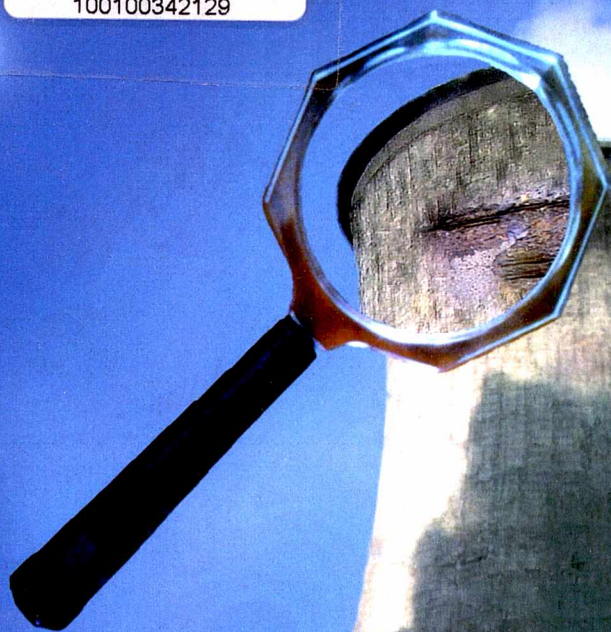


Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej



100100342129



Ryszard KUTYŁOWSKI

DIAGNOSTYKA STANU TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI CHŁODNI KOMINOWYCH





Ryszard Kutylowski

**DIAGNOSTYKA STANU
TECHNICZNEGO KONSTRUKCJI
CHŁODNI KOMINOWYCH**



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2013

NS 187598

Recenzenci

Janusz KAWECKI
Piotr NOAKOWSKI

Opracowanie redakcyjne i korekta

Alina KACZAK

Projekt okładki

Adam KUTYŁOWSKI



372577D/2

Wszelkie prawa zastrzeżone. Żadna część niniejszej książki, zarówno w całości, jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny, fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

Znaczną część fotografii wykonał autor. Rysunki 2.8, 3.9b i 3.17 dotyczą obiektów opisanych w raportach zespołu, do którego należy autor. Pozostałe zdjęcia wykonało Przedsiębiorstwo Usług Specjalistycznych TOMIKA Stanisław Odomirski, Kraków, ul. Armii Krajowej 83/34. Autor składa serdeczne podziękowanie za udostępnienie przez Przedsiębiorstwo TOMIKA zdjęć: 2.1, 2.7, 3.5, 3.7, 3.8, 3.10, 3.11, 3.13–3.16, 3.21a, 3.22a, 3.25, 3.26.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.wroc.pl>; e-mail: oficwyd@pwr.wroc.pl
zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-788-7

Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Wrocławskiej. Zam. nr 683/2013.

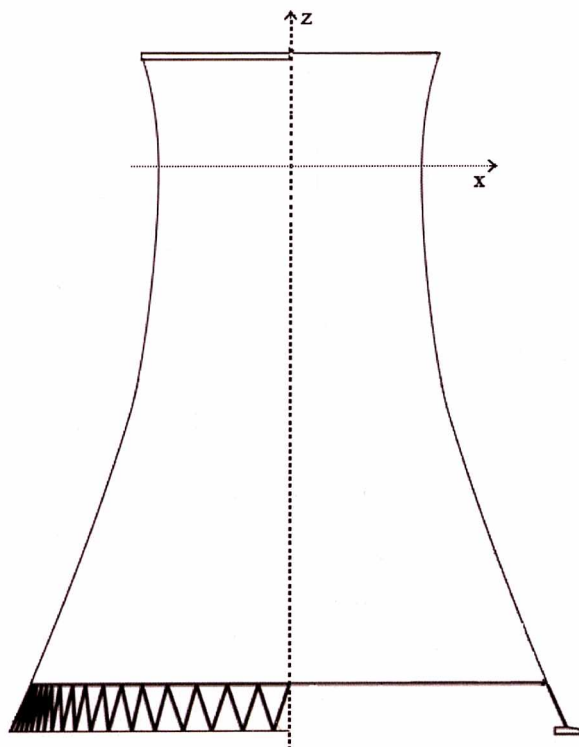
Pluc 2013/0811/K

SPIS TREŚCI

Wstęp	5
1. Stany chłodni kominowych i klasyfikacja przeglądów chłodni	11
1.1. Wprowadzenie	11
1.2. Opis stanów powłok chłodni kominowych	13
1.3. Ogólna klasyfikacja przeglądów chłodni	19
2. Zawartość raportu określającego stan techniczny konstrukcji chłodni kominowej	23
2.1. Zestawienie rozdziałów występujących w raporcie	23
2.2. Opis rozdziałów raportu	26
2.2.1. Rozdział 1 raportu	27
2.2.2. Rozdział 2 raportu	27
2.2.3. Rozdział 3 raportu	28
2.2.4. Rozdział 4 raportu	28
2.2.5. Rozdział 5 raportu	43
2.2.6. Rozdziały 6, 7 raportu	50
2.2.7. Rozdział 8 raportu	51
2.2.8. Rozdziały 9, 10, 11 raportu	61
2.3. Zalecenia i uwagi dotyczące raportu oraz uwagi związane z eksploatacją chłodni	66
3. Klasyfikacja uszkodzeń chłodni kominowych	69
3.1. Stan wykonawczy	69
3.2. Stan eksploatacyjny	76
4. Modelowanie powłok chłodni kominowych	97
4.1. Powłoka chłodni modelowana jako ciało zbudowane z dwóch izotropowych materiałów	98
4.2. Powłoka chłodni modelowana jako ciało z więzami	105
5. Analiza stanu naprężeń stycznych na granicy materiału rodzimego i naprawczego	113
5.1. Analiza naprężeń stycznych w przypadku wymiany betonu (naprawy)	114
5.2. Analiza naprężeń stycznych w przypadku wzmocnienia chłodni dodatkową powłoką	117
6. Podsumowanie	127
Literatura	129
Normy i przepisy	131
Streszczenie w języku angielskim	133

WSTĘP

Motywacją do podjęcia tematyki przedstawionej w niniejszej monografii jest brak odpowiednich przepisów oraz powszechnie dostępnych procedur, według których należy określać stan techniczny konstrukcji chłodni kominowych. Stosowanie jednolitej metodyki pozwoliłoby na porównywanie stanu technicznego obiektów w kolejnych okresach ich eksploatacji oraz porównanie stanu różnych obiektów. Wykonujący tego typu zadania mają do dyspozycji jedynie bardzo ogólny dokument [N 3, ISO 13822], w którym podano ogólne zasady oceny istniejących konstrukcji.



Rys. W1. Schemat chłodni kominowej w układzie współrzędnych

Niniejsza monografia dotyczy specyficznych konstrukcji, jakimi są chłodnie kominowe. Najczęściej są to hiperboloidalne chłodnie kominowe, których powierzchnia środkowa jest hiperboloidą jednopowłokową o tworzącej opisanej równaniem:

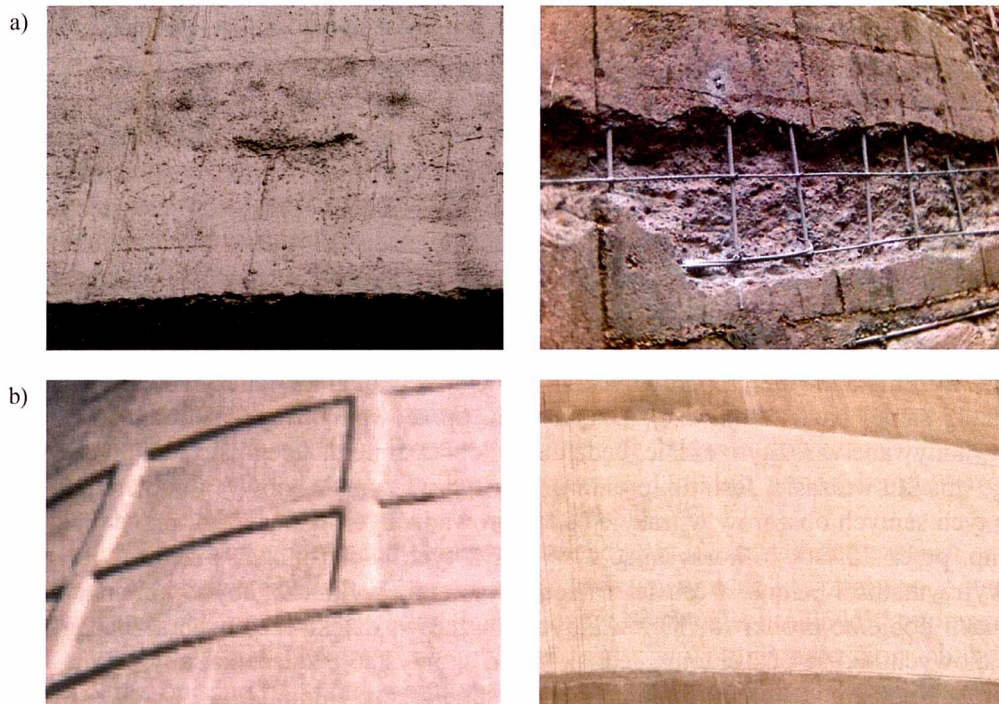
$$\left(\frac{r}{a}\right)^2 - \left(\frac{z}{b}\right)^2 = 1 \quad (\text{W.1})$$

gdzie a , b – półosie hiperboloidy, x , y , z – współrzędne punktów hiperboloidy w układzie, którego początek jest przyjęty w przewężeniu (por. rys. W1), a $r^2 = x^2 + y^2$.

Ponieważ eksperci oceniający stan techniczny chłodni kominowych stosują różne procedury, więc niezbędne jest ich usystematyzowanie. Podane w monografii procedury badawcze można stosować w odniesieniu do chłodni kominowych, a po wprowadzeniu pewnych modyfikacji także do innych obiektów, przede wszystkim do kominów żelbetowych. Większość z obecnie eksploatowanych chłodni w Polsce była budowana wiele lat temu zgodnie z obowiązującymi wtedy normami i zasadami obliczeń. Zasady te, dotyczące zarówno technologii, jak i konstrukcji chłodni, przedstawiono w fundamentalnej pracy [Ledwoń, Golczyk, 1967]. Z biegiem czasu chłodnie wymagały oceny ich stanu technicznego, jak również remontu. W przypadku każdej z chłodni konieczne było podjęcie badań diagnostycznych, w wyniku których powstało opracowanie na temat bezpiecznego ich dalszego użytkowania. Użytkowanie takie zazwyczaj możliwe było po wykonaniu remontu, który niekiedy wiązał się ze wzmocnieniem konstrukcji. W Polsce mamy do czynienia przede wszystkim z chłodniami, które uprzednio w wyniku przeprowadzonych badań diagnostycznych włączono do grupy obiektów wymagających bieżących remontów o relatywnie małej skali ingerencji w konstrukcję (rys. W2a). Niekiedy jednak stan chłodni wymagał remontu o znacznie szerszym zakresie, np. zastosowania uźebroowania w najbardziej wyłożonych obszarach, pokrycia torkretem znacznych obszarów powłoki chłodni itd. (rys. W2b). Kolejne badania stanu technicznego chłodni powinny uwzględniać wprowadzone uprzednio zmiany konstrukcyjne.

Niniejsza monografia powinna pomóc użytkownikom chłodni w podejmowaniu właściwych decyzji dotyczących zakresu badań, jakie należy podejmować przy ocenie stanu technicznego chłodni. Chłodnie kominowe są konstrukcjami szczególnie wrażliwymi i dlatego należy zapewnić wiarygodność ich badań. Zaleca się więc, aby badania dotyczące tych obiektów powierzać zespołom, których wiedza i doświadczenie gwarantuje wysoki poziom oraz zapewnia wysoką jakość wykonanych prac. Wymagania te są oczywiste, ale niekiedy przede wszystkim ze względów ekonomicznych może dojść do sytuacji, gdy za zbyt niską cenę wykonuje się badania o małej wiarygodności. Ze względu na doprowadzenie do obniżenia kosztów badania ogranicza się ich zakres. Może to prowadzić do zaniżenia nośności konstrukcji. W konsekwencji musi skutkować przeprowadzeniem remontu o większym zakresie. Dlatego najbardziej opłacalne jest wykonywanie rzetelnej analizy i badań, tak aby

w każdym etapie (badań oraz remontu) ponoszone koszty były możliwie najmniejsze, ale realne.



Rys. W2. Przykłady: lokalnego uszkodzenia i prowadzonej naprawy lokalnej (a), wzmocnienia żebrami i wzmocnienia powierzchniowego (b)

Przedstawiony w pracy zestaw algorytmów postępowania może być w przyszłości uzupełniony o nowe procedury, których zastosowanie stanie się konieczne w związku:

- ze zmianą norm i przepisów,
- z rozbudową obiektów wokół chłodni,
- z nierównomiernym osiadaniem chłodni, zmianą schematu statycznego, zmianą warunków geotechnicznych,
- z wystąpieniem zdarzeń losowych, np. bardzo silnych wiatrów.

W takich przypadkach konieczna jest analiza stanu chłodni ze szczególnym uwzględnieniem przeprowadzenia odpowiednich dla danej sytuacji obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. Zwykle wymaga to umiejętności posługiwania się zaawansowanym podejściem teoretycznym i numerycznym.

Należy podkreślić, że chłodnie kominowe, których przede wszystkim dotyczy niniejsza praca oraz kominy żelbetowe, są obiektami budowlanymi o strategicznym znaczeniu. Dlatego powinny być utrzymywane w dobrym stanie technicznym, a ich badania i remonty muszą gwarantować bezpieczną i wydajną pracę. Awaria chłodni może

skutkować bardzo poważnymi konsekwencjami zarówno technicznymi, jak i ekonomicznymi. Na świecie wydarzyło się już wiele katastrof chłodni kominowych (przykładowo, niemal równoczesna katastrofa trzech chłodni wydarzyła się w Ferrybridge w 1965 roku [Dulińska, Kawecki, 2011]). W Polsce odnotowano tylko jeden przypadek zawalenia się chłodni (w 1987 roku) [Symposium, 1991].

Ze względu na zaawansowany wiek przeważającej liczby chłodni w Polsce większość z nich była już remontowana, a wcześniej poddana odpowiednim badaniom. Dotychczas wykonano dużo opracowań dotyczących stanu technicznego chłodni wraz z zaleceniami co do dalszej ich eksploatacji. Zakres tych opracowań jest często zróżnicowany, co najczęściej wynika ze stanu technicznego obiektów oraz zapotrzebowania i możliwości finansowych zlecniodawców, a także z wypracowania przez autorów opracowań indywidualnych sposobów realizacji zleceń i form przedstawiania wyników badań.

W celu zapewnienia porównywalności wyników diagnoz należy kształtować je na takiej samej bazie badawczej. Dzięki temu opracowania dotyczące danego obiektu, wykonywane w różnym czasie, będą dawać obraz zmieniającego się stanu technicznego obiektu w czasie. Jeśli np. próbki do badań wytrzymałościowych pobierane byłyby z tych samych obszarów w trakcie badań prowadzonych w dłuższym przedziale czasu (np. przez 30 lat), to korzystając z wyników tych badań można przedstawić zmianę wytrzymałości betonu w czasie. Zalecenie takie nie wyklucza, aby w kolejnych badaniach pobierać próbki również z innych obszarów, dzięki czemu obraz badań materiałowych będzie poszerzony. Jednak warto skorzystać z zalecenia, aby pewną liczbę próbek pobierać z kolejno zmienianych części płaszcza chłodni.

Celem niniejszej monografii jest przedstawienie metodyki badań i sposobu ich dokumentowania w taki sposób, aby była możliwość późniejszego porównywania wyników otrzymanych w różnym czasie. Opisana tu metodyka określa pewien standard badań i sposób ich przedstawiania, jaki powinien zapewnić wykonujący badania. Zastosowanie podanej metodyki w opracowaniach diagnostycznych pozwoli na obiektywne porównywanie między sobą stanu technicznego poszczególnych obiektów.

Na podstawie niniejszej monografii mogłoby powstać opracowanie mające status *Wytycznych* dotyczące metodyki przeprowadzania badań i ich dokumentowania.

Problem badawczy dotyczący diagnostyki chłodni kominowych, a zwłaszcza powłoki chłodni, jest w tej monografii przedstawiony kompleksowo w kolejnych rozdziałach.

Pierwszy rozdział składa się z trzech części. W pierwszej z nich zarysowano opisywaną problematykę na tle najbardziej aktualnych badań przedstawianych w literaturze z uwzględnieniem prezentacji na konferencjach, na których poruszano omawianą problematykę. W części drugiej zdefiniowano stany chłodni począwszy od stanu w fazie projektowania przez stan powykonawczy do stanu eksploatacji (z uwzględnieniem remontów i wzmocnień). W trzeciej części – w syntetycznej formie – podjęto zagadnienie dotyczące klasyfikacji przeglądów chłodni i skoncen-

trowano uwagę na ogólnym opisanu dwóch podstawowych rodzajów przeglądów: standardowego i specjalnego.

Rozdział drugi ma charakter podstawowy w odniesieniu do przedstawienia metodyki przeprowadzania badań chłodni. Opisano w nim wszystkie czynności, jakie należy wykonać, opracowując wyniki badań. Przyjęto, że sprawozdanie z przeprowadzonych badań, analiz i innych niezbędnych czynności powinno mieć formę raportu. Następnie zdefiniowano zawartość takiego raportu opisującego stan techniczny konstrukcji chłodni kominowych.

Szczegółowo opisano poszczególne czynności badawcze. Zwrócono uwagę na sposób dokumentowania wyników badań (w tym przygotowanie dokumentacji fotograficznej i filmowej). Przedstawiona forma dokumentowania umożliwi w opracowywaniu kolejnych raportów odniesienie się do stanu wcześniejszego. Podano również zakres i sposób wykonania badań nieniszczących oraz metodologię pobierania próbek do tych badań. Opisano badania laboratoryjne, jakim powinny być poddane pobrane odwierty rdzeniowe, podano również sposób przedstawienia otrzymanych wyników badań. Zwrócono uwagę na badania dotyczące określania parametrów charakteryzujących podłoże gruntowe. Opisano metodykę pomiarów geodezyjnych chłodni kominowej.

Podkreślono potrzebę systematycznego zgromadzenia informacji dotyczących geometrii i właściwości materiału, z którego wykonano konstrukcję i to zarówno z etapu projektowego, jak i późniejszych kolejnych etapów eksploatacji chłodni kominowej. Przedstawiono zasady wykonywania obliczeń statyczno-wytrzymałościowych konstrukcji oraz opisano przykładowe algorytmy tych obliczeń w nawiązaniu do systematycznie aktualizowanej sytuacji eksploatowanej chłodni. Opis modelu fizycznego konstrukcji z uwzględnieniem *Metody Elementów Skończonych* (MES) oraz przyjmowane kombinacje obciążeń to zakres kolejnych części tego rozdziału. Zaproponowana forma graficzna przedstawiania otrzymanych wyników umożliwi syntetyczną ich prezentację na mapie rozwinięcia powłoki chłodni. Na takiej mapie można przedstawić zmiany lokalnego współczynnika wyężenia materiału konstrukcji. W przypadku zaś przekroczenia stanu granicznego nośności można stosunkowo łatwo wyodrębnić obszary wymagające wzmocnienia i ponownego sprawdzenia wyężenia konstrukcji. Omówiono także metodologię analizy nieliniowej konstrukcji powłoki chłodni.

Podano również zalecenia i przedstawiono uwagi ogólne dotyczące zawartości raportu oraz zalecenia eksploatacyjne odnoszące się do monitorowania stanu konstrukcji chłodni podczas jej eksploatacji.

W rozdziale trzecim zawarto klasyfikację typowych uszkodzeń chłodni kominowych. Rozrózniono uszkodzenia wynikające z niewłaściwego wykonawstwa oraz eksploatacji. Opis uszkodzeń odniesiono do przypadków stwierdzonych w praktyce, dokumentując je fotograficznie.

W rozdziale czwartym przedstawiono opis stanu chłodni w różnych okresach jej eksploatacji z uwzględnieniem modelowania współpracy nałożonego materiału na-

prawczego albo wzmacniającego z konstrukcją pierwotną. Na podstawie ogólnej teorii powłok, korzystając z funkcjonału zupełnego Hu-Washizu przedstawiono model powłoki chłodni jako ciała zbudowanego z dwóch izotropowych materiałów. Rozwiązując problem brzegowy, otrzymano komplet równań takiego modelu. Stanowią go związki geometryczne i konstytutywne, równania równowagi, warunki brzegowe nałożone na przemieszczenia i na naprężenia. Ponadto, modelując powłokę składającą się z dwóch materiałów jako ciało z więzami otrzymano warunki kinematyczne i statyczne na liniach założonych więzów liniowych. W przypadku więzów dyskretnych wykorzystano właściwości filtracyjne funkcji Diraca i pokazano sposób modelowania takich więzów, zapisując odpowiednio sformułowany funkcjonał po dokonaniu wariacji, z którego otrzymuje się równania analogiczne do występujących przy więzach ciągłych, ale opisujące równowagę statyczną i kinematyczną w dyskretnie rozmieszczonych łącznikach.

W rozdziale piątym przeanalizowano stan naprężeń stycznych występujących w przypadku wymiany materiału w konstrukcji chłodni albo w przypadku jej wzmocnienia. Przedstawiono wyniki analizy naprężeń stycznych w sytuacji, gdy do naprawy lub do wzmocnienia chłodni zastosowano materiał o innym niż materiał rodzimy module Younga. Rozpatrzono również problemy występujące w przypadku naprawy (wymiany materiału) oraz wzmacniania realizowanego przez nałożenie żeber albo zastosowanie wzmocnienia powierzchniowego. Na podstawie przeprowadzonej analizy wskazano obszary chłodni najbardziej narażone na wzrosty względnych naprężeń stycznych. Mogą być one przyczyną rozwarstwiania, dotyczy to zwłaszcza wzmocnień nakładanych powierzchniowo.

1. STANY CHŁODNI KOMINOWYCH I KLASYFIKACJA PRZEGLĄDÓW CHŁODNI

1.1. WPROWADZENIE

Badaniom dotyczącym chłodni kominowych poświęconych było wiele publikacji, najczęściej wcześniej przedstawiano je na konferencjach technicznych i naukowo-technicznych. Spośród wielu forów, poświęconych tej problematyce, wybrano tu niektóre, uznane przez autora za reprezentatywne. Może więc takie spojrzenie być uznane za subiektywne, ale ze względu na założony cel niniejszego opracowania możliwe do przyjęcia.

Chłodnie kominowe wybudowane w początku lat sześćdziesiątych XX w. oraz później (w latach siedemdziesiątych i osiemdziesiątych) po pewnym okresie eksploatacji wymagały remontu i były remontowane tradycyjnymi metodami i materiałami. Na początku lat dziewięćdziesiątych XX w. rozpoczęto w Polsce wprowadzanie do prac remontowych chłodni nowych materiałów i nowych technologii. Było to poprzedzane dyskusjami naukowymi, m.in. w roku 1989 zorganizowano w Bogatyni konferencję *Problemy trwałości żelbetowych chłodni kominowych*. Następnym przykładem zorganizowania forum, na którym dyskutowano o problemach chłodni może być [Symposium, 1991]. Spotkanie wykonawców, producentów materiałów i naukowców przy współudziale przedstawicieli elektrowni, biur projektowych i innych jednostek i zakładów pozwoliło na opracowanie metod, procedur i technologii uwzględniających wymagania wynikające z nowych materiałów i technologii. Wszystko to miało służyć ujednoliceniu wymagań w zakresie metodologii badań i remontów powłok chłodni kominowych. Widoczne było zainteresowanie użytkowników chłodni tą tematyką. Przykładowo Elektrownia „Turów” wyrażała swe zainteresowanie efektami spotkania ze względu na wiek chłodni przez nią eksploatowanych. Już wówczas pojawiły się sugestie opracowania jednolitej metodyki wykonywania przeglądów, badań i ocen stanu technicznego chłodni. Dysponowanie takimi ujednoliconymi informacjami pozwoliłoby podjąć właściwe decyzje dotyczące remontu i dalszej eksploatacji obiektu.

Podczas wspomnianego Sympozjum przedstawiono m.in. nowe materiały i technologie, zwrócono uwagę na jakość wykonawstwa oraz problemy występujące w chłodniach podczas ich remontu albo wzmacniania (np. opisano sposób wymiany całkowicie zdegradowanego betonu), analizowano stan wyężenia chłodni w różnych fazach degradacji jej konstrukcji, zaprezentowano sprzęt możliwy do zastosowania podczas remontu. Również inne spotkania (m.in. w roku 1989 w Bogatyni) zapoczątkowały organizowanie cyklicznych konferencji na temat *Budownictwo w energetyce*, na których omawia się całokształt problemów związanych z budownictwem obiektów energetycznych, w tym chłodni kominowych. VIII konferencja, która odbyła się w Szklarskiej Porębie w roku 2012 [Przegląd Budowlany, 5, 2012], była okazją do zaprezentowania prac dotyczących wybranych chłodni kominowych. I tak [Lechman i inni, 2012] przedstawili wyniki badania pewnej chłodni wraz z programem utrzymania jej trwałości przez okres następnych 20 lat, [Kasprzak i inni, 2012] z kolei przedstawili ocenę skutków rozbudowy elektrowni na stan bezpieczeństwa istniejącej chłodni, a [Biały, 2012] przedstawił projekt systemu monitorowania osiadania chłodni w czasie jej budowy. Odnotować tu trzeba również pracę [Chmielewski, Górski, 2010] z poprzedniej konferencji, w której, uwzględniając przepisy [N 3, ISO 13822], zaproponowano algorytm wykonania oceny stanu technicznego chłodni kominowych. W pracy [Kamiński, 2010] również opisano wymagany program badań (zakres i metodę ich przeprowadzania) oraz podano przykładowe wyniki badań i ich ocenę.

Ważnym forum wymiany doświadczeń odnoszących się również do chłodni kominowych są konferencje na temat *Awarii budowlanych*. W roku 2013 na konferencji przedstawiono ocenę bezpieczeństwa chłodni kominowej z dużymi imperfekcjami [Seręga i inni, 2013], analizę nośności i sposób naprawy słupów chłodni [Płachecki, Koziński, 2013] oraz koncepcję wzmocnienia konstrukcji chłodni kominowej materiałem kompozytowym na matrycy cementowej [Konderla i inni, 2013].

Do konferencji podejmujących problematykę chłodni kominowych należy zaliczyć konferencję naukowo-techniczną *Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego*, której XII edycja odbyła się w roku 2012 w Cedzynie. Przedstawiono na niej ocenę stanu bezpieczeństwa wzmocnionej chłodni w świetle nowych wymagań normowych [Płachecki, Seręga, 2012]. Ponadto m.in. przedstawiono metody badawcze w zastosowaniu do diagnostyki i monitoringu obiektów budowlanych, w tym chłodni kominowych [Hoła, Schabowicz, 2012]. Przedstawiono wykorzystanie nowego sprzętu stosowanego m.in. do: oceny grubości elementów żelbetowych, wykrywania pęknięć, pustek, a także sprzętu pozwalającego na określenie stopnia korozji zbrojenia. Nowoczesną metodykę badawczą, dotyczącą oceny zagrożenia korozyjnego, przedstawiono w pracy [Zybura i inni, 2012]. Autorzy przedstawili nowoczesny sprzęt diagnostyczny oraz opisali sposób przeprowadzania badań i zaprezentowali analizę otrzymanych wyników badań wraz z ich oceną. W pracy [Błaszczczyński i inni, 2012] opisano postępowanie diagnostyczne w odniesieniu do konstrukcji z korozją wewnętrzną betonu.

Podobnie na Konferencjach Krynickich prezentowane są prace dotyczące chłodni kominowych. Nawiązując do okresu końca lat osiemdziesiątych, m.in. w roku 1988, poruszono problem trwałości [Ryszewski, Gierczyk, 1988], niezawodności [Chmielewski, Golczyk, 1988] oraz sposobów remontowania chłodni kominowych [Rycaj, Napieraj, 1988]. Porównując metody i materiały stosowane już nawet na początku lat dziewięćdziesiątych XX w. i te przedstawione w pracy [Rycaj, Napieraj, 1988] można zauważyć postęp, jaki się już wtedy dokonał. Przez lata zmieniał się też sposób przeprowadzania obliczeń (od końca lat osiemdziesiątych zaczęto stosować MES). Obecnie obok analiz liniowych przeprowadza się też analizy nieliniowe z wykorzystaniem MES, czego przykładem jest praca [Kasprzak i inni, 2011].

Problemy badawcze podejmowane na konferencji *Budownictwo w energetyce* są zbliżone do podejmowanych na organizowanych sympozjach poświęconych problematyce tylko chłodni kominowych. W roku 2012 takie sympozjum odbyło się w Kolonii (6th International Symposium on Cooling Towers [ISCT 2012]). Dyskutowano tam również problemy związane z tematyką niniejszej monografii, takie jak: metody projektowania, utrzymania oraz naprawy chłodni. Wymiana doświadczeń w tym zakresie z partnerami zagranicznymi jest wskazana, gdyż dotyczy chłodni kominowych eksploatowanych w podobnych jak i u nas warunkach klimatycznych i środowiskowych.

W dniach 23–27 września 2013 zostanie zorganizowane Sympozjum IASS na temat *Beyond the Limits of Man*. Na Sympozjum przewiduje się sesję poświęconą chłodniom kominowym (WG03-Session on Cooling Towers), podczas której będą poruszane problemy dotyczące chłodni kominowych, w tym sprawy opracowania wytycznych i norm, zagadnienia utrzymania i przeprowadzania napraw, a także bardzo szeroko rozumianego projektowania oraz wykonawstwa chłodni.

Przy opracowywaniu niniejszej monografii uwzględniono literaturę ogólnie dostępną oraz opracowania wykonane przez różnych ekspertów. Ponadto uwzględniono wymagania ujęte w Międzynarodowym Standardzie ISO 13822, w którym podano zasady oceniania stanu technicznego istniejących konstrukcji [N 3, ISO 13822].

1.2. OPIS STANÓW POWŁOK CHŁODNI KOMINOWYCH

Stan każdego obiektu jest to zbiór danych dotyczących jego geometrii, materiału, cech fizycznych i mechanicznych oraz innych informacji o obiekcie począwszy od powstania jego koncepcji poprzez fazę jego projektowania, budowy oraz kolejnych etapów eksploatacji. Jest on zmienny w czasie. W zależności od chwili, w której dokonuje się opisu obiektu należy brać pod uwagę aktualne jego parametry oraz wszyst-

kie zmiany, jakie następowały w tym obiekcie począwszy od stanu projektowego (jeśli jest to uzasadnione ze względu na charakter opracowywanej analizy). W opisie stanu konstrukcji uwzględnia się następujące założenia:

- Nowo projektowana chłodnia w kształcie hiperboloidy jednopowłokowej jest konstrukcją, którą w teorii powłok opisuje się jako jednorodne ciało izotropowe.

- W trakcie eksploatacji chłodnie są wielokrotnie naprawiane z zastosowaniem różnych materiałów. Jeśli materiał zastosowany do naprawy ma parametry materiałowe takie same jak beton rodzimy, to rozważając model wyremontowanej chłodni można w dalszym ciągu przyjmować go jak model konstrukcji wykonanej z jednorodnego materiału izotropowego. Najczęściej jednak parametry materiałowe materiałów zastosowanych do remontu albo wzmocnienia chłodni są różne, w porównaniu z parametrami betonu rodzimego. Jeśli objętość wymienianego betonu lub objętość wzmocnienia jest znacząca, modelowanie konstrukcji powłoki chłodni powinno uwzględniać niejednorodność materiałową rozważanej powłoki. Istotne jest też wówczas to, czy i ewentualnie, w jaki sposób zapewniono współpracę zastosowanych różnych materiałów. W modelu należy uwzględnić rzeczywisty sposób połączenia i starać się wiernie odwzorować to w obliczeniach. Jeżeli wzmocnienia są znaczące i występują różnice w stosunku do geometrii projektowej, to modelowanie konstrukcji powłoki chłodni powinno uwzględniać zarówno geometrię projektową, jak i rzeczywistą.

Modelowanie chłodni w okresie eksploatacji powinno uwzględniać:

- projektowe i aktualne parametry materiałowe,
- projektowaną i aktualną geometrię powłoki.

Obecnie raczej rzadko modeluje się konstrukcję chłodni w różnych stadiach jej eksploatacji. Zazwyczaj obliczenia nie uwzględniają różnorodności materiałowej powłoki chłodni. Uważa się to za czynnik istotny w ocenie i dlatego przedstawiono (począwszy od etapu projektowego) różne stany chłodni, które należy opisać w sposób różniący się od siebie. W opisie zastosowano następujące oznaczenia: grubość powłoki chłodni (materiał rodzimy) oznaczono h , grubość wymienionego materiału oznaczono h_1 , natomiast grubość dodatkowo nałożonego na powłokę chłodni materiału oznaczono h_2 .

W analizach można wyróżnić:

1. Stan projektowy. Charakteryzuje się wszystkimi parametrami geometrycznymi przyjętymi w projektowaniu. Zakłada się też jednorodność materiałową chłodni (rys. 1.1a).

2. Stan powykonawczy. W praktyce geometria chłodni w stanie powykonawczym różni się od geometrii projektowej. Dotyczy to zarówno geometrii powierzchni środkowej, jak i grubości powłoki. Ponadto, często występują lokalne imperfekcje. Zazwyczaj traktuje się powłokę jako zbudowaną z materiału jednorodnego, choć w rzeczywistości występują różnice w klasie betonu w poszczególnych strefach powłoki chłodni. Przyjęcie materiału jednorodnego w modelu może być uzasadnione, jeśli lo-

kalnie nie występują istotne różnice klasy betonu. Jeśli jednak istotne różnice występują, to należy uwzględnić ten fakt w modelowaniu. Powinno się też uwzględnić wszystkie znaczące odstępstwa w geometrii powłoki od jej projektowego pierwowzoru (rys. 1.1a).

3. Stan chłodni po standardowych naprawach polegających na wymianie zdegradowanego betonu na nowy z zachowaniem tej samej geometrii. Opisany stan jest stanem powykonawczym chłodni, na który nałożone są lokalnie imperfekcje materiałowe (rys. 1.1b). W zależności od skali naprawy i rodzaju zastosowanego materiału rozważa się następujące przypadki:

- Występuje mała liczba dość równomiernie rozłożonych naprawianych małych powierzchni. Modelem powłoki jest wówczas model w stanie powykonawczym o odpowiednio dobranych parametrach materiałowych, które wynikają z badań materiału rodzimego. W przypadku uzyskanej względnej jednorodności badanych parametrów w obszarze powłoki chłodni należy dokonać homogenizacji wartości tych parametrów, w tym obszarze z odpowiednim (proporcjonalnym) uwzględnieniem parametrów materiału naprawczego i wielkości naprawianych obszarów. W podobny sposób można modelować chłodnię, gdy występuje mała liczba – nawet nierównomiernie rozłożonych – naprawianych małych powierzchni,

- Występuje duża liczba dość równomiernie rozłożonych naprawianych małych powierzchni. Należy tu uwzględnić także głębokość wymiany materiału. Wtedy w zależności od skali naprawy modelem może być model zastosowany w stanie powykonawczym albo stan uwzględniający (w następstwie takiego remontu) zhomogenizowaną zmianę parametrów materiałowych na całej chłodni (jeśli stosowano materiały różniące się od materiału rodzimego),

- Występuje duża liczba dość nierównomiernie rozłożonych naprawianych małych powierzchni. Wtedy w strefach napraw należy zastosować zmianę parametrów materiałowych, uwzględniając także głębokość, na jaką wykonano naprawę. Natomiast przy małej liczbie dość nierównomiernie rozłożonych naprawianych powierzchni modelem chłodni może być nawet model zastosowany w stanie powykonawczym. Niekiedy wymaga on wprowadzenia pewnej korekty.

W opisie rozpatrywanego stanu chłodni należy odpowiednio modelować wszelkiego rodzaju uszkodzenia. Przykładowo: uszkodzenia betonu objawiające się np. wyciekami można modelować jako szczeliny o rzeczywistych wymiarach geometrycznych. W modelowaniu numerycznym takie szczeliny są obszarami o zerowej sztywności.

4. Stan chłodni wzmacnianej (rys. 1.1c, 1.1d). W takim przypadku zazwyczaj chłodnia była już wcześniej naprawiana w sposób standardowy opisany w p. 3 (rys. 1.1b). W rozpatrywanej sytuacji wprowadzone jest dodatkowe wzmocnienie chłodni. Polega ono na zastosowaniu uźebrowania albo pokryciu znacznej części powłoki chłodni nową warstwą o ustalonej grubości. Powoduje to zmianę geometrii powłoki. W takich przypadkach w strefach wzmacnianych należy usunąć zdegradowany

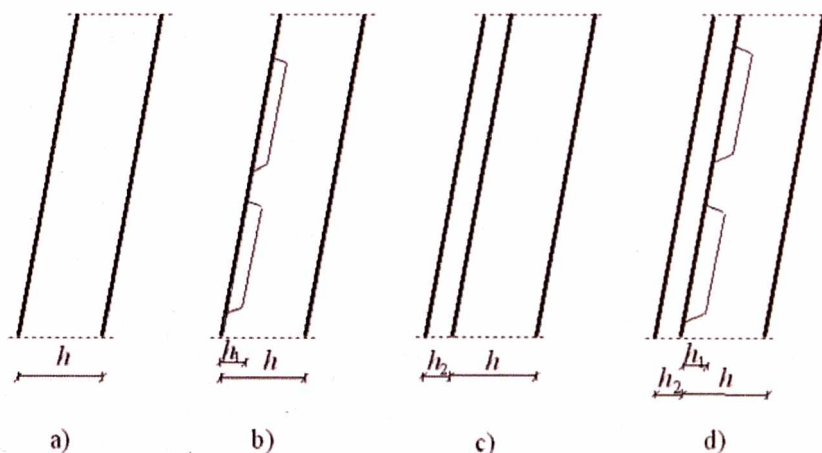
beton, przez co nowy materiał jest również wbudowywany w obszary występujące w geometrii powłoki w stanie powykonawczym (rys. 1.1d). Modelowanie chłodni jest wówczas etapowe. Najpierw kształtuje się model chłodni według p. 3, a następnie na ten model nakłada się model wzmocnienia, które można wykonać jako:

- a) żebra,
- b) dodatkową powłokę nałożoną w sposób ciągły w pewnym obszarze.

Modelowanie odpowiadające temu stanowi jest złożone ze względu na konieczność uwzględnienia różnych materiałów. Mamy wtedy następujące sytuacje:

a) jednorodny materiał powłoki, na który nakłada się żebra lub dodatkową ciągłą powłokę, które mogą, a nawet powinny być wykonane z materiału o możliwie zbliżonych parametrach materiałowych jak materiał rodzimy (rys. 1.1c),

b) materiał powłoki może składać się z różnych materiałów i na tak zróżnicowany materiał powłoki chłodni nakłada się wzmocnienie (w postaci żeber lub powłoki ciągłej); materiały te mogą różnić się wartościami parametrów w stosunku do zróżnicowanego materiału powłoki (rys. 1.1d).



Rys. 1.1. Symboliczne stany powłoki chłodni: a) stan projektowy, b) stan chłodni naprawionej, c) stan chłodni wzmocnionej, d) stan chłodni naprawionej i następnie wzmocnionej

Problem modelowania połączenia pomiędzy żebrami i nową powłoką a materiałem rodzimym powłoki chłodni przedstawiono w rozdziale 4.2.

Ze względu na pracę konstrukcji powłoki chłodni można wyróżnić następujące przypadki, w których uwzględnia się podane stany:

1. Chłodnia w fazie projektowania i w fazie powykonawczej (jeśli materiał chłodni jest jednorodny) modelowana może być jako ciało izotropowe.
2. Chłodnia w fazie eksploatacyjnej, gdy **nie jest** zapewniona współpraca pomiędzy **materiałem wzmocnienia** (dodatkowa powłoka lub żebro) a materiałem rodzimym powłoki.

3. Chłodnia w fazie eksploatacyjnej, gdy **nie jest** zapewniona współpraca pomiędzy **wymienionym materiałem** a materiałem rodzimym powłoki. W tym przypadku mamy do czynienia z sytuacją, gdzie pomimo wymiany betonu nie następuje jego zespolenie z materiałem rodzimym, a współpraca jest możliwa tylko w przypadku ścisania.

