

Zastosowanie mikrotomografii komputerowej (μ CT) w diagnostyce jakości zabezpieczenia otworów wiertniczych przed migracją gazu

Computer microtomography (μ CT) application in wells anti gas migration sealing quality inspections



Mgr inż. Łukasz Bolewski^{*)}



Mgr inż. Bartłomiej Karpiński^{*)}



Mgr inż. Mateusz Kmieć^{*)}



Dr hab. inż. Marek Szkodo^{*)}

Treść: Artykuł opisuje badania nad negatywnym zjawiskiem występującym w wiertnictwie otworowym pod nazwą migracja gazu z wykorzystaniem metody mikrotomografii komputerowej μ CT (ang. *computed microtomography*). Opisano główne przyczyny powstawania tego negatywnego zjawiska polegającego na przepływie gazów, a także płynów w zaczynie cementacyjnym lub kamieniu cementowym. Przygotowano próbki imitujące zacementowany odcinek rur okładzinowych. Skupiono się na wykorzystaniu mikrotomografii komputerowej, oraz analizie zrekonstruowanego trójwymiarowego obrazu w celu sprawdzenia jakości zacementowania. Przedstawiono zalety tej metody oraz możliwości analizy powstałych kamieni cementowych.

Abstract: This paper presents a description of the gas migration phenomenon. Main causes of this negative phenomenon consisting in fluid or gas flow in the cement slurry or bounded cement sheath have been described. The paper describes the use of the computed microtomography (μ CT) and analysis of the reconstructed three-dimensional (3D) images, in order to check the quality of cementation samples prepared at the Faculty of Mechanical Engineering. The paper presents the advantages and opportunities of X-ray computed microtomography analysis of the bonded cement sheath.

Słowa kluczowe:

migracja gazu, mikrotomografia komputerowa, jakość zacementowania

Keywords:

gas migration, computed microtomography (μ CT), cementing job quality

^{*)} Politechnika Gdańska, Gdańsk

1. Wstęp

Uszczelnienie poziomów skał zbiornikowych w orurowanych otworach wiertniczych jest jedną z najistotniejszych operacji w procesie wydobywania węglowodorów. Jej niepowodzenie grozi skażeniem środowiska, przeprowadzaniem kosztownych akcji ratunkowych i naprawczych, czy koniecznością wypłaty wysokich odszkodowań. Z tego powodu rozwiązanie problemów technologicznych, z uwzględnieniem szeregu czynników obejmujących zarówno fazę projektowania, jak i wykonania zabiegu cementowania, jest sprawą niezwykle ważną. Jak pokazują dane z pomiarów polskiej geofizyki otworowej, zwłaszcza badania CBL (*Cement Bond Log*), VDL (*Variable Density Log*) oraz wyniki cementomierzy typu PET lub CET, problem niedostatecznego wiązania cementu do rur okładzinowych i linera jest widoczny w niemal wszystkich przypadkach zespolenia rur przy pomocy zaczynu cementowego (Abimbola i in. 2016). Ponadto wiodące firmy naftowe, na podstawie analiz cementowań, twierdzą, że około 15% wykonanych zabiegów cementowań należałoby uznać za nieudane ze względu na proces ekshalacji gazowej (Szewczuk, Bolewski 2016a, b, Kremieniewski, Stryczek 2011). Do głównych przyczyn powodujących problemy ze szczelnością płaszczu cementacyjnego zaliczamy: kurczenie się cementu, migrację gazów w trakcie stygnięcia, pęknięcie po zastygnięciu oraz długoterminową degradację związaną z oddziaływaniem korozyjnego środowiska, substancji chemicznych i temperatury odwiertu (Celia i in. 2004). W literaturze znajdziemy szereg prac poświęconych tematyce integralności odwiertu wydobywczego i szczelności płaszczu cementacyjnego. Większość prac związana jest z wpływem destrukcyjnego oddziaływania CO₂ na jakość wiązania cement-casing, cement-skała. Testy laboratoryjne badające wpływ tego czynnika były zaprezentowane w pracach: (Kutchko i in. 2007, Carey 2013, Kutchko et al. 2008, Rimmele i in. 2008)).

