dr hab. inż. Maciej Niedostatkiewicz^{1)*)} dr inż. Jacek Haras²⁾

Zastosowanie promieniowania rentgenowskiego w diagnostyce montażu kotew wklejanych

DOI: 10.15199/33.2015.12.26

alety metody kotwienia za pomocą kotew wklejanych, to nieskomplikowany montaż, niezbyt duży koszt w porównaniu z innymi metodami oraz możliwość stosowania w przypadku podłoży o małej nośności. Natomiast niedoskonałością metody jest konieczność zachowania wysokiego poziomu reżimu technologicznego podczas realizacji prac związanych z montażem kotew, a przede wszystkim oczyszczania otworu w celu zapewnienia pełnego kontaktu pomiędzy żywicą a materiałem podłoża.

Jedną z metod oceny stopnia zespolenia lepiszcza z podłożem oraz kształtu materiału wypełniającego przygotowane otwory jest wykonanie prześwietlenia miejsc osadzenia kotew za pomocą promieniowania rentgenowskiego. Badania radiograficzne należą do grupy badań bezinwazyjnych, które umożliwiają analizę struktury materiałów, w tym wyrobów i produktów budowlanych, takich jak drewno [1], elementy ceramiczne i porcelanowe [8], stal [4] oraz materiały sypkie [6]. Udoskonaloną wersją klasycznej ekspozycji promieniowania rentgenowskiego jest stereoskopia rentgenowska [3], a kolejnym stopniem zaawansowania tomografia rentgenowska, która charakteryzuje się ciągłą emisją promieniowania dookoła badanego elementu, co umożliwia uzyskiwanie obrazów trójwymiarowych [2, 5, 7]. Przegląd literatury dotyczącej zastosowania klasycznego promieniowania rentgenowskiego oraz tomografii rentgenowskiej w diagnostyce materiałów budowlanych można znaleźć w pracy [6].

Obecnie nie ma w literaturze przykładów zastosowania promieniowania rentgenowskiego w diagnostyce skuteczności montażu kotew wklejanych w elementach drobnowymiarowych, jakimi są wyroby wapienno-piaskowe. Celem artykułu jest ocena możliwości wykorzystania promieniowania rentgenowskiego do diagnostyki montażu kotew wklejanych oraz dalsza analiza wpływu lokalizacji miejsc montażu kotew w drążonych bloczkach wapienno-piaskowych na sposób połączenia pomiędzy żywicą a materiałem elementu drobnowymiarowego. Przeprowadzono dyskusję na temat wpływu charakterystyk aparatu rentgenowskiego oraz doboru parametrów eksploatacyjnych urządzenia na czytelność wyników badań.

Opis metody pomiarowej

W radiografii konwencjonalnej wymagana jest ekspozycja analizowanej próbki na promieniowanie jonizujące, zazwyczaj rentgenowskie, określane też w literaturze jako promieniowanie X. Otrzymywany obraz jest negatywem próbki, tzn. obszary białe (mniej zaciemnione) odpowiadają obszarom struktury próbki, które pochłaniają promieniowanie bardziej od pozostałych. Często spotyka się również wyniki eksperymentów obrazowanych jako pozytywy, tzn. fragmenty próbek charakteryzujące się "mniejszym zagęszczeniem" (ewentualnie mniejszą grubością lub mniejszą gęstością), przez które przedostaje się promieniowanie, są wizualizowane jako elementy jaśniejsze, natomiast fragmenty charakteryzujące się "podwyższonym zagęszczeniem" jako ciemniejsze. Podstawy teoretyczne pomiarów z zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego opisane zostały szczegółowo w [1, 6].

Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych przez osadzenie prętów metalowych w bloczkach wapienno-piaskowych drążonych pionowo klasy 20, umożliwiających wykonanie przegród pionowych o odporności ogniowej REI240/EI240 i izolacyjności akustycznej $R_{A1} = 54 \text{ dB}, R_{A2} = 51 \text{ dB}, R_{W} = 56 \text{ dB}.$ Zastosowane bloczki miały wymiary 240 × 333 × 199 mm i 2 pionowe otwory przelotowe średnicy 40 mm rozmieszczone w odległości 80 mm (krawędź otworu) od zewnętrznej płaszczyzny poprzecznej bloczka. Użyto prętów stalowych M14 ze stali węglowej S235JR, które zamontowano za pomocą jednoskładnikowej żywicy winyloestrowej. W celu przeprowadzenia doświadczeń wybrano 3 przekroje: w części pełnościennej (A); w środku otworu pionowego (B) oraz na krawędzi otworu pionowego (C), co pokazano na fotografii 1. Po osadzeniu prętów stalowych z bloczków wycięto próbki o wymiarach 240 × 333 × 199 mm. W przypadku każdej lokalizacji prętów stalowych przygotowano 4 próbki, a więc ich całkowita liczba wynosiła 12.

Do przeprowadzenia badań zastosowano 2 rodzaje aparatów rentgenowskich: (1) medyczny oraz (2) przemysłowy. Aparat rentgenowski (1) miał możliwość cyfrowej wizualizacji danych. Ekspozycja promieniowania odbywała się w technice dwupunktowej. Na podstawie serii próbnych pomiarów ustalono wartość natężenia prądu generatora I_a = 12,5 mA oraz wartość napięcia U_a = 81,0 kV jako parametrów, przy których uzyskiwane zdjęcia charakteryzowały się największym kontrastem. Czas ekspozycji promieniowania podczas wszystkich eksperymentów był jednakowy i wynosił $t_{a} = 0.2$ s. Ich wyniki rejestrowano na ekranach o wymiarach 35 × 43 cm. Cyfrowy zapis danych pozyskiwanych z płyt obrazowych odbywał się w formacie *.dcm. Zastosowana wielkość kaset z płytami obrazowymi umożliwiła uzyskanie obrazu podczas obróbki cyfrowej, którego matryca wynosiła 1760 × 2010 pikseli, wymiar pojedynczego piksela 0,2 × 0,2 mm, a maksymalna częstotliwość przestrzenna, którą można było odwzorować, 2,5 linii/mm. Wizualizowane cyfrowo obrazy analizowano zarówno jako negatywy, jak i pozytywy. W artykule przedstawiono wyniki w postaci pozytywów.

Aparat rentgenowski (2) miał możliwość prześwietlania elementów, równoważnych pod względem struktury i grubości elementom stalowym do ~95 mm. Podczas doświadczeń zastosowano natężenie prądu generatora $I_{o} = 4,7$ mA oraz napięcie $U_{o} = 230,0$ kV. Czas ekspozycji promieniowania podczas wszystkich eksperymentów wynosił t = 450,0 s. Każdy z eksperymentów, zarówno w przypadku próbek (A), (B) i (C), jak również każdego z typów aparatu rentgenowskiego (1) i (2) powtarzany był trzykrotnie.

¹⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

 ²⁾ Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny
 *) Autor do korespondencji: e-mail: mniedost@pg.gda.pl

PRAKTYKA BUDOWLANA



Fot. 1. Zakotwienie pręta stalowego w elemencie wapienno-piaskowym. A) w części pełnościennej; B) w środku otworu pionowego; C) na krawędzi otworu pionowego: a) widok ogólny; b) widok z góry; c) szczegół zakotwienia w kanale pionowym