4. Chłodnia w fazie eksploatacyjnej, gdy **jest** zapewniona współpraca pomiędzy **wymienionym albo nowym materiałem** a materiałem rodzimym powłoki. Współpraca może być:

a) pełna, która odpowiada pełnemu zespoleniu wymienionego lub nowego materiału (realizowanemu jako dodatkowa powłoka lub żebro) z materiałem rodzimym; jest ono zapewnione przez pełną zgodność parametrów materiałowych zastosowanych materiałów z materiałem rodzimym wraz z zastosowaniem odpowiedniej warstwy czepnej, lub przy odpowiednio gęstym zastosowaniu łączników;

b) pełna między warstwami pomimo różnicy między wartościami parametrów materiałowych; współpracę tę zapewnia odpowiednio gęste zastosowanie łączników liniowych lub powierzchniowych, które są modelowane w obliczeniach odpowiednio przyjętymi więzami ciągłymi;

c) dyskretna, która realizowana jest punktowo i uwzględnia różnicę między parametrami materiałowymi materiału wymienionego lub nowego (dodatkowa powłoka lub żebro) z materiałem rodzimym; łączniki są wówczas rozmieszczane w założonych odległościach i tylko one modelują współpracę (są to tzw. więzy dyskretne).

W przypadkach a) oraz b) po wzmocnieniu powiększona zostaje grubość powłoki, dzięki czemu wzrasta nośność przekroju (rys 1.1c albo 1.1d). Stosując odpowiednią warstwę czepną można zakładać współpracę różnych materiałów; w zależności jednakże od stopnia zróżnicowania wartości parametrów materiałowych należy liczyć się ze wzrostem naprężeń w strefie kontaktowej między różnymi materiałami. W przypadku c) zakłada się dyskretny sposób połączenia. Łączniki muszą być wymiarowane w ten sposób, aby zapewniały przenoszenie obciążenia z obszaru pomiędzy łącznikami (przy liniowym lub powierzchniowym ich rozmieszczeniu).

Kształtowanie modelu chłodni powinno uwzględniać wszystkie wymienione stany chłodni. Obliczenia konstrukcji wykonane z uwzględnieniem rzeczywistego stanu geometrii i właściwości materiałowych przedmiotowej chłodni umożliwi uzyskanie wiarygodnych wyników diagnozy.

Na rysunku 1.2 podano przykład fragmentu powłoki chłodni, gdzie na materiał rodzimy tej powłoki nałożono dodatkową powłokę (przypadek nr 2 podanej klasyfikacji). Widoczne jest wyraźne rozseparowanie dwóch materiałów wskazujące na brak jakiegokolwiek współpracy pomiędzy tymi materiałami. Ponadto można zauważyć, że miejscowo niemal zupełnie brakuje otuliny zbrojenia powłoki i widać ślady korozji stali zbrojeniowej. Brak wystarczającej otuliny był w przeszłości powodem podjęcia decyzji o nałożeniu dodatkowej warstwy torkretu.



Rys. 1.2. Wyraźnie odspojony beton nałożony na materiał rodzimy wraz z widoczną korozją zbrojenia

1.3. OGÓLNA KLASYFIKACJA PRZEGLĄDÓW CHŁODNI

Użytkownik obiektu budowlanego, zgodnie z Ustawą Prawo Budowlane [N 2] powinien dokonywać okresowych przeglądów stanu technicznego tego obiektu, a wszystkie informacje jego dotyczące powinny być zapisywane w *Księżce obiektu budowlanego* [N 4]. W ustawie [N 2] określono czas, w jakim powinny odbywać się okresowe przeglądy. Są one podstawą oceny stanu technicznego obiektu i na tej podstawie obiekt może być dalej użytkowany (w przypadku oceny pozytywnej). Badania okresowe wykonywane co 5 lat nazwano tu **przełgłdem standardowym**. Oprócz przeglądu standardowego chłodnia może wymagać wykonania **przełgładu specjalnego** w związku ze zmianą warunków użytkowania. Cel każdego przeglądu jest taki sam: ma on odpowiedzieć na pytanie czy stan techniczny obiektu pozwala na jego bezpieczne użytkowanie. Jednak zakres przeglądu, a więc rodzaj przeprowadzonych badań jest w obu przypadkach różny. W przypadku przeglądu specjalnego mamy do czynienia z sytuacją specjalną a to oznacza, że powód przeglądu specjalnego wpływa na zakres badań, które należy przeprowadzić podczas jego wykonywania.

Wszystkie czynności wykonane podczas przeglądu powinny być udokumentowane w odpowiednim opracowaniu, które powinno mieć formę raportu. Formę i zakres merytoryczny raportu opisano w rozdziale 2. Wszystkie opisane w raporcie działania należy wykonać zgodnie z wymaganiami zapisanymi w obowiązujących normach i zaleceniach z uwzględnieniem aktualnego stanu prawnego. Jeżeli konieczne jest dokonanie sprawdzeń odniesionych do przeszłości, to należy uwzględnić stan prawny z odpowiedniego okresu.

W każdym badaniu stanu technicznego występują dwa zasadnicze elementy, które decydują o bezpieczeństwie konstrukcji chłodni. Są to badania materiałowe i obliczenia statyczno-wytrzymałościowe. Badania materiałowe pomagają odpowiedzieć na pytanie o stan zdegradowania materiału i dostarczają danych do obliczeń.

Przełgład standardowy

Przełgład standardowy ma na celu zbadanie czy stan techniczny chłodni pozwala na jej bezpieczne dalsze użytkowanie. Każde opracowanie tego rodzaju musi kończyć się jednoznacznym stwierdzeniem dotyczącym możliwości dalszego użytkowania chłodni w okresie przewidzianym przez Prawo Budowlane. Aby ten cel osiągnąć należy:

1. Dokonać oceny stanu technicznego powłoki, słupów podbudowy chłodni, a także konstrukcji misy stanowiącej pierścień fundamentowy i ocenić stan fundamentów oraz opracować wnioski wynikające z przeprowadzonej oceny. W zależności od sytuacji ocena dotyczyć może wszystkich albo tylko wybranych elementów konstrukcji.

2. Na podstawie prac ujętych w p. 1 należy ocenić potrzebę wykonania prac remontowych albo wzmacniających oraz określić zakres tych prac.

Sformułowanie podanych ocen wymaga wykonania niemal wszystkich wymienionych czynności:

- badania polowe obiektu: oględziny konstrukcji wraz ze sporządzeniem map uszkodzeń wszystkich elementów konstrukcyjnych chłodni oraz opisem tych uszkodzeń, oszacowanie ilościowe typowych uszkodzeń konstrukcji, wykonanie dokumentacji fotograficznej i filmowej, przeprowadzenie badań nieniszczących, pobranie próbek materiału (betonu i stali) w celu przeprowadzenia dalszych badań w warunkach laboratoryjnych,

- wykonanie badań laboratoryjnych próbek materiału: badania fizykochemiczne i badania wytrzymałościowe,

- wykonanie analizy stanu podłoża gruntowego,

- wykonanie pomiarów geodezyjnych powłoki chłodni,

- wykonanie analiz statyczno-wytrzymałościowych modelu chłodni poddanego aktualnym normowym obciążeniom konstrukcji z uwzględnieniem wpływu wszystkich czynników geometrycznych i fizycznych różniących chłodnię od jej projektowego pierwowzoru,

- przeprowadzenie analizy wszystkich wcześniejszych opracowań dotyczących badanej chłodni,

- opracowanie zakresu prac remontowych i wzmacniających, sposobu ich przeprowadzenia i ogólnych zasad technologii ich wykonania,

- opracowanie wniosków dotyczących całości wykonanych analiz i obliczeń.

Opracowanie zakresu prac remontowych i wzmacniających powinno mieć charakter wytycznych niezbędnych do sporządzenia dokumentacji na wykonanie tych prac, jeśli taka dokumentacja wymagana jest odpowiednimi przepisami. W przeciwnym razie powinna mieć charakter ogólnych wytycznych wykonawczych, umożliwiających zastosowanie przez wykonawcę materiałów i technologii występujących na rynku.

Z badań objętych opisywanym przeglądem można pewne elementy wyłączyć, jeżeli prowadzony jest w sposób ciągły proces remontowania pewnych elementów konstrukcyjnych chłodni albo niedawno zakończono remont pewnego elementu, a także wykonano w niedawnym okresie ocenę stanu technicznego pewnego elementu konstrukcyjnego.

Przegląd specjalny

Przegląd ten w odróżnieniu od przeglądu okresowego musi być wykonany w związku z wystąpieniem okoliczności uzasadniających przeprowadzenie takiego przeglądu. Przegląd ten może zawierać wszystkie elementy przeglądu standardowego, jeśli w przybliżeniu nakłada się z nim czasowo. W innym przypadku może zawierać wybrane jego elementy w zależności od potrzeb. Przegląd taki może być konieczny w związku z zaistnieniem dodatkowych okoliczności, jak np. powstanie w sąsiedztwie nowych obiektów, wystąpienie zarysowania powłoki chłodni na skutek nierównomiernego osiadania, wystąpienie przeciążenia konstrukcji ze względu na gwałtowne

wydarzenia atmosferyczne, stwierdzony podczas przeglądu okresowego bardzo zły i pogarszający się szybko stan konstrukcji chłodni itd.

Opisane przykładowe sytuacje mogą zobowiązywać do wykonania przeglądu specjalnego:

1. W kolejnych badaniach w pewnej strefie stwierdzano, iż beton, w pewnym obszarze był niższej klasy niż pozostały beton. Na bazie tych badań podjęto decyzję o przygotowaniu programu dla kolejnego badania. Program badań tego przeglądu specjalnego powinien obejmować:

- ustalenie stopnia bezpieczeństwa chłodni ze szczególnym uwzględnieniem słabszej strefy, wymaga to znacznie dokładniejszych badań materiałowych tej strefy,
- wykonanie wariantowych koncepcji wzmocnienia co wymaga wykonania odpowiedniej liczby symulacyjnych obliczeń statyczno-wytrzymałościowych z uwzględnieniem ewentualnego wzmocnienia.

2. Następuje rozbudowa elektrowni i w sąsiedztwie chłodni wybudowano nowe obiekty. Należy wtedy:

- wykonać odpowiednie badanie aerodynamiczne prowadzące do określenia współczynników interferencji w związku z wybudowaniem nowych obiektów. Badania te powinny być wykonywane dla pojedynczej chłodni, dla tej chłodni wraz z jej otoczeniem, a także dla tej chłodni wraz z jej otoczeniem i nowym obiektem,
- wykonać odpowiednie obliczenia statyczno-wytrzymałościowe z uwzględnieniem współczynników interferencji,
- ewentualnie zaproponować sposób wzmocnienia konstrukcji powłoki chłodni.

Podsumowując, każde badanie stanu technicznego musi być wykonywane w związku z zaistniałą sytuacją i zakres prac w ramach tego badania musi obejmować prace niezbędne w danej sytuacji, po przeprowadzeniu których będzie można w sposób wiarygodny odnieść się do stanu bezpieczeństwa konstrukcji chłodni kominowej.

2. ZAWARTOŚĆ RAPORTU OKREŚLAJĄCEGO STAN TECHNICZNY KONSTRUKCJI CHŁODNI KOMINOWEJ

2.1. ZESTAWIENIE ROZDZIAŁÓW WYSTĘPUJĄCYCH W RAPORCIE

Przedstawiono tu proponowany sposób i formę udokumentowania prac oraz opisano zakres niezbędnych do wykonania badań i analiz. Spis treści raportu opracowano z uwzględnieniem własnych doświadczeń autora oraz innych współpracowników (m.in. [Kasprzak i inni, 2012]). W przywołanej tu pracy przedstawiono w syntetycznej postaci wyniki prac badawczych dotyczących chłodni kominowej wcześniej udokumentowane w formie raportu.

Zakłada się, że raporty określające stan techniczny konstrukcji chłodni kominiowych z różnych okresów jej eksploatacji powinny być porównywalne merytorycznie. Wobec tego zarówno zakres wykonanych prac, jak i forma ich dokumentowania powinna być odpowiednio zgodne.

W rozdziale 2.2 podano zakres merytoryczny poszczególnych rozdziałów raportu. Pokazano też niekiedy formę prezentowania otrzymanych wyników. Zakłada się, że na podstawie zawartych w raporcie wyników możliwe jest powtórzenie badań czy obliczeń. Oszczędność w dokumentowaniu prac badawczych oraz zawężanie ich zakresu występująca niekiedy w wykonywanych opracowaniach nie jest uzasadniona.

Analiza stanu technicznego chłodni skupia się najczęściej na powłoce chłodni i słupach. Dlatego też spis opisujący badania powłoki chłodni wraz ze słupami należy traktować jako przykładowy i każdorazowo dostosowywać go do aktualnych wymagań i zakresu oceny. Należy podkreślić, że raport powinien być sprawozdaniem z prac dotyczących oceny stanu technicznego konstrukcji chłodni i szczególnie w przypadku przeglądu specjalnego powinien dotyczyć tylko tych prac, które były wymagane w rozpatrywanym przypadku.

W celu uniezależnienia numeracji poszczególnych rozdziałów raportu od numeracji rozdziałów monografii przed numerem każdego rozdziału raportu wprowadzono literę R.

Spis treści przykładowego raportu

R_1. Wprowadzenie

R_2. Podstawowe informacje o obiekcie chłodni kominowej

R_2.1. Informacje techniczne konstrukcji chłodni

R_2.2. Informacje dotyczące wcześniejszych opracowań oraz wykonanych remontów konstrukcji chłodni

R_3. Cel i zakres prac udokumentowanych w raporcie

R_4. Badania polowe chłodni kominowej

R_4.1. Warunki techniczne wykonania badań

R_4.2. Badania zewnętrznej powierzchni powłoki chłodni

R_4.3. Badania wewnętrznej powierzchni powłoki chłodni

R_4.4. Badania korony chłodni

R_4.5. Badania słupów

R_4.6. Ilościowe oszacowanie uszkodzeń

R_4.7. Lokalizacja pobrania odwiertów rdzeniowych i próbek stali

R_5. Badania betonu i stali

R_5.1. Opis badań

R_5.1.1. Badania odwiertów rdzeniowych

R_5.1.2. Badania wytrzymałości betonu metodą sklerometryczną

R_5.1.3. Badania wytrzymałości betonu na rozciąganie metodą pull-off

R_5.1.4. Badania nasiąkliwości betonu, jego gęstości objętościowej oraz porowatości otwartej

R_5.1.5. Badania stopnia zaawansowania procesu karbonatyzacji otuliny betonowej

R_5.1.6. Badania chemiczne zawartości chlorków, siarczanów, azotanów i azotynów w betonie

R_5.1.7. Badania modułu sprężystości betonu

R_5.1.8. Badania wytrzymałości betonu metodą pull-out

R_5.1.9. Badania stali

R_5.2. Wyniki badania betonu powłoki chłodni

R_5.2.1. Określenie nasiąkliwości betonu, jego gęstości objętościowej oraz porowatości otwartej

R_5.2.2. Określenie i ocena stopnia skarbonatyzowania otuliny betonowej

R_5.2.3.

R_5.2.4. Badania makroskopowe i mikroskopowe odwiertów rdzeniowych Określenie i ocena stężenia chlorków, siarczanów, azotanów i azotynów w przekroju betonowym

R_5.2.5. Określenie klasy betonu z badań wytrzymałościowych odwiertów rdzeniowych

R_5.2.6. Określenie klasy betonu metodą sklerometryczną

R_5.2.7. Ocena wytrzymałości betonu na rozciągnięcie metodą pull-off

- R_5.2.8. Wyznaczenie wartości modułu sprężystości betonu
- R_5.3. Wyniki badania betonu w słupach
 - R_5.3.1. Określenie klasy betonu metodą pull-out
 - R_5.3.2. Określenie klasy betonu metodą sklerometryczną
 - R_5.3.3. Ocena stopnia skarbonatyzowania otuliny betonowej
- R_5.4. Wyniki badania stali
- R_6. Oszacowanie parametrów modelu podłoża gruntowego
- R_7. Pomiary geodezyjne chłodni kominowej
 - R_7.1. Pomiar dotyczący powłoki chłodni
 - R_7.2.1. Metodyka pomiaru
 - R_7.2.2. Metodyka prac obliczeniowych
 - R_7.2. Pomiar osiadań
- R_8. Analiza statyczno-wytrzymałościowa konstrukcji
 - R_8.1. Model fizyczny konstrukcji
 - R_8.1.1. Schemat statyczny
 - R_8.1.2. Geometria
 - R_8.1.3. Parametry fizyczne materiałów
 - R_8.1.4. Zbrojenie
 - R_8.1.5. Obciążenia
 - R_8.1.6. Stany graniczne nośności
 - R_8.2. Model dyskretny MES
 - R_8.3. Kombinacje obciążeń
 - R_8.3.1. Schematy obciążeń
 - R_8.3.2. Stateczność konstrukcji
 - R_8.3.3. Nośność przekrojów
 - R_8.4. Wyniki obliczeń
 - R_8.4.1. Mnożnik obciążenia krytycznego
 - R_8.4.2. Współczynnik wyężenia na podstawie obwiedni sił wewnętrznych w powłoce
 - R_8.4.3. Współczynnik wyężenia na podstawie obwiedni sił wewnętrznych w słupach
 - R_8.4.4. Wyznaczenie wielkości ekwiwalentnego dodatkowego zbrojenia i sprawdzenie wyężenia konstrukcji z ekwiwalentnym dodatkowym zbrojeniem
 - R_8.5. Analiza nieliniowa konstrukcji
 - R_8.5.1. Model warstwowy powłoki chłodni
 - R_8.5.2. Model warstw betonu
 - R_8.5.3. Model warstw zbrojenia
 - R_8.5.4. Obciążenia
 - R_8.5.5. Wyniki obliczeń
 - R_8.5.6. Uwagi i wnioski

- R_9. Ocena stanu technicznego
 - R_9.1. Ogólna analiza stanu technicznego chłodni na podstawie dostępnej dokumentacji
 - R_9.2. Stan techniczny słupów
 - R_9.3. Stan techniczny powłoki chłodni (w tym korony chłodni)
 - R_9.4. Stan techniczny pozostałych elementów konstrukcji chłodni
 - R_9.5. Ocena aktualnego stanu technicznego chłodni w kontekście wcześniej wykonanych badań
- R_10. Zakres i technologia prac remontowych
 - R_10.1. Wykazanie potrzeby wykonania remontu
 - R_10.2. Zakres remontu powłoki chłodni kominowej
 - R_10.3. Przedmiar robót remontowych
 - R_10.4. Technologia wykonania poszczególnych prac remontowych
 - R_10.4.1. Założenia
 - R_10.4.2. Technologia wykonania wzmocnienia
 - R_10.4.3. Technologia odnowy zbrojenia konstrukcyjnego
 - R_10.4.4. Technologia remontu powłoki chłodni na powierzchniach zewnętrznej i wewnętrznej
 - R_10.4.5. Technologia remontu styków cykli betonowania i zarysowania na powierzchniach zewnętrznej i wewnętrznej
 - R_10.4.6. Technologia remontu powłoki w zakresie pęknięć i zarysowań na powierzchniach zewnętrznej i wewnętrznej
 - R_10.4.7. Technologia remontu kapitalnego
 - R_10.4.8. Ogólne warunki bhp
 - R_10.5. Zestawienie materiałów przeznaczonych do remontu chłodni
- R_11. Podsumowanie i wnioski
- R_Bibliografia, dokumenty, normy
- R_Załącznik 1. Dokumentacja fotograficzna chłodni (w wersji drukowanej)
- R_Załącznik 2. Dokumentacja fotograficzna i filmowa chłodni (w wersji elektronicznej)
- R_Załącznik 3. Pomiary geodezyjne geometrii żelbetowej powłoki chłodni (w wersji elektronicznej)

2.2. OPIS ROZDZIAŁÓW RAPORTU

Podany opis dotyczy wszystkich rozdziałów spisu treści raportu. Uwzględniono w nim informacje konieczne do tego, aby zapewnić kompletność badań.

W podanych opisach często, choć nie zawsze następują odwołania do obowiązujących norm. Ważniejsze jednak dla autora było uniwersalne przedstawienie pewnych

zasad i sposobów przeprowadzania badań oraz analiz niż odniesienie się bezpośrednio do obowiązujących norm. Wykonawcy prac projektowych, eksperckich oraz realizujący obiekt powinni odwoływać się bezpośrednio do norm. Zamieszczony na końcu spis norm nie obejmuje wszystkich obowiązujących norm związanych z projektowaniem, utrzymaniem i remontowaniem chłodni kominowych. Należy go traktować jedynie jako zbiór wybranych niezbędnych norm, do których powinno się nawiązywać w badaniu stanu technicznego chłodni kominowych.

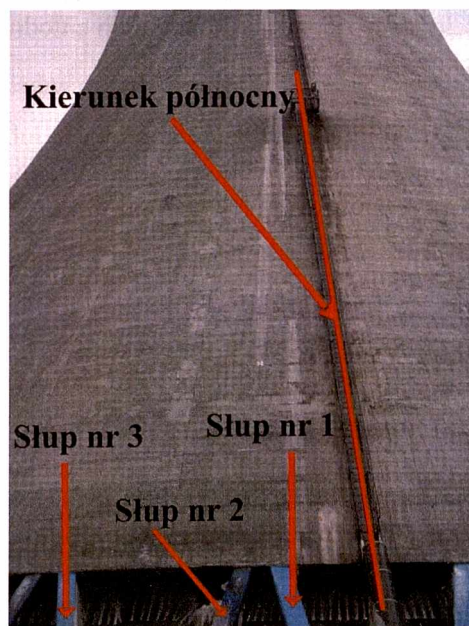
2.2.1. ROZDZIAŁ 1 RAPORTU

W tym rozdziale należy podać podstawę formalnoprawną badania stanu technicznego chłodni oraz przyczynę, z powodu której wykonywana ma być ocena. Należy też opisać w sposób ogólny wykorzystane materiały i przedstawić bazę badawczą zastosowaną podczas realizacji oceny.

2.2.2. ROZDZIAŁ 2 RAPORTU

R_2.1. Informacje techniczne konstrukcji chłodni.

Powinny być tu przedstawione ogólne dane techniczne (przede wszystkim geometryczne) wszystkich elementów konstrukcyjnych chłodni mające związek z przedmiotem



Rys. 2.1. Sposób numerowania słupów

opracowania. Szczegółowe dane, przede wszystkim fizyczne, należy podać w rozdziale R_8 raportu, gdzie będą wykorzystywane do obliczeń. Należy w tym miejscu zamieścić cztery zdjęcia chłodni (po dwie na stronę) z czterech stron świata w kolejności od strony północnej, następnie od strony wschodniej itd. Należałoby oznaczyć na nich strony świata i pokazać sposób numerowania słupów. Proponuje się przyjąć zasadę, aby słup nr 1 był pierwszym słupem, na jaki natrafia spoglądający na chłodnię od kierunku północnego i przemieszczający się w kierunku wschodnim zgodnie z azymutem (zgodnie z ruchem wskazówek zegara dla obserwatora stojącego w środku chłodni, por. rys. 2.1).

R_2.2. Dane dotyczące wcześniejszych opracowań i remontów konstrukcji chłodni.

W sposób syntetyczny należy przedstawić istotne wnioski z poprzednich opracowań oraz opisać wykonane remonty i ewentualne wzmocnienia. Z tych opisów powinien wynikać zakres prac badawczych, jakie należało wykonać w opisywanej ocenie stanu technicznego chłodni. Z zapisów ujętych w tym punkcie z uwzględnieniem sugestii użytkownika obiektu sformułowane będą zapisy ujęte w następnym punkcie raportu (R_3).

2.2.3. ROZDZIAŁ 3 RAPORTU

R_3. Cel i zakres prac udokumentowanych w raporcie.

Powinien być tu podany cel lub cele pracy. Mogą nimi być wymienione poniżej wszystkie cele lub tylko niektóre, mogą też być uzupełnione o inne cele, wynikające z zaistniałej sytuacji. Cele pracy dotyczące konstrukcji chłodni kominowej:

- ocena jej stanu technicznego,
- ocena jej stanu bezpieczeństwa,
- ocena konieczności wykonywania prac remontowych lub wzmacniających,
- określenie zakresu prac remontowych oraz prac mających na celu wzmocnienie konstrukcji chłodni wraz z propozycjami technologii wykonania tych prac,
- oszacowanie kosztów przewidzianych do wykonania prac remontowych.

Zakres opracowywanego raportu powinien być dostosowany do postawionych celów i syntetycznie przedstawiony. Obejmować powinien spis koniecznych do przeprowadzenia badań chłodni. Szczegóły dotyczące zakresu poszczególnych badań omówiono w kolejnych rozdziałach. Końcowym elementem zakresu, jaki obejmuje raport powinno być opracowanie wniosków dotyczących całości wykonanych analiz i obliczeń.

2.2.4. ROZDZIAŁ 4 RAPORTU

R_4. Badania polowe chłodni kominowej.

Celem badań polowych obiektu jest pobranie próbek odwiertów rdzeniowych, które posłużą do przeprowadzenia badań materiałowych. Drugim celem jest stwierdzenie wizualnego, rzeczywistego i aktualnego stanu konstrukcji.

Badania połowe chłodni powinny obejmować:

- Wykonanie przeglądu wszystkich elementów konstrukcyjnych chłodni (korony chłodni, słupów, misy i fundamentów), a przede wszystkim całej powierzchni powłoki chłodni po stronie zewnętrznej i wewnętrznej.

- Sporządzenie dokumentacji uszkodzeń na arkuszach inwentaryzacyjnych.

- Wykonanie dokumentacji fotograficznej i filmowej wraz z opisem i oznaczeniem miejsc wykonania zdjęć na arkuszach inwentaryzacyjnych.

- Pobranie próbek materiałowych (próbki betonowe pochodzące z odwiertów rdzeniowych oraz próbki stali zbrojeniowej) wraz z opisem miejsc ich pobrania.

- Sprawdzenie rozmieszczenia prętów zbrojenia.

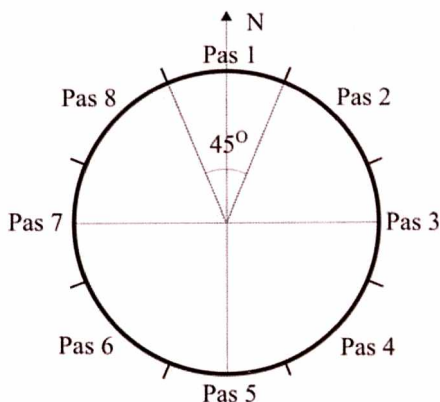
R_4.1. Warunki techniczne wykonania badań.

Badania chłodni rozpoczyna się od badań połowych. Powinny być one przeprowadzane przez wyspecjalizowane firmy alpinistyczne mające stosowne uprawnienia i sprzęt. Pobieranie odwiertów rdzeniowych powinno się odbywać z pomostu roboczego. Dopuszcza się ewentualnie możliwość pobieranie próbek przez alpinistów zawieszonych na linach. Podany opis sposobu przeprowadzania badań dotyczy umownej chłodni o wysokości rzędu 100 m. W przypadku wyższych chłodni należy zwiększyć proporcjonalnie liczbę punktów pomiarowych, na których wykonuje się pomiary oraz zwiększyć liczbę pobieranych próbek.

Opis sposobu przeprowadzania poszczególnych czynności badawczych dotyczących badań połowych

1. Przegląd

Przedstawiono przegląd w dwóch wersjach: pełnej i niezbędnej. Wersja pełna powinna zawierać dokładny opis wszelkich uszkodzeń. Wersja niezbędna zawiera informacje o uszkodzeniach zestawionych w formie ogólnej. Celem opisu jest uzyskanie szacunkowych danych, które będą zweryfikowane w trakcie czyszczenia strumieniowo-ciernego. Wersje przeglądów różnią się stopniem dokładności i szczegółowości. Dotychczas wykonywane przeglądy zazwyczaj zawierały informacje sytuujące je między wersją pełną a niezbędną. Na podstawie zawartych w nich informacjach często trudno było oszacować zakres remontu. Każdy przegląd powinien być odpowiednio udokumentowany na arkuszach inwentaryzacyjnych. Opis przeglądu powinien dotyczyć wszystkich elementów konstrukcji chłodni: zewnętrznej i wewnętrznej powłoki chłodni, korony chłodni, słupów podbudowy, misy (pierścienia fundamentowego) i fundamentów. Zazwyczaj jednak przegląd koncentruje się na konstrukcji powłoki chłodni, koronie i słupach. Z doświadczeń autora wynika, że w odniesieniu do powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej powłoki chłodni najlepiej przedstawiać wyniki przeglądu na ośmiu pionowych pasach. Każdy pas obejmuje wtedy 45°. W ogólności zaleca się, aby liczba pasów pionowych, na jakich przedstawiane będą wyniki przeglądu powinna być każdorazowo dobrana tak, aby zapewnić wystarczający stopień dokładności opisu.



Rys. 2.2. Rozmieszczenie pasów inwentaryzacyjnych po obwodzie chłodni

- W przypadku **przeglądu pełnego** wszelkie ubytki, uszkodzenia i inne nieprawidłowości występujące na badanej powierzchni chłodni powinny być pokazane na arkuszach inwentaryzacyjnych. Mogą być to ubytki betonu (należy też opisać wielkość tych ubytków i to, czy odkrywają zbrojenie czy też są w innym obszarze), wycieki rdzawe, wycieki mokre i suche (zazwyczaj występujące wzdłuż styków betonowania, których stan też powinien być sprawdzony i opisany), rozwarłe szczeliny, odkryte zbrojenie (należy rozróżniać różne stopnie skorodowania stali), płytko otulona stal, zarysowania, raki widoczne po ostukaniu, wszelkie drobne (ręczne) naprawy (powinny być w miarę dokładnie opisane, jeśli chodzi o parametry geometryczne i ich stan) itd. Wymiary geometryczne uszkodzeń należy również opisać (np. szerokość pęknięć i rys). Uszkodzenia powinny być dokumentowane na fotografiach, na których powinien być widoczny przymiar pokazujący odpowiednie wymiary geometryczne. W przypadku gdyby podczas przeglądu chłodni stwierdzono wizualnie dość duży stopień skorodowania stali, należy dokładniej oszacować stopień korozji występujący na całej powłoce chłodni.

- W przypadku **przeglądu niezbędnego** należy dokumentować takie uszkodzenia, które mają decydujący wpływ na szacowanie wielkości powierzchni uszkodzonej. Muszą być one reprezentatywne na reprezentatywnych powierzchniach. To samo dotyczy uszkodzeń liniowych (zła jakość styków, wycieki). Autor przeglądu niezbędnego zamiast dokumentowania z fotograficzną dokładnością wszelkich uszkodzeń powinien szacować wielkości uszkodzonych powierzchni oraz klasyfikować obszary pod względem potrzeby wykonania remontu przy dalszej eksploatacji chłodni. Rezultatem przeglądu niezbędnego są arkusze, na których zaznaczane są obszary wymagające różnego rodzaju remontu z oszacowaniem ich rozmiarów.

Zastosować można w tych opisach klasyfikację obejmującą obszary:

- materiału rodzimego wymagające ręcznej drobnej naprawy lub wymagające torkretowania mechanicznego,

- wymagające naprawy (pokryte podczas poprzednich remontów torkretem) ręcznie lub mechanicznie,
- wymagające wymiany betonu na małych lub znacznych obszarach z ewentualnym uwzględnieniem wymiany lub uzupełnienia zbrojenia,
- wymagające pokrycia powłokami ochronnymi itd.

Przy klasyfikowaniu obszarów należy zamieścić informację o szacowanej grubości napraw.

W podanej charakterystyce przyjęto, że podstawowe badanie dotyczy materiału rodzimego konstrukcji chłodni.

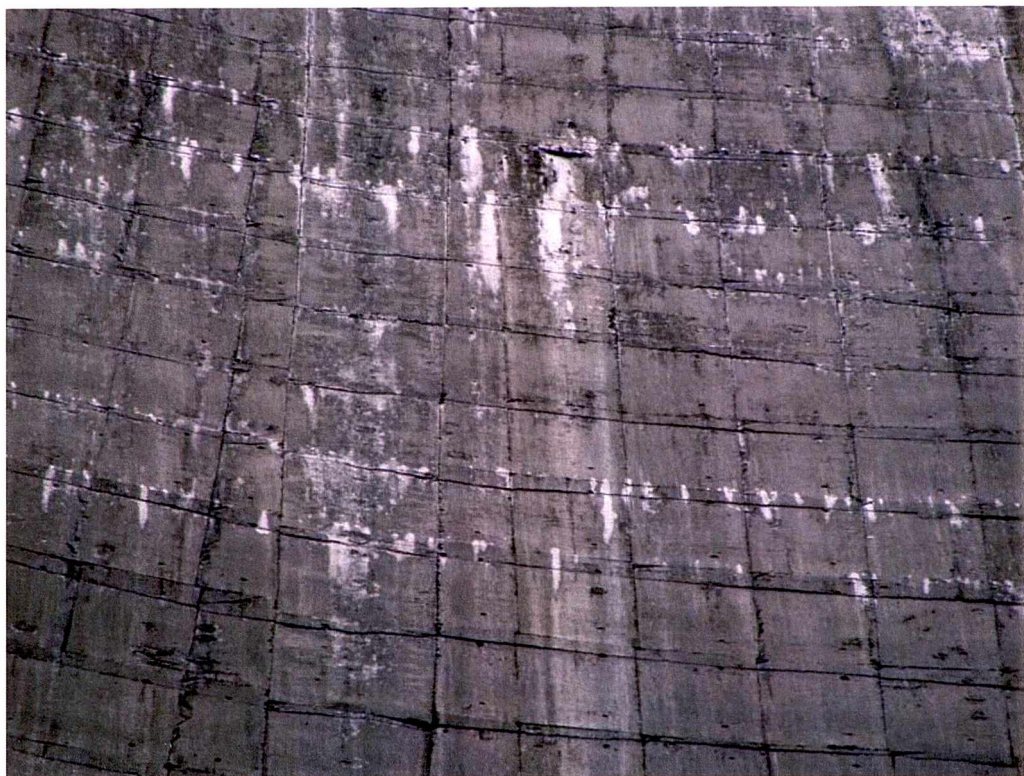
W przypadku gdy powłoka była wcześniej remontowana przez pokrycie w części nowym torkretem, niezbędne jest przeprowadzenie dokładnych badań powierzchni, uzupełnione badaniem stanu betonu rodzimego. W sposób wyraźny powierzchnie takie muszą być oznaczone na arkuszach inwentaryzacyjnych. Często z pozoru nawet dobrze wyglądające powierzchnie nałożonego mechanicznie torkretu (szczególnie wykonanego wiele lat temu) mogą w czasie eksploatacji być odspojone od powłoki chłodni. Przez spękania torkretu – nawet w dość oddalonych obszarach od badanego miejsca – może dostawać się woda, powodując duże zniszczenia betonu rodzimego i stali.

Z doświadczenia autora wynika, że ze względów praktycznych i ekonomicznych należy wykonywać przegląd niezbędny. Choć jego wyniki mają charakter przybliżony, to są one użyteczne w wystarczającym stopniu w oszacowaniu zakresu niezbędnego remontu powłoki chłodni.

Badanie stanu powierzchni powłoki chłodni przez alpinistów powinno w początkowej fazie umożliwić podanie globalnej oceny stanu powierzchni powłoki chłodni. Jeśli stwierdzony będzie duży stopień różnego rodzaju zniszczeń, to można zaniechać wykonywania szczegółowej mapy uszkodzeń. W szczególności dotyczy to przypadku, gdy duże powierzchnie powłoki są pokryte torkretem wykazującym nawet przy dość pobieżnym sprawdzeniu duży stopień degradacji. W takim przypadku dokładne oszacowanie powierzchni do naprawy będzie możliwe po strumieniowo-ciernym oczyszczeniu powierzchni. Czyszczenie to pozwala na usunięcie zniszczonych fragmentów betonu. Jeśli czyszczeniu będzie poddany obszar, na którym nałożono torkret podczas poprzedniego remontu, to dopiero czyszczenie strumieniowo-ciernie dostarczy informacji o stopniu degradacji badanego obszaru materiału rodzimego. Należy tu wyraźnie podkreślić, że badania powierzchni powłoki chłodni powinni wykonywać doświadczeni alpinisci. Od rzetelności ich pracy zależy wiarygodność danych będących podstawą do podejmowania dalszych decyzji, co do kierunku i sposobu przeprowadzania następnych prac oraz decyzji o charakterze ekonomicznym.

2. Dokumentowanie przeglądu chłodni

Dokumentowanie uszkodzeń odbywa się na arkuszach inwentaryzacyjnych. Zazwyczaj arkusze te są rozwinięciem powłoki chłodni zarówno od strony zewnętrznej, jak i wewnętrznej.



Rys. 2.3. Przykładowy fragment rozwinięcia fotograficznego dokumentującego uszkodzenia chłodni od strony wewnętrznej

Na rysunku 2.3 przedstawiono fragment powierzchni wewnętrznej chłodni, dokumentując w ten sposób jej stan. Zaleca się dokumentowanie uszkodzeń od strony wewnętrznej nie tylko na fotografiach poszczególnych fragmentów chłodni, lecz również na rozwinięciu fotograficznym wnętrza chłodni (na rozwinięciu chłodni przedstawiono m.in. rozkład współczynnika wyężenia – por. rys. 2.12). Na takim rozwinięciu zaznacza się poszczególne cykle betonowania (bądź poszczególne poziomy chłodni) i pionowy. W opisach rysunków powinno się podać osie: pozioma (azymut) i pionowa (wysokość chłodni), co pokazano w opisie rysunku 2.12.

Na arkuszach dokumentujących uszkodzenia powinno się oznaczać miejsca wykonania zdjęć typowych uszkodzeń. Zdjęcia te należy zamieścić w opisie zawartym w rozdziałach R_4.2 i R_4.3. Na tych samych (jeśli nie traci się na czytelności) lub osobnych arkuszach inwentaryzacyjnych należy zaznaczać miejsca pobrania próbek i miejsca wykonywania badań pull-off.



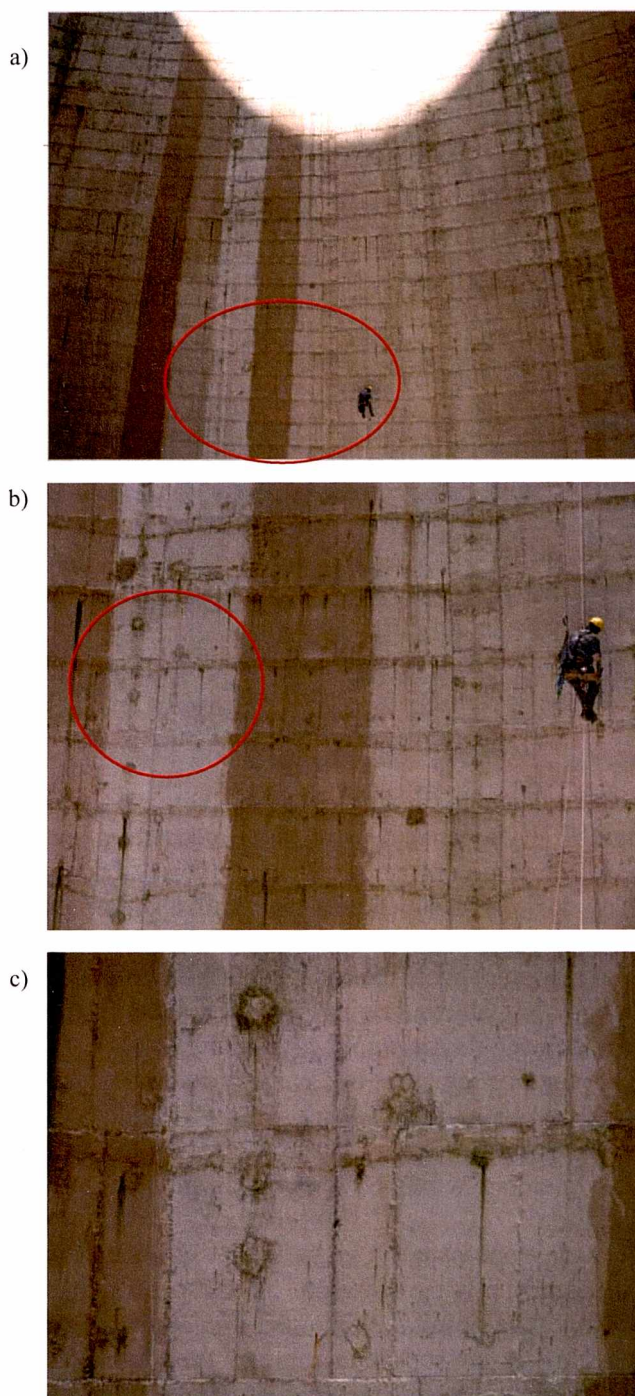
Rys. 2.4. Pas nr 6, poziom 52 m, N63

Szczegółowa dokumentacja fotograficzna powinna być zamieszczona w załączniku. Każdej fotografii (wykonanej od strony zewnętrznej albo wewnętrznej) należy nadać numer i jednoznacznie opisać, precyzując miejsce, którego dotyczy (por. opis rys. 2.4). Podawany poziom powinien dotyczyć środka zdjęcia. Miejsca wykonywania fotografii powinny być jednoznacznie zaznaczone na takich samych arkuszach, na jakich przedstawiono inwentaryzację uszkodzeń. Uszkodzenia należy dokumentować na kolejnych fotografiach tak, aby w kolejnych zbliżeniach pokazywały stan chłodni począwszy od ujęcia ogólnego do szczegółów (rys. 2.5).