Jednym z ważniejszych aspektów interakcji pomiędzy cementem w odwiercie a formacją skalną są parametry związane z porowatością obydwu tych materiałów. Porowatość i rozkład wielkości porów wpływają na zachowanie stałych materiałów porowatych, w tym na zachodzące w nich przepływy płynów i gazów. Najnowsze opracowania i wdrożenia w zakresie metod obliczeniowych oraz postęp w akwizycji obrazu z zastosowaniem rentgenowskiej tomografii i mikrotomografii komputerowej zaowocowały coraz szerszym zastosowaniem tych metod w ośrodkach porowatych. Obecnie metoda mikrotomografii komputerowej jest jedną z najbardziej zaawansowanych metod badawczych, używanych w geologii, przede wszystkim w celu scharakteryzowania właściwości porometrycznych skał zbiornikowych. Umożliwia ona wizualizację wewnętrznej struktury badanego obiektu. Mikrotomografia rentgenowska, ze względu na względnie wysoką rozdzielczość i nieniszczący charakter, znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki. Potencjalnie może być użyta w każdym przypadku, w którym istotną rolę odgrywa budowa wewnętrzna (na poziomie mikrometrycznym) badanego przedmiotu. Większa ilość badań potwierdziła skuteczność użycia metody mikrotomografii rentgenowskiej (x-ray- μ CT), w celu identyfikacji zmian w strukturze w strefie kontaktowej cement-skała. Badania zaprezentowane w pracach (Cao i in. 2013, Jung i in. 2012, Mason i in. 2014, Yalcinkaya i in. 2011) wykazały, że metoda mikrotomografii komputerowej μ CT, jest w stanie w bezinwazyjny i niedestrukcyjny sposób zwizualizować niejednorodne przestrzenie degradacji materiału jakim jest cement wiertniczy. Uwzględniając w tym gęstość i zmianę struktury porów na skutek destrukcyjnego działania środowiska nasyconego CO₂. Metoda ta umożliwiła wizualizację potencjalnych ścieżek ucieczki CO₂, które mogą tworzyć

się w strefach kontaktu cement-skała, jako efekt procesów degradacji. Rentgenowska mikrotomografia komputerowa ma zastosowanie do analizy jakościowej i ilościowej wewnętrznych właściwości materiałów geologicznych. Pozwala bezinwazyjnie zajrzeć do wnętrza badanego obiektu, o ile badana próbka odznacza się wystarczająco dużym zróżnicowaniem absorpcji promieniowania rentgenowskiego przez poszczególne jej elementy. Jednym z ważniejszych zastosowań rentgenowskiej tomografii komputerowej jest badanie porowatości, co ułatwia silny kontrast gęstości pomiędzy fazą stałą a powietrzem (Zalewska, Dohnalik 2009). Można by przytoczyć więcej badań obejmujących charakterystykę skał zbiornikowych (Van Geet i in. 2000, Van Geet i in. 2003).

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wykorzystania mikrotomografii komputerowej (μ CT) jako skutecznej metody w diagnostyce jakości zabezpieczenia otworów wiertniczych przed migracją gazu. W celu zwieryfikowania problematyki i metodologii uszczelniania orurowania przy pomocy zaczynu cementowego wykonano badania w skali laboratoryjnej na wcześniej zaprojektowanym i zbudowanym stanowisku cementacyjnym. Stanowisko to powstało jako efekt realizacji jednego z zadań projektu PPPI (Protector Przeciw Pęczniącemu Ilom), finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju i znajduje się ono na wyposażeniu hali hydraulicznej i pneumatycznej Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej. W celu sprawdzenia jakości zacementowania i przeprowadzenia analizy wad powstałych w płaszczu cementowym posłużyły badania z wykorzystaniem mikrotomografu komputerowego General Electric Phoenix v|tome|x s240 CT, w który wyposażona jest Katedra Inżynierii Materiałowej i Spajania Politechniki Gdańskiej.

Zrekonstruowany trójwymiarowy obraz zacementowanych próbek poddano analizie, w celu detekcji porów, kanałów, szczelin i innych rodzajów wad obecnych w płaszczu cementacyjnym mających zasadniczy wpływ na obniżenie jakości zacementowania. Przedstawione wyniki ukazały i potwierdziły skuteczność wykorzystania metody μ CT jako bezinwazyjnej metody badawczej przy analizie zastygniętego cementu wiertniczego, pozwalającej określić geometrię szczelin i ocenić charakter wad w płaszczu cementowym. W kolejnych publikacjach zostaną przedstawione badania przeprowadzone na próbkach dla różnych parametrów cementowania oraz z wprowadzonymi w przestrzeń pierścieniową przeszkodami imitującymi niedoskonałości geometrii rzeczywistego odwiertu.

2. Zjawisko i przyczyny migracji gazu

Jednym z głównych powodów powstawania wad w kamieniu cementowym oraz rozszczelnienia tej bariery jest zjawisko migracji płynu w przestrzeni pierścieniowej. Płynem może być zarówno faza ciekła, jak i gazowa. Migracja płynu w przestrzeni pierścieniowej może mieć miejsce zarówno w trakcie wiercenia, jak też podczas przygotowywania otworu do eksploatacji.

Udowodniono, że migracja cieczy w przestrzeni pierścieniowej polega w głównym stopniu na dopływie płynów złożonych do przestrzeni pierścieniowej wskutek braku równowagi ciśnienia. Gaz przemieszcza się do stref o niższym ciśnieniu lub nawet dociera do powierzchni górotworu (Bonett, Pafitis 1996, Kremieniewski 2011, Raczkowski 1997). Obecnie problem migracji gazu występuje na większości złóż gazowych lub w otworach przygotowanych do magazynowania gazu (zbiorniki/kawerny gazu) i określany jest jako:

- łączność gazowa, przeciek gazowy,
- przepływ gazu w przestrzeni pierścieniowej,

- przepływ kanałowy gazu,
- przepływ gazu po cementowaniu,
- inwazja gazu,
- migracja/ekshalacja/iniekcja gazu (Crook, Healthman 1998, Carter, Slagle 1972, Tinsley i in. 1980).