Wyniki badań

Badania doświadczalne przeprowadzono w przypadku ekspozycji horyzontalnej oraz wertykalnej próbek (A), (B) oraz (C). W przypadku medycznego aparatu rentgenowskiego (1) oraz horyzontalnej ekspozycji promieniowania wyniki doświadczeń pokazały, że próbka (A) charakteryzowała się pełnym kontaktem żywicy z podłożem wzdłuż całej długości otworu poziomego (fotografia 2Aa). Stwierdzono całkowite wypełnienie otworu żywicą. Wyniki w przypadku próbki (B) również pokazały ciągłość styku układu żywica-podłoże (fotografia 2Ba). Jedynie na krawędzi poziomego otworu wykonanego w celu osadzenia kotwy z pionowym otworem technologicznym (drążonym) zaobserwowano lokalne zarysowanie (brak kontaktu żywicy z materiałem elementu drobnowymiarowego). Powstało ono prawdopodobnie w wyniku zarwania się w kanale bryły żywicy pod własnym ciężarem. Długość rozwarcia wynosiła ~4 mm, a szerokość w górnej części ~0,5 mm i malała w kierunku osi otworu poziomego do zarysowania włoskowatego. Rezultaty doświadczeń z próbką (C) pokazały ciągłość styku żywica-podłoże wzdłuż otworu poziomego (fotografia 2Ca). Nie zaobserwowano rozszczelnienia styku żywicy wzdłuż pobocznicy w otworze pionowym.

Na podstawie wyników doświadczeń z wertykalną ekspozycją promieniowania stwierdzono, że w przypadku próbki (A) nie było możliwości oceny stopnia zespolenia żywicy z podłożem (fotografia 3Aa). Wynikało to bezpośrednio z grubości elementu wapien-



Fot. 2. Radiogramy pionowe zakotwienia pręta stalowego w elemencie wapienno-piaskowym: A) w części pełnościennej; B) w środku otworu pionowego; C) na krawędzi otworu pionowego uzyskane na podstawie pomiarów przy użyciu aparatu rentgenowskiego: a) medycznego (1); b) przemysłowego (2)

no-piaskowego (odległość górnej krawędzi do osi pręta wynosiła ~100 mm). Podobna sytuacja miała miejsce w przypadku próbki (B) (fotografia 3Ba) oraz próbki (C) (fotografia 3Ca).

W przypadku doświadczeń z przemysłowym aparatem rentgenowskim (2) oraz horyzontalną ekspozycją promieniowania wyniki doświadczeń pokazały, że w przypadku próbki (A) występował lokalny brak kontaktu żywicy z podłożem na długości ~20 mm wzdłuż górnej krawędzi otworu poziomego (fotografia 2Ab). Sytuacja ta możliwa była jednak do oceny tylko i wyłącznie na podstawie oryginalnych zdjęć wykonanych na błonie rentgenowskiej. Wyniki w przypadku próbki (B) (fotografia 2Bb) pokazały ciągłość styku układu żywicapodłoże wzdłuż otworu poziomego, jednak wyznaczone zarysowanie żywicy w miejscu styku otworów poziomego i pionowego było większe niż pomierzone na podstawie zdjęć wykonanych medycznym



Fot. 3. Radiogramy poziome zakotwienia pręta stalowego w elemencie wapienno-piaskowym: A) w części pełnościennej; B) w środku otworu pionowego, C) na krawędzi otworu pionowego uzyskane na podstawie pomiarów przy użyciu aparatu rentgenowskiego: a) medycznego (1); b) przemysłowego (2)

aparatem rentgenowskim i wynosiło odpowiednio ~5 mm (długość) oraz ~0,6 mm (rozwarcie). Rezultaty doświadczeń z próbką (C) (fotografia 2Cb) były zbliżone do uzyskanych podczas doświadczeń z medycznym aparatem rentgenowskim (1) (fotografia 2Ca).

Podobnie jak w przypadku doświadczeń wykonanych z zastosowaniem medycznego aparatu rentgenowskiego (1), wyniki doświadczeń z wertykalną ekspozycją promieniowania generowanego przez aparat przemysłowy (2) uniemożliwiły, ze względu na silne tłumienie, ocenę stopnia zespolenia żywicy z podłożem (fotografia 3Ab, 3Bb oraz 3Cb).