Dokumentacja fotograficzna może być podzielona na trzy grupy:

1. Fotografie zamieszczone bezpośrednio w opracowaniu (raporcie).
2. Fotografie zamieszczone w załączniku.
3. Fotografie wymienione w p. 1 i 2 w wersji oryginalnej zamieszczone na nośniku elektronicznym.
4. Filmy i ewentualnie pozostałe fotografie zamieszczone na nośniku elektronicznym.

Fotografie zamieszczane w opracowaniu lub załączniku są zwykle skompresowane. Zaleca się więc, aby na nośniku elektronicznym zamieszczać ich oryginały odpowiednio skatalogowane. W ten sposób dokumentowane fotografie pozwolą na porównanie występującego w przyszłości stanu chłodni z obecnym. Takie porównania będą możliwe dzięki zachowaniu zdjęć w oryginalnej dużej rozdzielczości.



Rys. 2.5. Kolejne zbliżenia powierzchni powłoki chłodni

Zaleca się również wykonanie filmów z przeglądu, dotyczy to zwłaszcza powierzchni wewnętrznej. Filmy należy wykonywać w ujednolicony sposób, filmując np. na kierunku południowym od góry do dołu chłodni z widokiem na zachodni, a następnie wschodni kierunek. Na obu ujęciach powinien być widoczny kierunek południowy. Zapis filmowy należy wykonywać odpowiednio wolno, aby można było, odtwarzając film, analizować stan chłodni. Przed rozpoczęciem dokumentowania za pomocą filmu należy zaznaczyć na powierzchni powłoki chłodni kolejne dziesiątki metrów wysokości albo cykli betonowania. W przypadku występowania istotnych uszkodzeń należy je w trakcie filmowania zapisać jako komentarz słowny. W sprawozdaniu z badań powinno się znaleźć nawiązanie do wspomnianego komentarza wraz z odpowiednimi zdjęciami. Należy sfilmować powierzchnię wewnętrzną chłodni w jednym zjeździe na kierunkach zachodnim i północnym od góry do wysokości około 20 m poniżej przewężenia. Zbliżenia i oddalenia należy filmować w sposób umożliwiający identyfikowanie istotnych uszkodzeń.

Jeśli w trakcie remontu chłodni po oczyszczeniu strumieniowo-ciernym okaże się, że zmienił się obraz uszkodzeń, gdyż czyszczenie odkryło niemożliwe do zidentyfikowania wcześniej uszkodzenia, to należy odpowiednio uaktualnić mapy inwentaryzacyjne. Można tego nie wykonywać pod warunkiem sporządzenia odpowiednich map inwentaryzacyjnych, na których opisany zostanie stan elementów konstrukcyjnych po wykonaniu remontu. Obowiązek sporządzenia takich map spoczywać powinien na wykonawcy i potwierdzony powinien być przez zlecającego remont. Takie arkusze inwentaryzacyjne będą następnie podstawą do wykonywania kolejnego przeglądu w następnej ocenie stanu technicznego. Współcześnie narzędzia opisu umożliwiają wykonanie arkuszy inwentaryzacyjnych w formie elektronicznej, z możliwością tworzenia kolejnych warstw.

3. Badania pull-off

Wykonanie badań pull-off jest niezbędne. Dopiero na podstawie wyników tych badań można dobierać odpowiednią technologię remontu powierzchni konstrukcji betonowej. Badania pull-off wykonuje się zgodnie z normą [N 14, PN EN 12504-3]. Badania te dostarczają informacji o stanie przypowierzchniowej warstwy betonu. Często, pomimo wizualnej oceny stanu powierzchni jako dobrego, dopiero z badań pull-off wynika, że stan ten jest zły. Z doświadczenia wynika, że w chłodniach kominiowych stan powierzchni wewnętrznej powłoki chłodni w dolnej jej części nawet po kilkunastoletnim użytkowaniu bywa dobry i spełnia wymagania normowe (nawet z dużym zapasem). Jednak w górnej części, zwłaszcza w obszarze od nieznacznie poniżej przewężenia do górnej krawędzi stan powierzchni betonowej nawet po kilkuletnim użytkowaniu jest zwykle niezadowolający. W tym obszarze warstwy zabezpieczające najszybciej ulegają zniszczeniu, to zaś skutkuje przyspieszoną degradacją betonu. Stąd wynika usytuowanie miejsca wykonywania badań pull-off. Proponuje się wykonanie badań na kierunkach (pionach) wskazanych na rysunku 2.6. Taki wybór lokalizacji

miejsca wykonywania badań pull-off umożliwia sprawdzenie stanu przypowierzchniowej warstwy betonu w obszarach reprezentatywnych. Liczbę punktów pomiarowych należy każdorazowo dobierać do celu i zakresu tych badań. Zaleca się je wykonywać nie rzadziej niż co 10 m. Jeśli badania dotyczą wewnętrznej powłoki, to można zaproponować wykonanie badań pull-off przede wszystkim w górnej części powłoki chłodni (od korony do obszaru położonego poniżej przewężenia, gdzie powyżej ostatniego punktu pomiarowego mamy przynajmniej 10–15 m wizualnie nieuszkodzonej powłoki ochronnej). Jeśli również w tym punkcie otrzymane wyniki byłyby poniżej dopuszczalnych, to należy przeprowadzić takie badania na całej wysokości chłodni. W przypadku wykonywania badań tylko w części górnej chłodni w celach porównawczych proponuje się wykonać również badania w dolnej części chłodni na poziomie zraszalników, np. przy wejściu do chłodni oraz po przeciwnej stronie chłodni.

Badania pull-off powinny być udokumentowane fotograficznie. Należy wykonać zdjęcia przygotowanego do badania miejsca, przyklejonego krążka oraz krążka po zerwaniu z odpowiednim jego opisem dokumentującym miejsce wykonania badania (przykładowe zdjęcia pokazano na rys. 3.25 i 3.26).

Przed przystąpieniem do prac naprawczych należy jeszcze sprawdzić przyczepność proponowanych do naprawy materiałów z materiałem rodzimym powłoki chłodni poprzez sprawdzenie ich przyczepności na powierzchniach testowych. Powierzchnie te w kształcie kwadratu powinny mieć odpowiednie wymiary (przynajmniej około jednego metra kwadratowego) i powinny być położone w co najmniej pięciu, reprezentatywnych miejscach na powierzchni powłoki chłodni. Badania takie powinny polegać na tym, aby w pierwszej kolejności sprawdzić wytrzymałość na odrywanie na tych powierzchniach. Następnie po nałożeniu na tę powierzchnię materiału przygotowanego do naprawy i po odpowiedniej pielęgnacji, w okresie 14 dni, należy sprawdzić wytrzymałość na odrywanie tego materiału. Jeśli próby wypadną pomyślnie to ten materiał może być użyty do naprawy. Opisane badania dostarczą informacji o tym czy beton rodzimy jest wystarczająco wytrzymały i czy przełom w próbach odrywania nie nastąpi w materiale rodzimym przy naprężeniach mniejszych niż dopuszczalne.

4. Badania pull-out

Badania pull-out wykonuje się w celu określenia klasy betonu słupów. Niemożliwe jest uzyskanie tych informacji tylko przy pomocy badań sklerometrycznych ze względu na brak możliwości kalibracji sklerometru. Badania pull-out wykonuje się zgodnie z normą [N 14, PN EN 12504-3]. Jeśli wcześniej takie badania nie były wykonywane to proponuje się wykonać je na 10 słupach. W przypadku, gdy wyniki z tych badań nie będą znacząco różniły się i będą zadawalające, to przy kolejnych badaniach wystarczy wykonać je na 5 słupach.

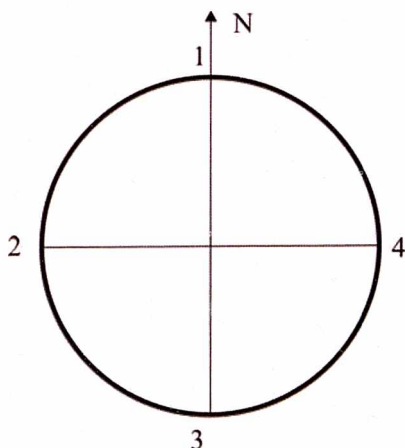
5. Badania sklerometryczne

Badania sklerometryczne przeprowadza się zgodnie z normą [N 13, PN EN 12504-2]. Należy je wykonać na słupach, na których wykonywane będą badania pull-out w są-

siedztwie miejsc badań pull-out. Następnie wykonuje się je w innych miejscach na badanym słupie, a także w tych samych miejscach na kolejnych losowo wybranych 10 słupach. Ponadto wykonuje się badania sklerometryczne na powłoce chłodni. Muszą one być wykonane w sąsiedztwie miejsc, z których będą pobierane próbki rdzeniowe oraz uzupełnione badaniami w innych miejscach. Badania te wykonuje się wzdłuż linii pionowych pokazanych na rys. 2.6, rozpoczynając od miejsc położonych nieco ponad słupami aż do korony w odstępach co 5 m. Ponadto badania takie wykonuje się na koronie od strony zewnętrznej: przy pierwszym od rozpoczęcia eksploatacji badaniu chłodni na czterech pionach (wg rys. 2.6) na wysokości około 0,5 i 1,0 m poniżej górnej krawędzi korony chłodni. W kolejnych badaniach można pominąć badanie na wysokości 1,0 m od górnej krawędzi korony chłodni.

6. Pobieranie próbek

Pobieranie próbek wykonuje się zgodnie z normami [N 12, PN EN 12504-1] i [N16, PN EN 13791]. Średnica odwiertu rdzeniowego powinna wynosić 100 mm. Często jednak pobieranie próbek o średnicy 100 mm jest utrudnione ze względu na gęsto rozmieszczone zbrojenie występujące w konstrukcji. Zgodnie z normą [N 16, PN EN 13791] dopuszczalne jest pobieranie próbek o mniejszej średnicy, ale wtedy należy pobierać odpowiednio większą liczbę próbek. Z doświadczenia wynika, że największa średnica próbki, przy pobieraniu której zwykle nie następuje przecięcie stali wynosi 80 mm. Próbkę pobiera się na tej samej wysokości, np. cyklu betonowania (np. na 2/3 wysokości cyklu). Ze względów porównawczych, zwłaszcza przy pierwszym badaniu chłodni, można też wykonać badania na próbkach pobranych z 1/3 wysokości cyklu oraz z obszaru z obu stron przy granicy między cyklami betonowania.



Rys. 2.6. Kierunki, na których wskazane jest pobieranie próbek i wykonywanie badań pull-off

Próbki betonu do badań wytrzymałościowych i chemicznych powinny być jednoznacznie opisane, co do miejsca ich pobrania. Oznaczenie powinno zawierać informację o pionie, z którego została pobrana próbka, a także powinna być podana wysokość lub numer cyklu betonowania, z którego pobrano próbkę. Przykładowo: oznaczenie O-1/10 informuje, że jest to odwiert z pierwszego pionu na wysokości 10 m od poziomu 0 mierzonego u podstawy słupa (tzw. poziom 0 chłodni). Każda próbka powinna zawierać oznaczenie wskazujące na stronę zewnętrzną i stronę wewnętrzną chłodni.

Otwory powstałe po pobraniu próbek należy wypełnić. W obszarach, gdzie grubość powłoki chłodni jest relatywnie niewielka (nie więcej niż 14 cm) można wykonać odwierty przez całą grubość powłoki. Tak wykonany odwiert umożliwia wyznaczenie wiarygodnie grubości powłoki (por. rys. 2.7). Pobieranie próbek z odwiertów przez całą grubość powłoki umożliwia wykonanie badań wytrzymałościowych na próbkach $\varphi \approx h \approx 80$ mm oraz wykorzystanie tych samych próbek w badaniach chemicznych na dwóch stronach (od strony zewnętrznej i wewnętrznej).



Rys. 2.7. Pomiar grubości powłoki chłodni

7. Sprawdzanie grubości otulenia. Podczas pierwszego badania w trakcie eksploatacji chłodni należy wykonać pomiar grubości otuliny. Do tego celu używa się specjalistycznego sprzętu (np. wykorzystującego metodę radarową). Badania przeprowadza się z na czterech podstawowych pionach, przy czym, korzystając z pomostów roboczych, na każdym pionie należy wykonać te badania na pasach o szerokości dwóch pomostów.

8. Wstępne badanie karbonatyzacji (badanie opcjonalne). Badanie takie może być przeprowadzane podczas pobierania próbek. Polega ono na pomiarze stopnia karbonatyzacji betonu powłoki chłodni w otworach powstałych po odwiertach rdzeniowych. Właściwe badanie próbek w tym zakresie wykonuje się w laboratorium.

9. Pobranie stali zbrojeniowej. Z reprezentatywnych miejsc na chłodni pobiera się 3 próbki stali o długości 0,5 m każda. Następnie (najlepiej w Laboratorium Akredytowanym) wykonuje się próbę rozciągania według normy [N 17, EN ISO 15630-1]. Wszystkie pobrane próbki powinny być oznaczane co do miejsca ich pobrania. Jeśli próbki były pobrane z tych samych pionów co próbki betonowe, to ich oznaczenie powinno być takie same jak próbek betonowych. Zaleca się pobieranie próbek stali z tych samych miejsc, w których pobierano próbki betonowe. W ten sposób otrzyma się spójny obraz wbudowanego w chłodnię materiału. Pobraną z konstrukcji chłodni stal należy uzupełnić, zapewniając jej ciągłość.

10. W opisywanych tu badaniach można korzystać ze specjalistycznego sprzętu umożliwiającego nieniszczącą ocenę stopnia zaawansowania procesu korozji (wyraża się go, podając ubytek zbrojenia), powstałych produktów korozji oraz szybkości procesu korozji zbrojenia. Badanie takie traktuje się jako uzupełniające i kontrolne w stosunku do badania stopnia karbonatyzacji.

11. Sprawdzenie rozmieszczenia zbrojenia w konstrukcji (przede wszystkim w powłoce chłodni). Sprawdzenie to wykonuje się podczas pierwszego sprawdzenia stanu technicznego chłodni przynajmniej w trzech pionach (1, 2, 3 por. rys. 2.6) i dziesięciu poziomach z zewnątrz i wewnątrz chłodni. Najlepiej wykonać to sprawdzenie tam, gdzie pobierane były próbki rdzeniowe. W następnym badaniu stanu technicznego wykonuje się weryfikację poprzednich wyników badań z zewnątrz i wewnątrz w jednym pionie i ewentualnie sprawdza się w pionie czwartym. W przypadku zgodności rozmieszczenia stali z projektem nie ma potrzeby w następnych sprawdzeniach stanu technicznego sprawdzania rozmieszczenia stali zbrojeniowej w powłoce.

R_4.2. i R_4.3. Badania zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni powłoki chłodni

W tych rozdziałach raportu zamieszcza się wyniki przeglądu. Są to arkusze inwentaryzacyjne uszkodzeń wraz z opisem typowych uszkodzeń oraz dokumentacją fotograficzną. Na fotografiach pokazuje się rysy w układzie zbrojenia, powierzchniowe ubytki betonu, nieciągłości betonu pomiędzy cyklami betonowania, uskoki na styku deskowań itd. Jeśli dokumentowanie zawarte jest na filmach, to w tekście należy dokładnie opisać miejsca, których dotyczy, aby zidentyfikować wszystko to,

co jest pokazywane na filmach. Należy starać się dążyć do klasyfikowania poszczególnych obszarów ze względu na ich stan techniczny. W przypadku powierzchni wewnętrznych jest to stosunkowo łatwe, gdyż występowanie takich obszarów jest typowe, tzn. w górnej części chłodni występuje strefa całkowicie zdegradowanego betonu (zazwyczaj wysokości kilkunastu metrów). Następnie występuje obszar pokryty glonami (wysokości kilkudziesięciu metrów) i wreszcie występuje obszar bez glonów, w którym powierzchnia powłoki ochronnej wykazuje ciągłość. W tej strefie sporadycznie pojawiają się nieregularne nacieki rdzawe i odspojenia betonu.

Ważnym elementem tej części raportu jest opis stanu elementów objętych wszystkimi wykonanymi wcześniej pracami remontowymi, w tym zwłaszcza stanu nałożonego torkretu. Bardzo istotna jest np. interpretacja spękań, rys i odspojień. Właściwa ocena stanu niekiedy nawet dużych powierzchni może mieć istotny wpływ na dalsze postępowanie dotyczące powierzchni objętych naprawą. Niezauważenie i niezaklasyfikowanie odspojonego czy spękanego i zarysowanego nałożonego wcześniej torkretu może skutkować szybką degradacją rodzimego betonu. Przez odspojenia i spękania bowiem w przestrzeń kontaktową dostaje się woda, która zwłaszcza w okresie zimowym powoduje znaczące zniszczenia. Znane są przypadki, kiedy to niemal odkryte zbrojenie zostało pokryte torkretem o innych parametrach materiałowych niż materiał rodzimy (rys. 2.8). W stanie powietrzno suchym korozja zbrojenia nie odbywała się szybko. Brak połączenia obu powłok oraz brak zbrojenia narzuconego torkretu o dość dużej grubości skutkował odspojeniem narzuconego torkretu ze względu na jego skurcz. Ponadto narzucony torkret, charakteryzując się innymi parametrami materiałowymi niż beton rodzimy, nie odkształcał się tak samo jak beton powłoki chłodni. Wówczas naprężenia styczne występujące na styku obu materiałów okazują się większe niż naprężenia, jakie występowałyby w przekroju o takiej samej geometrii wykonanym z jednego materiału. Naprężenia te mogą być jednym z czynników doprowadzających do odspojenia obu materiałów na wspólnej powierzchni. W okresie wykonywania remontu tej chłodni przez torkretowanie nie stosowano żadnych materiałów wiążących obie łączące warstwy. Na powierzchni zewnętrznej narzuconego torkretu nie występowały oznaki wskazujące na brak współpracy z betonem rodzimym. Jednak dopiero odkrycie powierzchni wspólnej wykazało, że zbrojenie zostało znacząco skorodowane, gdyż znajdowało się ono cały czas w stanie wilgotnym. Zapewne nie pokrycie niemal odkrytego zbrojenia torkretem wydłużyć mogłoby żywotność zbrojenia. Opisany przypadek potwierdza wagę diagnozowania badanych sytuacji oraz znaczącą rolę właściwego przygotowania ekipy współpracujących z autorami diagnozy alpinistów.

a)



b)



Rys. 2.8. Przykłady: a) odspojona część narzuconego wcześniej torkretu,
b) odczyszczone i zabezpieczone zbrojenie, które korodowało pod warstwą torkretu

R_4.4. i R_4.5. Badania pozostałych elementów konstrukcyjnych chłodni

Badania te należy przeprowadzić według podanych zasad, uwzględniając specyfikę danego elementu.

R_4.6. Ilościowe oszacowanie uszkodzeń

Opisując uszkodzenia konstrukcji, należy wyspecyfikować ich zasięg w metrach kwadratowych lub metrach bieżących, uwzględniając wszelkie udokumentowane dane zawarte w raporcie. Dotyczy to powierzchni zdegradowanej, stopnia tej degradacji (w tym podania powierzchni wymagającej tylko nowej powłoki ochronnej, a także reprofilacji (np. do grubości 3 cm)) itd. W opisie należy zawrzeć wszystkie inne informacje dotyczące uszkodzeń (w tym np. długość uszkodzonych styków roboczych itd.). Istotne jest też wyszczególnienie wszelkich błędów wykonawczych, które mogą wpływać na stan naprężenia w powłoce chłodni. Specyfikacje ilościowe należy podawać oddzielnie w odniesieniu do poszczególnych elementów konstrukcyjnych chłodni. Jeśli szacowanie podawane jest w ujęciu procentowym, to należy podawać również wielkości powierzchni poszczególnych elementów konstrukcyjnych chłodni. W opisie należy także oszacować ilość odkrytego zbrojenia (powierzchnię lub/i długość) w zależności od stopnia jego skorodowania.

W zależności od oszacowanej ilości uszkodzeń badana chłodnia kominowa może być zakwalifikowana do remontu o określonym zakresie. Aby ułatwić to kwalifikowanie, przygotowując *Wytyczne* należałoby:

- opracować ilościowy sposób klasyfikacji poszczególnych uszkodzeń,
- zdefiniować miary uszkodzeń w postaci wielostopniowej skali,
- poszczególnym stopniom uszkodzeń przyporządkować ich wpływ na bezpieczeństwo eksploatowanej chłodni.

R_4.7. Lokalizacja pobrania odwiertów rdzeniowych i próbek stali

• W R_4.1 (punkt 6) dotyczącym pobierania próbek podano ogólne zasady wykonywania tych czynności. W tej części raportu należy podać liczbę próbek, jaką należy pobrać w celu określenia stanu technicznego chłodni. Liczba ta i miejsce wykonywania odwiertów i pobierania próbek powinny być uzasadnione w nawiązaniu do wcześniejszych opracowań i zasad ogólnych podanych w normach. W tych ustaleniach bierze się pod uwagę aktualny stan chłodni.

• W niniejszej części raportu powinien znaleźć się rysunek rozwinięcia powłoki chłodni z zaznaczonymi na nim miejscami pobrania próbek. Miejsca te należy opisać w sposób zgodny z opisem każdej próbki betonu oraz stali.

• W przedstawianej części pracy zamieszcza się rysunki (we właściwej skali) informujące o zmierzonych rozkładach grubości powłoki chłodni wzdłuż wysokości w odniesieniu do podanej na tych rysunkach grubości projektowych.

• Jeśli na podstawie wizualnej oceny stwierdzono zły stan techniczny chłodni, a poprzednie oceny również to wskazały i dodatkowo, jeśli w poprzednich opracowaniach nie podawano dokładnych wyników badań materiałowych, to należy wykonać badania materiałowe w szerszym zakresie. W badaniach tych należy opisać efekty lo-

kalne, co stanie się możliwe po pobraniu znacznie większej liczby próbek rdzeniowych niż w typowych sytuacjach. Uzyskanie informacji o wartościach charakteryzujących lokalne właściwości materiałowe umożliwi modelowanie konstrukcji chłodni przydatne w obliczeniach sprawdzających.

- Jeśli przeprowadza się badanie chłodni, to zaleca się pobranie próbek z czterech pionów (na kierunku północnym, zachodnim, południowym i wschodnim – por. rys. 2.6), rozpoczynając bezpośrednio powyżej słupów (w przybliżeniu od ok. 2 m powyżej słupów), co ok. 10 m aż do korony. Na koronie należy pobrać próbki z powłoki chłodni na wysokości około 0,5 m od górnej krawędzi i z poziomej części pierścienia.

- W kolejnych badaniach, które wykonuje się po upływie pewnego czasu od pierwszego badania, liczba próbek może być mniejsza. Nie może ich być mniej niż 30 próbek, po 10 w każdym z trzech pionów (na kierunku północnym, zachodnim i południowym).

- W drugim kolejnym badaniu należy pobierać próbki z tych samych obszarów, z których pobierano je do pierwszego badania. Umożliwia to ocenę ewentualnych zmian parametrów materiałowych chłodni wraz z upływem czasu. W kolejnych badaniach można pobierać próbki w sposób mieszany, tzn. część próbek pochodzić powinna z tych samych obszarów, a część – w pewnej odległości (na prawo lub lewo) od pierwszego pobrania. Jednakże próbki te powinny być pobierane zawsze na tej samej wysokości cyklu. Można też alternatywnie pobierać próbki z opisanych pionów, ale z pionowym przesunięciem o 5 m w stosunku do pierwszego pobrania.

- Jeśli w kolejnych badaniach uzyskuje się różne klasy betonu pobranego z różnych obszarów chłodni, to należy zwiększyć liczbę pobieranych próbek w taki sposób, aby uzyskać lokalny rozkład klasy betonu. Pozwoli to na uwzględnienie w modelu konstrukcji chłodni wbudowany materiał w sposób możliwie wiernie oddający jego rzeczywiste parametry.

2.2.5. ROZDZIAŁ 5 RAPORTU

R_5. Badania betonu i stali

Wyniki badań materiałowych dostarczają danych do obliczeń statyczno-wytrzymałościowych oraz stanowią podstawę decyzji o sposobie i technologii naprawy, renowacji, remontu albo wzmocnienia konstrukcji. Ponadto wyniki badań dostarczają informacji o zmianie parametrów opisujących materiał, z jakiego wykonana jest konstrukcja.

Uzyskanie wiarygodnych wyników badań zapewnia się wtedy, gdy prace te wykonują Laboratoria Akredytowane, w których cały proces badania próbek i opracowywania wyników musi być zgodny z odpowiednimi procedurami i normami, a przez to zapewniona jest wymagana jakość tych prac.

R_5.1. Opis badań betonu

Każde z przeprowadzonych badań jest osobno opisane. W opisie badań umieszcza się podstawy prawne, metodologię oraz sposób wyznaczania wartości parametrów charakteryzujących materiał. Pomocą w dobraniu formy takiego opisu może być sprawozdanie z projektu badawczego wydane w formie książki [*Metody diagnozowania...*, 2003]. Przedstawiono tam analizę struktury betonu, opisano badania wytrzymałości betonu, mrozoodporności oraz porowatości, a także przeprowadzono analizę defektów, niejednorodności i rys w betonie. Tam również pokazano procedurę i opis badań mikromechanicznych oraz przedstawiono zastosowania praktyczne w diagnozowaniu konstrukcji betonowych.

W opisie badań należy podawać wszystkie potrzebne zależności między wielkościami mierzonymi (cytując je z odpowiednich opracowań źródłowych), w tym normowe graniczne wartości badanych parametrów. Jeśli jest to potrzebne, to należy odpowiednie zależności wyprowadzić. Opis powinien być dokładny, aby nie pozostawiał wątpliwości, że badania wykonano prawidłowo i zgodnie z obowiązującymi wymaganiami i aby na podstawie tego opisu było możliwe ich powtórzenie. Ponadto w opisie należy zamieścić wszystkie algorytmy obliczeniowe umożliwiające – na podstawie otrzymanych z badań wielkości – obliczenie wartości parametrów materiałowych. Wszystkie wielkości powinny być zdefiniowane lub obliczone. Jeśli jest to uzasadnione, to wielkości wykorzystywane w dalszej części raportu powinny być odniesione w formie zależności symbolicznej albo wartości liczbowej do odpowiednich źródeł (np. ujętych w normach albo w literaturze naukowej). Wielkości te można przedstawić w ujęciu tablicowym.

Wskazane jest też, aby w opisie podać wszystkie jednoznacznie identyfikujące dane i nazwy oraz symbole stosowanej aparatury i załączyć zdjęcia tej aparatury. Ponadto zaleca się, aby dokumentować fotograficznie przeprowadzane badania tak, aby w raporcie znalazły się reprezentatywne wyniki badań pokazane również na zdjęciach.

R_5.2.–R_5.4. Wyniki badania betonu i stali

Zgodnie z zaproponowanym spisem treści poszczególnych podrozdziałów dotyczących wyników badań należy wyznaczyć wielkości, o których mowa w tytułach podrozdziałów. Niekiedy potrzebną wielkość można wyznaczyć w różny sposób. Przykładowo, moduł Younga można wyznaczyć metodą ultradźwiękową (korzystając z badania próbek), można też korzystać z zależności między odkształceniami a naprężeniami przy badaniu próbki na ściskanie. Zaleca się, aby przynajmniej w pierwszej ekspertyzie chłodni zawrzeć wyniki tych badań wykonane dwoma metodami.

W formie skrótovej podano proponowany sposób przedstawiania wyników wybranych badań. Podano nagłówki kilku tabel zbiorczych. Tabele powinny zawierać wartości wszystkich wielkości potrzebnych do obliczeń. Powinny one wynikać z ich oznaczenia na próbkach lub z przeprowadzonych odpowiednich obliczeń. Ponadto należy wykonać odpowiednią obróbkę statystyczną badań oraz pod każdą tabelą opisać otrzymane wyniki w kontekście wartości normowych (dopuszczalnych).

Badania makroskopowe i mikroskopowe pobranych próbek

W tej części raportu należy zamieścić fotografie pobranych próbek. Wszystkie próbki należy przedstawić w taki sposób, aby widoczny był ich opis. Jeśli próbki są dobrej jakości, to zamieszczenie na jednej fotografii 10 sztuk próbek zapewni wystarczającą dokładność ich prezentacji. Ponadto, w załączniku albo tylko w wersji elektronicznej dokumentacji, można zamieścić dokładniejsze fotografie poszczególnych próbek. Jeśli próbki są złej jakości, to należy w odpowiednim załączniku pokazać fotografię każdej z próbek i uzupełnić ją odpowiednim opisem wskazującym na charakterystyczne uszkodzenia.

Autor raportu przeprowadza oględziny próbek i bada ich strukturę. Badanie polega na:

- ocenie jednorodności i składu betonu rodzimego wraz z taką samą oceną ewentualnego dodatkowego torkretu,
- ocenie występowania rys, rozwarstwień, raków,
- ocenieniu stopnia degradacji betonu (oględziny za pomocą odpowiedniego sprzętu powiększającego obraz),
- przeprowadzeniu badań krystalograficznych za pomocą mikroskopu elektronowego (por. [Brandt, 2011]).

Wyniki oględzin, w tym wszystkie zauważone istotne uszkodzenia próbek, należy dokumentować fotograficznie, wskazując odpowiednimi znakami graficznymi opisywane w tekście uszkodzenia oraz cechy próbek. W dokumentacji powinny być uwiidocznione wszelkie spękania poprzeczne i wzdłużne, rozpadnięcia się próbki w trakcie jej pobierania, skorodowane zbrojenie itd. Jeśli próbki są częściowo zdegradowane, to – jeśli to jest tylko możliwe – wycina się z nich próbki do badań. Należy tę informację opisać i następnie odpowiednio zinterpretować uzyskane wyniki.

Dokładność opracowania tej części raportu jest szczególnie istotna, gdy próbki wykazują znaczny stopień degradacji. Jeżeli np. pobrane próbki są pęknięte (i są w kilku częściach), to należy udokumentować ten fakt fotograficznie i opisowo. Będzie to stanowić potwierdzenie stanu stali zbrojeniowej i betonu w powłoce.

Badania fizykochemiczne

Badanie gęstości objętościowej należy obecnie do podstawowych badań fizykochemicznych. Wyznacza się ją zgodnie z normą [N11 PN-EN 12390-7] (uprzednio obowiązywała norma [N19 PN-88/B-06250]). W tabeli 2.1 podano przykładowy nagłówek tabeli, w której zestawia się wielkości niezbędne do wyznaczenia gęstości objętościowej betonu.

Tabela. 2.1. Zestawienie wyników obliczenia gęstości objętościowej badanego betonu

Pion	Oznaczenie próbki	Masa w stanie wysuszonym [g]	Masa w stanie naturalnym [g]	Objętość próbki [cm ³]	Gęstość objętościowa w stanie wysuszonym [g/cm ³]	Gęstość objętościowa w stanie naturalnym [g/cm ³]
1	O-1/10					
	O-1/20					
...	...	...	...	...	...	...

Badania chemiczne wykonuje się w odniesieniu do wszystkich pobranych próbek. Jeśli jest to możliwe, to badania takie należy przeprowadzać zarówno na powierzchni zewnętrznej, jak i wewnętrznej powłoki chłodni. Dotyczy to odwiertów wykonanych przez całą grubość powłoki. W tabeli 2.2 podano opis nagłówka tabeli, w której zestawia się wyniki badań karbonatyzacji powłoki chłodni.

Tabela. 2.2. Zestawienie wyników oznaczenia karbonatyzacji powłoki chłodni

Pion	Oznaczenie próbki	Głębokość karbonatyzacji zewnętrznej [mm]	Głębokość karbonatyzacji wewnętrznej [mm]
1	O-1/10		
	O-1/20		
...	...	...	...
Strona powłoki chłodni		Zewnętrzna	Wewnętrzna
Średnia głębokość karbonatyzacji [mm]			

W tabeli 2.3 podano opis nagłówka tabeli, w której zestawia się wyniki oznaczenia zawartości i rozkładu chlorków.

Tabela. 2.3. Zestawienie wyników oznaczenia zawartości i rozkładu chlorków

Pion	Oznaczenie próbki	Zawartość chlorków z zewnątrz [udział % w stosunku do masy betonu]		Zawartość chlorków z wewnątrz [udział % w stosunku do masy betonu]	
		0,0–1,0 cm	1,0–2,0 cm	0,0–1,0 cm	1,0–2,0 cm
1	O-1/10				
	O-1/20				
...	...	...	...	...	...
Strona powłoki chłodni		Zewnętrzna		Wewnętrzna	
Głębokość		0,0–1,0 cm	1,0–2,0 cm	0,0–1,0 cm	1,0–2,0 cm
Średnia zawartość chlorków [udział % w stosunku do masy betonu]					

We wszystkich tabelach wartości przekraczające dopuszczalne wartości należy wyróżnić w druku, zapisując je czcionką wytłuszczoną. W tabeli 2.3 rozkład zawartości chlorków i siarczanów podano w podziale na dwie strefy głębokości penetracji. Jest to istotne ze względów poznawczych.

W tej części raportu zamieszcza się przykładowe fotografie odpowiednio oznaczonych próbek wykonane w ten sposób, aby widoczny był na nich zasięg karbonatyzacji. Wymaga to przyłożenia przymiaru i wykonania zdjęcia w takim ujęciu, aby zasięg

karbonatyzacji był czytelny. W opisie należy tu odwołać się do odpowiedniego miejsca w tabeli.

Oszacowanie klasy betonu

• Oszacowanie klasy betonu na podstawie badania wytrzymałościowego

W rozdziale R_5.1.1 raportu zamieszczono algorytm postępowania i algorytm obliczeń prowadzące do uzyskania informacji o wytrzymałości betonu. Można go tu zastosować i wyniki badań przedstawić tabelarycznie z odpowiednim komentarzem.

Do badań wytrzymałościowych wycina się próbki z wcześniej pobranych odwierć rdzeniowych. Należy opisać sposób wycinania próbek, tzn. podać: w jakiej części grubości powłoki pobrano próbkę poddaną badaniom (może być to próbka od strony zewnętrznej na długości normowej albo – z powodu zdegradowania otuliny badaniom poddano beton z wnętrza powłoki). Opisuując wyniki badań i wyznaczając klasę betonu z zastosowaniem rachunku statystycznego, należy w obliczeniach uwzględniać próbki porównywalne. Jeśli zaś są to próbki z różnych części grubości powłoki, należy ten fakt opisać, a otrzymane wyniki odpowiednio interpretować. W tabeli 2.4 pokazano sposób zestawienia wyników badań laboratoryjnych próbek pobranych z przykładowego poziomu położonego na wysokości 10 m. Ze względu na technologię wykonywania powłoki należy uśrednienie wytrzymałości dokonywać na poszczególnych poziomach.

Tabela 2.4. Zestawienie wyników badań laboratoryjnych próbek betonowych, pobranych z powłoki chłodni na poziomie 10 m

Oznaczenie próbki	Przekrój F [mm ²]	Siła P [kN]	Współczynnik kształtu	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
Próbka O-1/10				
Próbka O-2/10				
Próbka O-3/10				
Próbka O-4/10				
Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm, is}$ [MPa]				

Wyniki zestawione w tabelach, odnoszących się do poszczególnych poziomów, są podstawą wyznaczania wielkości zamieszczonych w tabeli 2.5.

Bezpośrednio pod tabelą opisuje się otrzymane wyniki oraz jednoznacznie określa się klasę betonu w całej powłoce chłodni. W przypadku gdy występuje niejednorodność klasy betonu, wówczas należy to odpowiednio zinterpretować.

Alternatywnie lub w przypadku gdy próbki pobierane są z mniejszej liczby pionów, wówczas w tabeli 2.4 uśrednia się wartości wytrzymałości na ściskanie z rozpatrywanego pionu. Wtedy tabela 2.5 przyjmie postać tabeli 2.6.

Tabela 2.5. Zestawienie wyników statystycznych oszacowania klasy betonu

Algorytm oszacowania klasy betonu (p. 5.1.1)	Poziom 10 m	Poziom 20 m	Poziom 30 m	...	Średnia z poziomów
Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm, is}$ [MPa]				...	
Najmniejsza uzyskana wytrzymałość $f_{is, lowest}$ [MPa]				...	
Odchylenie standardowe σ [MPa]				...	
Współczynnik zmienności wytrzymałości v_f [%]				...	
Liczba pomiarów n				...	
Współczynnik k				...	
Wytrzymałość charakterystyczna, odpowiadająca wytrzymałości oznaczanej na próbkach sześciennych o boku 150 mm $f_{ck, is, cube}$ [MPa]				...	
Klasa betonu wg PN-EN 13791				...	

Tabela 2.6. Zestawienie wyników statystycznych oszacowania klasy betonu

Algorytm oszacowania klasy betonu (p. 5.1.1)	Pion 1	Pion 2	Pion 3	Średnia pionów 1, 2, 3
Średnia wytrzymałość betonu na ściskanie $f_{cm, is}$ [MPa]				
Najmniejsza uzyskana wytrzymałość $f_{is, lowest}$ [MPa]				
Odchylenie standardowe σ [MPa]				
Współczynnik zmienności wytrzymałości v_f [%]				
Liczba pomiarów n				
Współczynnik k				
Wytrzymałość charakterystyczna, odpowiadająca wytrzymałości oznaczanej na próbkach sześciennych o boku 150 mm $f_{ck, is, cube}$ [MPa]				
Klasa betonu wg PN-EN 13791				

Badania wytrzymałościowe próbek wykonuje się z użyciem maszyn wytrzymałościowych. Jeśli wyznacza się rozkład wytrzymałości betonu na ściskanie po grubości badanej powłoki chłodni, to można wykorzystać metodę ultradźwiękową opisaną w normie [N 15, PN EN 12504-4:2005].

• Oszacowanie klasy betonu metodą sklerometryczną

Należy przyjąć równanie regresji dla metody sklerometrycznej. Można skorzystać z równania zalecanego w instrukcji fabrycznej sklerometru Schmidta. Wymaga to jednak weryfikacji z wykorzystaniem podanych wyników wytrzymałościowych badań laboratoryjnych próbek pobranych z powłoki chłodni. W tabeli 2.7 podano nagłówek tabeli, w której zestawia się wielkości potrzebne do stwierdzenia wiarygodności badań metodą sklerometryczną.

Tabela 2.7. Weryfikacja przyjętej hipotetycznie krzywej regresji do metody sklerometrycznej

Oznaczenie próbeki	Odczyty na pobocznicy (9 pomiarów)	L_{sr} [–]	f_{ci} [MPa]	f_{oi} [MPa]
O-1/10				
O-1/20				
...	...	...	...	...

gdzie L_{sr} – średnia wartość odczytu na pobocznicy, f_{ci} – wytrzymałość betonu wyznaczona na podstawie badania z użyciem maszyny wytrzymałościowej, f_{oi} – wytrzymałość betonu wyznaczona na podstawie badania metodą sklerometryczną.

Następnie wyznacza się wartość względnego odchylenia kwadratowego, które nie może przekroczyć określonej dopuszczalnej wartości. Jeśli wartość jest przekroczona, to równania podanego w instrukcji fabrycznej sklerometru Schmidta nie można stosować. Musi być ono zmodyfikowane na podstawie wyników otrzymanych z badań wytrzymałościowych betonu. Po przeprowadzeniu modyfikacji równania regresji należy również zmodyfikować odpowiednie wartości f_{oi} . Jeśli – po takiej modyfikacji – otrzyma się wartość względnego odchylenia kwadratowego spełniającego wymagania, to można stosować zmodyfikowane równanie regresji do oceny wytrzymałości betonu na ściskanie metodą sklerometryczną i do określenia klasy betonu tą metodą. Przykładowe zestawienie tabelaryczne dotyczących L_{sr} i f_{oi} wyznaczonych na poziomie 10 m podano w tabeli 2.8.

Tabela 2.8. Wyznaczenie wytrzymałości betonu w powłoce chłodni

Miejsce pomiarowe	Kąt pomiaru	Odczyt									L_{sr}	f_{oi}
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	[–]	[–]
L-1/10	0°											
L-2/10	0°											
L-3/10	0°											
L-4/10	0°											
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Wartości średnie												

Kolejnym krokiem w tym postępowaniu jest wykonanie odpowiedniej obróbki statystycznej umożliwiającej zestawienie w tabeli zbiorczej wyznaczonych wielkości na wszystkich poziomach wraz z oszacowaniem klasy betonu całej powłoki chłodni. Można to zrobić na podstawie tabeli 2.5.

W przypadku wykonania sprawdzającego badania sklerometrycznego tylko w jednym pionie, w tabeli 2.8 zamieszcza się wszystkie wartości otrzymane z badań sklerometrycznych, a następnie na ich podstawie określa się klasę betonu.