Skala zagrożenia przepływu gazu jest duża, a zakres występowania szeroki, począwszy od występowania delikatnych poduszek gazowych i wskazań drobnych skoków ciśnień na głowicy, a skończywszy na erupcjach. Obecny stan wiedzy pozwolił wytypować czynniki przyczynowe wpływające w głównej mierze na powstawanie procesu migracji gazu (Kremieniewski, Stryczek 2011):

- geologiczne – płytkie zaleganie warstw (50-500 m) horyzontów gazowych i poziomów ilasto-piaskowych, nasyconych gazem o bardzo dobrych właściwościach kolektorskich, jest to powodem słabej jakości uszczelnienia rur;
- techniczno-technologiczne – jakość rur okładzinowych, stan ich powierzchni, szczelność połączeń gwintowych, uzbrojenie kolumny rur, sprawność sprzętu cementacyjnego i aparatury kontrolno-pomiarowej, konstrukcja otworu, długość i średnica kolumny rur okładzinowych, powierzchnia przekroju przestrzeni pierścieniowej, stan techniczny i przygotowanie otworu do zarurowania i cementowania, centryczność kolumny rur w otworze, rodzaj i parametry płuczek wiertniczych, charakterystyka osadu filtracyjnego, skład, objętość i parametry zaczynu cementowego, charakter przepływu zaczynu podczas tłoczenia, poruszanie i obracanie kolumną rur podczas cementowania, ciśnienie wywierane w otworze i przestrzeni międzyrurowej po zakończeniu cementowania;
- mechaniczne – udary oraz wibracje świdra i przewodu wiertniczego podczas zwiercenia korka cementowego, buta i dalsze wiercenia, perforacja rur, zmiana ciśnienia w otworze podczas wykonywania zabiegów stymulacyjnych;
- organizacyjne – projekty rurowań i cementowania, zakres wykorzystania informacji geofizycznych, geologicznych i wiertniczych przy ich opracowaniu, zgodności wykonawstwa zabiegu cementowania z projektem i ewentualne komplikacje, czynności po cementowaniu, wyposażenie zaplecza laboratoryjnego, przygotowanie teoretyczne i zawodowe ekipy cementacyjnej (Herman 2005, Kremieniewski 2014, Szostak, Chrzęszcz 1999).

Powyższe zestawienie pokazuje mnogość czynników wpływających na powstawanie zjawiska migracji gazu. W celu przedstawienia jak trudno uzyskać poprawną jakość zespolenia odcinka zaczynem cementowym oraz wystarczające związanie cementu z rurami i ścianą otworu, zespół badawczy w warunkach laboratoryjnych wykonał zabieg cementowania. W celu sprawdzenia jakości zacementowa-

nia i analizy różnego rodzaju wad powstałych w płaszczu cementacyjnym przeprowadzono badania z wykorzystaniem mikrotomografu komputerowego.

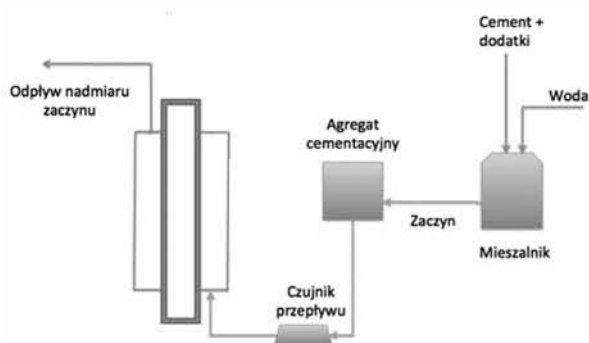
3. Stanowisko do testów cementowania

Stanowisko badawcze zostało zaprojektowane, skonstruowane i opracowane w celu przebadania zjawisk wypierania się cieczy wiertniczych, jak i jakości samego procesu cementowania przestrzeni pierścieniowej imitującej odcinek rur okładzinowych w odwiercie wiertniczym (rys. 1). Dzięki modułowej budowie pozwala na rozszerzenie badań o wpływ różnych stopni ekscentryczności przestrzeni pierścieniowej na jakość uzyskanego płaszczu cementacyjnego. Podstawowe elementy budowy stanowiska to: mieszalnik szybkoobrotowy WMS-200, zaopatrzony w pompę wirową (o wydajności 0,65 MPa), elektromagnetyczny czujnik natężenia przepływu, oraz stelaż umożliwiający zamontowanie centrycznie/ekscentrycznie rur imitujących przestrzeń pierścieniową odwiertu.