Analiza wyników badań

Wpływ filtru stałego (własnego). W przypadku medycznego aparatu rentgenowskiego (1), filtr stały (własny) stanowiła obudowa lampy rentgenowskiej oraz otaczający ją olej transformatorowy. Wartość liczbowa filtru własnego była równoważna warstwie aluminium grubości 1,5 mm. Natomiast w przypadku przemysłowego aparatu rentgenowskiego (2), filtr stały (własny) stanowiła blacha aluminiowa grubości 5 mm. Filtr ten miał za zadanie zmniejszenie natężenia "miękkiej składowej" promieniowania rozproszonego. W wyniku zastosowania filtru stałego (własnego) radiografy uzyskane podczas doświadczeń z użyciem przemysłowego aparatu rentgenowskiego (2) charakteryzowały się mniejszym udziałem tzw. *miękkiej części promieniowania* (eliminacja z widma promieniowania o mniejszej długości fali), co skutkowało lepszym prześwietlaniem próbek oraz większą kontrastowością zdjęć wykonanych na błonach rentgenowskich.

Wpływ filtru absorpcyjnego (dodatkowego). W medycznym aparacie rentgenowskim (1), filtr absorpcyjny stanowiła warstwa aluminium grubości 1 mm ustawiona prostopadle do wiązki promieniowania, natomiast w aparacie przemysłowym (2) ołowiane folie grubości 0,05 mm wykonane jako okładki na błonach rentgenowskich oraz blacha ołowiana grubości 4 mm ułożona na podłodze. Filtr ten dodatkowo zabezpieczał przed promieniowaniem rozproszonym odbitym od podłogi i ścian komory rentgenowskiej, w której odbywały się ekspozycje. W wyniku zastosowania filtru absorpcyjnego (dodatkowego), radiogramy uzyskane podczas doświadczeń z użyciem przemysłowego aparatu rentgenowskiego (2) charakteryzowały się zminimalizowanym wpływem promieniowania rozproszonego dzięki eliminacji dodatkowych błędów w postaci tzw. *artefaktów* (odbić i zaciemnień).

Wpływ kolimatora zmiennego (głębinowego). W medycznym aparacie rentgenowskim (1) kolimator głębinowy umożliwiał precyzyjne wyznaczenie prostokątnego pola naświetlania o rozmiarach odpowiadających rozmiarom płyty obrazowej. Podczas badań zastosowano kratkę przeciwrozproszeniową stałą, charakteryzującą się współczynnikiem wypełnienia M = 70 (stosunek wysokości listew ołowianych do odległości pomiędzy nimi). W przemysłowym aparacie rentgenowskim (2) nie stosowano kolimatora głębinowego, lecz stałą, przyjętą na podstawie pomiarów próbnych, odległość ogniskową (odległość źródło-błona) równą 700 mm, co umożliwiło uzyskanie dużego kontrastu zdjęć na błonach rentgenowskich. Zmiana ogniskowej w przypadku ekspozycji wertykalnej nie polepszyła jakości uzyskiwanych obrazów ze względu na duże tłumienie promieniowania w strukturze elementu wapienno-piaskowego.

Wpływ promieniowania miękkiego. W przypadku medycznego aparatu rentgenowskiego (1), w celu zwiększenia ograniczenia wpływu promieniowania miękkiego zastosowano dodatkowy filtr z blachy miedzianej grubości 0,3 mm. Filtr ten pod względem zakresu pracy stanowił rozbudowę filtru stałego (własnego). Promieniowanie o małej energii emisyjnej zostało zaabsorbowane w elemencie z blachy miedzianej i ograniczyło możliwość powstawania zaburzeń obrazu (artefaktów), za co w głównej mierze odpowiedzialny był filtr absorpcyjny (dodatkowy). W przypadku przemysłowego aparatu rentgenowskiego (2) zastosowano, podczas początkowych doświadczeń, fluoryzujące okładki wzmacniające, tzw. *okładki solne*. W dalszych doświadczeniach, w celu zwiększenia kontrastu, wykorzystano okładki wzmacniające z blachy ołowianej grubości 0,05 mm. Rozwiązanie to zwiększyło efektywność działania zarówno filtru stałego (własnego), jak również filtru absorpcyjnego (dodatkowego). Podczas doświadczeń z zastosowaniem przemysłowego aparatu rentgenowskiego (2), ze względu na brak wzorników dla elementów wapienno--piaskowych, zastosowano wskaźniki jakości obrazu (WJO) właściwe dla elementów stalowych. Przyjęto, że możliwe jest uzyskanie wizualizacji elementów metalowych i ich interpretacja w zakresie od W6 (1,0 mm) do W12 (0,25 mm) (fotografia 2ABCb). Uznano, że taka metoda oceny obrazu jest dopuszczalna, ponieważ w próbkach występowały elementy stalowe w postaci kotew.