W analogiczny sposób wyznacza się i podaje wyniki pozostałych badań dotyczących betonu.

Istotne informacje, pomocne w interpretowaniu wyników badań, zawarte są w opisach warunków przeprowadzania badań. Mają one szczególne znaczenie w przypadku występowania nagłych zmian warunków atmosferycznych. Zmiany te rzutują na wartości otrzymanych wyników z badań. Informacje o rzeczywistych warunkach umożliwiają właściwą interpretację wartości otrzymanych na podstawie badań i obliczeń.

W przypadku badań betonu słupów chłodni zastosowanie metody pull-out umożliwia wykonanie odpowiedniej kalibracji sklerometru Schmidta, którym następnie wykonuje się badania i uzyskuje wiarygodne wyniki.

Badanie stali obejmuje wyznaczenie wytrzymałości stali zbrojeniowej na rozciąganie i ocenę procentowego stopnia jej korozji.

2.2.6. ROZDZIAŁY 6, 7 RAPORTU

R_6. Oszacowanie parametrów modelu podłoża gruntowego

W przypadku braku wiarygodnych danych dotyczących współczynnika podłoża sprężystego można wyznaczyć go na podstawie danych z przekrojów geologiczno-inżynierskich podłoża gruntowego pod chłodnią. W raporcie należy opisać metodologię oraz zamieścić stosowane obliczenia. Ciekawym studium prowadzenia monitoringu osiadań podczas wznoszenia chłodni jest praca [Biały, 2012]. Zamieszczone w niej informacje świadczą o tym, że istotne jest prawidłowe zaprojektowanie położenia reperów w zależności od parametrów gruntu i specyfiki obciążenia terenu wokół chłodni. Wiarygodne informacje dotyczące podłoża gruntowego mają bardzo istotne znaczenie. Jeśli podłoże jest niejednorodne, to może być przyczyną degradacji chłodni i jej pochylenia, co należy wiązać z nierównomiernym osiadaniem konstrukcji chłodni (por. [Noakowski, 2010]). Ponadto niejednorodne podłoże może wpływać na parametry dynamiczne chłodni [Ciesielski i inni, 1989].

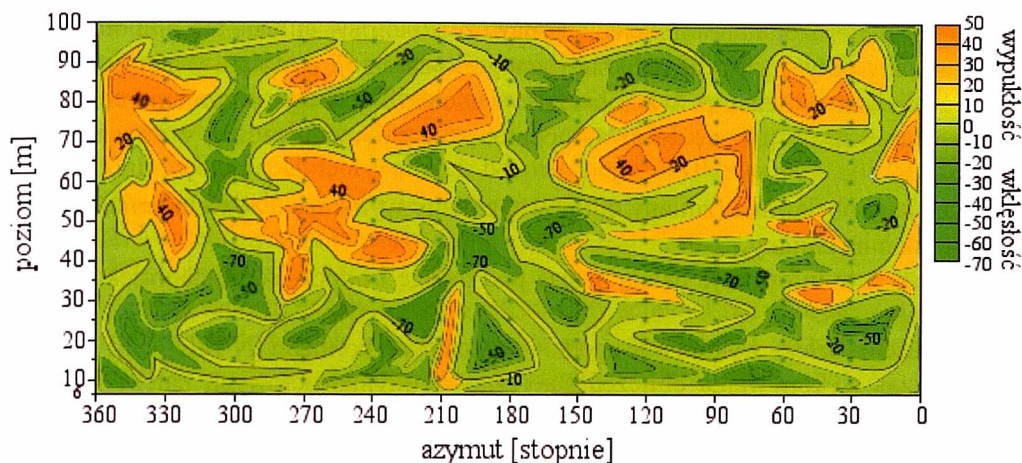
R_7. Pomiary geodezyjne chłodni kominowej

R_7.1. Pomiar dotyczący powłoki chłodni

Zakres prac obejmować powinien pomiar geometrii zewnętrznej powierzchni powłoki chłodni kominowej w założonych punktach pomiarowych. Aktualny przegląd stosowanych geodezyjnych metod inwentaryzacji kształtu i pomiaru deformacji chłodni kominowych przedstawiono w pracy [Zdanowski, 2011]. Wskazano też na związek pomiędzy kształtem zdeformowanej powłoki chłodni w stosunku do jej projektowego kształtu a możliwością wystąpienia awarii takiej chłodni.

Metodyka prowadzonych pomiarów powinna zakładać, że w przypadku chłodni wcześniej badanych pod względem geodezyjnym należy pomiary wykonać w tych samych punktach pomiarowych, co umożliwi bezpośrednie porównanie otrzymanych wyników z poprzednimi. Na podstawie pomierzonych wielkości oraz równania powłoki i przyjmując, że grubości powłoki są zgodne z projektowymi albo, uwzględ-

niając wyniki pomiarów grubości powłoki, oblicza się imperfekcje geometryczne w punktach pomiarowych. Następnie, stosując odpowiednie metody obliczeniowe, na podstawie interpolacji, uzyskuje się na rozwinięciu powłoki chłodni izolacji imperfekcji. Przykład mapy imperfekcji geometrycznych podano na rys. 2.9.



Rys. 2.9. Mapa imperfekcji geometrycznych na rozwinięciu powłoki

Pomiary dotyczące geometrii powłoki wykonuje się cyklicznie. Dzięki temu możliwa jest analiza porównawcza uzyskanych wyników z poprzednimi. W raporcie powinien być opisany sposób pomiaru wraz z opisem zastosowanego sprzętu. Należy też przedstawić szczegóły dotyczące obliczeń, na podstawie których otrzymuje się mapę imperfekcji przedstawioną na rozwiniętej powłoce chłodni. Imperfekcje geometryczne powłoki chłodni kominowej powodują zwiększenie wartości sił wewnętrznych w powłoce i w konsekwencji prowadzą do znacząco zwiększonego wyężenia konstrukcji powłoki chłodni. Pokazano to w pracy [Abramek i inni, 1993]. Imperfekcje mogą być niekiedy bardzo duże. Przykład imperfekcji o największych dotychczas odnotowanych wartościach podano w pracy [Hojdys i inni, 2012].

R_7.2. Pomiar osiadań

Pomiary osiadań wykonuje się cyklicznie. Nowe wartości należy porównywać z wynikami uzyskanymi w przeszłości i na tej podstawie podjąć stosowne decyzje.

2.2.7. ROZDZIAŁ 8 RAPORTU

R_8. Analiza statyczno-wytrzymałościowa konstrukcji

Wykonanie obliczeń statyczno-wytrzymałościowych chłodni wymaga dysponowania informacjami dotyczącymi modelu konstrukcji, jej geometrii, parametrów fi-

zycznych materiałów oraz wielkości i rodzaju obciążenia konstrukcji. Informacje te zestawia się w rozdziałach R_8.1.1-R_8.1.5 raportu. Dotyczą one stanu projektowego i aktualnego.

Jeśli stwierdzono:

- odstępstwa od projektu (np. geometria chłodni odbiega od projektowej, a dodatkowo np. stwierdzone imperfekcje wykonawcze),
- zmiany dotyczące schematu statycznego konstrukcji powstałe w następstwie remontów i wzmocnień (np. wzmocnienie pierścienia górnego, wzmocnienie poprzez użebrowanie strefy przewężenia, wzmocnienie na całym obwodzie, wzmocnienia lokalne),
- zmiany obciążenia (zmiany normowe, zmiany wynikające ze wzmocnień),
- oraz inne zmiany,

to wszystkie te informacje należy wziąć pod uwagę i odpowiednio zaprojektować algorytm obliczeń.

Obliczenia należy wykonywać zgodnie z aktualnymi normami [N 18], [N 20 – N 23].

Podczas wykonywania obliczeń statyczno-wytrzymałościowych należy uwzględnić podane wskazania:

W pierwszej ocenie stanu technicznego danej chłodni lub zespołu chłodni wykonanych na podstawie jednego projektu można informacje projektowe jednorazowo zweryfikować, wykonując obliczenia według norm z okresu projektowania.

Kolejne obliczenia wykonywane w ramach oceny stanu technicznego chłodni muszą być dostosowane do aktualnych wymagań normowych, aktualnej geometrii, aktualnych obciążeń i aktualnych parametrów materiałowych.

Obliczenia te muszą uwzględniać wszelkie zmiany, jakie nastąpiły podczas eksploatacji chłodni (m.in. wzmocnienia, a w tym np. zmiany w ilości zbrojenia).

W analizie należy wszystkie zmiany uwzględniać tak, aby wyniki obliczeń zapewniły bezpieczeństwo konstrukcji.

Niedopuszczalne jest, aby w aktualnej konfiguracji wykonywać obliczenia na podstawie norm z okresu projektowania chłodni i na tej podstawie wydawać opinię o stanie jej bezpieczeństwa.

Przykładowe wymagania odnośnie do algorytmów obliczeń uwzględniających specyficzną sytuację, w jakiej znajduje się rozpatrywana chłodnia, stanowią dobrą ilustrację opisanych wymagań:

- Chłodnia wykazuje silną degradację szczególnie od strony wewnętrznej (do ok. 20% wysokości). Zmierzona grubość powłoki chłodni jest nieco mniejsza niż projektowa na pewnej części tej zdegradowanej powierzchni. Obliczenia należy wykonać z uwzględnieniem zmniejszonej grubości powłoki, a następnie przyjmując grubość, do jakiej planuje się ją zwiększyć po remoncie (zazwyczaj jest to grubość projektowa).

- Badania chłodni wykazały, że beton w niektórych obszarach jest bardzo zdegradowany oraz stal wykazuje znaczny stopień korozji. Należy wówczas modelować chłod-

nię z uwzględnieniem betonu o znacznie obniżonym module Younga w obszarach o znacznej degradacji betonu. Podobnie w przypadku skorodowanej stali należy przyjąć odpowiednio zmniejszone zbrojenie. Dla tak zamodelowanej chłodni sporządza się mapy wyężenia konstrukcji chłodni. Na tej podstawie podejmuje się decyzję o sposobie jej wzmocnienia.

- Chłodnia nie spełnia warunków bezpiecznego użytkowania. Obliczenia wykazały, że są obszary, w których jest przekroczony stan graniczny nośności. Wobec tego proponuje się wzmocnienie chłodni na przykład przez zastosowanie dodatkowego zbrojenia pokrytego torkretem. Należy wtedy sprawdzić i wykazać, że po wzmocnieniu chłodnia będzie spełniała warunek bezpiecznego użytkowania, czyli że stan graniczny nośności chłodni nie będzie przekroczony.

R_8.1. Model fizyczny konstrukcji

R_8.1.1. Schemat statyczny

W tej części raportu należy opisać zastosowany schemat statyczny poszczególnych elementów konstrukcyjnych chłodni, przedstawić założenia i sposób modelowania rozważanych w opracowaniu elementów konstrukcji chłodni.

R_8.1.2. Geometria

Zestawia się tu dane geometryczne wszystkich elementów konstrukcyjnych chłodni mające związek z przedmiotem opracowania, łącznie z rysunkiem chłodni, opisem jej geometrii, przedstawieniem równania tworzącej powierzchnię środkową hiperboloidy jednopowłokowej. Zestawienie obejmuje przedstawienie funkcji projektowanej grubości powłoki wraz z rysunkiem i uzasadnieniem przyjętego do obliczeń rozkładu grubości powłoki po wysokości. W przypadku gdy w obliczeniach uwzględnia się grubości powłoki odbiegające od projektowych (zazwyczaj mniejsze – por. rys. 3.5a), wówczas należy fakt ten uzasadnić. W opisie należy też uwzględnić wszelkie zmiany geometrii konstrukcji chłodni, jakie wystąpiły podczas jej eksploatacji i występują w chwili sporządzania oceny stanu technicznego. Szczególne znaczenie ma tu wartość rozkładu rzeczywistej grubości po wysokości chłodni. Sytuacja, w której wartość grubości jest mniejsza niż wymagana może być przyczyną zmniejszenia stopnia bezpieczeństwa chłodni, co pokazano w pracy [Centkowski, 1993], gdzie przeprowadzono analizę doboru grubości powłoki chłodni ze względu na kryterium utraty stateczności.

R_8.1.3. Parametry fizyczne materiałów

Opis w tej części raportu zawiera wszystkie potrzebne do obliczeń parametry. Należy je podać w odniesieniu do każdego z rozważanych elementów chłodni z osobna (powłoka i korona, słupy, pierścień fundamentowy wraz z misą, fundament, grunt).

W odniesieniu do powłoki i korony chłodni parametry te można podać następująco:

Przyjęto izotropowy, jednorodny beton klasy C25/30 charakteryzowany następującymi wartościami parametrów fizycznych:

- wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$,
- moduł sprężystości betonu $E_{cm} = 30 \text{ GPa}$,

- współczynnik Poissona $\nu = 0,2$,
- współczynnik rozszerzalności cieplnej $\alpha_t = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

Zastosowano stal zbrojeniową 34GS o wytrzymałości charakterystycznej $f_{yk} = 420 \text{ MPa}$. Jeśli w wyniku badań materiałowych stwierdzono różnice w parametrach materiałowych, to w opisie modelu konstrukcji należy to uwzględnić.

R_8.1.4. Zbrojenie

W opisie modelu fizycznego ilości zbrojenia w konstrukcji chłodni przyjmuje się na podstawie projektu. Jeżeli jednak przeprowadzono dokładne badanie sprawdzające ilości wmontowanego zbrojenia i jeżeli wykazało ono niezgodność z projektem oraz jeśli jest on bardziej niekorzystny od projektowego, to w obliczeniach należy przyjąć jego rozkład rzeczywisty.

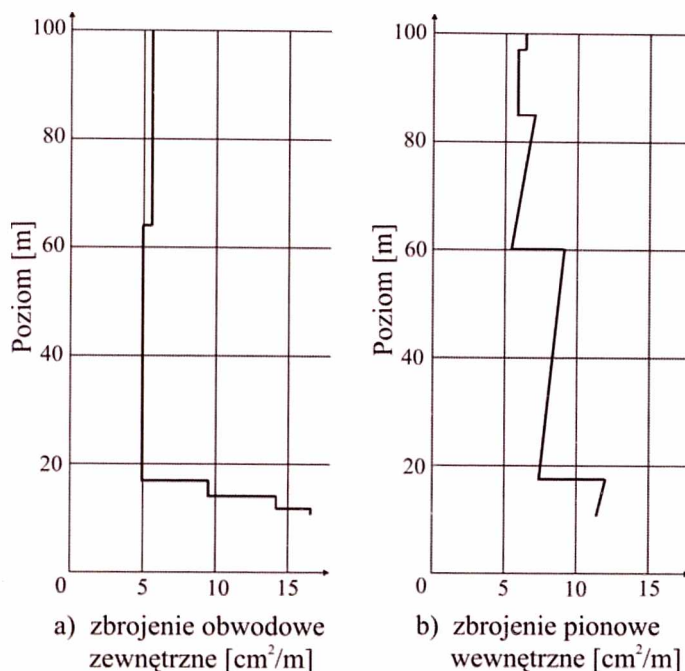
Przyjęte w obliczeniach zbrojenie powłoki chłodni można zestawić w tabeli, którą podano jako tabelę 2.9. Zbrojenie pionowe w tabeli 2.9 podano w odniesieniu do pasa stanowiącego pewną część obwodu powłoki.

Tabela 2.9. Zestawienie zbrojenie powłoki chłodni

Poziom [m]	Zbrojenie pionowe		Zbrojenie obwodowe	
	wewnętrzne	zewewnętrzne	wewnętrzne	zewewnętrzne
6–9	36 Ø 16	36 Ø 18	Ø 18 co 15 cm	Ø 18 co 15 cm
9–11			Ø 16 co 15 cm	Ø 16 co 15 cm
11–13			Ø 14 co 15 cm	Ø 14 co 15 cm
14–15		36 Ø 16		
.....				
60–100	18 Ø 12	18 Ø 12	Ø 10 co 30 cm + Ø 12 co 30 cm	Ø 10 co 30 cm + Ø 12 co 30 cm
Korona – zbrojenie wspólne z powłoką			6 Ø 25 + 2 Ø 8	

W tej części raportu sporządza się wykresy zewnętrznego i wewnętrznego zbrojenia równoleżnikowego i południkowego powłoki chłodni w przeliczeniu na 1 m bieżący. Wykresy te uwzględnione zostaną w dalszym postępowaniu. W opisie informuje się o położeniu zbrojenia w powłoce (w szczególności informuje się o tym, które zbrojenie – pionowe czy poziome – jest usytuowane bliżej środka powłoki) i podaje się wymiar otuliny (dotyczy to również przypadku zmniejszonej grubości powłoki).

Na rysunku 2.10 zamieszczono – jako przykładowe – rysunki z informacjami o ilości rozmieszczonego w powłoce chłodni. W podobnie precyzyjny sposób należy opisać zbrojenie pozostałych elementów konstrukcyjnych chłodni (w tym słupów).



Rys. 2.10. Wybrane rysunki z informacjami o ilości zbrojenia w powłoce chłodni w zależności od jej wysokości

R_8.1.5. Obciążenia

Wraz z upływem czasu eksploatacji chłodni mogą zmieniać się zalecenia ujęte w normach. Tym samym niektóre wielkości charakteryzujące obciążenia w czasie opracowania raportu mogą różnić się od wielkości projektowych. Wówczas w obliczeniach zamieszczonych w raporcie przyjmuje się aktualne wartości obciążeń i obliczenia wykonuje się z uwzględnieniem aktualnych norm. W raporcie należy przedstawić cały tok postępowania prowadzący do otrzymania wartości, które wykorzystuje się w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych. Chłodnia powinna być obciążana ciężarem własnym, oddziaływaniem wiatru oraz oddziaływaniem termicznym i skurczem betonu.

Ustalając oddziaływanie wiatrem, wyznacza się obciążenie na powierzchnię zewnętrzną i wewnętrzną powłoki chłodni, uwzględniając współczynnik ciśnienia zewnętrznego po obwodzie, którego wykres po obwodzie chłodni należałoby zamieścić. Następnie wyznacza się kierunkowo najniekorzystniejsze położenie obciążenia. Jeśli chłodnia lokalizowana jest wśród innych wysokich obiektów, to należy wyznaczyć kierunek najbardziej niekorzystnego oddziaływania wiatru lub kombinację takiego obciążenia i wziąć pod uwagę interferencję wynikającą z wpływu tych obiektów na rozważaną chłodnię.

W odniesieniu do oddziaływań termicznych należy wyznaczyć charakterystyczną temperaturę powietrza w różnych warunkach obciążenia powłoki. Wyróżnia się trzy przypadki:

- chłodnia użytkowana zimą,
- chłodnia użytkowana latem,
- zimowa przerwa technologiczna.

W każdej z tych sytuacji wyznacza się temperaturę wewnętrzną i zewnętrzną na ścianie chłodni oraz uwzględnia wpływ promieniowania słonecznego zmiennego na obwodzie chłodni.

R_8.1.6 Stany graniczne nośności

W tej części raportu opisuje się metodologię sprawdzania stanów granicznych nośności, definiując wielkości, które są miarą bezpieczeństwa konstrukcji. Rozważa się dwa stany graniczne: stateczność oraz stan graniczny nośności przekrojów powłoki.

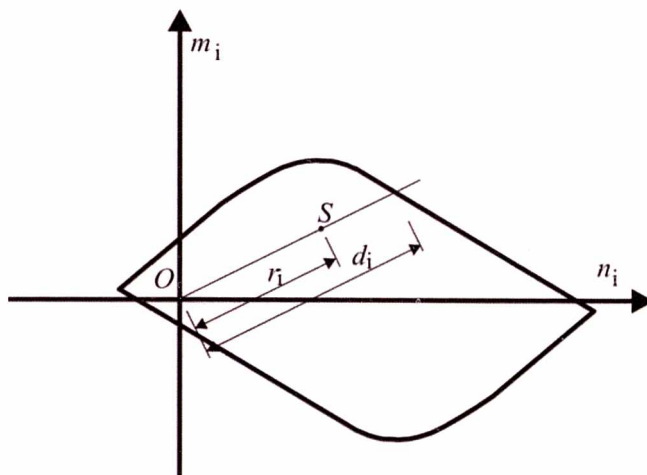
W pierwszym z wymienionych stanów granicznych rozwiązuje się zagadnienie stateczności początkowej. Wyznacza się mnożnik obciążenia krytycznego λ , który jest liczbową miarą bezpieczeństwa chłodni ze względu na utratę stateczności.

W odniesieniu do stanu granicznej nośności przekrojów powłoki chłodni rozwiązuje się zagadnienie brzegowe i wyznacza siły wewnętrzne w powłoce. Służą one do wyznaczenia sił miarodajnych uwzględniających odpowiednie sumowanie sił wewnętrznych na rozważanych kierunkach. Na tej podstawie sprawdza się nośność przekrojów powłoki chłodni. W dalszej części (por. opis do R_8.4.2) na podstawie [Kasprzak i inni, 2012] podano praktyczny sposób przedstawienia wyników obliczeń w postaci planu warstwicowego współczynnika wyężenia.

Na podstawie informacji o wewnętrznych siłach miarodajnych w odniesieniu do zadanych parametrów przekroju wyznacza się powierzchnie nośności granicznej przekroju z uwzględnieniem miarodajnych wartości momentu i siły (m_i, n_i – gdzie $i = 1, 2$) niezależnie w kierunkach: południkowym i równoleżnikowym. Przykładowy plan warstwicowy współczynnika wyężenia materiału na rozwinięciu powłoki chłodni pokazano w na rys. 2.12 oraz w pracy [Kasprzak i inni, 2012], gdzie podano również metodologię wyznaczania lokalnego współczynnika wyężenia. Przyjęto, że stan wyężenia przekroju w kierunku południkowym lub równoleżnikowym określa się na podstawie wartości sił miarodajnych (m_i, n_i), które definiują punkt S (rys. 2.11). Lokalny współczynnik wyężenia e_i w dowolnym punkcie powłoki definiuje się jako iloraz promienia wektora r_i punktu S i promienia wektora punktu przecięcia prostej przechodzącej przez punkty S i O z linią nośności granicznej:

$$e_i = \frac{r_i}{d_i}, \quad i = 1, 2. \quad (2.1)$$

Jeśli wartość lokalnego współczynnika wyężenia $e_i > 1,0$, to w rozpatrywanym punkcie nośność przekroju jest mniejsza od wymaganej.



Rys. 2.11. Powierzchnia graniczna na płaszczyźnie wyznaczonej siłami wewnętrznymi n_i , m_i .
Geometryczna interpretacja lokalnego współczynnika wyężenia

R_8.2. Model dyskretny MES

Współcześnie zagadnienie brzegowe i zagadnienia stateczności początkowej rozwiązuje się z zastosowaniem modelu MES. W opisie modelu należy określić program komputerowy oraz podać opis elementów skończonych zastosowanych w modelowaniu elementów konstrukcyjnych chłodni. W kształtowaniu modelu i wymiarów elementów należy uwzględnić wymaganie, aby np. południkowe wymiary elementów odpowiadały zmianom zbrojenia na wysokości powłoki oraz spełnić kinematyczne warunki brzegowe. Na rysunku przedstawia się siatkę podziału na elementy. Przyjęty podział na elementy powinno się wcześniej przetestować, tak aby zapewnić otrzymanie wiarygodnych wyników.

R_8.3. Kombinacje obciążeń

W tej części raportu należy przedstawić kombinacje obciążeń uwzględnione w obliczeniach.

R_8.3.1. Schematy obciążeń

Obliczenia powłoki chłodni poddaje się następującym oddziaływaniom:

- oddziaływania stałe
 - G_1 – ciężar własny,
 - G_2 – skurcz,
- oddziaływania zmienne
 - Q_W – oddziaływanie wiatru (łącznie parcie i ssanie),
 - Q_{T1} – oddziaływanie termiczne (chłodnia użytkowana zimą),
 - Q_{T2} – oddziaływanie termiczne (chłodnia użytkowana latem),
 - Q_{T3} – oddziaływanie termiczne (zimowa przerwa technologiczna),
 - Q_{TS} – oddziaływanie termiczne spowodowane promieniowaniem słonecznym.

R_8.3.2. Stateczność konstrukcji

W obliczaniu mnożnika obciążenia krytycznego λ korzysta się z charakterystycznych wartości obciążeń ciężarem własnym i wiatrem. Obciążenia termiczne nie mają istotnego wpływu na wartość obciążenia krytycznego.

R_8.3.3. Nośność przekrojów

Do wyznaczenia nośności przekroju niezbędne jest przyjęcie:

- Częściowych współczynników oddziaływań i współczynników wartości kombinacyjnych na podstawie danych z aktualnej normy. W przypadku obciążeń termicznych przyjmuje się obecnie wartość współczynnika do kombinacji równą 1,0 (proponuje to również niemiecka instrukcja [N 1]) zamiast podawanej w normach [N 21] i [N 24] wartości 1,5.

- Sytuacji obliczeniowych, które są kombinacją sił wewnętrznych.
- Uwzględniając kombinacje obciążeń, wyznacza się obwiednie sił wewnętrznych w analizowanych elementach konstrukcyjnych chłodni.

R_8.4. Wyniki obliczeń

R_8.4.1. Mnożnik obciążenia krytycznego

Mnożnik obciążenia krytycznego λ wyznacza się z uwzględnieniem najbardziej niekorzystnego kierunku obciążenia wiatrem. Jego wartość powinna być większa od 5. Na tej podstawie stwierdza się czy analizowana chłodnia spełnia kryterium stateczności. Jeśli chłodnia jest zlokalizowana wśród innych wysokich obiektów, to biorąc pod uwagę obciążenie chłodni (ciężar własny i wiatr) uwzględnia się odpowiednie kombinacje obciążeń. Czytelność wyników obliczeń wzrasta, jeśli przedstawia się je tabelarycznie. Pomaga w tym również załączenie rysunków formy czy form wyboczenia.

Początkowo projektowane chłodnie charakteryzowały się wartością mnożnika obciążenia krytycznego $\lambda < 5$, co było przyczyną kilku katastrof na świecie. W pracy [Gigiel, Kałuża, 1993] analizowano jak zwiększenie grubości konkretnej powłoki chłodni prowadzi do zwiększenia mnożnika obciążenia krytycznego λ do wartości > 5 .

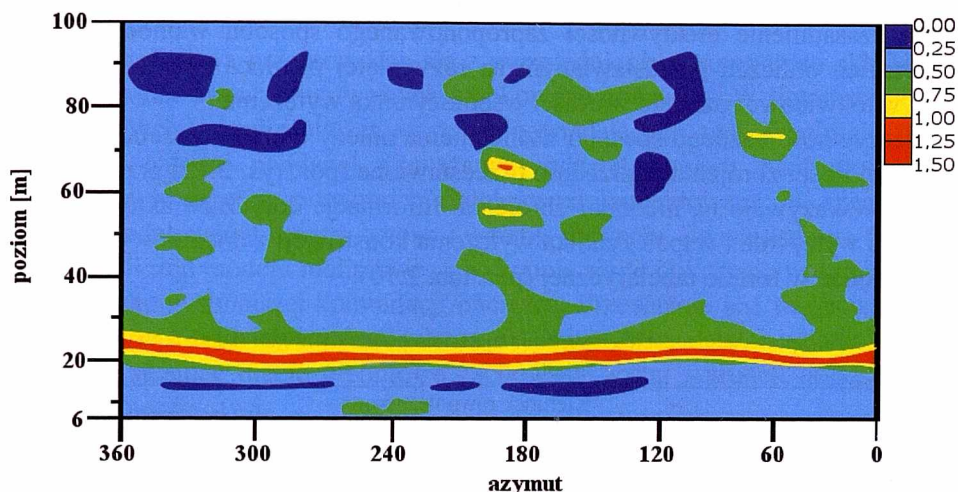
R_8.4.2. Współczynnik wyężenia na podstawie obwiedni sił wewnętrznych w powłoce

W punkcie 8.1.6 raportu podaje się algorytm wyznaczania lokalnego współczynnika wyężenia. Obliczenia wykonane według tego algorytmu umożliwiają wyznaczenie wartości współczynnika wyężenia w rozważanych kierunkach działania wiatru. W przypadku powłoki chłodni otrzymane wyniki można przedstawiać na rozwiniętej powłoce w formie planów warstwicznych maksymalnych wartości współczynnika wyężenia w poszczególnych punktach powłoki chłodni. Oddzielne rysunki dotyczą wyników odnoszących się do kierunków: równoleżnikowego i południkowego.

Otrzymane mapy rozkładów wartości współczynnika wyężenia w odniesieniu do analizowanych kierunków wiatru poddaje się dalszej analizie. Jeśli w jakimś obszarze wartości tego współczynnika są większe od jedności, w tym obszarze został przekroczony stan graniczny nośności. Na podstawie obwiedni wartości współczynnika wyę-

zenia (rozpatruje się wówczas łącznie wszystkie mapy rozkładów) można otrzymać końcową mapę rozkładu wartości współczynnika wyężenia na konstrukcji. Na mapie tej widoczne są obszary przekroczenia nośności granicznej. Mapa taka informuje również o obszarach z wystarczającą ilością zbrojenia ($e \leq 1$) i obszarach, w których jest niewystarczająca ilość zbrojenia ($e > 1$).

Przykładowo, na rysunku 2.12, przekroczenia nośności na kierunku obwodowym występują: w pasie pomiędzy poziomami 19,0–25,0 m ($e_{\max} = 1,35$), a także lokalnie pomiędzy poziomami 62,0–64,0 m oraz azymutami 182–192° ($e_{\max} = 1,10$).



Rys. 2.12. Przykładowy plan warstwicowy współczynnika wyężenia materiału na rozwinęciu powłoki chłodni (kierunek obwodowy)

R_8.4.3. Współczynnik wyężenia na podstawie obwiedni sił wewnętrznych w słupach

W tej części raportu wyznacza się obwiednie sił osiowych w słupach i momentów im towarzyszących. Następnie oblicza się współczynniki wyężenia w słupach i przedstawia wyniki ich analizy. Jeśli występują obszary, w których są przekroczone stany graniczne nośności, to obszary te opisuje się podając ich lokalizację.

R_8.4.4. Wyznaczenie wielkości dodatkowego ekwiwalentnego zbrojenia i sprawdzenie wyężenia konstrukcji z ekwiwalentnym dodatkowym zbrojeniem

Na podstawie wyników obliczeń przedstawionych w poprzednich rozdziałach raportu ocenia się możliwość wystąpienia przeciążenia konstrukcji (obszary, w których współczynnik wyężenia jest większy od 1,0). W tych obszarach niezbędne jest wzmocnienie konstrukcji.

W raporcie przedstawia się propozycję dotyczącą wzmocnienia konstrukcji. Można to wzmocnienie uzyskać za pomocą:

- dodatkowego zbrojenia,
- sprężenia,
- zastosowania taśm kompozytowych z włóknami węglowymi lub mat wzmacniających itp.

Propozycja wzmocnienia podawana w raporcie powinna być alternatywna, a w przypadku proponowania wzmocnień niekonwencjonalnych powinna zawierać odpowiednie uzasadnienie (w tym również teoretyczne) zastosowania proponowanego rozwiązania.

Wykonane obliczenia – analogiczne do przedstawionych wcześniej – powinny stanowić uzasadnienie efektywności zaproponowanego sposobu wzmocnienia. Wynikiem takich obliczeń przedstawianym na rozwiniętej powłoce chłodni powinny być plany warstwiczne rozkładu wartości współczynnika wyężenia.

Efektywność każdego sposobu wzmocnienia należy odnieść (przeliczyć) do ekwiwalentnej ilości zbrojenia. Uprzednio przedstawione (por. rys. 2.12) przeciążenie konstrukcji wskazywało na niedobór zbrojenia. Informacje dotyczące aktualnego współczynnika wyężenia i współczynnika wyężenia konstrukcji z dodatkowym zbrojeniem można podać w formie tabelarycznej (por. tab. 2.10).

Tabela 2.10. Sprawdzenie stopnia wyężenia materiału powłoki chłodni z dodatkowym zbrojeniem

Kierunek równoleżnikowy				
Poziom [m]	Istniejące zbrojenie poziome zewnętrzne [cm ² /m]	Współczynnik wyężenia stan aktualny	Dodatkowe zbrojenie poziome zewnętrzne [cm ² /m]	Współczynnik wyężenia – z dodatkowym zbrojeniem
Kierunek południkowy				
Poziom [m]	Istniejące zbrojenie pionowe zewnętrzne [cm ² /m]	Współczynnik wyężenia stan aktualny	Dodatkowe zbrojenie pionowe zewnętrzne [cm ² /m]	Współczynnik wyężenia – z dodatkowym zbrojeniem

W tej części raportu sporządza się również odpowiednie rysunki zbrojenia istniejącego oraz zbrojenia dodatkowego stanowiącego wzmocnienie.

W podsumowaniu zapisów ujętych w rozdziale 8 raportu, a dotyczących obliczeń statyczno-wytrzymałościowych warto zauważyć, że najczęściej w tego rodzaju opracowaniach podaje się wykresy sił wewnętrznych, brakuje zaś syntetycznego ujęcia wyników. Zaleca się więc przyjęcie opisanego sposobu przedstawiania wyników obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, tzn. przedstawianie syntezy w formie pla-

nów warstwicznych wartości współczynnika wyężenia na rozwiniętej powłoce chłodni.

R_8.5. Analiza nieliniowa konstrukcji

Analizę nieliniową konstrukcji chłodni wykonuje się w celu pozyskania pełniejszych informacji umożliwiających przeprowadzenie pogłębionej analizy bezpieczeństwa chłodni. Może się bowiem okazać, że właśnie ta analiza pozwoli uniknąć kosztownego wzmocnienia lub umożliwi obniżenie kosztu wzmocnienia z zachowaniem wymaganego poziomu bezpieczeństwa. Na podstawie doświadczenia własnego autor zachęca do tego, aby wówczas, gdy jest to możliwe przeprowadzać analizę nieliniową konstrukcji chłodni.

Analizę nieliniową przeprowadza się z uwzględnieniem kompozytu składającego się z betonu oraz dwóch warstw dwukierunkowego zbrojenia. W literaturze brakuje dobrze opisanych modeli obliczeniowych odpowiadających zachowaniu się żelbetowej powłoki chłodni poddanej rozważanym oddziaływaniom, stąd modelowanie przedstawiane w raporcie powinno być dobrze udokumentowane. W szczególności dotyczy to modelowania warstw betonu i warstw zbrojenia. Ze względu na relatywnie długi czas obliczeń modelu nieliniowego wykonuje się te obliczenia w odniesieniu do jednej, najniekorzystniejszej kombinacji obciążeń. Przeważnie jest to obciążenie ciężarem własnym i oddziaływaniem wiatru. W opisie otrzymanych wyników należy wykazać, że stosując ujęcie nieliniowe zachowany został warunek dopuszczalnego poziomu bezpieczeństwa.

2.2.8. ROZDZIAŁY 9, 10, 11 RAPORTU

R_9. Ocena stanu technicznego. Rozdział 9 raportu zawiera syntetyczne przedstawienie stanu technicznego konstrukcji chłodni na podstawie wcześniejszych opracowań i na podstawie aktualnych badań z uwzględnieniem zaleceń ujętych w raportach wcześniejszych.

R_10. Zakres i technologia prac remontowych. W rozdziale 10 raportu należy podać zakres prac remontowych i opisać technologię ich wykonania. Niekiedy konieczne staje się rozłożenie remontu na etapy. Jeśli ze względów bezpieczeństwa chłodni jest to możliwe, to dostosowuje się prace remontowe do terminów planowych wyłączeń chłodni z eksploatacji. Sposób wykonania remontu albo wzmocnienia przedstawia się w ujęciu wariantowym. Niekiedy w sytuacjach dość znacznego wyężenia konstrukcji albo znacznego zniszczenia powłoki chłodni konieczne jest wykonanie remontu zabezpieczającego. W każdej prezentacji zakresu prac remontowych należy podać przedmiar robót. Na podstawie przeprowadzonych badań i korzystając z informacji zebranych i opisanych w raporcie, można oszacować ów przedmiar robót. Podstawą do określenia zakresu prac są wyniki obliczeń z rozdziału 8 raportu (stan wyężenia konstrukcji – przedstawiony na planach warstwicznych rozwinięcia chłodni) oraz

wyniki analizy stanu technicznego elementów konstrukcyjnych chłodni kominowej, a także oszacowania opisane w rozdziale R_4.6.

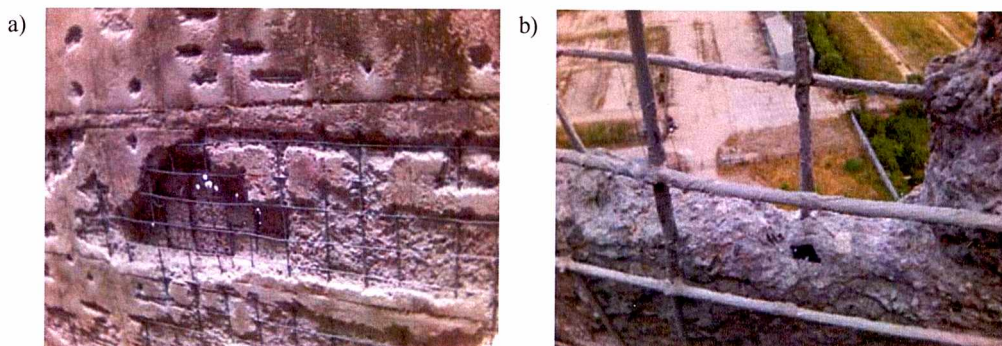
Zakres prac remontowych w zależności od stanu chłodni kominowej może być różny. W sytuacji bardzo dużej degradacji betonu może również obejmować wymianę betonu w wybranych obszarach (por. rys. 2.13 i 2.14b), a także usunięcie odspojonego torkretu i wykonanie ponownego torkretowania znacznych powierzchni (por. rys. 2.13). Wymiany betonu, szczególnie na większych powierzchniach wymagają przeprowadzenia odpowiednich obliczeń i na ich podstawie ustalenia technologii robót. Określona musi być wielkość i usytuowanie miejsc, w których wykonywana będzie wymiana betonu, tak aby na każdym etapie remontu zachowane było bezpieczeństwo konstrukcji.



Rys. 2.13. Usunięty całkowicie zdegradowany beton oraz widoczny odspojony torkret narzucony podczas wcześniejszego remontu

Ilościowe oszacowanie powierzchni i głębokości degradacji betonu nie jest łatwe i dopiero po czyszczeniu strumieniowo-ciernym okazuje się, jaki zakres robót jest konieczny do wykonania. Przykładowo na rys. 2.14a pokazano, że beton jest zdegradowany na różną głębokość. Możliwość takiej degradacji o zróżnicowanej głębokości należy brać pod uwagę, przygotowując zakres prac remontowych. W tym przypadku w szacowaniu zakresu remontu pomocne będą badania materiałowe zestawione w rozdziale R_5. Niekiedy chłodnia wymaga wzmocnienia na znacznej

powierzchni. Na rysunku 2.15 pokazano wzmocnianie powłoki chłodni zbrojonym torkretem. Widoczne jest też, iż powierzchnia, na którą nakładane jest wzmocnienie musiała być odpowiednio przygotowana (usunięty musiał być zdegradowany beton, a odsłonięte zbrojenie musiało być zabezpieczone antykorozyjnie). Należy tu podkreślić, że wzmocnienia powierzchniowe muszą być zbrojone ze względu na występowanie w nowym torkrecie naprężeń skurczowych. Ze względu na zapewnienie współpracy z materiałem rodzimym wzmocnienia powierzchniowe powinny być połączone z materiałem rodzimym za pomocą łączników (kotew). Modelowanie powłoki chłodni z nową powłoką poprzez różne rozmieszczone łączniki przedstawione jest w rozdziale 4.2.