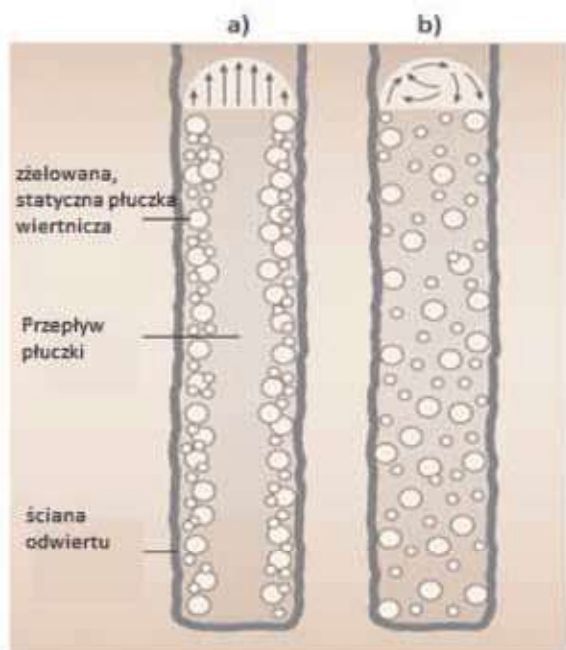
4. Przygotowanie próbek

Zarówno płuczka wiertnicza, ciecz buforowa i zaczyn cementowy są płynami nienewtonowskimi. Ciecze te cechuje właściwość tiksotropii. Oznacza to, że tworzą one strukturę żelu w wyniku działania niskich prędkości sił ścinających. Takie rozwiązanie w praktyce ma na celu zapobieganie opadaniu zwiercin i skał oraz ich gromadzeniu na dnie studni w okresach braku obiegu płuczki wiertniczej (Karpiniński, Szkodo 2015). Podczas etapu cementowania płuczka wiertnicza musi zostać całkowicie wyparta przez zaczyn cementowy, celem uzyskania pełnego przepływu w przestrzeni pierścieniowej. Obecność niewypartej żelowanej płuczki na etapie cementowania zagraża integralności otworu wiertniczego. Uzyskanie odpowiedniego stopnia wyparcia płuczki w dużym stopniu zależy od rodzaju przepływu cieczy wiertniczej (rys. 2).

W przepływie laminarnym dominują lepkie siły tarcia pomiędzy kolejnymi warstwami płynu, przy czym maksymalna prędkość przepływu jest w samym środku przekroju otworu wiertniczego i zmniejsza się stopniowo do zera w kierunku ściany odwiertu. Powoduje to że struktura żelowaciła płuczki wiertniczej przy ścianach nie może zostać „złamana” co powoduje niepełne wyparcie płuczki wiertniczej i słabą jakością zacementowania. W przypadku przepływu turbulentnego, cząsteczki płynu poruszają się w sposób nieprzewidywalny, krążąc, co powoduje, że prędkość w centralnej części przekroju otworu wiertniczego jest prawie taka sama jak przy



Rys. 1. Schemat oraz zdjęcie stanowiska cementacyjnego
Fig. 1. Scheme and photo of cementing test station



Rys. 2. Dwa rodzaje przepływu: laminarny (a), cząsteczki płynu poruszają się z zakrzywionym profilem prędkości równoległe do osi rury; turbulentny (b), płaski profil prędkości cząsteczek, cząsteczki wirują wokół (Doherthy i in. 2016)

Fig. 2. The two flow regimes: in laminar flow (a), all fluid particles move parallel to the pipe axis with a curved velocity profile; in turbulent flow (b), the velocity profile is flat because the fluid particles are swirling around (Doherthy et al. 2016)

ścianie odwiertu. W większości przypadków, na wiertniach stosowany jest turbulentny przepływ płynów zapewniający lepsze wynoszenie pozostałości płuczki i błota wiertniczego.

W celu najlepszego wyparcia płuczki wiertniczej z przestrzeni pierścieniowej, próbki będą przygotowane, uzyskując przepływ turbulentny cieczy wiertniczych. Pierwszym etapem przygotowania próbek było zamontowanie na stelażu centralnie dwóch rur imitujących orurowanie i ściany otworu wiertniczego (rys. 1). Średnica wewnętrzna zewnętrznej rury to 104 mm, średnica zewnętrzna wewnętrznej rury wynosi 75 mm (materiał aluminium PA38). Uzyskano w ten sposób przestrzeń pierścieniową roboczą o objętości około 6000 cm³. Następnie tak przygotowaną przestrzeń pierścieniową wypełniono bentonitową płuczka wiertniczą. Wykorzystana do testów wiskoelastyczna bentonitowa wodna płuczka wiertnicza skomponowana została zgodnie z recepturą zaproponowaną przez (Mueller i in. 2004). Dokładny skład przedstawiony został w tabeli 1.