Obrazy uzyskane za pomocą przemysłowego aparatu rentgenowskiego (2) zawierały więcej informacji niż obrazy uzyskane z zastosowaniem medycznego aparatu rentgenowskiego (1). Radiogramy były bardziej kontrastowe, co pozwoliło na interpretacje większej liczby zjawisk zachodzących w miejscu kontaktu żywicy z podłożem oraz umożliwiło detekcję miejsc nieciągłości połączenia żywica-podłoże. Interpretacja wyników wymagała jednak korzystania tylko i wyłącznie z błon rentgenowskich. Zapis cyfrowy uzyskany na podstawie skanowania tzw. światłem przechodzącym skutkował pogorszeniem jakości obrazu, który niezależnie od formy zapisu cyfrowego (*png, *.tiff lub *.jpg) odpowiadał pod względem informacji obrazom uzyskanym z medycznego aparatu rentgenowskiego (1).

Wnioski

Promieniowanie rentgenowskie umożliwia oszacowanie poprawności montażu kotew wklejanych w elementach nośnych, w tym w bloczkach wapienno-piaskowych. Interpretacja wyników wymaga korzystania z radiogramów na błonach rentgenowskich, gdyż ich digitalizacja i dalsza analiza zapisów cyfrowych powoduje obniżenie jakości zdjęć i utratę istotnych informacji z inżynierskiego punktu widzenia. Metoda promieniowania rentgenowskiego może być stosowana tylko i wyłącznie w skali laboratoryjnej, ze względu na brak możliwości horyzontalnego wygenerowania wiązki promieniowania rentgenowskiego w kierunku prostopadłym do osadzonych kotew, zamontowanych w elementach konstrukcyjnych w skali naturalnej. Jednocześnie należy dążyć do zastosowania techniki tomografii rentgenowskiej w celu trójwymiarowej wizualizacji montażu kotew w elementach drobnowymiarowych.

Literatura

[1] Badel E., Perre P. (2001): Using a digital X-ray imaging device to measure the swelling coefficients of a group of wood cells. NDT&E, 34, s. 345 – 353.

[2] Caulkin R., Jia X., Xu C. i in. (2009): Simulations of structures in packed columns and validation by X-ray tomography. Ind. Eng. Chem. Res., nr 48, s. 202 – 213.
[3] Evans J. P. O. (2002): Dynamic stereoscopic X-ray imaging. NDT&E, 35, s. 337 – 345.
[4] Kuroda M., Yamanaka S, Isobe Y. (2001): Detection of plastic deformation and estimation of maximum value of residual stress in low carbon steel by X-ray stress analusis using statistical techniques. NDT&E, 36, s. 77 – 83.

[5] Letang J-M., Peix G. (2003): Online X-ray focal spot assessment based on deconvolution using imaging devices. NDT&E, 36, s. 303 – 317.

[6] Niedostatkiewicz M. (2014): Badania deformacji w materiałach sypkich podczas dynamicznego przepływu w silosach. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 145, s. 1 – 371.

[7] Pengpan T., Mitchell C. N., Soleimani M. (2010): Compensating for motion artefacts in X-ray CT using Electrical Impedance Tomography data. Proceedings of the 6th World Congress on Industrial Process Tomography (WCIPT-6), Beijing, China, s. 1132–1548.
[8] Potter A. R, Austin J. C., Ormerod R. M., Haycoock P. W., Heywood B. R., George S. D. (2001): X-ray images of defect formation in porcelain ceramics during drying. NDT&E, 36, s. 77 – 83. Przyjęto do druku: 12.08.2015 r.