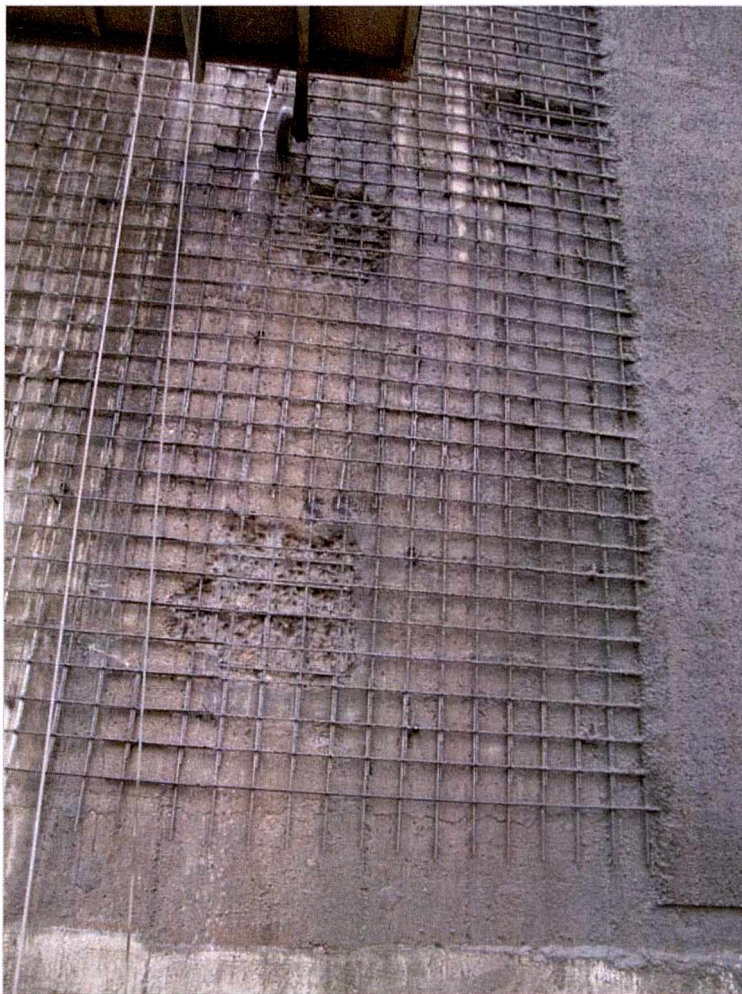


Rys. 2.14. Przykłady: a) degradacja betonu o różnej głębokości,
b) zabezpieczone zbrojenie w obszarze dokonywania wymiany betonu na pełną grubość powłoki

Omówione przykłady pokazują złożoność procesu określania zakresu prac koniecznych do wykonania podczas remontu chłodni kominowej. Zakres prac jest podstawą do określenia wspomnianego wcześniej przedmiaru robót, który najlepiej przedstawić w formie tabelarycznej. Przykład takiego ujęcia podano w tabeli 2.11, w której zestawienie powierzchni wzmocnienia nawiązuje do rys. 2.12. Ostatnia kolumna tabeli 2.11 informuje o objętości betonu wzmocnienia. W tabeli 2.12 z kolei podano opis nagłówek tabeli z zestawieniem prac remontowych w nawiązaniu do tabeli 2.11. Zestawienia takie posłużą następnie inwestorowi do wykonania odpowiednich obliczeń kosztorysowych.

Tabela 2.11. Zestawienie powierzchni wzmocnienia

Zakres wysokości [m]	Zakres obwodu [m]	Pole powierzchni [m ²]	Objętość [m ³]
19–25	na całym obwodzie		
62–64	pomiędzy azymutami 182–192°		
Razem			



Rys. 2.15. Przykład powierzchniowego wzmocnienia powłoki zbrojonym torkretem

Tabela 2.12. Zestawienie prac remontowych

Element konstrukcyjny oraz nazwa robót remontowych	Jednostka miary	Wielkość	% do naprawy	Przedmiar robót
Wykonanie nowej powłoki z torkretu zbrojonego siatką o grubości 6 cm: poziom 19–25 m zużycie, m ³ poziom 62–64 m zużycie, m ³	m ³			
Powierzchni zewnętrznej powłoki – usunięcie uszkodzonego torkretu, remont powierzchni	m ²			
...	...	...	...	...

Odnośnie do technologii robót podaje się wszystkie istotne elementy robót. W szczególności należy podać technologię robót nietypowych oraz technologię wzmocnienia. Bardzo dokładnego opisu wymagają prace z użyciem nowych materiałów. Należy tutaj w porozumieniu z producentem takich nietypowych i dotychczas nie stosowanych materiałów zapewnić odpowiednie szkolenie wykonawcy. W takich przypadkach wymagane jest współdziałanie producenta, wykonawcy i inwestora w celu zapewnienia dobrej jakości wykonania i utrzymania wszystkich parametrów materiału oraz zapewnienia ważności gwarancji producenta i wykonawcy.

W zależności od życzenia zleceniodawcy należy na podstawie zestawienia prac niezbędnych do wykonania przygotować zestawienie materiałów przeznaczonych do remontu chłodni. Te informacje również najlepiej jest przedstawić tabelarycznie, podając proponowane materiały różnych producentów. Materiały zestawia się odnosząc je do kolejnych etapów uwzględniając ich zużycie i ceny jednostkowe jak to podano w tabeli 2.13. W drugim wierszu opisano przykładowe prace. Opcjonalnie może być też podany szacunkowy koszt robót remontowych (na podstawie obmiaru robót według odpowiednich tabel).

Tabela 2.13. Zestawienie materiałów przeznaczonych do remontu chłodni

Prace remontowe	Proponowane materiały	Zużycie	Cena jednostkowa
Przy reprofilacji ręcznej: • renowacja zbrojenia • remont powłoki			
...	...	...	...

W opisie dotyczącym wykonywania remontu należy zwrócić uwagę na zapewnienie odpowiedniej jakości wykonawstwa, aby był on zgodny ze stosowanymi procedurami i zasadami (por. opisy w [Runkiewicz, 2011]). Stosowanie właściwej organizacji pracy oraz uzyskanie wysokiej jakości robót mogą zapewnić firmy wykonawcze legitymujące się odpowiednimi certyfikatami zgodności z normami ISO. W procedurze przetargowej na wykonanie remontu chłodni powinno się wymagać doświadczenia firmy w realizacji prac remontowych na chłodniach kominowych.

R_11. Podsumowanie i wnioski

W rozdziale 11 raportu, należy umieszczać jednoznaczne stwierdzenia i określić zgodnie z przepisami okres bezpiecznego dalszego eksploataowania chłodni kominowej. Określa się również datę wykonania koniecznego następnego przeglądu.

Jednoznaczne stwierdzenia muszą wynikać z przeprowadzonych badań, a w szczególności badań materiałowych oraz analiz statyczno-wytrzymałościowych dotyczących stateczności i warunku stanu nośności granicznej powłoki chłodni i wszystkich analizowanych elementów konstrukcyjnych chłodni.

2.3. ZALECENIA I UWAGI DOTYCZĄCE RAPORTU ORAZ UWAGI ZWIĄZANE Z EKSPLOATACJĄ CHŁODNI

Zalecenia i uwagi dotyczące zasad wykonywania oceny stanu technicznego

1. Każdą chłodnię kominową należy po pewnym, początkowym okresie eksploatacji poddać szczegółowym badaniom, których wyniki należy przedstawić w raporcie.

2. Zakres kolejnych badań określających stan techniczny chłodni powinien wynikać z zasad ogólnych wykonywania takich prac oraz odnosić się do wniosków z poprzednich ocen ujętych w odpowiednich raportach. W kolejnych badaniach należy przede wszystkim ocenić zmiany występujące w stanie technicznym chłodni w stosunku do stanów występujących na początku eksploatacji oraz w czasie opracowywania kolejnych raportów z badań stanu technicznego chłodni. Duże znaczenie mają tu wyniki badań chemicznych i wytrzymałościowych. Pozwalają bowiem na oszacowanie zmiany wartości badanych parametrów w czasie. Niekiedy występuje konieczność dokładniejszego zbadania lokalnych właściwości materiałów z powodu zauważenia, iż właściwości te są różne w różnych obszarach. Ważne informacje uzyskuje się też podczas badania geometrii chłodni. Wszystkie te informacje są następnie wykorzystywane w obliczeniach.

3. W przypadkach wątpliwych potrzebny zakres badań powinni określić eksperci zewnętrzni w stosunku do właściciela chłodni.

4. Jeśli w odniesieniu do danej chłodni nie przeprowadzano kompleksowej analizy jej stanu technicznego, to należy taką analizę wykonać. Po wielu latach eksploatacji przeprowadzanie tylko powierzchniowych oględzin i brak dokładnych badań materiałowych mogą doprowadzić do wystąpienia awarii chłodni. Z doświadczenia autora wynika, iż nawet w wizualnie dobrze ocenianej chłodni może występować znacznie zdegradowany beton, a zewnętrzne powłoki ochronne, albo beton nałożony podczas naprawy mogą skutecznie maskować występowanie skorodowanego zbrojenia i zdegradowanego rodzimego betonu.

5. Jeśli w przeszłości chłodnia była w relatywnie złym stanie, a ostatnia ocena stanu technicznego chłodni miała charakter opracowania dość ogólnego, to planując wykonanie kolejnej oceny, należy odpowiednio przygotować jej zakres. Nie można bowiem uszczuplać jej zakresu np. ze względów finansowych.

6. Chociaż oceny stanu technicznego chłodni dokumentowane raportami wykonywane przez różne zespoły nie będą takie same, to jednak sposób przedstawiania wyników badań i analiz powinien być podobny w takim stopniu, aby można było odpowiednio wielkości porównywać oraz porównać metody pozyskania wyników badań.

7. Wykonanie oceny stanu technicznego chłodni należy powierzać wiarygodnym podmiotom. Wiarygodność oraz kompetencje zespołów autorskich powinny być czyn-

nikiem decydującym przy wyborze wykonawcy. Zauważa się obecnie tendencję do zmniejszania zakresu prac ujętych w ocenie stanu technicznego (np. znaczne zmniejszanie liczby próbek, co prowadzi do zgrubnego i zazwyczaj zaniżonego określenia właściwości materiałowych). Autorzy takich ocen stanu technicznego najczęściej zdają sobie sprawę z mniejszej wiarygodności wyników i powiększają zakres zalecanych prac remontowych. To zaś doprowadza do niepotrzebnego podnoszenia kosztów remontu.

8. W przypadkach wątpliwych co do zapewnienia jakości oceny stanu technicznego chłodni warto, aby zlecniodawca kierował ją do recenzji (weryfikacji). W ten sposób uniemożliwi się wykonawcom oferującym zbyt niską cenę, przez ograniczenie zakresu prac objętych oceną, doprowadzania do obniżenia jakości opracowania.

Zalecenia dotyczące oznaczeń na chłodni

1. Słupy chłodni powinny być ponumerowane zgodnie z zasadami podanymi w rozdziale 2.2 (R_2.1). Oznaczenia numerów słupów przyjęte w raporcie powinno się nanosić na słupy w sposób trwały.

2. Zapewne przygotowane w przyszłości *Wytyczne* w zakresie sposobu przeprowadzania i dokumentowania stanu technicznego chłodni kominowych wprowadzą trwałe oznaczenie powłoki chłodni. Obecnie warto przy wykonywaniu oceny stanu technicznego chłodni przewidzieć orientowanie rozważanych obszarów powłoki chłodni w nawiązaniu do numeracji słupów. Trwałe oznaczenie cykli betonowania powłoki chłodni, oznaczenie wysokości poszczególnych poziomów chłodni od strony wewnętrznej powinno być wprowadzane przy najbliższym jej postoju. Będzie ono na pewno pomocne w jednoznacznym opisywaniu konstrukcji chłodni w kolejnych jej badaniach. Zalecane oznaczenia pionów podano tu na rys. 2.6.

Zalecenia eksploatacyjne

1. Podczas eksploatacji chłodni należy w sposób ciągły monitorować stan elementów konstrukcyjnych chłodni wraz z okresowym przeprowadzeniem pomiarów geodezyjnych. Monitorowanie to umożliwia określenie obszarów, które należy obejmować bieżącymi remontami. Przede wszystkim, co pewien czas należy wykonywać gruntowne czyszczenie i renowację betonu chłodni. W szczególności dotyczyć to powinno słupów, korony chłodni, powierzchni zewnętrznej powłoki oraz górnej części powłoki wewnętrznej chłodni. Tego typu bieżące remonty należy wykonywać, gdy powłoka ochronna przestaje spełniać swą rolę i zaczyna się jej degradacja. Remonty te wykonuje się jako standardowe, według ogólnie znanych zasad.

2. Wykonanie remontu powierzchni wewnętrznej chłodni jest utrudnione ze względu na ciągłą pracę chłodni. Poniżej podano sposób przeprowadzenia remontu powierzchni wewnętrznej w krótkim, trzy tygodniowym okresie postoju. Postój taki nie musi być planowany. Remont tego typu traktuje się jako remont zabezpieczający. Jego celem jest zatrzymanie procesu degradacji. Obejmuje on następujące prace: oczyszczenie strumieniowo-cierne ścierniwem pomiedziowym części powłoki prze-

znaczonej do remontu zabezpieczającego, oczyszczenie i zabezpieczenie odsłoniętego zbrojenia oraz jego uzupełnienie (jeśli jest skorodowane). W przypadku wystąpienia lokalnych ubytków należy je reprofilować przez ręczne wypełnianie zaprawą lub lokalne torkretowanie (w zależności od wielkości obszaru). Zasadniczym etapem, który zabezpiecza na kilka lat zdegradowaną powierzchnię betonową, jest nałożenie szpachlówki elastycznej, grubości 3 mm. Jeśli jest to czasowo możliwe, to można szpachlówkę tę pokryć powłoką ochronną. Jeśli czas na to pozwala, to należy naprawić inne uszkodzenia. Dotyczy to np. przecieków oraz występowania głębokich uszkodzeń styków roboczych. W miejscach tych należy odkuć zdegradowany beton oraz oczyścić i zabezpieczyć odkryte zbrojenie. Następnie należy przeprowadzić ręczne uzupełnienie betonu zaprawą lub lokalne torkretowanie. Powierzchnie wyremontowane powinny być pokryte powłokami ochronnymi.

3. KLASYFIKACJA USZKODZEŃ CHŁODNI KOMINOWYCH

W rozdziale tym opisano nieprawidłowości, jakie mogą wystąpić w konstrukcji chłodni. Podobnie jak w pracy [Bień, 2010] posłużono się tu określeniem „uszkodzenie”, które rozumie się tutaj jako zespół wszelkich odstępstw stanu konstrukcji odbiegający od stanu projektowego. Opisuje się tu tylko te stany konstrukcji, które mają wpływ na jakość eksploatacji chłodni. Rozważa się dwa podstawowe stany konstrukcji:

- stan wykonawczy (łącznie z etapem projektowym),
- stan eksploatacyjny.

3.1. STAN WYKONAWCZY

Z doświadczeń autora wynika, że już w etapie wykonawczym mogą wystąpić uszkodzenia, które później będą wpływać na stan eksploatacyjny chłodni. Uszkodzenia te nazywa się zwykle wadami. Wynikają one z:

1. Błędów projektowych, np. posadowienia na zróżnicowanym gruncie (por. [Noakowski, 2010]).
2. Wykonania chłodni o geometrii innej niż założona w projekcie (pomiar geodezyjne potwierdzają, że występują odstępstwa rzędnych powierzchni powłoki chłodni od opisanej równaniem projektowanej hiperboloidy jednopowłokowej (por. rys. 2.9)).
3. Gorszej jakości wbudowanego betonu (stwierdza się niekiedy różnice w klasie betonu występującego w różnych strefach powłoki chłodni, co może być przyczyną zróżnicowanego stopnia wyężenia powłoki chłodni i doprowadza nawet do braku zapewnienia wystarczającej nośności w pewnych obszarach powłoki).
4. Niezachowania odpowiedniej technologii wykonawstwa (np. betonowanie w niskiej temperaturze bez stosowania odpowiednich dodatków, niewłaściwy montaż szalunków

a)

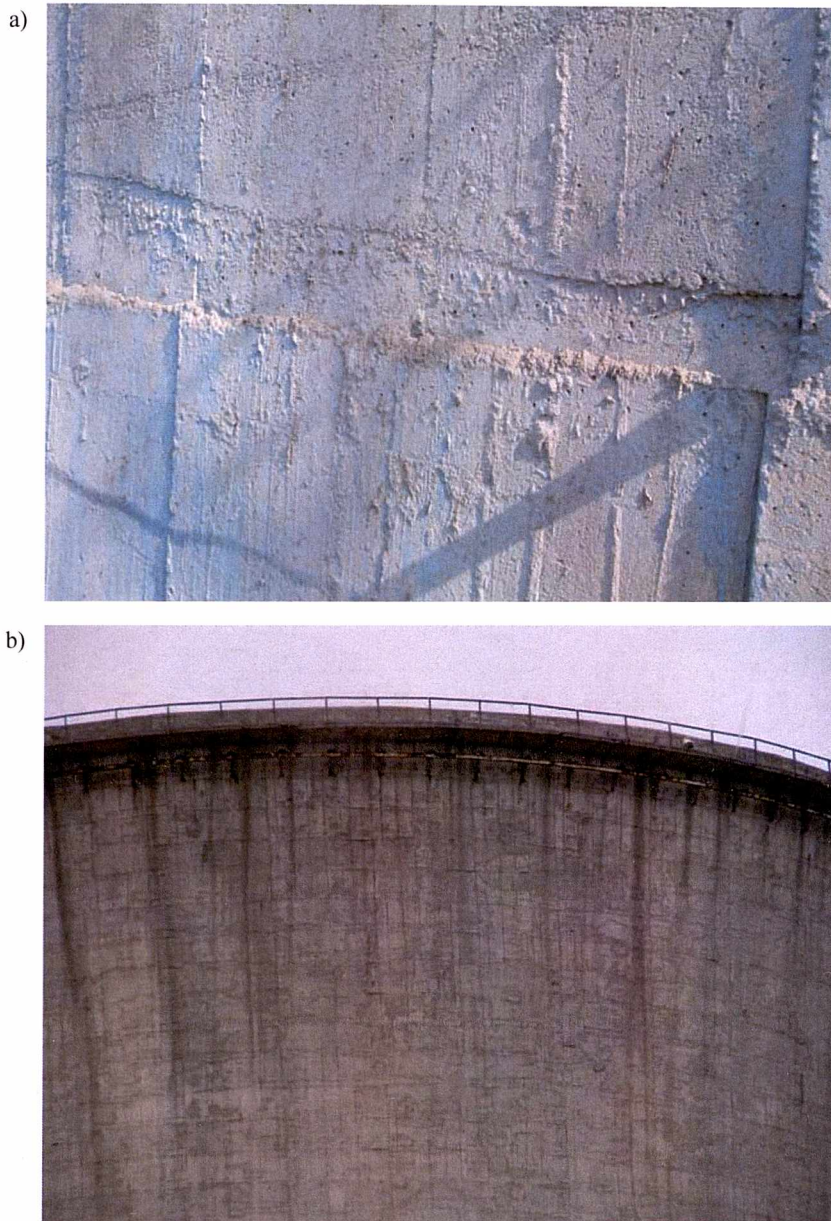


b)



Rys. 3.1. Skutek nieszczelnych szalunków pomiędzy cyklami betonowania (a),
uskoki pionowe na powierzchni zewnętrznej (b)

powodujący występowanie uskoków (por. rys. 3.1b i 3.2a), niedokładne wykańczanie szwów roboczych skutkujące koniecznością ich późniejszego zacierania (por. rys. 3.2b) i powstawania rdzawych nacieków – oznaczonych kołem – rys. 3.3a, b itp.).

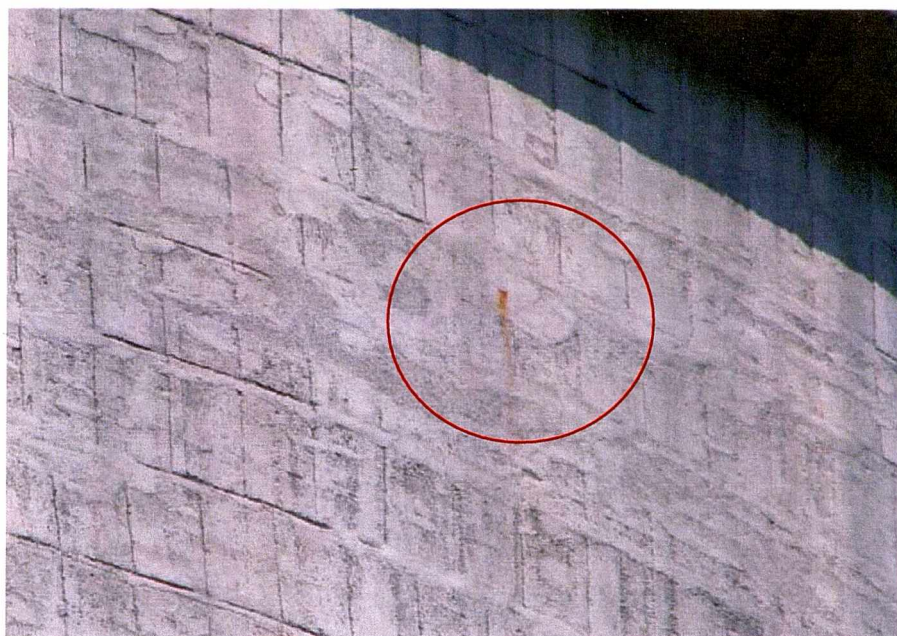


Rys. 3.2. Uskoki poziome, na których osadza się pył podczas remontu części górnej (a), zatarte szwy robocze (b)

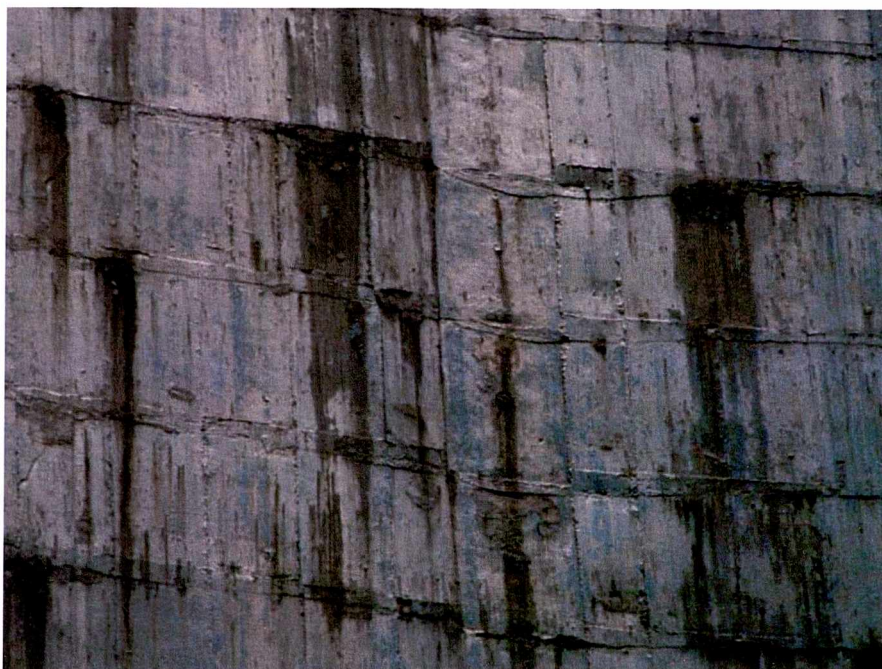
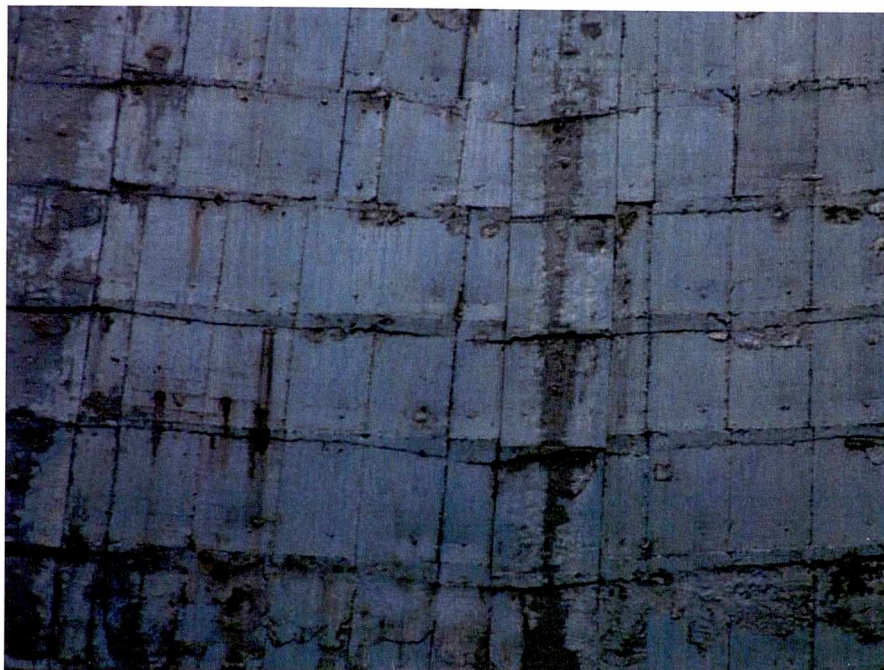
a)



b)



Rys. 3.3. Zatarłe szwy robocze i rdzawy naciek (a),
zbliżenie zatartych szwów roboczych i rdzawego nacieku (b)

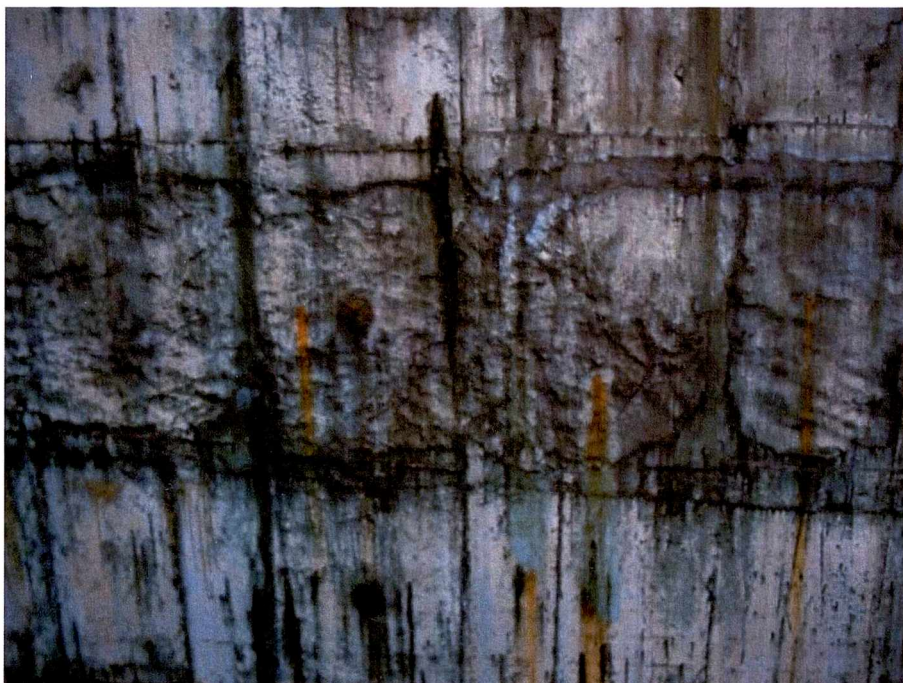


Rys. 3.4. Widoczne niedokładności geometryczne powłoki
od strony wewnętrznej wynikające ze źle zamontowanych szalunków

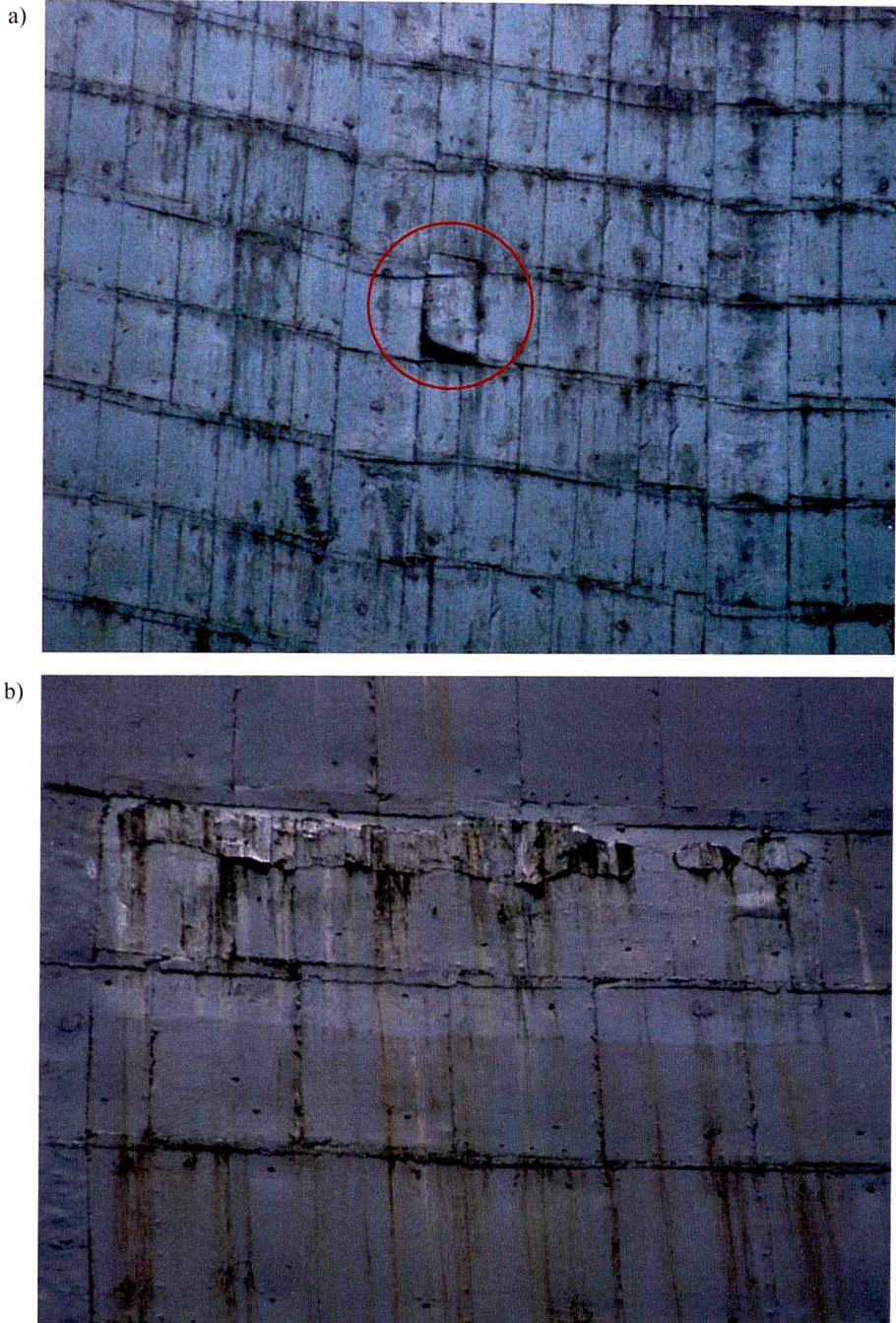
a)



b)



Rys. 3.5. Błędy wykonawstwa: a) za mała grubość powłoki, b) odsłonięte zbrojenie



Rys. 3.6. Błędy wykonawstwa wynikające ze słabo umocowanego szalunku (a),
z występowania nieciągłości między cyklami betonowania (b)

Sytuacja opisana w p. 2 może wynikać zarówno z błędnego wytyczania geodezyjnego powłoki, jak i z błędów wykonawstwa polegających na braku zapewnienia odpowiedniej sztywności szalunków powłoki, w wyniku czego w trakcie betonowania występują przesunięcia szalunków (por. rys. 3.4). Stwierdza się występowanie odstępstw grubości powłoki od wielkości projektowanych (por. rys. 3.5a – grubość powinna tu wynosić 14 cm), odkryte zbrojenie (por. rys. 3.5b), zbyt małą otulinę zbrojenia (por. rys. 3.16), źle rozmieszczone zbrojenie oraz nieciągłości betonu pomiędzy cyklami betonowania (por. rys. 3.6b) i widoczne na powierzchni linie szalunków (por. rys. 3.1).

Jakość wykonawstwa ma bardzo duży wpływ na stan chłodni w momencie oddania jej do eksploatacji. Stan ten rzutuje również na trwałość chłodni. Stąd wynika zalecenie, aby przy wykonywaniu oceny stanu technicznego dowolnej chłodni, nawet zrealizowanej przed wielu laty, zwrócić uwagę na jej stan powykonawczy.

3.2. STAN EKSPLOATACYJNY

W stanie eksploatacyjnym mogą wystąpić następujące uszkodzenia:

1. Ubytki betonu (rozdziela się ubytki liniowe i powierzchniowe, o małej oraz dużej długości i powierzchni – por. rys. 3.7–3.10).
2. Wycieki mokre i suche – (zazwyczaj występują wzdłuż styków betonowania) koloru białego i rdzawego (por. rys. 3.9b, 3.11 i 3.12)).
3. Rozwarte szczeliny i zarysowania o relatywnie małej albo dużej długości oraz różnicowanej szerokości: od mikropęknięć do pęknięć o nawet kilkumilimetrowej szerokości na betonie rodzimym (por. rys. 3.13) i na narzuconym podczas remontu torkrecie (por. rys. 3.14).

Widoczne na rysunku 3.14 rysy są ewidentnym skutkiem braku zbrojenia torkretu. Zbrojenie to powinno być połączone z materiałem rodzimym powłoki chłodni za pomocą kotew. W przeszłości niekiedy wykonywano wzmocnienia chłodni na dużych powierzchniach bez zbrojenia torkretu. W takim przypadku, ze względu na brak połączenia z materiałem rodzimym i bardzo liczne spękania, narzucony torkret nie spełnia swojej funkcji wzmacniającej.

4. Odsłonięte zbrojenie (o różnym stopniu skorodowania stali). Mogą to być pojedyncze odsłonięte pręty z brakiem otuliny na małej długości oraz odsłonięte pojedyncze pręty na dużej długości, a także małe lub duże powierzchnie z odsłoniętym zbrojeniem poziomym i pionowym. Niekiedy odsłonięcie pręta nawet na małej długości może być efektem odspojenia się betonu na znacznej powierzchni. Na rysunku 3.15 pokazano odsłonięte pręty, których otulina była zgodna z wymiarem otuliny projektowej.

a)



b)



Rys. 3.7. Przykłady: a) powierzchniowego złuszczenia betonu
b) powierzchniowego odspojenia betonu

a)



b)



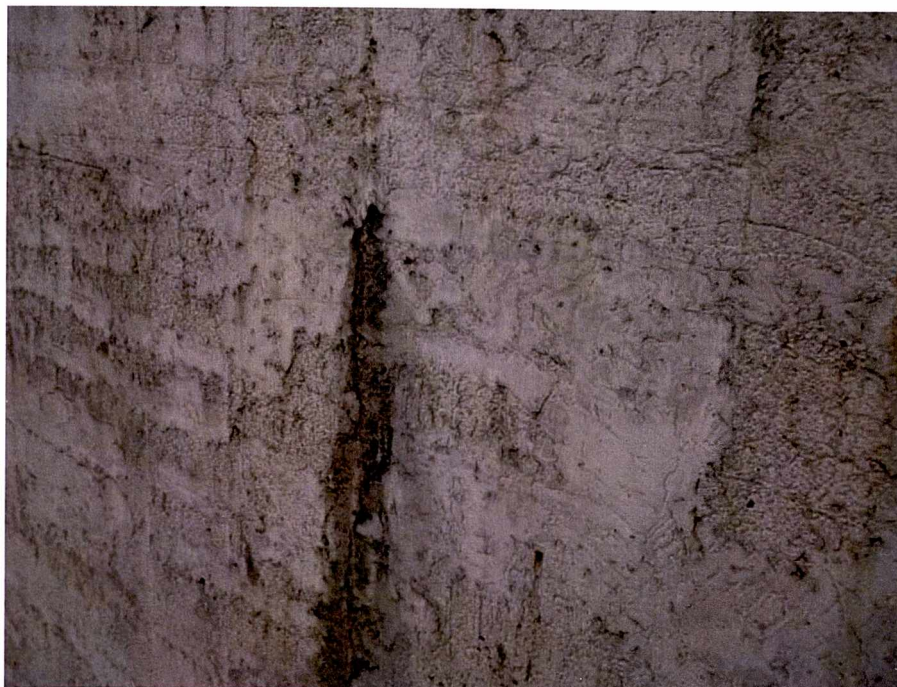
Rys. 3.8. Przykłady: a) powierzchniowego odspojenia i złuszczenia betonu,
b) liniowego odspojenia betonu (widoczny odsłonięty pręt zbrojeniowy na długości ok. 16 cm)



Rys. 3.9. Na powierzchni wewnętrznej chłodni: a) przykład wykonanej naprawy ubytków,
b) duży powierzchniowy ubytek betonu oraz białe nacieki węglanu wapnia

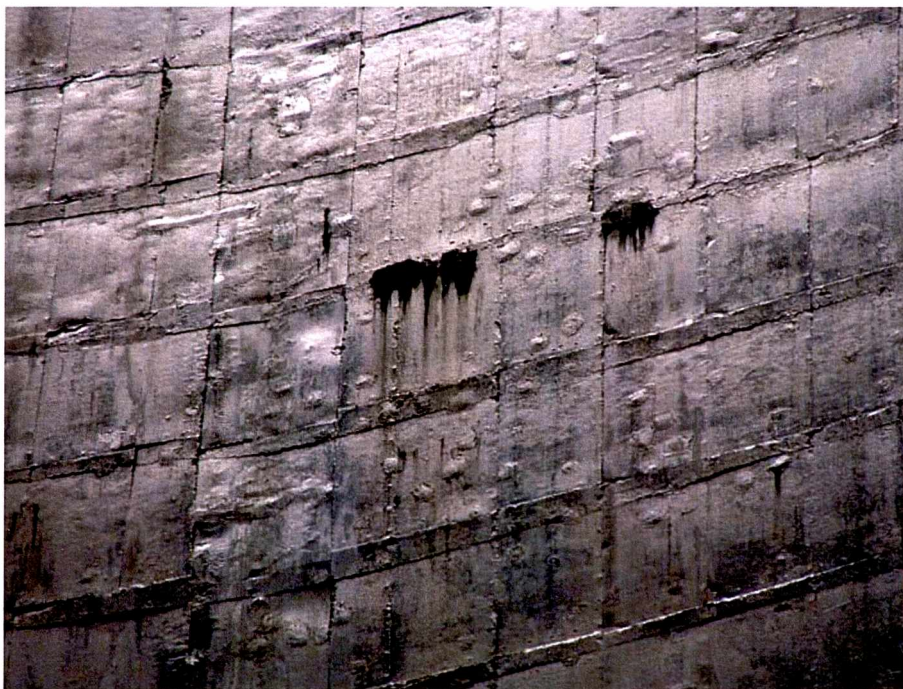


Rys. 3.10. Przykłady ubytków materiału rodzimego

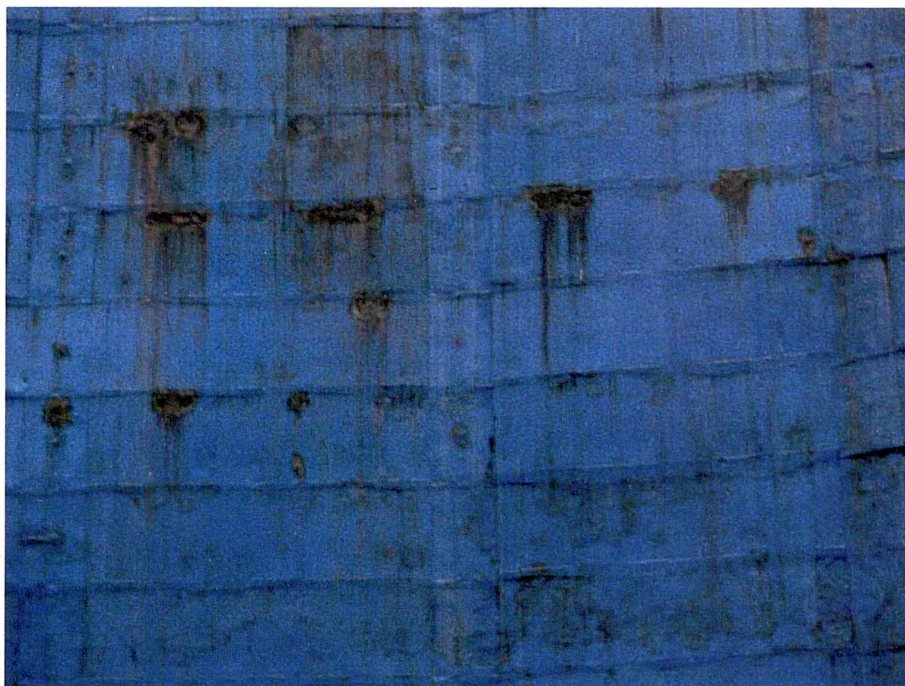


Rys. 3.11. Wyciek na powierzchni zewnętrznej powłoki chłodni (kolory: ciemny i jasny)