Tabela 1. Skład wodnej płuczki wiertniczej (Mueller i in. 2004)
Table 1. Drilling fluid composition (Mueller et al. 2004)

Woda	4 l
Guma Xantanowa	20 g
Bentonit	56 g
Karboksymetyloceluloza	40 g
Baryt	1,8 g

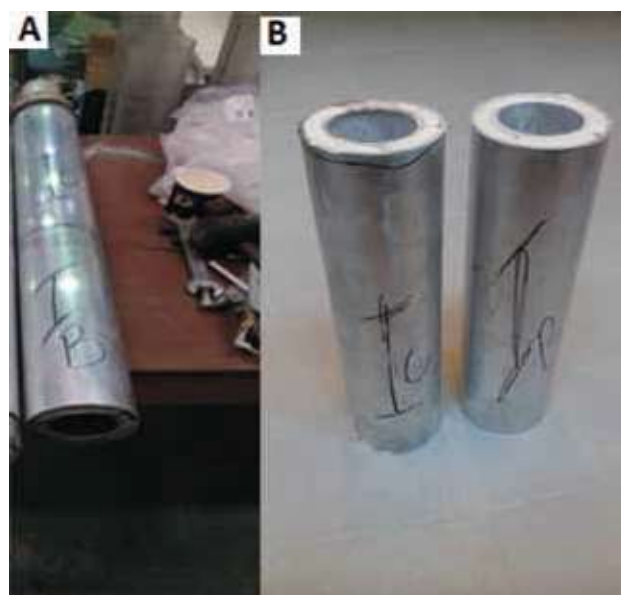
W wypełnioną przez płuczka wiertniczą przestrzeń pierścieniową przepompowano kolejno 18 litrów (3 objętości przestrzeni pierścieniowej) cieczy buforowej, a następnie

przez 25 sekund tłoczono przygotowany uprzednio w mieszalniku zaczyn cementowy, utrzymując przepływ burzliwy (turbulentny). Skład przygotowanego zaczynu zawarty został w tabeli 2. Jako ciecz buforową zastosowano 30-procentowy roztwór owego zaczynu cementowego.

Tabela 2. Skład cementu, CEM I 32,5 R (Ożarów)
Table 2. Cement composition, CEMI 32,5 R (Ożarów)

składnik	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl-
% wag.	20	5,1	2,8	62,5	1,3	2,8	0,13	0,85	0,08

Po osiągnięciu pełnego wypełnienia przestrzeni pierścieniowej cement pozostawiono do stygnięcia przez 24 h. Następnie zacementowane rury ściągnięto ze stanowiska i odłożono na 27 dni w celu całkowitego związania cementu. Po wyznaczonym okresie próbkę pocięto na 40-centymetrowe odcinki które mieszczą się w obszarze roboczym oraz przebadano na tomografie komputerowym (rys. 3A i B).



Rys. 3. A - Zacementowana próbka po upływie 27 dni. B - próbki przygotowane do analizy mikrotomografem komputerowym

Fig. 3. A - Cemented specimen after 27 days of bonding. B - Specimens prepared for microtomography analysis

5. Badania na tomografie komputerowej

Zadaniem rentgenowskiej tomografii komputerowej jest odtworzenie przekroju obiektu na podstawie tłumienia promieniowania X. Wiązka promieni rentgenowskich przechodząc przez warstwę materii ulega osłabieniu w wyniku rozpraszania i absorpcji. Zmniejszenie natężenia promieniowania (-ΔI) w wyniku przejścia wiązki przez elementarną grubość absorbenta jest według prawa Beera-Lamberta proporcjonalne do natężenia I oraz do grubości warstwy dx:

$$dI = \mu \cdot I \cdot dx \tag{1}$$

Dla absorbenta o grubości x, po rozwiązaniu równania różniczkowego otrzymuje się wykładniczą postać prawa pochłaniania:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \tag{2}$$

gdzie:

I – natężenie wiązki po przejściu przez ośrodek;

- I_0 – natężenie wiązki padającej;
 x – grubość absorbenta;
 μ – całkowity współczynnik absorpcji (pochłaniania) – zwany również współczynnikiem tłumienia liniowego, który jest sumą trzech współczynników absorpcji (comptonowskiej, fotoelektrycznej, tworzenia par), w zależności od energii promieniowania względny udział poszczególnych składowych może się znacznie zmieniać.

Współczynnik tłumienia liniowego μ zależy od gęstości elektronowej (gęstości średniej) ρ i liczby atomowej Z pierwiastka, a wartość jego określa wzór (Wellington, Vinegar 1987):

$$\mu = \rho \cdot \left(a + \frac{b \cdot Z^{3.8}}{E^{3.2}} \right) \quad (3)$$

gdzie:

- a – współczynnik niemal niezależny od energii promieniowania rentgenowskiego, nazywany współczynnikiem Klein–Nishina;
 b – stała; E – energia fotonu.

Rentgenowska mikrotomografia komputerowa opiera się na zapisywaniu projekcji promieniowania X przechodzącego przez badany obiekt dla kolejnych pozycji kątowych położenia próbki w zakresie $0 \div 3600$. Objętość obiektu podzielona jest na małe komórki, zwane voxelami, w których liniowy współczynnik pochłaniania promieniowania jest taki sam. Zrekonstruowany obraz przekrojowy jest ilościową mapą liniowego współczynnika pochłaniania promieniowania w voxelach wchodzących w skład skanowanej warstwy. Rozkład współczynników pochłaniania promieniowania jest obliczany przez komputer, dlatego metoda nosi nazwę tomografii komputerowej (Ratajczyk 2012).

W celu przeprowadzenia analizy pod kątem detekcji i charakterystyki wad, szczelin i nieciągłości powstałych w płaszczu cementacyjnym próbki przebadano metodą mikrotomografii komputerowej przy użyciu mikrotomografu komputerowego phoenix v|tome|x s240, znajdującego się na wyposażeniu Katedry Inżynierii Materiałowej i Spajania Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej (rys. 4).

Zastosowany dwulampowy mikrotomograf rentgenowski v|tome|x s240 to wysokiej rozdzielczości system tomografii

komputerowej CT (ang. *Computed Tomography*), przeznaczony do zastosowań radiologicznych. Metoda pozwala na pełne, wysokorozdzielcze trójwymiarowe skanowanie próbek, oraz analizę zrekonstruowanego obrazu pod kątem defektów struktury i metrologii trójwymiarowej. GE Phoenix v|tome|x s240 składa się z dwóch lamp rentgenowskich, wysokiej czułości detektora panelowego o wielkości pixela $200 \mu\text{m}$, stacji komputerowej do zapisu i obróbki danych, oraz oprogramowania umożliwiającego kontrolę wszystkich parametrów i procesów.

Dane gromadzone i przetwarzane są za pomocą oprogramowania phoenix datos|x 2, natomiast rekonstrukcja przebiega z użyciem phoenix datos|x 2 rec. Oprogramowanie datos|x 2.0 zawiera szeroką gamę modułów do optymalizacji wyników mikrotomografu, zwiększając ich precyzję i jakość. Ponadto, moduł bhc (ang. *Beam hardening correct*), kontroluje wzmacnianie wiązki automatycznie. Pozwala to na znaczne zniwelowanie niepożądanych artefaktów, a co za tym idzie zwiększenie precyzji analizy porów i ekstrakcji powierzchni.

Tabela 3. Parametry pracy tomografu komputerowego
Table 3. Microtomograph operation parameters

Parametr	Wartość
Napięcie przyspieszające	210 kV
Natężenie prądu	420 μA
Rozmiar voxela	120,001 μm
Powiększenie	1,667
Liczba zdjęć	1400
Czas ekspozycji	333,1 ms
Filtr	0,5 mm Cu

W celu post-processingu i analizy zrekonstruowanych wyników skanu, laboratorium aktualnie wykorzystuje Volume Graphics VG Studio Max 2.2.

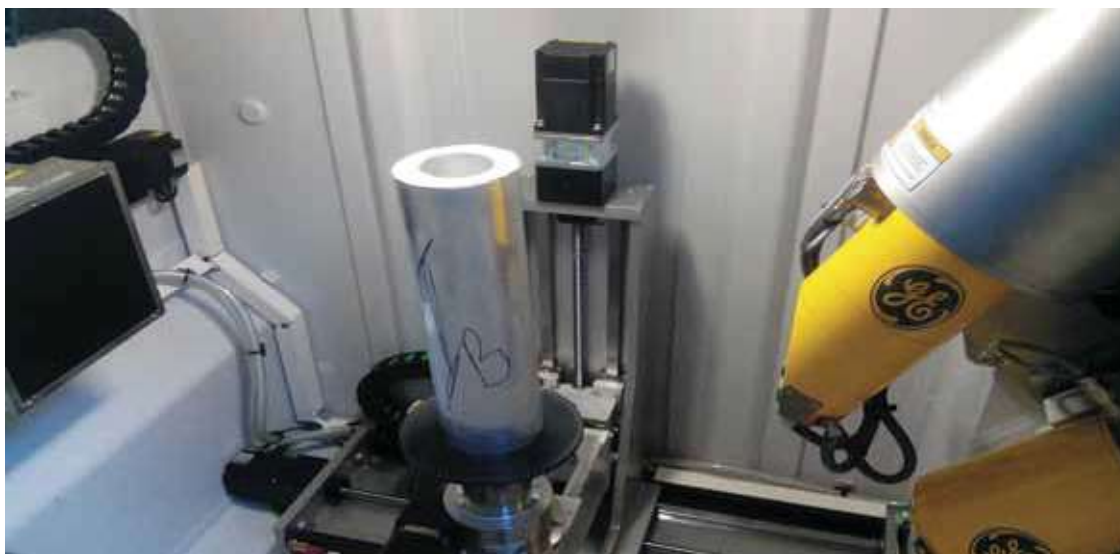
6. Wyniki

Wcześniej przygotowane próbki umieszczono w mikrotomografie (rys. 5). Do analizy wszystkich badanych odcinków użyto jednakowych parametrów pracy użytej aparatury.