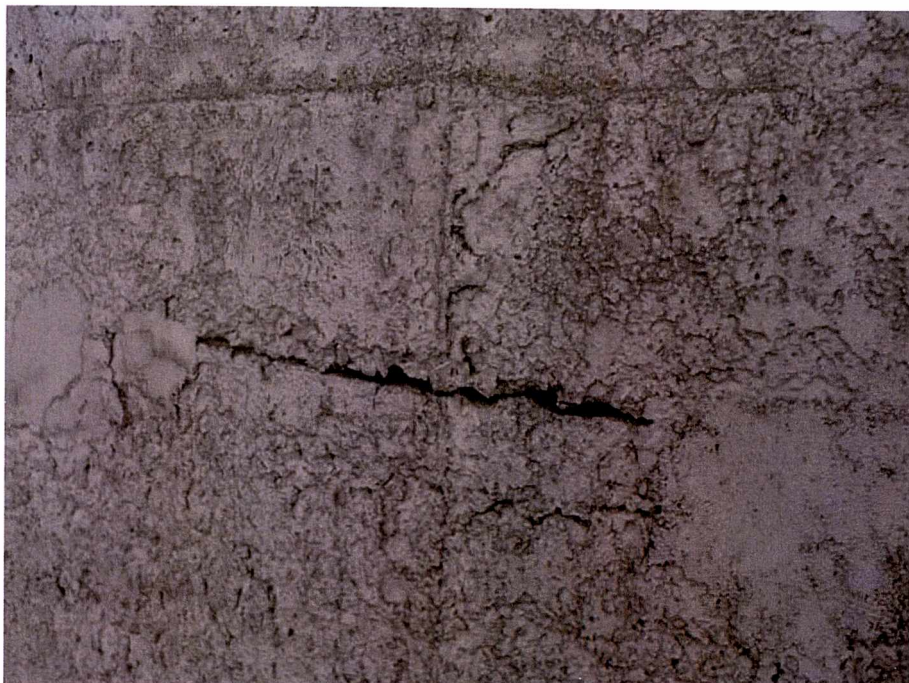
a)



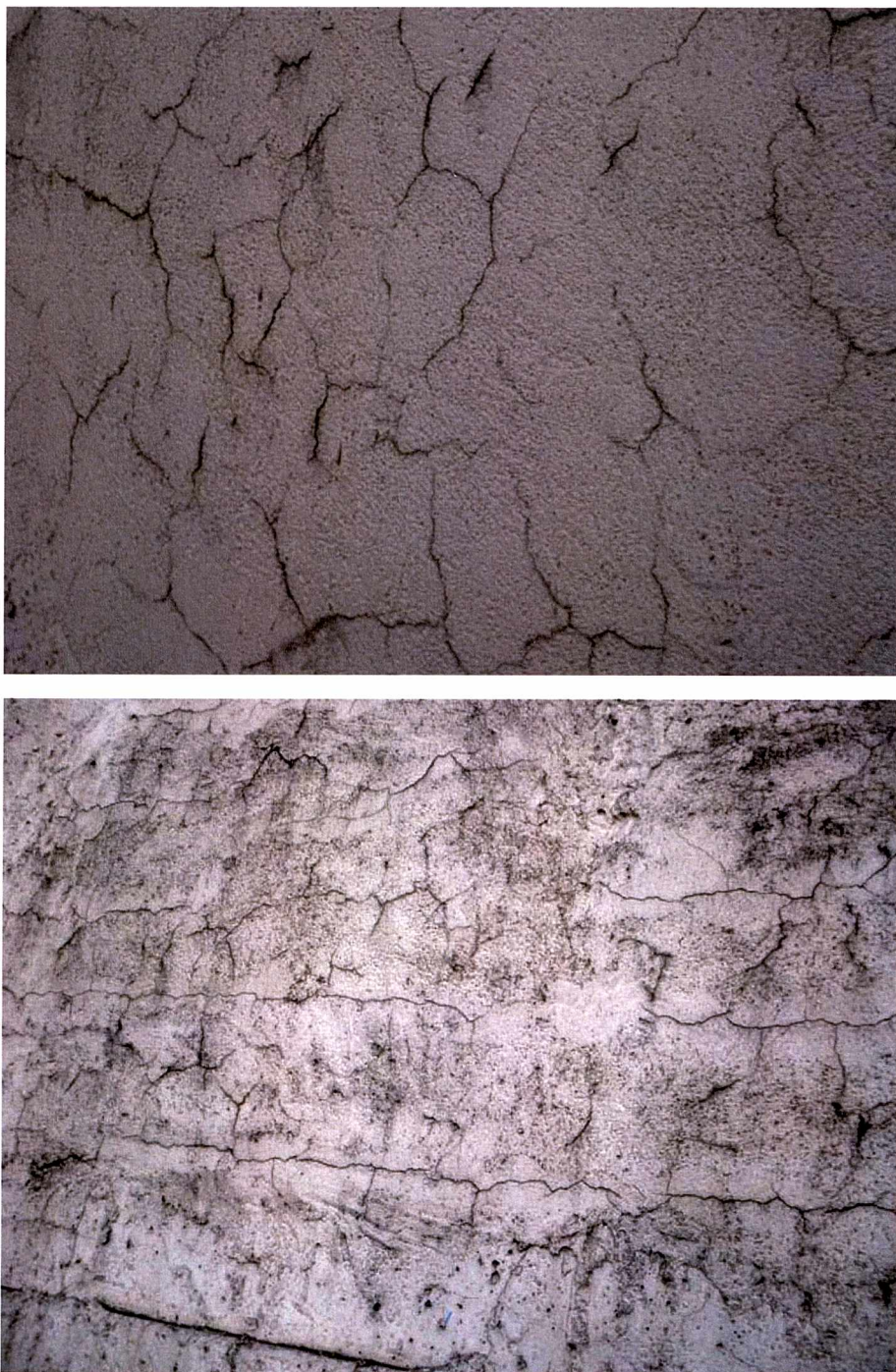
b)



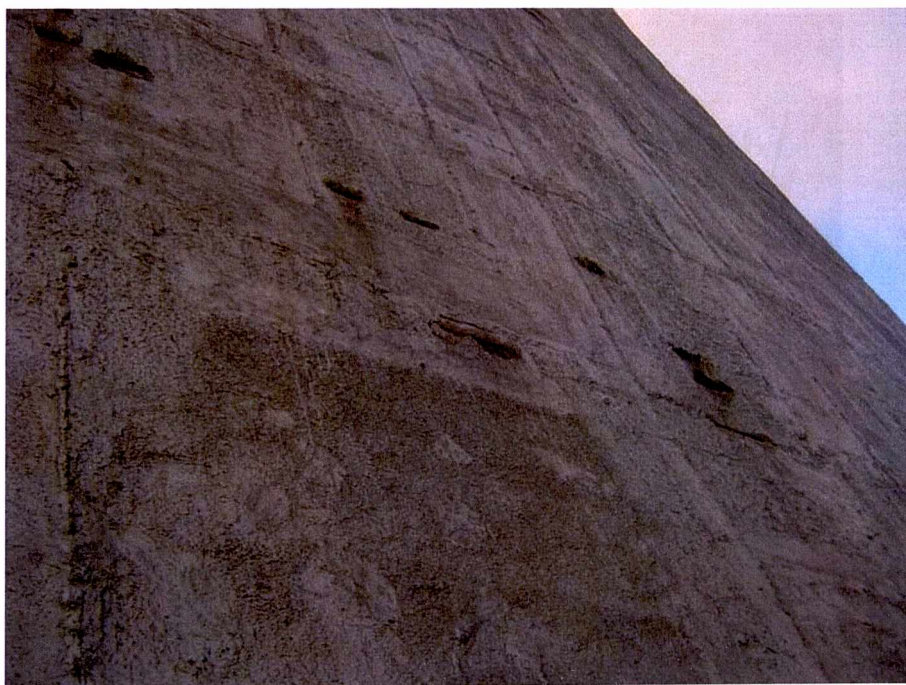
Rys. 3.12. Wycieki na powierzchni wewnętrznej powłoki chłodzi: a) koloru ciemnego, b) koloru rdzawego



Rys. 3.13. Spękania i wyraźne rysy na materiale rodzimym powłoki chłodni



Rys. 3.14. Spękania i wyraźne rysy na torkrecie narzuconym na powłokę chłodni



Rys. 3.15. Odslonięte zbrojenie powłoki chłodni



Rys. 3.16. Bardzo płytko osadzone zbrojenie (prawie bez otuliny)



Rys. 3.17. Odspojenia warstwy narzuconego torkretu

5. Za małą grubość otuliny, w wyniku czego następuje odspojenie się betonu, jego zarysowanie, a następnie odkrycie i korodowanie stali. Na rysunku 3.16 pokazano odkryte pręty w miejscach, gdzie brak było otuliny.

6. Pęknięcia i odspojenia na styku: torkret–beton rodzimy. Są one obserwowane wówczas, gdy torkret charakteryzował się innymi parametrami materiałowymi niż beton rodzimy albo technologia torkretowania nie była właściwa (por. rys. 3.17).



Rys. 3.18. Wykruszony beton z wnętrza słupa chłodni

7. Występowanie bardzo słabego betonu wewnątrz konstrukcji, np. pierścienia fundamentowego, albo słupów chłodni. Stan ten można stwierdzić np. podczas wykonywania remontu słupów, gdy stosunkowo łatwo wykrusza się beton z wnętrza słupa (por. rys. 3.18).

8. Występowanie zdegradowanego betonu. Pobrana próbka rdzeniowa wykazuje wyraźne spękania od powierzchni zewnętrznej do zbrojenia (por. rys. 3.19). Niekiedy

na skutek degradacji betonu otulina ulega odwarstwieniu. Często nie jest to widoczne i ujawnia się dopiero podczas pobierania próbki rdzeniowej. Na skutek odwarstwienia otuliny stal zbrojeniowa ulega korozji (por. rys. 3.20).



Rys. 3.19. Próbk rdzeniowa z wyraźnymi spękaniami



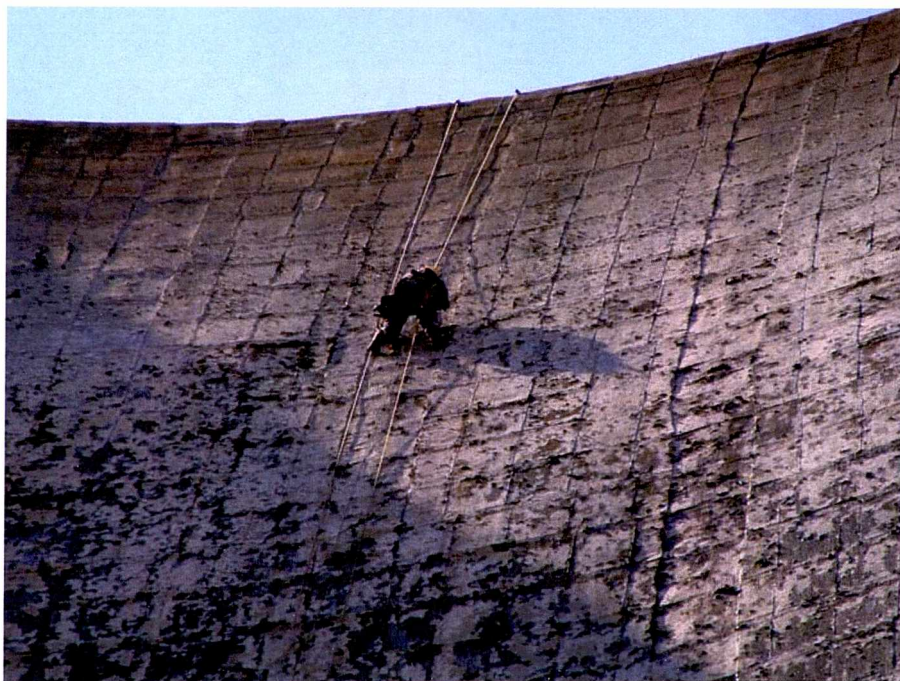
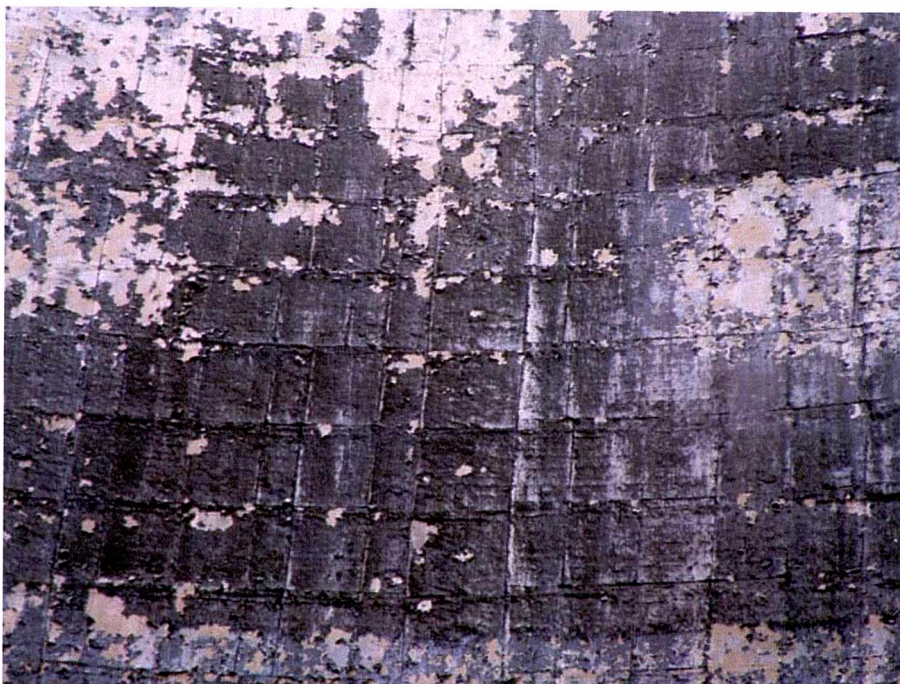
Rys. 3.20. Próbk rdzeniowa ze skorodowanym zbrojeniem i brakiem odwarstwionej otuliny

9. Występowanie tzw. „raków”, które najczęściej są widoczne w betonie pierścienia fundamentowego, czasami także w słupach oraz w powłoce chłodni.

10. Występowanie różnego rodzaju narośli, zwłaszcza w górnej strefie od strony wewnętrznej powłoki chłodni (por. rys. 3.21 i 3.22).



Rys. 3.21. Narośla, uszkodzenia i ubytki powłoki ochronnej chłodzi



Rys. 3.22. Narośla, uszkodzenia i ubytki powłoki ochronnej chłodni



Rys. 3.23. Narośla i uszkodzenia wewnętrznej powłoki ochronnej na odwiertach rdzeniowych pobranych do badań

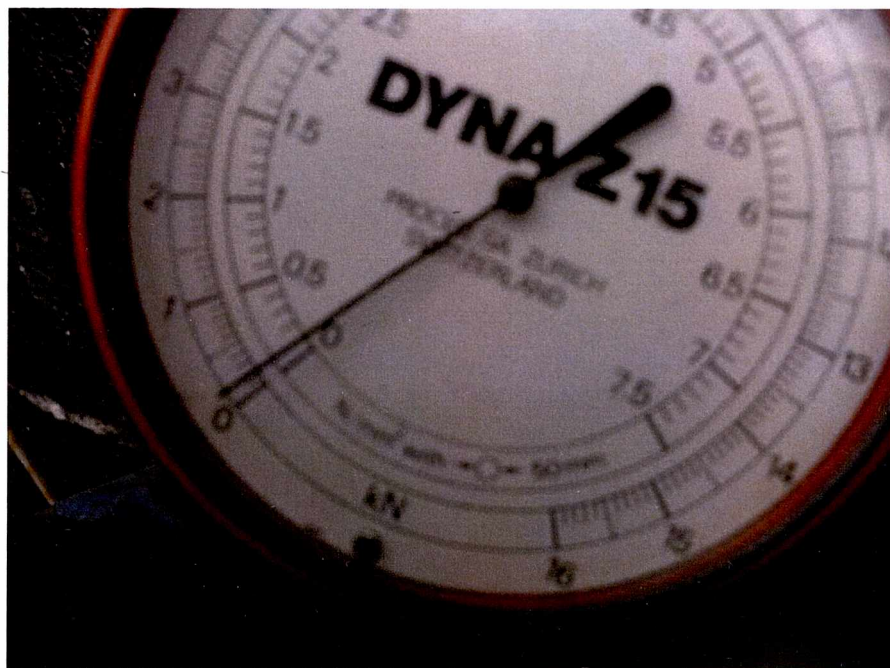
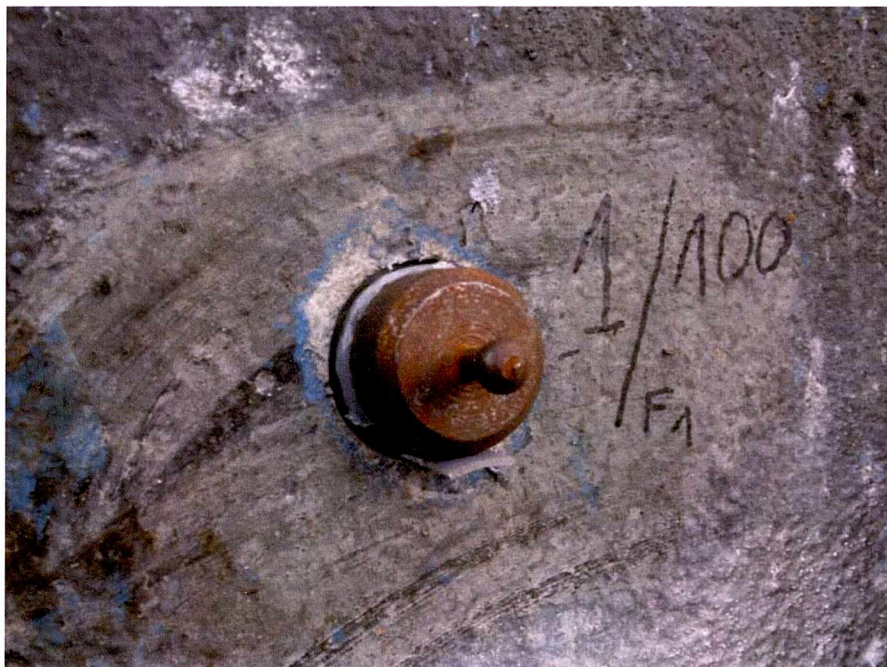
11. Uszkodzenia lub ubytki powłoki ochronnej, a także całkowite złuszczenia (obserwowane najczęściej w najwyższej strefie po wewnętrznej stronie powłoki chłodni – por. rys. 3.21, rys. 3.22 oraz rys. 3.23). O wielkości poziomu destrukcji świadczy bardzo mała siła odrywająca użyta podczas badań pull-off. Przykładowy krążek z badań pull-off, z opisanym uszkodzeniem pokazano na rys. 3.24. Na rysunkach 3.25 i 3.26 pokazano przykładowy sposób dokumentowania badań pull-off. W tym przypadku odnotowano bardzo małą siłę odrywającą.



Rys. 3.24. Krążek betonu z badań pull-off

12. Osobną grupę stanowią uszkodzenia wynikające z zastosowania błędnej technologii remontu (np. w górnym lub dolnym zakończeniu narzuconego torkretu wprowadzenie uskoku w linii poziomej, zastosowanie do prac remontowych (zwłaszcza podczas remontu dużych powierzchni) materiałów o parametrach niezgodnych z parametrami materiału rodzimego, nieusunięcie w wystarczającym stopniu zdegradowanego betonu i narzucenie na niego warstwy naprawczej itp.

Wymienione uszkodzenia należy dokładnie zinwentaryzować. Jeśli nie zostały one naprawione, to w następnych badaniach chłodni należy ocenić zmiany, jakie wystąpiły w rozmiarze i rodzaju uszkodzeń w stosunku do poprzednich badań. W opisie uszkodzeń wyróżnia się te z nich, które wpływają na bezpieczeństwo konstrukcji i uniemożliwiają dalsze bezpieczne eksploataowanie chłodni. Uszkodzenia te należy bezwzględnie naprawić. Sposób inwentaryzowania uszkodzeń został opisany w rozdziale 2.2 (R_4.1, punkt 2 „Dokumentowanie przeglądu”).



Rys. 3.25. Przykład dokumentowania badań pull-off
(przypadek zdegradowanej powierzchni wewnętrznej powłoki chłodni)



Rys. 3.26. Ciąg dalszy przykładu dokumentowania badań pull-off
(przypadek zdegradowanej powierzchni wewnętrznej powłoki chłodni)

4. MODELOWANIE POWŁOK CHŁODNI KOMINOWYCH

W dwóch kolejnych podrozdziałach opisano problemy dotyczące modelowania chłodni kominowych.

Zaproponowane podejście przedstawiono w sposób możliwie zwięzły, bez wchodzenia w szczegóły poszczególnych etapów przekształceń. Celem jest pokazanie możliwości modelowania powłoki chłodni jako ciała dwuskładnikowego, a następnie modelowania więzów łączących oba materiały. Taki ideowy sposób przedstawienia problemu przybliży autorom dokonującym oceny stanu technicznego chłodni kominowych istotę problemu współpracy dwóch materiałów, pokazuje różnorodność tej współpracy i różnorodność sposobów modelowania powłoki chłodni. Korzystając z komercyjnych programów MES, należy pamiętać o właściwym modelowaniu danego rozpatrywanego przypadku tak, aby możliwie wiernie odwzorować rzeczywistą konstrukcję chłodni kominowej w jej numeryczny model.

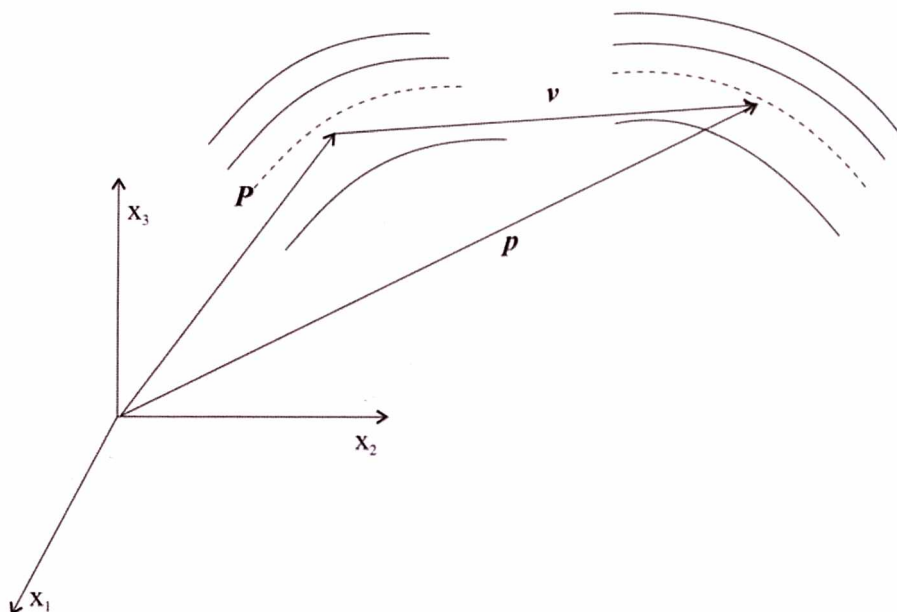
W rozdziale 4.1 rozważa się model konstrukcji powłoki chłodni z nałożoną na nią warstwą dodatkowego betonu (np. w formie dodatkowej powłoki na znacznym obszarze) przy całkowitym (powierzchniowym) zespoleniu obu materiałów. Omawia się problem z czysto formalnego aspektu, abstrahując od sposobu połączenia, ponieważ celem jest zbudowanie modelu powłoki składającej się z dwóch materiałów. Model ten będzie następnie wykorzystany w rozdziale 4.2. Jeśli wprowadzi się uproszczenie modelu złożonego z dwóch materiałów przez zastąpienie go modelem konstrukcji wykonanej z jednego materiału, to można stosować ten model w obliczeniach izotropowej powłoki chłodni w stadium projektowym.

W rozdziale 4.2 przedstawiono sposób modelowania powłoki chłodni w przypadku stosowania wymiany materiału w pewnych obszarach, a także przy wprowadzaniu wzmocnień liniowych (wzmocnień żebrami) i powierzchniowych (torkretowanie powierzchniowe). Wyremontowana albo wzmocniona w ten sposób powłoka chłodni może być analizowana jako ciało zbudowane z dwóch izotropowych materiałów: z materiału rodzimego i materiału żeber, wzmocnień powierzchniowych lub wzmocnień lokalnych. Współpracę dwóch różnych materiałów opisuje się poprzez przyjęcie odpowiednich więzów na powierzchniach brzegowych dwóch materiałów. Są to więzy

liniowe ciągłe albo dyskretne oraz powierzchniowe więzy modelowane za pomocą ortogonalnej siatki więzów liniowych.

4.1. POWŁOKA CHŁODNI MODELOWANA JAKO CIAŁO ZBUDOWANE Z DWÓCH IZOTROPOWYCH MATERIAŁÓW

Bezpośrednio sformułowanie problemu brzegowego dotyczącego powłoki chłodni kominowej przedstawiono na podstawie prac [Kutyłowski, 2004] oraz [Naghdi, 1963] i [Naghdi, 1972]. Wyprowadzone w pracy [Kutyłowski, 2004] równania izotropowego ciała sprężystego wykorzystano tu do sformułowania problemu brzegowego dwóch ciał izotropowych o różnych parametrach materiałowych. Zastosowano kierunkową teorię powłok. Użyto rachunku wariacyjnego (funkcjonału zupełnego Hu-Wazhizu [Rozin, 1978]).



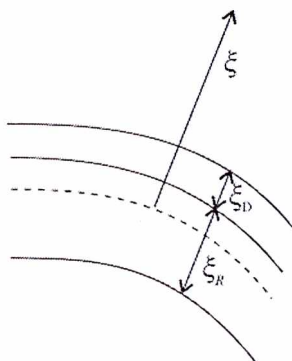
Rys. 4.1. Wektor położenia dowolnego punktu w konfiguracji początkowej i aktualnej

Jako podstawowy – w tym rozdziale – sformułowany został problem brzegowy ciała składającego się z dwóch izotropowych materiałów o pełnym zespoleniu (ciągłym i powierzchniowym) obu materiałów. W takim przypadku formalnie nie występuje problem modelowania sposobu połączenia tych materiałów. Rozwiązanie takiego

problemu brzegowego umożliwia kolejny etap (w rozdziale 4.2), nałożenie odpowiednich więzów na powierzchniach brzegowych pomiędzy dwoma materiałami i rozwiązanie tak postawionego problemu brzegowego z więzami modelującymi różne sposoby rzeczywistego połączenia dwóch materiałów pracujących w konstrukcji powłoki chłodni kominowej.

Obiektem rozważań jest ciało o objętości V . Do opisu geometrii ciała użyto globalnego kartezjańskiego układu współrzędnych oraz lokalnego konwekcyjnego układu współrzędnych. Rozpatrywane zagadnienie rozważane będzie na powierzchni podstawowej, wobec tego wszystkie niezbędne wielkości zostaną do niej sprowadzone. Na kolejnych rysunkach powierzchnia podstawowa jest zaznaczona linią przerywaną wewnątrz przekroju materiału rodzimego chłodni.

Na rysunku 4.1 opisano wektor położenia dowolnego punktu w konfiguracji początkowej oraz aktualnej wraz z wektorem przemieszczenia, a na rys. 4.2 opisano przyjęcie zakresu zmienności współrzędnej ξ . Przyjęto, że współrzędna ξ_R dotyczy geometrii materiału rodzimego, a współrzędna ξ_D – geometrii dodatkowego materiału nałożonego na materiał rodzimy. Funkcja ξ odniesiona do geometrii powłoki jest funkcją ciągłą, a rozróżnienie współrzędnych ξ_R i ξ_D pozwala na ustalenie przynależności poszczególnych punktów ciała do jednej z dwóch kategorii materiałów.



Rys. 4.2. Powierzchnia podstawowa
i zakres zmienności współrzędnej ξ po wysokości

Na rysunku 4.2 opisano zakres zmienności współrzędnych ξ_R i ξ_D dla przykładowego założenia, że grubość powłoki chłodni wynosi h , natomiast grubość dodatkowej powłoki $h_2 = h/3$. W takiej sytuacji łączna grubość powłoki chłodni z dodatkową powłoką wynosi $4/3h$. Powierzchnię podstawową przyjęto przykładowo w środku grubości powłoki składającej się z dwóch materiałów. Wtedy zakres zmienności ξ_R i ξ_D opisują nierówności:

$$-\frac{2}{3}h \leq \xi_R \leq \frac{1}{3}h \quad \text{oraz} \quad \frac{1}{3}h \leq \xi_D \leq \frac{2}{3}h$$

W dalszych rozważaniach wielkości dotyczące materiału rodzimego indeksowane będą literą R , natomiast dotyczące dodatkowego materiału literą D .

Formalizm przyporządkowania poszczególnych punktów materialnych, należących do poszczególnych materiałów, umożliwi potem sformułowanie problemu brzegowego z więzami opisującego powłokę chłodni z nałożonym na nią dodatkowym materiałem. Jeśli konstrukcja rozważana będzie jako całość, nie rozróżniając materiałów, to podane sformułowania dotyczyć będą materiału jednorodnego.

Posłużono się współrzędną ξ , pamiętając, że w zależności od tego czy rozpatrywamy punkt materialny należy do materiału rodzimego, czy do powłoki dodatkowej może to być ξ_R lub ξ_D , zgodnie z zależnością:

$$\xi = \{\xi_R, \xi_D\} \quad (4.1)$$

Wektor położenia dowolnego punktu w konfiguracji początkowej definiuje się jako:

$$P(\Theta^\alpha, \xi) = R(\Theta^\alpha) + A_3 \xi(\Theta^\alpha) \quad (4.2)$$

gdzie R – wektor położenia punktów na powierzchni podstawowej S , Θ^α – krzywoliniowe współrzędne na powierzchni S , natomiast A_3 – jednostkowy wektor normalny do powierzchni S .

Wektor położenia dowolnego punktu w konfiguracji aktualnej we współrzędnych konwekcyjnych zapisuje się zależnością:

$$p(\Theta^\alpha, \xi) = r(\Theta^\alpha) + \xi d(\Theta^\alpha) \quad (4.3)$$

gdzie

$$\begin{aligned} r &= R + u \\ d &= A_3 + \delta \\ \delta &= \gamma + \beta \end{aligned} \quad (4.4)$$

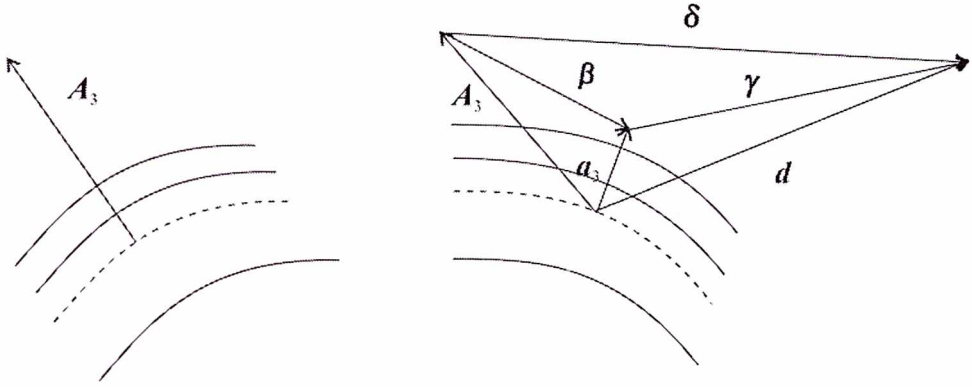
pokazano na rys. 4.3; u – wektor przemieszczenia powierzchni podstawowej S , γ – wektor deformacji poprzecznej, β – uogólniony kąt obrotu przekroju poprzecznego.

Po uwzględnieniu równania (4.4) można zapisać wektor p w postaci:

$$p(\Theta^\alpha, \xi) = R + u + \xi \delta + \xi A_3 \quad (4.5)$$

Wektor przemieszczenia dowolnego punktu przyjmuje postać:

$$v = p - P = u + \xi \delta \quad (4.6)$$



Rys. 4.3. Składowe stanu przemieszczenia

Formułując problem brzegowy, posłużono się pierwszą formą zupełnego funkcjonału Hu-Washizu:

$$\begin{aligned} \Pi(\sigma^{ij}, e_{ij}, v_i) = & \frac{1}{2} \int_V C^{ijkl} e_{ij} e_{kl} dV + \int_V \sigma^{ij} \left[\frac{1}{2} (v_{i|j} + v_{j|i}) - e_{ij} \right] dV \\ & - \int_V X^i v_i dV - \int_{\Gamma_T} t^i v_i dS - \int_{\Gamma_u} \sigma^{ij} v_j^* (v_i - v_i^0) ds - \int_{S_+} q_+^i v_i dS_+ - \int_{S_-} q_-^i v_i dS_- \end{aligned} \quad (4.7)$$

gdzie naprężenia, przemieszczenia i odkształcenia zapisane są w bazie trójwymiarowej konfiguracji początkowej. Objętość V składa się z objętości V_1 materiału rodzimego i objętości V_2 materiału dodatkowej powłoki. Powierzchnie S_+^i i S_-^i są powierzchniami granicznymi, na które działa obciążenie q_+^i i q_-^i . Siły objętościowe oznaczono jako X^i . Powierzchnie Γ_σ i Γ_u są powierzchniami brzegowymi, na których zadano odpowiednio obciążenia brzegowe t^i lub przemieszczenia brzegowe v_i^0 (rys. 4.4). Wektor v^* jest wektorem normalnym do powierzchni Γ , a C^{ijkl} jest tensorem sprężystości, natomiast e_{ij} jest tensorem odkształcenia.

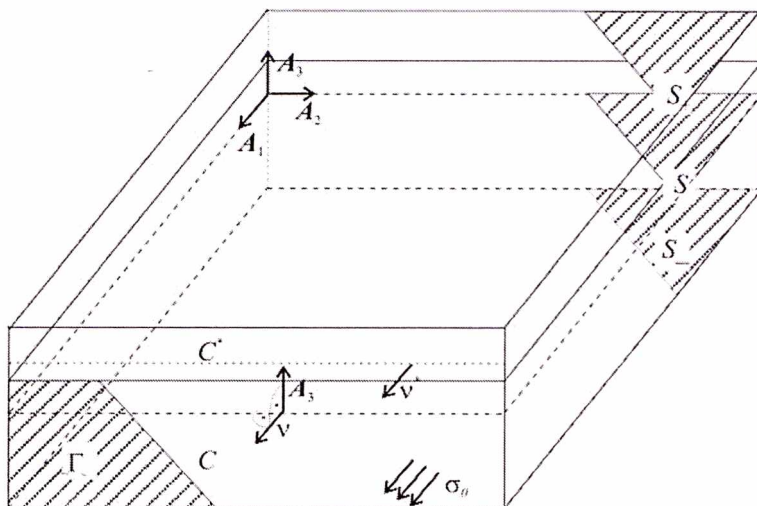
Odnosząc rozważania do powierzchni podstawowej, składowe wektora przemieszczenia zapisuje się następująco:

$$\begin{aligned} v_\alpha &= u_\alpha + \xi \delta_\alpha \\ v_3 &= u_3 + \xi \delta_3 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Uwzględnivszy więzi kinematyczne otrzymuje się:

$$\Pi^* = \int_V r^\alpha (v_\alpha - u_\alpha - \xi \delta_\alpha) dV + \int_V r^3 (v_3 - u_3 - \xi \delta_3) dV \quad (4.9)$$

gdzie r^α, r^3 – reakcje więzi kinematycznych. Uzupełniając funkcjonal Π o funkcjonal Π^* , otrzymuje się zapisany w bazie trójwymiarowej funkcjonal $\tilde{\Pi} = \Pi + \Pi^*$.



Rys. 4.4. Rozpatrywane ciało dwumateriałowe

Zapisując funkcjonal $\tilde{\Pi}$ na powierzchni podstawowej w bazie A_i , posłużono się zależnościami podanymi w [Naghdi, 1963]. Całki po objętości zastąpiono całkami po powierzchni podstawowej S , całkując po ξ w odpowiednich przedziałach materiału rodzimego (ξ_R) i dodatkowej powłoki (ξ_D).

Zdefiniowano siły wewnętrzne osobno w materiale rodzimym i osobno w dodatkowej powłoce. Całkowite siły wewnętrzne są sumą odpowiednich sił występujących w obydwu materiałach:

$$\begin{aligned}
 N^{\alpha\gamma} &= N_R^{\alpha\gamma} + N_D^{\alpha\gamma} & N^{\alpha 3} &= N_R^{\alpha 3} + N_D^{\alpha 3} \\
 M^{\alpha\gamma} &= M_R^{\alpha\gamma} + M_D^{\alpha\gamma} & N^{33} &= N_R^{33} + N_D^{33} \\
 M^{\alpha 3} &= M_R^{\alpha 3} + M_D^{\alpha 3}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Ostatecznie po odpowiednich przekształceniach, opierając się na pracy [Naghdi, 1963], otrzymuje się tensory odkształcenia zdefiniowane na powierzchni podstawowej. Są nimi $\varepsilon_{\gamma\beta}$, $\varepsilon_{\gamma 3}$, $\kappa_{\gamma\beta}$, γ_α , γ_3 . Tensory te określone są przez co najwyżej pierwsze pochodne przemieszczeń uogólnionych ($\mathbf{u}$ oraz $\boldsymbol{\delta}$):

$$\varepsilon_{\gamma\beta} = \varepsilon_{\gamma\beta}(\mathbf{u}), \quad \varepsilon_{\gamma 3} = \varepsilon_{\gamma 3}(\boldsymbol{\delta}_3), \quad \kappa_{\gamma\beta} = \kappa_{\gamma\beta}(\boldsymbol{\delta}), \quad \gamma_\alpha = \gamma_\alpha(\boldsymbol{\delta}_\alpha), \quad \gamma_3 = \gamma_3(\boldsymbol{\delta}_3) \tag{4.11}$$

Tensory sprężystości zdefiniowane są osobno w odniesieniu do poszczególnych materiałów i zależą od modułu Younga i współczynnika Poissona rozpatrywanego materiału. Po sprowadzeniu ich do powierzchni podstawowej otrzymuje się następujące składowe tensora sprężystości:

$$\begin{aligned} E_{\omega}^{\alpha\beta\tau\varepsilon}, E_{\omega M}^{\alpha\beta\tau\varepsilon}, E_{\omega MM}^{\alpha\beta\tau\varepsilon}, E_{\omega}^{\alpha\beta33}, E_{\omega M}^{\alpha\beta33}, \\ E_{\omega}^{\alpha3\gamma3}, E_{\omega M}^{\alpha3\gamma3}, E_{\omega MM}^{\alpha3\gamma3}, E_{\omega}^{3333} \end{aligned} \quad (4.12)$$

gdzie ω przyjmuje postać R , jeśli składowa tensora dotyczy materiału rodzimego i D jeśli dotyczy materiału dodatkowego.

Definiuje się uogólnione siły działające na powierzchniach granicznych dS_+ i dS_- . Są to siły F^α i F^3 oraz momenty L^α i L^3 , a także uogólnione siły brzegowe: siły T^α i T^3 oraz momenty T_M^α i T_M^3 . Wskaźnik M , który nie podlega sumowaniu, informuje, iż jest to siła brzegowa o charakterze momentu. Każda z wymienionych sił zawiera człon dotyczący sił masowych, odniesiony odpowiednio do materiału rodzimego i dodatkowego.