Rys. 4. Dzięki wysokoenergetycznej rentgenowskiej lampie microfocus, system GE phoenix v|tome|x s240 CT szczególnie nadaje się do penetracji materiałów wysokiego tłumienia

Fig. 4. The high Energy microfocus x-ray lamp makes the GE phoenix v|tome|x s240 CT especially useful for high attenuation material tomography

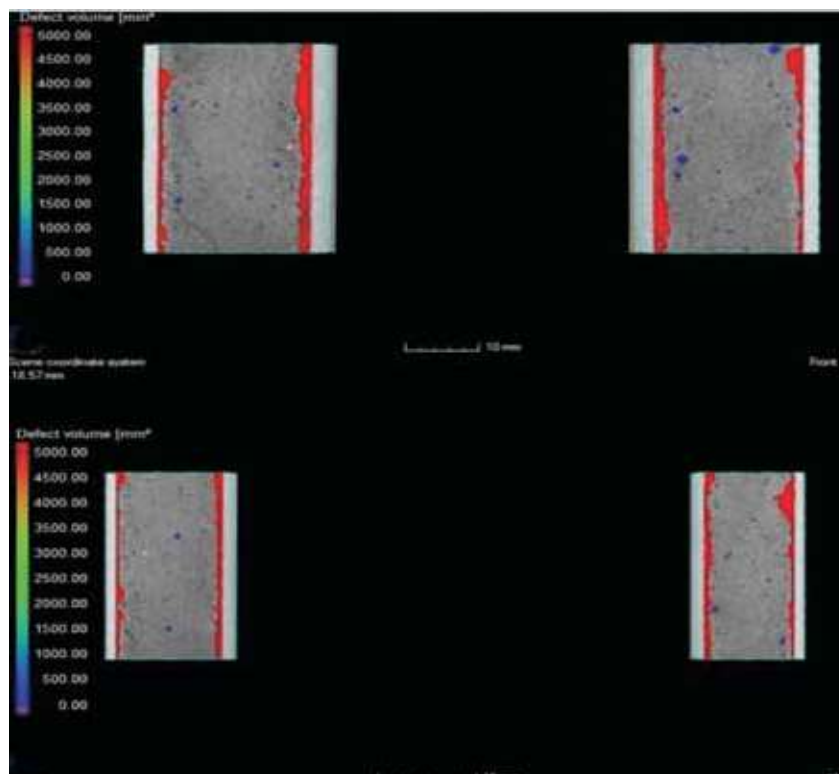


Rys. 5. Próbką umieszczoną wewnątrz mikrotomografu GE phoenix v|tome|x s240
Fig. 5. Cement specimen placed inside the GE phoenix v|tome|x s240 microtomograph

Mikrotomograf komputerowy Phoenix v|tome|x s240 CT został ustawiony zgodnie z parametrami przedstawionymi w tabeli 3. Parametry zostały dobrane tak, by uzyskać jak największą dynamikę zdjęć, z których rekonstruowany jest trójwymiarowy obraz, bazując głównie na doświadczeniu operatora oraz ogólnych wytycznych.

Wyniki zostały poddane obróbce graficznej w celu wykrycia wad w kamieniu cementacyjnym. Przeprowadzona analiza defektoskopii przeprowadzona na mikrotomografie wykryła szereg zmian w kamieniu cementacyjnym. Rzuty wyników na osiach X i Y zostały przedstawione na rys. 6. Całkowita objętość skanowanej próbki wynosiła 181 tys. mm³.

Widoczne są znaczące niezwiązania przy dwóch powierzchniach rur. Zarówno przy rurze okładzinowej, jak i tej imitującej otwór. Wady te posiadają objętość całkowitą powyżej 5000 mm³ i zostały zaznaczone kolorem czerwonym (rys. 6). Pozostałe wady poniżej objętości 1000 mm³ oznaczono kolorem niebieskim. Całkowita objętość ubytków wynosi 13,7 tys. mm³, co w stosunku do całkowitej objętości daje nam ponad 7,59% ubytku (tab. 4). Wady powstały w trakcie tworzenia i zastygania kamienia cementowego, bądź jeszcze w zaczynie cementowym.



Rys. 6. Wyniki badania mikrotomografem komputerowym - rzuty na oś X, Y
Fig. 6. Microtomography pore analysis results -X and Y axis cross-section

Tabela 4. Wyniki analizy zacementowanej próbki
Table 4. Results of pore analysis of specimen

Objętość całkowita skanowanego materiału [mm ³]	181 285,05
Objętość wad w kamieniu cementacyjnym [mm ³]	13 766,80
Procentowa ilość wad w stosunku do objętości całkowitej [%]	7,59%

7. Analiza wyników

Na rys. 7 przedstawiono przestrzenny rozkład ubytków oraz przekrój prostopadły do osi rur. Można zauważyć koncentrację wad przy ścianach zewnętrznych i wewnętrznych. Mniejsze objętości wad nie stanowią zagrożenia dla integralności płaszczu cementacyjnego. Nie oznacza to jednak, że nie wpływają one na właściwości wytrzymałościowe kamienia cementowego. Z aspektu bezpieczeństwa i ochrony środowiska bardziej istotne są natomiast wady o dużej objętości, gdyż ich ułożenie wzdłuż rury okładzinowej może przyczynić się do powstawania niechcianego zjawiska migracji gazu.