Funkcjonał $\tilde{I}$ na powierzchni podstawowej zapisuje się teraz w postaci:

$$\begin{aligned} \tilde{I} = & \int_S \frac{1}{2} \left(E_{\omega}^{\alpha\beta\tau\varepsilon} \varepsilon_{\tau\varepsilon} \varepsilon_{\beta\alpha} + E_{\omega M}^{\alpha\beta\tau\varepsilon} \kappa_{\tau\varepsilon} \varepsilon_{\beta\alpha} \right) dS \\ & + \int_S \frac{1}{2} \left(E_{\omega M}^{\alpha\beta\tau\varepsilon} \varepsilon_{\tau\varepsilon} \kappa_{\beta\alpha} + E_{\omega MM}^{\alpha\beta\tau\varepsilon} \kappa_{\tau\varepsilon} \kappa_{\beta\alpha} \right) dS \\ & + \int_S \frac{1}{2} \left(E_{\omega MM}^{\alpha3\tau3} \varepsilon_{\alpha3} \varepsilon_{\gamma3} + E_{\omega M}^{\alpha3\tau3} \varepsilon_{\alpha3} \gamma_{\gamma} \right) dS \\ & + \int_S \frac{1}{2} \left(E_{\omega M}^{\alpha3\tau3} \varepsilon_{\gamma3} \gamma_{\alpha} + E_{\omega}^{\alpha3\tau3} \gamma_{\alpha} \gamma_{\gamma} + E_{\omega}^{3333} \gamma_3 \gamma_3 \right) dS \\ & + \int_S \frac{1}{2} \left(E_{\omega}^{\varepsilon\beta33} \gamma_3 \varepsilon_{\varepsilon\beta} + E_{\omega M}^{\varepsilon\beta33} \gamma_3 \kappa_{\varepsilon\beta} \right) dS \\ & + \int_S \left(N^{\alpha\beta} u_{\beta\parallel\alpha} + M^{\alpha\beta} \delta_{\beta\parallel\alpha} - N^{\alpha\beta} B_{\beta\alpha} u_3 \right) dS \\ & + \int_S \left(-M^{\alpha\beta} B_{\beta\alpha} \delta_3 - N^{\alpha\beta} \varepsilon_{\beta\alpha} - M^{\alpha\beta} \kappa_{\beta\alpha} \right) dS \\ & + \int_S \left(M^{\alpha3} \delta_{3,\alpha} - M^{\alpha3} \varepsilon_{\alpha3} + N^{\alpha3} (\delta_{\alpha} - \beta_{\alpha}) \right) dS \\ & + \int_S \left(-N^{\alpha3} \gamma_{\alpha} + N^{33} \delta_3 - N^{33} \gamma_3 \right) dS \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \int_S (F^\beta u_\beta + F^3 u_3 + L^\beta u_\beta + L^3 \delta_3) dS \\
& - \int_{C_\sigma} (T^\beta u_\beta + T_M^\beta u_\beta + T^3 u_3 + T_M^3 \delta_3) dC_\sigma \\
& - \int_{C_u} (N^{\alpha\beta} (u_\beta - u_\beta^0) \nu_\alpha + M^{\alpha\beta} (\delta_\beta - \delta_\beta^0) \nu_\alpha) dC_u \\
& - \int_{C_u} (N^{\alpha 3} (u_3 - u_3^0) \nu_\alpha + M^{\alpha 3} (\delta_3 - \delta_3^0) \nu_\alpha) dC_u
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Całkowania zależności (4.13), dotyczące poszczególnych tensorów sprężystości, wykonuje się niezależnie po odpowiednim przedziale zmiennej ξ materiału rodzimego i dodatkowego. W tym etapie rozważań zakłada się pełne i ciągle zespolenie obu materiałów. Wobec tego można traktować konstrukcję jako ciało ciągłe. Dokonując wariacji tego funkcjonału traktuje się przyrosty wirtualne argumentów jako wzajemnie niezależne. Warunkiem stacjonarności jest zerowanie się pierwszej wariacji funkcjonału. Z tego warunku otrzymuje się kolejno związki geometryczne, związki konstytutywne, równania równowagi oraz przemieszczeniowe i naprężeniowe warunki brzegowe.

Związki geometryczne (kreską pionową oznaczono różniczkowanie na powierzchni A_α , a przecinkiem różniczkowanie cząstkowe):

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{\beta\alpha} &= u_{\beta|\alpha} - B_{\beta\alpha} u_3 \\
\kappa_{\beta\alpha} &= \delta_{\beta|\alpha} - B_{\beta\alpha} \delta_3 \\
\varepsilon_{\alpha 3} &= \delta_{3,\alpha}^- \\
\gamma_\alpha &= \delta_\beta - \beta_\alpha \\
\gamma_3 &= \delta_3
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Związki konstytutywne:

$$\begin{aligned}
N^{\alpha\beta} &= E_{\omega}^{\alpha\beta\tau\varepsilon} \varepsilon_{\tau\varepsilon} + E_{\omega M}^{\alpha\beta\tau\varepsilon} \kappa_{\tau\varepsilon} + E_{\omega}^{\alpha\beta 33} \gamma_3 \\
M^{\alpha\beta} &= E_{\omega M}^{\alpha\beta\tau\varepsilon} \varepsilon_{\tau\varepsilon} + E_{\omega MM}^{\alpha\beta\tau\varepsilon} \kappa_{\tau\varepsilon} + E_{\omega M}^{\alpha\beta 33} \gamma_3 \\
M^{\alpha 3} &= E_{\omega MM}^{\alpha 3\gamma 3} \varepsilon_{\gamma 3} + E_{\omega M}^{\alpha 3\gamma 3} \gamma_\gamma \\
N^{\alpha 3} &= E_{\omega M}^{\alpha 3\gamma 3} \varepsilon_{\gamma 3} + E_{\omega}^{\alpha 3\gamma 3} \gamma_\gamma \\
N^{33} &= E_{\omega}^{3333} \gamma_3 + E_{\omega}^{\alpha\beta 33} \varepsilon_{\alpha\beta} + E_{\omega M}^{\alpha\beta 33} \kappa_{\alpha\beta}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Uwzględniając zależności (4.10) i (4.12), poszczególne równania zależności (4.15) i odpowiednio (4.16), należy interpretować jako sumę sił w materiale rodzimym i dodatkowym.

Równania równowagi:

$$\begin{aligned}
 N^{\alpha\beta}|_{\alpha} + F^{\beta} - N^{\alpha 3} B_{\alpha}^{\beta} &= 0 \\
 N^{\alpha\beta} B_{\beta\alpha} + F^3 + N^{\alpha 3}|_{\alpha} &= 0 \\
 M^{\alpha\beta}|_{\alpha} + L^{\beta} - N^{\beta 3} &= 0 \\
 M^{\alpha\beta} B_{\beta\alpha} + L^3 + M^{\alpha 3}|_{\alpha} - N^{33} &= 0
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Warunki brzegowe nałożone na przemieszczenia:

$$\begin{aligned}
 u_{\beta} &= u_{\beta}^0 & \delta_{\beta} &= \delta_{\beta}^0 \\
 u_3 &= u_3^0 & \delta_3 &= \delta_3^0
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

i na naprężenia

$$\begin{aligned}
 N^{\alpha\beta} \nu_{\alpha} &= T^{\beta} \\
 M^{\alpha\beta} \nu_{\alpha} &= T_M^{\beta} \\
 N^{\alpha 3} \nu_{\alpha} &= T^3 \\
 M^{\alpha 3} \nu_{\alpha} &= T_M^3
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Gdy dwa materiały nie są połączone ze sobą, wówczas zagadnienie brzegowe należałoby rozwiązać niezależnie w odniesieniu do każdego z materiałów z osobna. Jeśli ma się do czynienia tylko z materiałem rodzimym, to współrzędna $\xi_D = 0$.

4.2. POWŁOKA CHŁODNI MODELOWANA JAKO CIAŁO Z WIĘZAMI

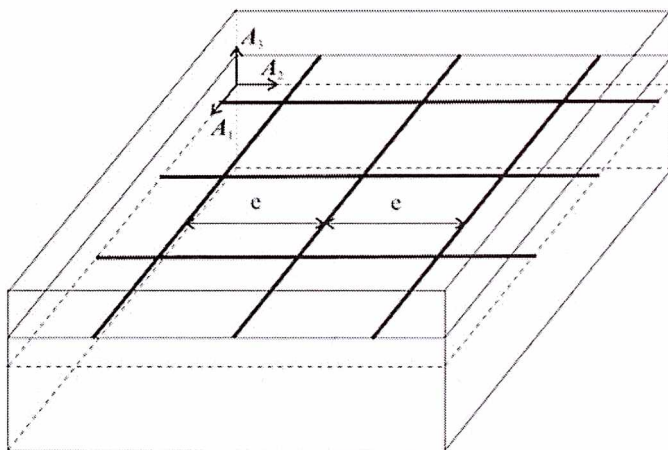
W tym rozdziale przedstawiono modelowanie połączenia materiału rodzimego powłoki z dodatkowym materiałem, który może być: materiałem wbudowanym w miejsce zdegradowanego materiału, żebrzem wzmacniającym, dodatkową – zwykle wielkopowierzchniową – powłoką nałożoną na rodzimą powłokę chłodni. Modelowanie połączenia odbywa się przez nałożenie odpowiednich więzów na powierzchni podstawowej.

Więzy liniowe i powierzchniowe ciągłe

Liniowe więzy ciągłe modelują połączenie liniowych elementów, np. żeber nałożonych na materiał rodzimy. Zakłada się, że wzdłuż linii połączenia nałożone będą ciągłe więzy realizowane poprzez zastosowanie materiału szepnego oraz/lub odpowiedniej liczby łączników na przykład w formie kołków lub kotew rozmieszczonych wystarczająco gęsto, co pozwoli na liniową homogenizację ich nośności. Jeśli tak rozumiane więzy liniowe rozpatrzy się jako odpowiednio blisko siebie położone oraz dodatkowo umieszczone w dwóch ortogonalnych kierunkach, to można je interpretować jako powierzchniowe więzy ciągłe. Na rysunku 4.5 przedstawiono taką rodzinę więzów ortogonalnych (grube linie ciągłe).

Materiał dodatkowy, przeznaczony do wykonania np. żebra wzmacniającego, można rozpatrzeć w dwóch przypadkach:

- a) materiał dodatkowy charakteryzuje się parametrami takimi samymi jak materiał rodzimy,
- b) materiał dodatkowy charakteryzuje się innymi parametrami niż parametry materiału rodzimego.

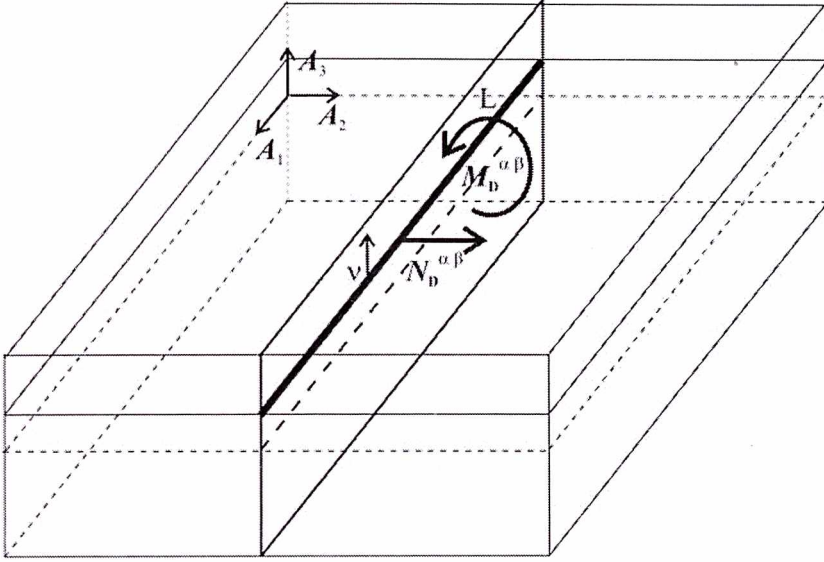


Rys. 4.5. Więzy ciągłe w układzie ortogonalnym

W obydwu przypadkach zakłada się, iż nałożone więzy wzdłuż linii żeber zapewnią pełną i ciągłą współpracę pomiędzy materiałami. W przypadku b) dodatkowo w obliczeniach należy uwzględnić wzrost wartości naprężeń stycznych występujących na granicy między różnymi materiałami. Problem ten opisano w rozdziale 5. Przyjęto następujące więzy wzdłuż geometrycznych linii żeber:

$$\begin{aligned}\gamma_{(\tau)} &= \gamma_{\alpha} \tau^{\alpha} = (\delta_{\alpha} - \beta_{\alpha}) \tau^{\alpha} = 0 \\ \gamma_3 &= \delta_3 = 0\end{aligned}\tag{4.19}$$

Wskaźnik (τ) nie podlega sumowaniu.



Rys. 4.6. Pojedyncza linia więzów ciągłych z zaznaczeniem sił wewnętrznych działających w materiale dodatkowym

Na rysunku 4.6 podano pojedynczą linię więzów ciągłych (linia L). Zaznaczono na niej normalny kierunek do powierzchni kontaktu pomiędzy dwoma materiałami. Wprowadzenie więzów (4.19) oznacza, że wzdłuż linii nałożenia więzów nie występuje odkształcenie postaciowe. Linia ta rozgranicza dwie części materiału konstrukcji. Występują na niej oddziaływania z zewnętrznej części zbudowanej z materiału dodatkowego zastąpione odpowiednimi siłami wewnętrznymi. Są to siły $(N_D^{\alpha\beta}, M_D^{\alpha\beta}, N_D^{\alpha 3}, M_D^{\alpha 3})$. Zdefiniowano następujący funkcjonał $\bar{\Pi} = \bar{\Pi}(\lambda, (u, \delta))$:

$$\begin{aligned} \bar{\Pi} = & \int_L \left(\lambda_3 \delta_3 + \lambda_{(\tau)} \tau^\alpha (\delta_\alpha + u_{3||\alpha} + B_\alpha^\beta u_\beta) \right) dL \\ & - \int_L \left(N_D^{\alpha\beta} v_\alpha u_\beta + M_D^{\alpha\beta} v_\alpha \delta_\beta + N_D^{\alpha 3} v_\alpha u_3 + M_D^{\alpha 3} v_\alpha \delta_3 \right) dL \end{aligned} \quad (4.20)$$

Przyjęto, że funkcjonał $\tilde{\Pi}$ zawiera człony dotyczące materiału rodzimego (tzn. $\xi_D = 0$). Oznaczono go $\tilde{\Pi}_R$. Funkcjonał $\tilde{\Pi}_R$ należy uzupełnić o funkcjonał $\bar{\Pi}$: $\Pi'' = \tilde{\Pi}_R + \bar{\Pi}$.

Wielkości $\lambda_{(\tau)}$, λ_3 to mnożniki Lagrange'a i są interpretowane jako siły reakcji utrzymujące więzy. Można teraz dokonać wariacji funkcjonału Π'' , traktując przyrosty wirtualne argumentów funkcjonału jako wzajemnie niezależne. Przyrównując do zera pierwszą wariację funkcjonału, otrzymuje się, oprócz równań (4.14)–(4.18) ro-

zumianych jako równania dotyczące materiału rodzimego, dodatkowe zależności na liniach żeber. Są to:

- warunki kinematyczne

$$\begin{aligned}\lambda_3 &= 0 \\ (\delta_\alpha - \beta_\alpha) \tau^\alpha &= 0\end{aligned}\tag{4.21}$$

- warunki statyczne

$$\begin{aligned}(N_R^{\alpha\beta} - N_D^{\alpha\beta}) v_\alpha + B_\alpha^\beta \lambda_{(\tau)} \tau^\alpha &= 0 \\ (M_R^{\alpha\beta} - M_D^{\alpha\beta}) v_\alpha + \lambda_{(\tau)} \tau^\beta &= 0 \\ (M_R^{\alpha 3} - M_D^{\alpha 3}) v_\alpha + \lambda_3 &= 0 \\ (N_R^{\alpha 3} - N_D^{\alpha 3}) v_\alpha + \frac{\partial}{\partial L} [\lambda_{(\tau)} \tau^\alpha \bar{\varepsilon}_{\alpha\gamma} v^\gamma] &= 0\end{aligned}\tag{4.22}$$

gdzie $\lambda_{(\tau)} \tau^\alpha v_\alpha = 0$.

Przedstawiony tok postępowania dotyczy jednej reprezentatywnej linii więzów. Analogiczne równania można sformułować w odniesieniu do rodziny linii równoległych i ortogonalnych.

Więzy liniowe i powierzchniowe dyskretne

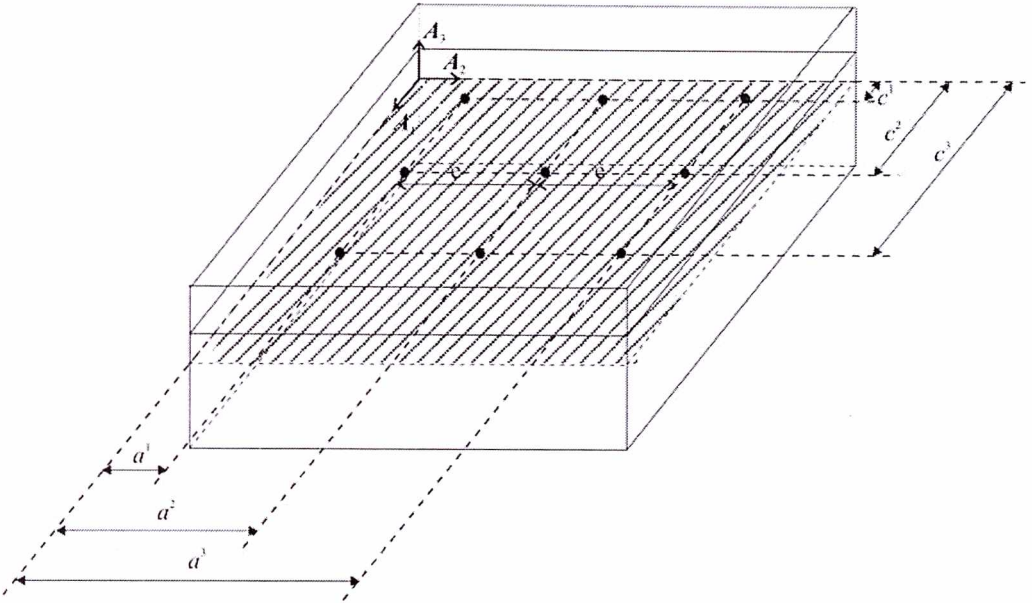
Dyskretne więzy liniowe i powierzchniowe modelują połączenie dwóch materiałów. Połączenie obu materiałów zapewniają łączniki rozmieszczone w znacznym odaleniu od siebie i dlatego nazwano je więzami dyskretnymi. Rozróżniono:

a) więzy liniowe – łączniki tworzą linię, a grupa takich linii ułożonych równolegle tworzy rodzinę więzów równoległych, np. południkowych (por. rys. 4.7),

b) więzy powierzchniowe – rozważa się dwie rodziny wzajemnie ortogonalnych więzów (południkowych i równoleżnikowych pokazanych na rys. 4.7); jeśli odległości pomiędzy łącznikami w obu kierunkach są takie same, to mamy do czynienia z regularną siatką łączników.

W dalszej części przedstawiono modelowanie z więzami powierzchniowymi jako przypadek najbardziej ogólny. Rozważania odnosi się do powierzchni podstawowej, na której liniami przerywanymi oznaczono linie, wzdłuż których przewidziano założenie więzów. Występują więc one na przecięciu się linii rodziny a^i oraz c^j , gdzie i oraz j są wskaźnikami oznaczającym numer kolejnej linii więzów na kierunkach wzajemnie ortogonalnych. Wykorzystuje się tu pochodną funkcji Heaviside'a, nazywaną funkcją Diraca, która ma właściwość filtracji. W przypadku zagadnienia powierzchniowego funkcjonal $\overline{\Pi}$ powinien być poddany filtracji w sposób następujący:

$$\overline{\Pi}_F = \overline{\Pi} (\delta(\Theta^1 - a^1) + \delta(\Theta^2 - c^1) - \delta(\Theta^1 - a^1) \delta(\Theta^2 - c^1))\tag{4.23}$$



Rys. 4.7. Więzy dyskretne w układzie ortogonalnym

gdzie

$$\delta(\Theta^\alpha - d) = H(\Theta^\alpha - d) \quad (4.24)$$

i przyjmuje wartość 0, gdy $\Theta^\alpha - d > 0$ i gdy $\Theta^\alpha - d < 0$, natomiast przyjmuje wartość 1, gdy $\Theta^\alpha - d = 0$. W podanych zależnościach d symbolicznie oznacza współrzędną a^i albo c^j .

W przypadku więzów dyskretnych funkcjonał $\tilde{\Pi}_R$ należy uzupełnić o funkcjonał $\bar{\Pi}_F$: $\Pi^u = \bar{\Pi}_R + \bar{\Pi}_F$. Po dokonaniu wariacji funkcjonału Π^u otrzymuje się dodatkowe równania takie same jak (4.21) i (4.22), z tym że równanie analogiczne do równania (4.22) opisuje równowagę sił w łącznikach. Siły działające w materiale dodatkowym zebrane z obszaru pomiędzy łącznikami równoważone są przez łączniki z siłami działającymi w materiale rodzimym.

Uwagi podsumowujące, dotyczące stosowania więzów

Przedstawione sposoby modelowania połączenia pomiędzy dwoma materiałami pokazują różnice w pracy konstrukcji chłodni kominowej w zależności od rodzaju połączenia. Należy to uwzględnić, kształtując numeryczny model chłodni, gdyż w zależności od rodzaju połączenia różna jest współpraca między materiałami. Jeśli niewłaściwie zostanie rozpoznany rzeczywisty sposób połączenia między materiałami i błąd ten zostanie przeniesiony na model numeryczny, to otrzyma się błędne wyniki

obliczeń, a na ich podstawie zostaną sformułowane błędne wnioski. Współcześnie istniejące na rynku systemy komputerowe dają duże możliwości modelowania numerycznego. Niemniej jednak potrzebna jest przy ich użyciu wiedza z mechaniki budowli dotycząca modelowania konstrukcji.

W podsumowaniu podanych rozważań można zalecić następujące postępowanie w odniesieniu do kształtowania modelu chłodni.

1. Jeśli obydwa materiały stanowią powierzchniowo całkowicie połączoną konstrukcję, to można ją modelować zgodnie z opisem w rozdziale 4.1. Materiały te mogą mieć różne parametry. Kształtowanie siatki elementów skończonych przeprowadza się niezależnie w odniesieniu do obydwu materiałów. W elementach sąsiadujących ze sobą, a przynależnych do różnych materiałów, na granicy między materiałami należy wprowadzić scalanie wszystkich parametrów węzłowych.

2. Jeśli połączenie jest liniowe albo dyskretne (por. rozdział 4.2), to na granicy między elementami przyjmuje się odpowiednie więzy wzdłuż linii ich nałożenia.

- Gdy liniowe więzy ciągłe realizowane są za pomocą łączników (np. w formie kołków lub kotew rozmieszczonych odpowiednio gęsto), należy scalić parametry węzłowe, które modelują przyjęte więzy i zapewniają przenoszenie sił wewnętrznych. Scalanie to przeprowadza się we wszystkich elementach znajdujących się na granicy między obydwooma materiałami. Scala się te parametry, które zrealizują więzy geometryczne (4.19) nałożone wzdłuż określonej linii. Jeśli łączniki są rozmieszczone wzdłuż wielu równoległych linii, to wzdłuż tych linii należy dokonać odpowiedniego scalenia. Podobnie postępuje się w przypadku wzajemnie ortogonalnej siatki linii. W węzłach siatki takich linii więzy nakłada się w węzłach leżących na ortogonalnych kierunkach. Opisany tu model wymaga stosowania odpowiednio gęstej siatki elementów skończonych.

- Gdy łączniki nie będą rozmieszczone odpowiednio gęsto, wówczas można w modelu połączenia uwzględnić więzy zgodnie z rzeczywistością. Taki opis podano w rozdziale 4.2, a połączenia w nim występujące traktuje się jako dyskretne. Oznacza to, że odległości między łącznikami są znaczne, a odpowiednie scalanie parametrów węzłowych następuje tylko w niektórych elementach znajdujących się wzdłuż linii, na której nałożono więzy. Tu również jak w przypadku poprzednim – można rozważać więzy nałożone wzdłuż pojedynczej linii, rodziny linii równoległych i rodziny wzajemnie ortogonalnych linii.

Otrzymane z analizy statyczno-wytrzymałościowej wartości sił wewnętrznych na liniach więzów ciągłych albo w punktach, gdzie nałożono więzy dyskretne są siłami, na które wymiarować należy łączniki. Siły wewnętrzne powinny być wyznaczone z uwzględnieniem wszystkich oddziaływań, zwłaszcza muszą uwzględniać wpływ skurczu materiału dodatkowego.

Projektowane łączniki (kotwy) są niezbędne przy powierzchniowym lub liniowym (żebra) wzmocnieniu powłoki nowym materiałem i zapewniają zespolenie obu materiałów.

W analizach dotyczących konstrukcji chłodni, w której na materiał rodzimy nałożono dodatkowy materiał w formie żeber albo wzmocnienia powierzchniowego, należy uwzględnić różnice między charakteryzującym materiały modułami Younga, oraz to, że na granicy między materiałami wystąpią odpowiednio zwiększone naprężenia styczne. Analizę stanu tych naprężeń przedstawiono w rozdziale 5, w odniesieniu do przypadku opisanego w rozdziale 4.1, gdzie założono ciągłość konstrukcji złożonej z dwóch materiałów.

5. ANALIZA STANU NAPRĘŻEŃ STYCZNYCH NA GRANICY MATERIAŁU RODZIMEGO I NAPRAWCZEGO

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki analizy rozkładu i wielkości naprężeń stycznych między warstwami materiałów rodzimego i naprawczego, występujących po naprawie albo wzmocnieniu powłoki chłodni kominowej. Jest to analiza uzupełniająca w stosunku do analizy stanu naprężenia wynikającego z obciążenia powłoki chłodni wszystkimi oddziaływaniami.

Zmiana rozkładu i wartości naprężeń stycznych w powłoce chłodni w stosunku do stanu projektowego następuje, gdy remont chłodni polega na wbudowaniu w miejsce zdegradowanego betonu innego materiału charakteryzującego się modułem Younga, o innej wartości niż materiał rodzimy powłoki chłodni. Zwiększenie wartości naprężeń stycznych w powłoce chłodni występuje również wtedy, gdy beton rodzimy został wzmocniony zbrojonymi żebrami albo zbrojoną nową powłoką ciągłą, a także po narzuceniu na powłokę torkretu niezbrojonego. W każdym z wymienionych przypadków wzmocnienia zwiększa się grubość, o grubość narzuconego torkretu.

Analiza przedstawiona w niniejszym rozdziale dotyczy stanu naprężenia powierzchniowo ciągłego połączenia dwóch materiałów. Wyniki analizy można również odnieść do przypadków, w których stosowano ciągle łączniki liniowe albo dyskretne. Wówczas analiza sprowadza się do wyznaczenia wartości sił w łącznikach.

Zwiększenie naprężeń stycznych może, w skrajnym przypadku, doprowadzić do rozwarstwienia na granicy dwóch materiałów i spowodować redukcję współpracy między tymi materiałami. Oznacza to, że remont polegający na wymianie materiału albo na dołączeniu żeber, albo na powierzchniowym natrysku torkretem nie spełnił oczekiwanego zadania zarówno ze względów technicznych, jak i ekonomicznych.

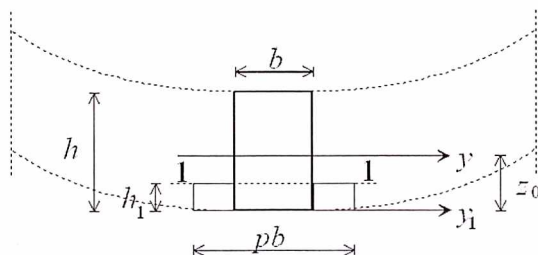
W celu przedstawienia konkretnych wyników obliczeń należało uzyskać je, analizując wybrany konkretny obiekt. Obliczenia wykonano w odniesieniu do rzeczywistej chłodni wysokości 132 m. Obliczenia porównawcze umożliwiające ocenę wartości naprężeń stycznych na granicy materiału rodzimego powłoki chłodni i materiału naprawczego wykonano, rozważając przekrój powłoki grubości h oraz jednostkowej

obwodowej szerokości b . Oznaczenia odnoszące się do wymienianego oraz dodatkowego materiału są zgodne z oznaczeniami przyjętymi na rys. 1.1.

5.1. ANALIZA NAPRĘŻEŃ STYCZNYCH W PRZYPADKU WYMIANY BETONU (NAPRAWY)

Obliczenia wykonano, rozważając dwa przypadki wymiany betonu: o głębokości $h_1 = 3$ cm, a następnie $h_1 = 6$ cm (por. rys. 5.1). Podane grubości wymienianego betonu wyczerpują znane praktyczne przypadki. Najczęściej bowiem ubytki nie przekraczają 3 cm grubości, w przypadku najpoważniejszych uszkodzeń nie przekraczają one grubości 6 cm. Założono, że grubość powłoki chłodni pozostaje taka sama jak przed remontem i jest zgodna z grubością projektową. W obliczeniach rozpatrzono odpowiednio zmodyfikowany przekrój powłoki chłodni.

Zwiększony moduł Younga w części przekroju grubości h_1 uwzględniono przez odpowiednie zwiększenie szerokości przekroju (o wartość równą $(p - 1)b$), gdzie $p = E_1/E$, E jest modułem Younga materiału rodzimego, E_1 jest modułem Younga materiału naprawczego. W tak powstałym przekroju wyznaczono naprężenia na głębokości grubości powłoki oznaczonej na rys. 5.1 linią 1–1. Naprężenia występujące w tym przekroju oznaczono jako τ_1 . Porównano je z naprężeniami (nazwanymi τ) wyznaczonymi na tej samej głębokości 1–1 w przekroju szerokości b wykonanym z materiału rodzimego powłoki chłodni. Oś y jest zawsze osią środkową przekroju zarówno złożonego tylko z materiału rodzimego, jak i przekroju zmodyfikowanego. Oznacza to, że w przekroju z wbudowanym materiałem naprawczym oś ta będzie zawsze położona niżej niż $h/2$ od osi y_1 . Obliczenia wykonano, przyjmując różne wartości wielkości p ($p = 1,1, 1,3, 1,5$ oraz $p = 1,7$). Podany zakres zmian wartości p wyczerpuje praktyczne przypadki materiałów stosowanych podczas napraw i remontów.



Rys. 5.1. Kształtowanie modelu naprawianej powłoki chłodni umożliwiające wyznaczenie naprężeń stycznych na granicy dwóch materiałów

Otrzymane wyniki obliczeń zestawiono w tabelach (tab. 5.1 i 5.2). W pierwszej kolumnie podano wartości charakterystyczne wysokości powłoki chłodni, liczone od poziomu +0 (por. rys. 5.2), w których występują zmiany grubości powłoki. W drugiej kolumnie podano grubość powłoki odpowiednio do danej wysokości. Następnie na wyszczególnionych wysokościach powłoki chłodni zestawiono stosunek wartości naprężeń stycznych τ_1 i τ w odniesieniu do różnych wartości parametru $p = E_1/E$. Widoczny jest znaczący wzrost wartości naprężeń τ_1 w stosunku do wartości naprężeń τ wraz ze wzrostem parametru p .

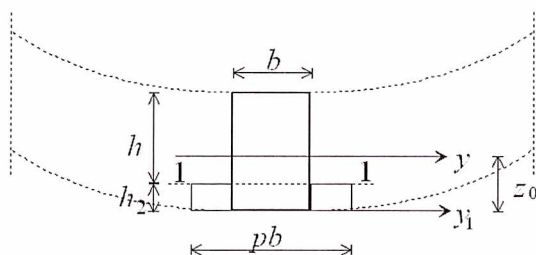
Tabela 5.1. Wzrost naprężeń stycznych na granicy materiałów
wyrażony ilorazem τ_1/τ , grubość materiału wymienionego równa 3 cm

H [m]	h [cm]	$\tau_1/\tau, p = 1,1$	$\tau_1/\tau, p = 1,3$	$\tau_1/\tau, p = 1,5$	$\tau_1/\tau, p = 1,7$
8	66	1,082	1,237	1,383	1,519
15	42	1,072	1,207	1,329	1,441
22	18	1,046	1,125	1,191	1,247
68	14	1,036	1,096	1,144	1,184
128	14	1,036	1,096	1,144	1,184
129	20	1,050	1,137	1,210	1,273
132	26	1,059	1,165	1,256	1,337

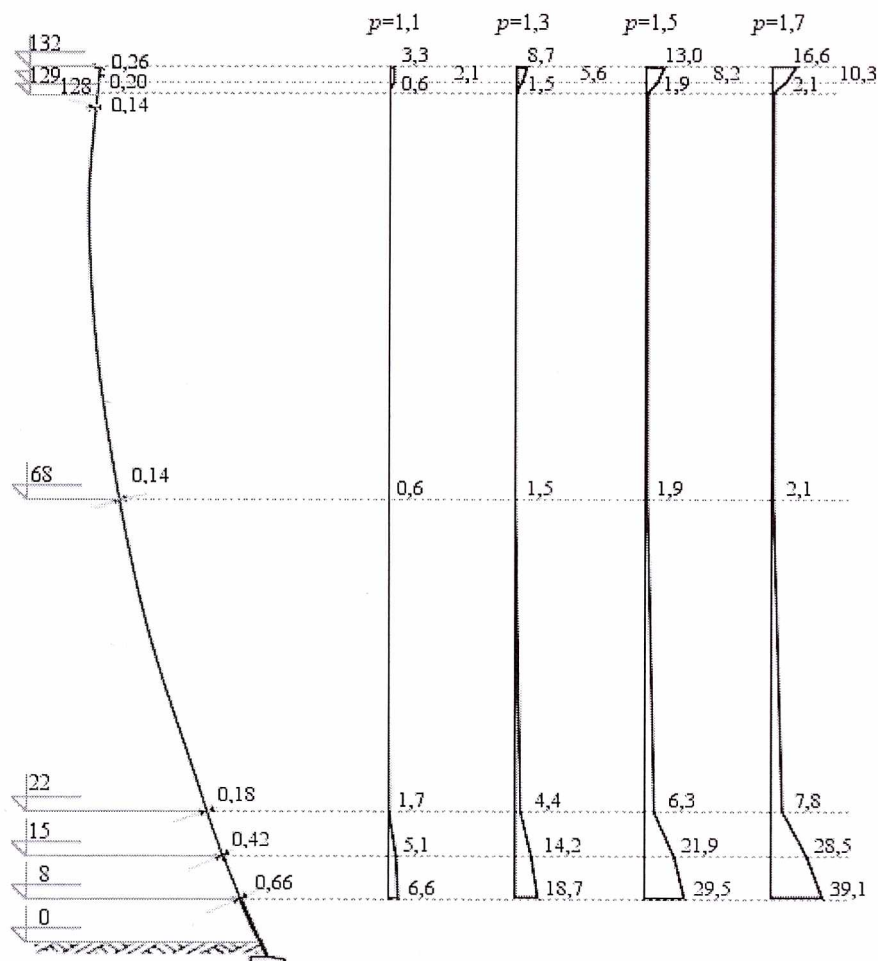
Tabela 5.2. Wzrost naprężeń stycznych na granicy materiałów
wyrażony ilorazem τ_1/τ , grubość materiału wymienionego równa 6 cm

H [m]	h [cm]	$\tau_1/\tau, p = 1,1$	$\tau_1/\tau, p = 1,3$	$\tau_1/\tau, p = 1,5$	$\tau_1/\tau, p = 1,7$
8	66	1,066	1,187	1,295	1,391
15	42	1,052	1,142	1,219	1,285
22	18	1,017	1,044	1,063	1,078
68	14	1,006	1,015	1,019	1,021
128	14	1,006	1,015	1,019	1,021
129	20	1,021	1,056	1,082	1,103
132	26	1,033	1,087	1,130	1,166

Na rysunkach 5.2 i 5.3, na podstawie informacji zestawionych w tabeli 5.1 i tabeli 5.2, podano procentowe przyrosty naprężeń stycznych, jakie występują na styku dwóch materiałów o różnych modułach Younga przy wymianie betonu o grubościach równych odpowiednio 3 cm i 6 cm. Naprężenia są większe w obszarach o większej grubości powłoki i są największe do poziomu +22 m, licząc od styku powłoki ze słupami (por. rys. 5.2 i 5.3). Nieco mniejszy przyrost naprężeń występuje w strefie korony chłodni. Podane wyniki obliczeń uzyskano przy uwzględnieniu tylko sztywności powłoki chłodni. W strefie korony chłodni górny pierścień znacznie usztywnia konstrukcję chłodni. W związku z tym, w tej strefie wzrost wartości naprężeń stycznych jest wyraźnie mniejszy niż wykazany w obliczeniach.



Rys. 5.2. Wzrost naprężeń stycznych na styku dwóch materiałów wyrażony w procentach po wymianie materiału grubości 3 cm

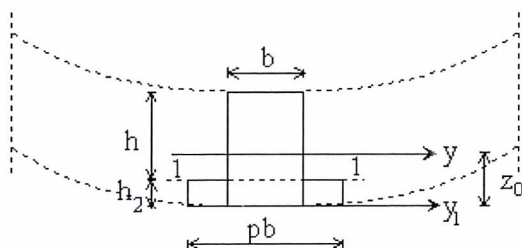


Rys. 5.3. Wzrost naprężeń stycznych na styku dwóch materiałów wyrażony w procentach po wymianie materiału grubości 6 cm

Podobnie stosunkowo niewielkie zwiększenia analizowanych naprężeń odnotowuje się w obszarze od poziomu +22 m do +68 m i wymianie materiału na głębokość 6 cm. Po wymianie materiału na głębokość $h_1 = 3$ cm naprężenia styczne są wyraźnie większe niż po wymianie materiału na głębokość $h_1 = 6$ cm. Maksymalny wzrost naprężeń wyniósł 51,9%, gdy $h_1 = 3$ cm wobec 39,1%, gdy $h_1 = 6$ cm. W przypadku wymiany materiału na głębokość $h_1 = 3$ cm zauważa się również wyraźny wzrost naprężeń na styku materiałów w obszarze od poziomu +68 m do poziomu +128 m. Wzrost ten wynosi 3,6%, gdy $p = 1,1$ i 18,4%, gdy $p = 1,7$.

5.2. ANALIZA NAPRĘŻEŃ STYCZNYCH W PRZYPADKU WZMOCNIENIA CHŁODNI DODATKOWĄ POWŁOKĄ

Analiza dotyczy powłoki chłodni opisanej w rozdz. 5.1 Rozpatrywano różne wzmocnienia powłoki chłodni. Najpierw rozważono wzmocnienie chłodni warstwą narzuconego zbrojonego torkretu o grubości 6 cm. Grubość tę uważa się za minimalną, praktycznie możliwą w przypadku wzmocnienia chłodni torkretem zbrojonym ze względu na konieczność zapewnienia minimalnej grubości otuliny zbrojenia. Następnie rozważono przypadek narzucenia torkretu niezbrojonego o grubości $h_2 = 3$ cm. Ten rodzaj remontu stosuje się wówczas, gdy stwierdza się zbyt małą grubość otuliny w wykonanej powłoce. W obu rozważanych sytuacjach następuje powiększenie grubości powłoki odpowiednio o $h_2 = 6$ cm i $h_2 = 3$ cm (rys. 5.4). Wyznaczano naprężenia na powierzchni oznaczonej 1–1 na rys. 5.4 usytuowanej odpowiednio w odległości 6 i 3 cm od powierzchni zewnętrznej powłoki chłodni po wykonanym wzmocnieniu.



Rys. 5.4. Kształtowanie modelu wzmocnionej powłoki chłodni umożliwiającego wyznaczenie naprężeń stycznych na granicy dwóch materiałów

Analiza naprężeń stycznych na granicy materiałów, gdy grubość wzmocnienia wynosi 6 cm

Wzrost naprężeń wynikający z zastosowania do wzmocnienia powłoki chłodni materiału o zwiększonym module Younga jest nieco większy (por. zestawienie w tabeli 5.3 i 5.8) w porównaniu z wynikami przedstawionymi uprzednio, a doty-

czącymi naprawy bez zmieniania grubości powłoki (por. wartości zestawione w tabeli 5.2 i 5.1). Należy jednak pamiętać, że w przypadku remontu naprawczego grubość powłoki jest zgodna z projektową, a w przypadku wzmocnienia jest większa niż grubość projektowa.

Tabela 5.3. Wzrost naprężeń stycznych na granicy materiałów wyrażony ilorazem τ_1/τ , grubość materiału narzuconego na powłokę chłodni równa 6 cm

H [m]	$h+h_2$ [cm]	$\tau_1/\tau, p = 1,1$	$\tau_1/\tau, p = 1,3$	$\tau_1/\tau, p = 1,5$	$\tau_1/\tau, p = 1,7$
8	72	1,069	1,196	1,308	1,410
15	48	1,056	1,156	1,243	1,318
22	24	1,029	1,077	1,116	1,146
68	20	1,022	1,056	1,082	1,103
128	20	1,022	1,056	1,082	1,103
129	26	1,033	1,087	1,130	1,166
132	32	1,041	1,111	1,169	1,217

Podane w tabeli 5.2 wartości informujące o wzroście naprężeń są bezwzględnymi wartościami obliczonymi w poszczególnych poziomach powłoki chłodni. Z tego zestawienia nie wynika jeszcze czy największy wzrost naprężeń występuje w strefie największych bezwzględnych wartości naprężeń stycznych, czy może występuje on w strefie, gdzie naprężenia styczne są niewielkie. Pełniejsze informacje uzyskuje się, odnosząc wyznaczone naprężenia do maksymalnych naprężeń występujących w powłoce rozpatrywanej chłodni. Wykonano odpowiednie obliczenia, uwzględniając wielkości niezależne od wartości sił tnących. Wyniki zamieszczono w kolejnych tabelach, wyznaczając ilorazy τ_1/T i τ/T zestawione w trzeciej i czwartej kolumnach tych tabel po uwzględnieniu całkowitej grubości powłoki wraz z narzuconym torkretem. Następnie wykonano normalizację wartości kolumn trzeciej i czwartej.

Tabela 5.4. Znormalizowane naprężenia styczne i znormalizowane przyrosty naprężeń stycznych po zwiększeniu grubości o 6 cm za pomocą materiału narzuconego na powłokę chłodni, współczynnik $p = 1,1$

1	2	3	4	5	6	7	8
H [m]	$h+h_2$ [cm]	τ/T $p = 1,1$	τ_1/T $p = 1,1$	Znormalizowane			(Znormalizowane τ_1/T) (τ_1/τ)
				τ/T	τ_1/T	τ_1/τ	
8	72	0,0064	0,0068	0,101	0,106	1,047	0,113
15	48	0,0137	0,0144	0,217	0,224	1,032	0,237
22	24	0,0469	0,0482	0,744	0,750	1,008	0,766
68	20	0,0630	0,0644	1	1	1	1,022
128	20	0,0630	0,0644	1	1	1	1,022
129	26	0,0410	0,0423	0,650	0,657	1,011	0,679
132	32	0,0286	0,0297	0,453	0,462	1,019	0,481

Wyniki tej normalizacji wpisano odpowiednio w kolumnach piątej i szóstej tabel 5.4–5.7. Iloraz τ/T oraz znormalizowana wartość tych naprężeń w każdej tabeli, odpowiadającej grubości wzmocnienia równej 6 cm, jest taka sama. Jednak w celu utrzymania czytelności tabel i ułatwienia odpowiednich przeliczeń zamieszczono w nich wartości zestawione w kolumnach trzeciej i piątej.

Największe naprężenia styczne, odniesione do siły poprzecznej, występują w obszarze od poziomu +68 do poziomu +128 m, tzn. w tej części powłoki chłodni, w której jej grubość jest najmniejsza. W kolumnie siódmej tabel 5.4–5.7 zestawiono ilorazy wyrażające znormalizowane wartości τ_1 odniesione do τ (otrzymano je, dzieląc wartości z kolumny szóstej przez wartości z kolumny piątej). W ten sposób otrzymano znormalizowane przyrosty naprężeń stycznych na granicy między materiałem rodzimym a torkretem narzuconym na powłokę chłodni. Wartości tych znormalizowanych przyrostów naprężeń stycznych są mniejsze niż analogiczne bezwzględne przyrosty naprężeń zestawione w tabeli 5.3.

Tabela 5.5. Znnormalizowane naprężenia styczne i znormalizowane przyrosty naprężeń stycznych po zwiększeniu grubości o 6 cm za pomocą materiału narzuconego na powłokę chłodni, współczynnik $p = 1,3$

1	2	3	4	5	6	7	8
H	$h+h_2$	τ/T	τ_1/T	Znormalizowane			(Znormalizowane
[m]	[cm]	$p = 1,3$	$p = 1,3$	τ/T	τ_1/T	τ_1/τ	$\tau_1/T)(\tau_1/\tau)$
8	72	0,0064	0,0076	0,101	0,114	1,132	0,137
15	48	0,0137	0,0158	0,217	0,238	1,095	0,275
22	24	0,0469	0,0505	0,744	0,759	1,020	0,818
68	20	0,0630	0,0665	1	1	1	1,056
128	20	0,0630	0,0665	1	1	1	1,056
129	26	0,0410	0,0445	0,650	0,669	1,029	0,728
132	32	0,0286	0,0317	0,453	0,477	1,053	0,530

W kolumnie ósmej zamieszczonych tabel zestawiono iloczyny znormalizowanych wartości τ_1/T (kolumna szósta) i przyrostów τ_1/τ zestawionych w tabeli 5.3. W ten sposób otrzymano wartości znormalizowanych przyrostów naprężeń w stosunku do maksymalnych naprężeń występujących w chłodni. Otrzymano więc względne wartości naprężeń zwiększonych z powodu różnicy wartości modułu Younga w obu materiałach. Wartości te zestawiono na danej wysokości w stosunku do maksymalnych naprężeń, jakie występują w przedziale wysokości od +68 m do +128 m.

Wartości zestawione w tabeli 5.4 i dalszych można zinterpretować następująco. Wartość 0,113 podana w kolumnie 8 w tabeli 5.4, odpowiadająca wysokości $H = 8$ m oznacza, jaką część maksymalnych naprężeń stycznych występujących w tej chłodni stanowią naprężenia styczne występujące na poziomie +8 m. Wartość tę otrzymano jako wynik mnożenia wartości 0,106 występującej w kolumnie 6 tejże tabeli i wartości 1,069 występującej w kolumnie 3 tabeli 5.3, która odpowiada $p = 1,1$.

Tabela 5.6. Znormalizowane naprężenia styczne i znormalizowane przyrosty naprężeń stycznych po zwiększeniu grubości o 6 cm za pomocą materiału narzuconego na powłokę chłodni, współczynnik $p = 1,5$

1	2	3	4	5	6	7	8
H [m]	$h+h_2$ [cm]	τ/T $p = 1,5$	τ_1/T $p = 1,5$	Znormalizowane			(Znormalizowane $\tau_1/T)(\tau_1/\tau)$
				τ/T	τ_1/T	τ_1/τ	
8	72	0,0064	0,0083	0,101	0,122	1,221	0,160
15	48	0,0137	0,0170	0,217	0,249	1,148	0,310
22	24	0,0469	0,0523	0,744	0,767	1,031	0,856
68	20	0,0630	0,0682	1	1	1	1,082
128	20	0,0630	0,0682	1	1	1	1,082
129	26	0,0410	0,0463	0,650	0,679	1,044	0,768
132	32	0,0286	0,0334	0,453	0,490	1,081	0,573

Tabela 5.7. Naprężenia styczne i znormalizowane przyrosty naprężeń stycznych po zwiększeniu grubości o 6 cm za pomocą materiału narzuconego na powłokę chłodni, współczynnik $p = 1,7$

1	2	3	4	5	6	7	8
H [m]	$h+h_2$ [cm]	τ/T $p = 1,7$	τ_1/T $p = 1,7$	Znormalizowane			(Znormalizowane $\tau_1/T)(\tau_1/\tau)$
				τ/T	τ_1/T	τ_1/τ	
8	72	0,0064	0,0090	0,101	0,129	1,279	0,182
15	48	0,0137	0,0180	0,217	0,259	1,195	0,342
22	24	0,0469	0,0537	0,744	0,773	1,039	0,886
68	20	0,0630	0,0695	1	1	1	1,103
128	20	0,0630	0,0695	1	1	1	1,103
129	26	0,0410	0,0478	0,650	0,687	1,057	0,801
132	32	0,0286	0,0348	0,453	0,501	1,104	0,609

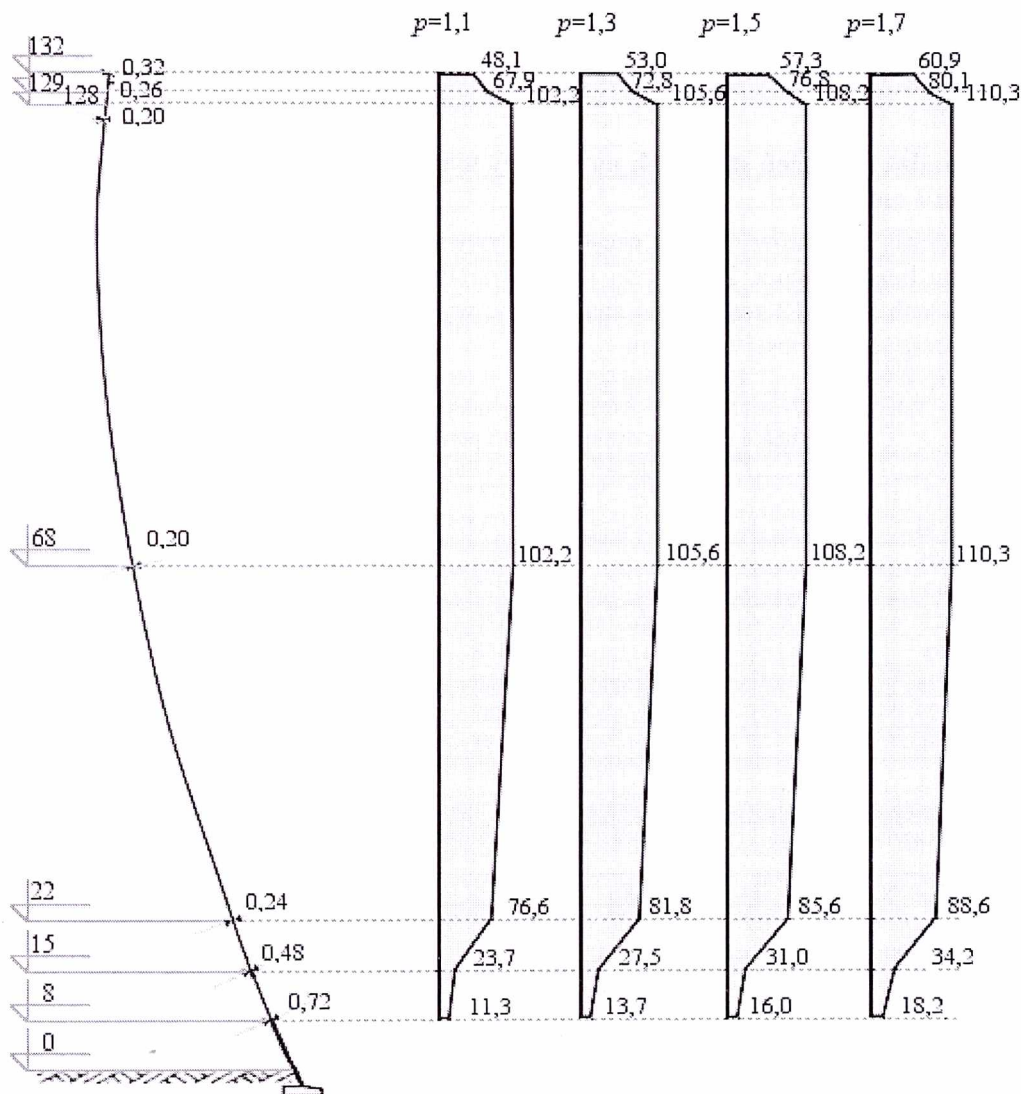
Niekiedy bezwzględne przyrosty naprężeń są bardzo duże (np. na poziomie +8 m, gdy $p = 1,7$, przyrost ten wynosi 41%, por. tabela 5.3), jednak w stosunku do największych naprężeń stycznych naprężenia te wynoszą tylko 18,21% (por. tabela 5.7, kolumna ósma, pierwszy wiersz) naprężeń maksymalnych występujących w zakresie wysokości między poziomem +68 a poziomem +128 m.

Kolumnę ósmą należy interpretować następująco: uzyskanie wartości mniejszej od jedności oznacza, że na danej wysokości naprężenie styczne (nawet, jeśli wzrosło) nie przekroczyło wartości maksymalnej, jaka występuje w obszarze od poziomu +68 do poziomu +128 m. Oznacza to, że uzyskanie wartości mniejszej od jedności na pewno nie naruszy warunku nośności na ścinanie. Jeśli jednak opisywana wartość jest większa od jedności, to w ocenianym obszarze nośność na ścinanie nie jest wystarczająca.

Na rysunku 5.5 przedstawiono w formie graficznej informacje zapisane w kolumnie ósmej tabel 5.4–5.7. Podano tam procentowy wzrost naprężeń stycznych w stosunku do maksymalnych naprężeń występujących w powłoce chłodni.

Z analizy tabel (tab. 5.4–5.7 – kolumna ósma) i rysunku 5.5 wynika, że w obszarze od poziomu +68 do poziomu +128 m, gdzie grubość powłoki chłodni jest najmniejsza

(w rozważanym przykładzie jest ona równa 14 cm) występują największe przekroczenia naprężeń stycznych i wynoszą one od 2,2% do 10,23%, odpowiednio dla $p = 1,1$ i gdy $p = 1,7$. Ponadto przekroczenia te występują również w pewnym obszarze, przede wszystkim poniżej poziomu +68 m.



Rys. 5.5. Wartości $(Z_{\text{norm.}} \tau_1/T)(\tau_1/\tau)$ występujące na styku dwóch materiałów wyrażone w procentach, gdy podczas remontu powłoka chłodni została wzmocniona warstwą torkretu grubości $h_2 = 6$ cm

Z podanych obliczeń wynika, iż konieczna jest szczegółowa analiza wzmocnień dodatkowym materiałem w tej części chłodni, w której występuje najmniejsza grubość powłoki (między poziomem +68 a +128 m) oraz między poziomem od +22 m do +68 m w obszarach, gdzie znormalizowany przyrost naprężeń w stosunku do maksymalnych naprężeń przekracza wartość jeden. Niekiedy zdarza się, że w tych obszarach są wymagane wzmocnienia. Wówczas trzeba zwrócić uwagę na torkret zastosowany do wzmocnienia i zapewnić, aby moduł Younga materiału stosowanego do wzmocnienia był taki sam, albo możliwie zbliżony do wartości charakteryzującej materiał rodzimy.

Analiza naprężeń stycznych na granicy materiałów, gdy grubość wzmocnienia wynosi 3 cm

Podczas remontów chłodni często pokrywa się powłokę chłodni cienką warstwą torkretu bez zbrojenia. Zazwyczaj jest to warstwa grubości nieprzekraczająca 3 cm. W tabelach 5.8–5.12 zestawiono analogiczne wyniki obliczeń do podanych wcześniej a dotyczących grubości $h_2 = 6$ cm.

Tabela 5.8. Wzrost naprężeń stycznych na granicy materiałów wyrażone ilorazem τ_1/τ , grubość materiału narzuconego na powłokę chłodni równa 3 cm

H [m]	$h+h_2$ [cm]	τ_1/τ $p = 1,1$	τ_1/τ $p = 1,3$	τ_1/τ $p = 1,5$	τ_1/τ $p = 1,7$
8	69	1,082	1,239	1,387	1,526
15	45	1,074	1,212	1,339	1,454
22	21	1,052	1,142	1,219	1,285
68	17	1,044	1,118	1,180	1,233
128	17	1,044	1,118	1,180	1,233
129	23	1,055	1,152	1,235	1,308
132	29	1,062	1,175	1,274	1,362

Tabela 5.9. Znnormalizowane naprężenia styczne i znormalizowane przyrosty naprężeń stycznych po zwiększeniu grubości o 3 cm za pomocą materiału narzuconego na powłokę chłodni, współczynnik $p = 1,1$

1	2	3	4	5	6	7	8
H [m]	$h+h_2$ [cm]	τ/T $p = 1,1$	τ_1/T $p = 1,1$	Znormalizowane			(Znormalizowane $\tau_1/T)(\tau_1/\tau)$
				τ/T	τ_1/T	τ_1/τ	
8	69	0,0036	0,0039	0,071	0,073	1,037	0,079
15	45	0,0083	0,0089	0,162	0,167	1,023	0,179
22	21	0,0350	0,0368	0,682	0,687	1,008	0,723
68	17	0,0513	0,0535	1	1	1	1,044
128	17	0,0513	0,0535	1	1	1	1,044
129	23	0,0296	0,0312	0,577	0,583	1,011	0,615
132	29	0,0192	0,0204	0,374	0,381	1,018	0,405

Tabela 5.10. Znormalizowane naprężenia styczne i znormalizowane przyrosty naprężeń stycznych po zwiększeniu grubości o 3 cm za pomocą materiału narzuconego na powłokę chłodni, współczynnik $p = 1,3$

1	2	3	4	5	6	7	8
H [m]	$h+h_2$ [cm]	τ/T $p = 1,3$	τ_1/T $p = 1,3$	Znormalizowane			(Znormalizowane $\tau_1/T)(\tau_1/\tau)$
				τ/T	τ_1/T	τ_1/τ	
8	69	0,0036	0,0045	0,071	0,078	1,108	0,097
15	45	0,0083	0,0101	0,162	0,175	1,084	0,213
22	21	0,0350	0,0340	0,682	0,697	1,021	0,796
68	17	0,0513	0,0574	1	1	1	1,118
128	17	0,0513	0,0574	1	1	1	1,118
129	23	0,0296	0,0341	0,577	0,594	1,030	0,684
132	29	0,0192	0,0226	0,374	0,393	1,051	0,462

Tabela 5.11. Znormalizowane naprężenia styczne i znormalizowane przyrosty naprężeń stycznych po zwiększeniu grubości o 3 cm za pomocą materiału narzuconego na powłokę chłodni, współczynnik $p = 1,5$

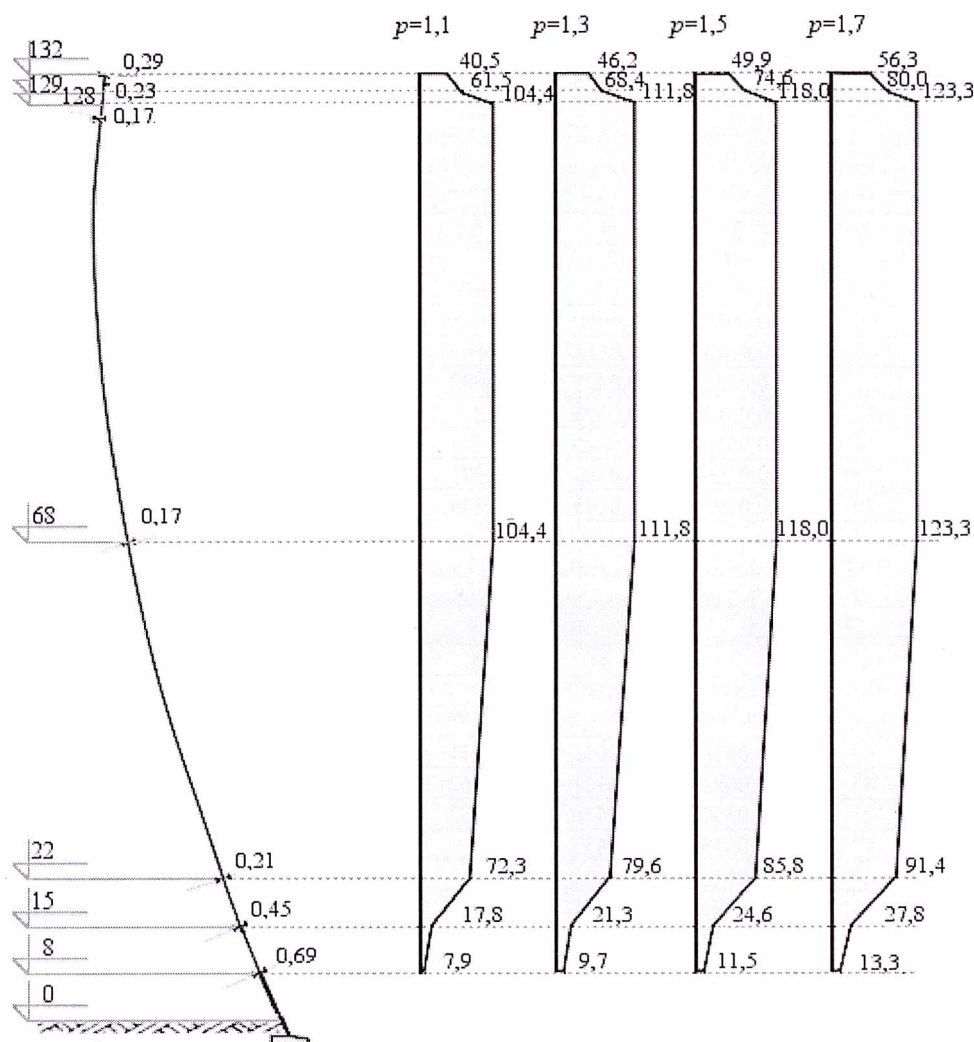
1	2	3	4	5	6	7	8
H [m]	$h+h_2$ [cm]	τ/T $p = 1,5$	$\tau_1/T p =$ 1,5	Znormalizowane			(Znormalizowane $\tau_1/T)(\tau_1/\tau)$
				τ/T	τ_1/T	τ_1/τ	
8	69	0,0036	0,0050	0,071	0,083	1,175	0,115
15	45	0,0083	0,0111	0,162	0,183	1,134	0,246
22	21	0,0350	0,0427	0,682	0,704	1,033	0,859
68	17	0,0513	0,0605	1	1	1	1,180
128	17	0,0513	0,0605	1	1	1	1,180
129	23	0,0296	0,0366	0,577	0,604	1,047	0,746
132	29	0,0192	0,0245	0,374	0,404	1,080	0,499

Tabela 5.12. Znormalizowane naprężenia styczne i znormalizowane przyrosty naprężeń stycznych po zwiększeniu grubości o 3 cm za pomocą materiału narzuconego na powłokę chłodni, współczynnik $p = 1,7$

1	2	3	4	5	6	7	8
H [m]	$h+h_2$ [cm]	τ/T $p = 1,7$	τ_1/T $p = 1,7$	Znormalizowane			(Znormalizowane $\tau_1/T)(\tau_1/\tau)$
				τ/T	τ_1/T	τ_1/τ	
8	69	0,0036	0,0055	0,071	0,087	1,237	0,133
15	45	0,0083	0,0121	0,162	0,191	1,180	0,278
22	21	0,0350	0,0450	0,682	0,711	1,043	0,914
68	17	0,0513	0,0632	1	1	1	1,233
128	17	0,0513	0,0632	1	1	1	1,233
129	23	0,0296	0,0387	0,577	0,612	1,061	0,800
132	29	0,0192	0,0261	0,374	0,414	1,105	0,563

Na podstawie analizy wartości zestawionych w kolumnach ósmych tabel oraz przedstawionych graficznie na rys. 5.5 i 5.6 można sformułować wnioski o charakterze ogólniejszym. W przypadku wzmocnienia powłoki warstwą grubości 6 cm większy wzrost naprężeń stycznych występuje w strefach leżących bezpośrednio nad słu-

pami oraz powyżej poziomu 128 m, niż w przypadku wzmocnienia warstwą grubości 3 cm. W zakresie poziomów od +22 m do +129 m większy wzrost naprężeń stycznych występuje po wzmocnieniu powłoki chłodni warstwą torkretu grubości 3 cm. Wzrost jest znaczący i wynosi od 4,4%, gdy $p = 1,1$, do 23,3%, gdy $p = 1,7$. Podane wartości dotyczą torkretu nałożonego na beton rodzimy bez zbrojenia. Oznacza to, że współpracę między materiałami można wówczas zapewnić tylko przez zastosowanie odpowiednich warstw szepnych albo za pomocą odpowiednich łączników. Podczas ich dobierania należy uwzględnić wyznaczony wzrost naprężeń stycznych.



Rys. 5.6. Wartości $(Z_{\text{norm.}} \tau_1/T)(\tau_1/\tau)$ występujące na styku dwóch materiałów wyrażone w procentach, gdy podczas remontu powłoka chłodni została wzmocniona warstwą torkretu grubości $h_2 = 3$ cm

Zestawione w tabelach wartości względne (od tabeli 5.3) uzyskano bez uwzględnienia siły poprzecznej. W przypadku opracowania projektów szczegółowych dotyczących wzmocnienia chłodni należy w obliczeniach naprężeń stycznych uwzględniać siły poprzeczne w całej chłodni oraz rzeczywisty moduł Younga odpowiadający materiałowi rodzinnemu, materiałowi naprawczemu i materiałowi przeznaczonemu do wzmocnienia chłodni. Na podstawie takich obliczeń uzyskuje się informacje o spodziewanej nośności na ścinanie na granicy dwóch materiałów.

Zastosowanie podczas naprawy (wzmocnienia) materiału o innych parametrach od materiału rodzimego (rys. 1.2) skutkuje niezależną pracą obydwu części, to zaś może prowadzić do odspojenia od siebie obydwu materiałów. W konsekwencji odspojenie powoduje zwiększenie podatności układu na korozję wewnętrzną.

6. PODSUMOWANIE

Cel, jaki założono podejmując się przygotowania niniejszej monografii, to usystematyzowanie metodyki oceniania stanu technicznego chłodni kominowych. Opisano metodykę działania oraz sposób przedstawiania wyników prac dokumentowanych w formie raportu. W celu zapewnienia wymaganego poziomu technicznego raportu i uniknięcia pobieżnego przedstawiania wyników prac przedstawiono szczegółowe opisy sposobu ich dokumentowania. Ponadto zaprezentowano sposób modelowania powłoki chłodni z wymienionym materiałem lub/i nałożonym wzmocnieniem jako ciała z więzami. Przedstawiono również analizę rozkładu i wielkości naprężeń stycznych między warstwami materiałów rodzimego i dodatkowego, występujących po naprawie albo wzmocnieniu powłoki chłodni kominowej, gdy jako dodatkowego użyto materiału o innych parametrach niż materiał rodzimy.

W monografii przedstawiono działania, jakie należy wykonać, opracowując raport na temat stanu technicznego chłodni kominowych. Można założyć, że stwarza on podstawę do opracowania *Wytycznych* przeznaczonych dla użytkowników chłodni kominowych. Ale już obecnie niniejsza monografia może być z powodzeniem wykorzystana przez nich w związku z nadzorem nad zapewnieniem bezpiecznej eksploatacji chłodni kominowych.

LITERATURA

- Abramek W., Centkowski J., Gigiel J., Golczyk M., Kałuża R., *Analiza bezpieczeństwa żelbetowych chłodni kominowych z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych*, Inżynieria i Budownictwo, nr 6, 1993, 247–250.
- Biały M., *Monitorowanie osiadań fundamentów hiperboloidalnej chłodni kominowej*, Przegląd Budowlany, nr 5, 2012, 40–43.
- Bień J., *Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010.
- Błaszczczyński T., Łowińska-Kluge A., Runkiewicz L., *Diagnostyka konstrukcji betonowych w przypadku korozji wewnętrznej betonu*, XII Konferencja naukowo-techniczna – Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego, Kielce, Cezdżyna, 16–18 maja 2012, 372–384.
- Brandt A., *Diagnostyka betonu na podstawie badania struktury*, Przegląd Budowlany, nr 10, 2011, 53–61.
- Ciesielski R., Gumiński A., Dulińska J., *Dynamic properties of hiperboloidal cooling tower on a nonhomogeneous elastic soil*, 3rd International Symposium on Natural Draught Cooling Towers, IASS, Paris, 1989, 49–58.
- Centkowski J., *Dobór grubości powłoki hiperboloidalnej chłodni kominowej*, Inżynieria i Budownictwo, nr 6, 1993, 233–237.
- Chmielewski T., Górski P., *O ocenie stanu technicznego chłodni kominowych*, Przegląd Budowlany, nr 5, 2010, 48–51.
- Chmielewski T., Golczyk M., *Zagadnienia niezawodności konstrukcji budowlanych na przykładzie hiperboloidalnych chłodni kominowych*, XXXIV Konferencja KILIW PAN i KN KN PZITB Gliwice–Krynica 1988, t. 6, 297–309.
- Dulińska J., Kawecki J., *Awarie i katastrofy budowlane wywołane działaniami dynamicznymi*, XXV Konferencja naukowo-techniczna – Awarie budowlane, Szczecin–Międzyzdroje, 24–27 maja 2011, s. 75–92.
- Gigiel J., Kałuża R., *Rekonstrukcja żelbetowych powłok chłodni kominowych*, Inżynieria i Budownictwo, nr 6, 1993, 238–240.
- ISCT 2012, 6th Interantional Sympodium on Cooling Towers. Ed. R. Harte, R. Meiswinkel, Faculty D, Departament of Civil Engineering, Bergische Universität, ISBN 978-3-925795-98-5, Wuppertal 2012.
- Hojdys Ł., Krajewski P., Seręga S., Plachecki M., *Stan techniczny powłoki żelbetowej hiperboloidalnej chłodni kominowej z dużymi imperfekcjami po 35 latach użytkowania*, Przegląd Budowlany, nr 4, 2012, 71–74.
- Hoła J., Schabowicz K., *Przegląd metod badawczych w zastosowaniu do diagnostyki i monitoringu obiektów budowlanych*, XII Konferencja naukowo-techniczna – Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego, Kielce, Cezdżyna, 16–18 maja 2012, 60–81.
- Kamiński M., *Wybrane problemy diagnostyki i oceny stanu technicznego chłodni kominowych*, Przegląd Budowlany, nr 5, 2010, 51–54.
- Kasprzak T., Konderla P., Myślecki K., *Fizycznie nieliniowa analiza żelbetowej powłoki chłodni kominowej*, Zezsyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2011, z. 58, nr 3, 135–142.
- Kasprzak T., Konderla P., Kutylowski R., Waśniewski G., *Ocena skutków rozbudowy elektrowni na stan bezpieczeństwa istniejącej chłodni kominowej*, Przegląd Budowlany, nr 5, 2012, 36–39.

- Konderla P., Kutylowski R., Stefanek K., *Koncepcja wzmocnienia chłodni kominowej materiałem kompozytowym z matrycą cementową*, XXVI Konferencja naukowo-techniczna – Awary budowlane, Szczecin–Międzyzdroje, 21–24 maja 2013, 251–258.
- Kutylowski R., *Optymalizacja topologii kontinuum materialnego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- Lechman M., Chruściel W., Lamenta A., *Program utrzymania z uwzględnieniem trwałości hiperboloidalnych chłodni kominowych po 30 latach eksploatacji*, Przegląd Budowlany, nr 5, 2012, 30–35.
- Ledwoń J., Golczyk M., *Chłodnie kominowe i wentylatorowe*, Arkady, Warszawa 1967.
- Metody diagnozowania betonów i betonów wysokowartościowych na podstawie badań strukturalnych*, red. A.M. Brandt, J. Kasperkiewicz, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, North Atlantic Treaty Organization, (NATO), Scientific Affairs Division, ISBN 83-917926-8-4, Warszawa 2003.
- Naghdi P. M., *Foundations of elastic shell theory*, Progress in Solid Mechanics, Vol. IV, North Holland Publ. Company, Amsterdam 1963.
- Naghdi P. M., *The theory of shells and plates*, Handbuch der Physik, Vol. VIa/2, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1972.
- Noakowski P., *Ocena wyłączenia chłodni kominowej wskutek nierównomiernych osiadań jej fundamentów*, Przegląd Budowlany, nr 5, 2010, 40–44.
- Płachecki M., Seręga Sz., *Ocena bezpieczeństwa istniejącej chłodni kominowej w świetle nowych wymagań normowych*, XII Konferencja naukowo-techniczna – Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego, Kielce, Cezdyna, 16–18 maja 2012, 209–221.
- Płachecki M., Koziński K., *Analiza nośności i naprawy słupów podbudowy hiperboloidalnych chłodni kominowych po pięćdziesięciu latach eksploatacji*, XXVI Konferencja naukowo-techniczna – Awary budowlane, Szczecin–Międzyzdroje, 21–24 maja 2013, 713–720.
- Przegląd Budowlany, VIII Konferencja Naukowo-techniczna „Budownictwa w energetyce”, Szklarska Poręba, 15–18 maja 2012, nr 5, 2012.
- Runkiewicz L., *Wykonywanie, kontrola i odbiór robót budowlanych przy wzmacnianiu konstrukcji żelbetowych*, Przegląd Budowlany, nr 10, 2011, 44–52.
- Rycaj S., Napieraj Z., *Regeneracja powłok żelbetowych chłodni hiperboloidalnych na przykładzie doświadczeń uzyskanych w Elektrowniach – Łagisza, Adamów, Siersza*, XXXIV Konferencja KILIW PAN i KN KN PZITB, Gliwice–Krynica 1988, t. 6, 311–320.
- Ryszewski C., Gierczyk F., *Zagadnienia trwałości żelbetowych chłodni hiperboloidalnych w świetle 35-letnich doświadczeń*, XXXIV Konferencja KILIW PAN i KN KN PZITB, Gliwice–Krynica 1988, t. 6, 357–362.
- Seręga Sz., Hołdys Ł., Krajewski P., Płachecki M., *Ocena bezpieczeństwa chłodni kominowej z dużymi wadami*, XXVI Konferencja naukowo-techniczna – Awary budowlane, Szczecin–Międzyzdroje, 21–24 maja 2013, 727–734.
- Symposium *Chłodnie kominowe – efektywne systemy ochrony i napraw*, Jelenia Góra, 2–4 grudnia 1991, z dostarczonych maszynopisów powielono i oprawiono w Zakładach Graficznych Politechniki Wrocławskiej.
- Rozin L.A., *Variacionnye postanovki zadač dla uprugich sistem*, Izd. Leningradskogo Universiteta, Leningrad 1978.
- Zdanowicz K., *Geodezyjny monitoring deformacji powierzchni hiperboloidalnych chłodni kominowych*, Czasopismo Techniczne, Budownictwo, z. 3, nr 1-B, 2011, 207–218.
- Zybur A., Jaśniok M., Jaśniok T., *Ocena stanu technicznego konstrukcji żelbetowej pod względem trwałości*, XII Konferencja naukowo-techniczna – Warsztat pracy rzeczoznawcy budowlanego, Kielce, Cezdyna, 16–18 maja 2012, 153–171.

NORMY I PRZEPISY

- [N 1] BTR Technika budowlana dla chłodni kominowych: Zalecenia (VGB-Richtlinie) R610 U, VGB PowerTech, Essen, Rev. 2005.
- [N 2] Prawo Budowlane Dz.U.2006.156.1118 z późn. zm.; ostatnia zm. Dz.U.07.247.1844.
- [N 3] International Standard ISO/FDIS 13822, Bases for design of structures – Assessment of existing structures.
- [N 4] Książka obiektu budowlanego.
- [N 5] PN-EN 12390-1:2001 Badania betonu – Część 1, Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badania i form.
- [N 6] PN-EN 12390-2:2001 Badania betonu – Część 2, Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.
- [N 7] PN-EN 12390-3:2001 Badania betonu – Część 3, Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.
- [N 8] PN-EN 12390-4:2001 Badania betonu – Część 4, Wytrzymałość na ściskanie Wymagania dla maszyn wytrzymałościowych.
- [N 9] PN-EN 12390-5:2001 Badania betonu – Część 5, Wytrzymałość na zginanie próbek do badania.
- [N 10] PN-EN 12390-6:2001 Badania betonu – Część 6, Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania.
- [N 11] PN-EN 12390-7:2001 Badania betonu – Część 7, Gęstość betonu.
- [N 12] PN-EN 12504-1:2001 Badania betonu w konstrukcjach – Część 1, Odwierty rdzeniowe – Wycinanie, ocena i badanie wytrzymałości na ściskanie.
- [N 13] PN-EN 12504-2:2002 Badania betonu w konstrukcjach – Część 2, Badanie nieniszczące – Oznaczanie liczby odbicia.
- [N 14] PN EN 12504-3:2005 Badania betonu w konstrukcjach – Część 3, Oznaczanie siły odrywania.
- [N 15] PN EN 12504-4:2005 Badania betonu – Część 4, Oznaczanie prędkości fali ultradźwiękowej.
- [N 16] PN-EN 13791:2008 Ocena wytrzymałości betonu na ściskanie w konstrukcjach i prefabrykowanych wyrobach betonowych.
- [N 17] PN-ISO 15630-1:2002 Stal do zbrojenia i sprężania betonu – Metody badań – Część 1, Pręty, walcówka i drut do zbrojenia betonu.
- [N 18] PN-EN 1990:2002 Eurocod 1, Podstawy projektowania konstrukcji.
- [N 19] PN-88/B-06250 Beton Zwykły, zastąpiona przez PN-EN 206-1:2003.
- [N 20] PN-EN 1991-1-1:2002 Eurocod 1, Oddziaływanie na konstrukcje – Część 1–1, Oddziaływanie ogólne. Ciężary objętościowe, ciężar własny i obciążenia zewnętrzne budynków.
- [N 21] PN-EN 1991-1-4:2005 Eurocod 1, Obciążenia budowli – Część 1–4, Ogólne obciążenia budowli, obciążenie wiatrem.
- [N 22] PN-EN 1991-1-5:2005 Eurokod 1, Oddziaływania na konstrukcje – Część 1–5, Oddziaływania ogólne. Oddziaływania termiczne.
- [N 23] PN-EN 1992-1-1:2008 Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1–1, Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [N 24] PN 77 / B-02011: Obciążenia w obliczeniach statycznych – Obciążenie wiatrem.

DIAGNOSTICS OF COOLING TOWER STRUCTURE CONDITION

This monograph systematizes the methodology for assessing the technical condition of cooling towers and the way of presenting results of studies documented in the form of a report. It presents a way of modelling the cooling tower shell with replaced material or/and with applied reinforcement, as a body with constraints, and an analysis of the distribution and magnitude of shearing stresses at the interface between the original material and the added material when the latter's parameters differ from those of the original material.

The motivation for this study was the lack of relevant regulations and universal procedures for assessing the technical condition of cooling tower structures. Since various procedures are used by experts making such assessments it seems necessary to systematize them. Thanks to the use of a standardized methodology it would be possible to compare the condition of cooling tower structures in the successive periods of their service and to compare the condition of different structures.

The author hopes that this monograph will help cooling tower users to make right decisions concerning investigations to be undertaken to diagnose the condition of cooling towers.

The monograph includes five chapters.

Chapter 1 consists of three sections.

The first section outlines the subject against the background of the most current studies reported in the literature. The second section defines the condition of the cooling tower, beginning with its condition at the design stage, through the postconstruction condition to the operational condition (including renovations and upgrades). The third section synthetically presents problems relating to the classification of cooling tower inspections and focuses on two basic inspections: the standard inspection and the special inspection.

Chapter 2 is fundamental for cooling tower testing. It describes all the activities involved in cooling tower testing and in the processing of the test results. It is recommended that the tests, analyses and other activities involved should be presented in

a report. The content of such a report describing the technical condition of the cooling tower structure is specified.

The particular test activities are described in detail. Attention is paid to the way of documenting the test results. The way and range of nondestructive testing and the methodology of taking samples for testing are specified. The laboratory tests to which the drill cores should be subjected and the way in which the results of the tests should be presented are described. Attention is drawn to tests aimed at determining the parameters of the subsoil. The methodology of cooling tower land surveys is described. The way of carrying out a static strength analysis of the cooling tower structure is presented.

The need for the systematic acquisition of data on the geometry of the structure and the properties of the material, from which the latter is made, covering the design stage and the subsequent stages of cooling tower operation, is emphasized. The principles of carrying out static strength calculations and exemplary algorithms for such calculations with reference to the systematically updated state of the operated cooling tower are presented. A physical cooling tower structure model, taking into accounts FEM, and the adopted load configurations are described in the next sections of this chapter. Thanks to the proposed graphic form of presenting the results the latter can be synthetically shown on a cooling tower shell expansion map. Changes in the local strain of the structure material can be presented on such a map and if the ultimate limit state is exceeded, the areas which should be strengthened can be relatively easily identified. A general methodology for carrying out a non-linear analysis of cooling tower shell structures is presented.

In the final section of this chapter, recommendations and general observations concerning the content of the report, and operational recommendations for monitoring the condition of the cooling tower structure in the course of its service are made.

Chapter 3 contains a classification of typical kinds of damage to cooling towers. The kinds of damage due to respectively improper execution and improper operation are distinguished. The kinds of damage are illustrated with photographically documented cases encountered in practice.

Chapter 4 describes the condition of the cooling tower in different periods of its service, including the modelling of the interaction between the applied repair or strengthening material and the original structure. A model of the cooling tower shell as a body made up of two isotropic materials, based on the general theory of shells and the total Hu-Washizu functional, is presented. A complete set of equations for the model was obtained by solving the boundary value problem. The set is made up of geometric and constitutive relations, equations of equilibrium and boundary conditions imposed on displacements and stresses. Moreover, by modelling the two-material shell as a body with constraints the kinematic and static conditions along the lines of the imposed linear constraints were obtained. In the case of the discrete constraints, the filtration properties of the Dirac function were exploited to show the way in which

such constraints are modelled. A functional was formulated and after its variation, equations similar to the ones for continuous constraints, but describing the static and kinematic equilibrium in discretely distributed connectors, were obtained.

Chapter 5 analyses the state of shearing stresses occurring when the material in the cooling tower structure is replaced or if the latter is reinforced. The results of analyses of shearing stress values for a case when a material characterised by a different Young modulus than that of the original material was used to repair (material replacement) or reinforce the cooling tower are presented. The problems involved in repair (material replacement) or strengthening consisting in the application of ribs or surface reinforcement are discussed. The analyses indicated the cooling tower areas, in which shearing stresses are most likely to increase, which may result in delamination, especially in the case of superficially applied reinforcement.





Politechnika
Wrocławska

Biblioteka Główna

372577 D/2

W monografii *Diagnostyka stanu technicznego* usystematyzowano metodykę oceniania stanu technicznego chłodni kombinowanych oraz sposób przedstawiania wyników prac dokumentowanych w formie raportu. Zaprezentowano sposób modelowania powłoki chłodni z wymienionym materiałem lub/i nałożonym wzmocnieniem jako ciała z więzami. Przedstawiono ponadto analizę rozkładu i wielkości naprężeń stycznych, jakie występują na granicy między warstwami materiału rodzimego i dodatkowego, w przypadku gdy jako dodatkowe użyto materiału o innych parametrach niż materiał rodzimy.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej są do nabycia w księgarni,
plac Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, budynek D-1 PWr., tel. 71 320 29 35
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową: zamawianie.ksiazek@pwr.wroc.pl

ISBN 978-83-7493-788-7