W wypadku powstania przestrzeni komunikującej złoże z rurą okładzinową może dojść do przyspieszonej korozji odcinka ururowania. Niezwiązanie powstało na całym obwodzie dwóch rur, wraz z nieznaczącymi wadami wewnątrz kamienia cementowego. Można zatem wnioskować, iż w tym wypadku największym zagrożeniem jest zjawisko przepływu kanałowego, a w przypadku dużego ciśnienia złożowego - erupcji.

8. Podsumowanie

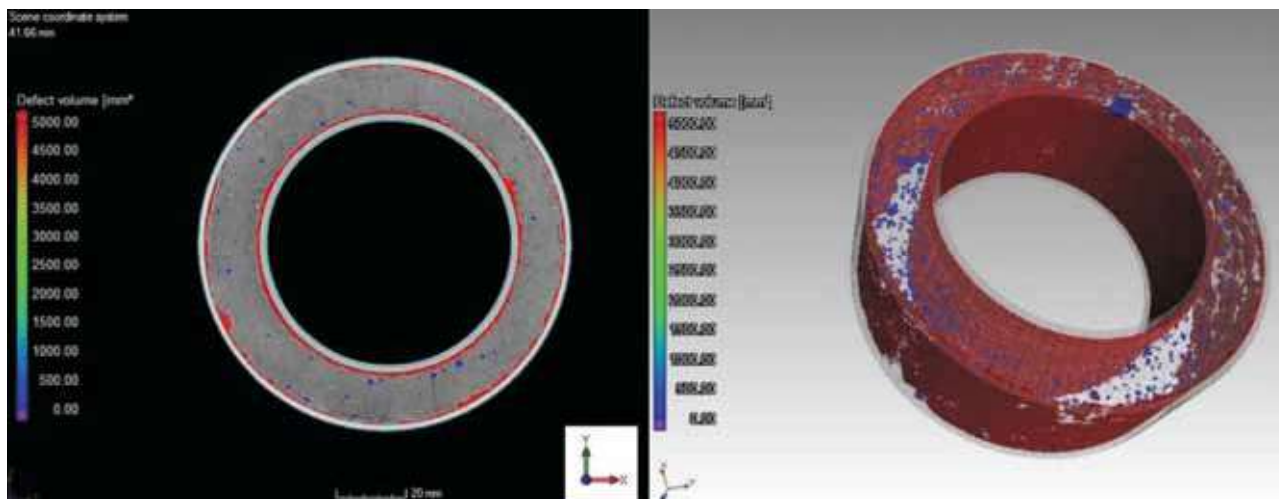
Przedstawiony artykuł zawiera informacje obejmujące wykorzystanie mikrotomografii komputerowej do analizy wad powstałych w kamieniach cementacyjnych naśladujących te spotykane przy zabiegach wydobywczych. W tym celu wykonano proces cementowania rur na stanowisku badawczym Wydziału Mechanicznego. Przeprowadzono prześwietlenie wyciętego kawałka zacementowanej rury na mikrotomografie phoenix v|tome|x s240 CT, a następnie przeprowadzono analizę defektoskopii. Wyniki graficzne zostały przedstawione na rys. 6 oraz 7, a wyniki analizy objętościowej defektoskopii

w tabeli 4. Dla przeprowadzonego badania wykryto szereg wad powstałych w kamieniu cementacyjnym. Największe skupisko ubytków powstało na zewnętrznej powierzchni rury oraz zewnętrznej powierzchni „otworu”. Takie płaszczowe ubytki prowadzą do słabego, a w tym przypadku do braku związania cementu zarówno z rurą okładzinową, jak i ze ścianą otworu. Skutkiem tego jest możliwość powstania tzw. migracji gazu złożowego. Powstałe zjawisko migracji gazu w przypadku całkowitego niezwiązania kamienia cementacyjnego na całej kolumnie rur może doprowadzić do awarii, a nawet erupcji. W dalszych pracach planuje się przeprowadzenie symulacji numerycznych, których celem będzie umożliwienie przeprowadzenia zespolenia rur okładzinowych dla przypadku zróżnicowanych średnic, różnych warunków pracy oraz przy użyciu odmiennych płynów wiertniczych.

Badania oraz budowa stanowiska do wypierania się cieczy wiertniczych zostały przeprowadzone i sfinansowane w ramach jednego z zadań grantu naukowego o akronimie PPPI współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- ABIMBOLAM., KHAN F., KHAKZADN. 2016 - Risk-based safety analysis of well integrity operations. Safety science, 84: pp.149-160.
- BONETT A., PAFITIS D. 1996 - Getting to the root of gas migration. Oilfield Review 8 (1):36-49.
- CAO P., KARPYN Z.T., LI L. 2013 - Dynamic alterations in wellbore cement integrity due to geochemical reactions in CO₂-rich environments. Water Resources Research. 49 (7): 4465-4475.
- CAREY, J.W. 2013 - Geochemistry of wellbore integrity in CO₂ sequestration: Portland cement-steel-brine-CO₂ interactions. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 77 (1): 505-539.
- CARTER G., SLAGLE K. 1972 - A study of completion practices to minimize gas communication. Journal of Petroleum Technology 24 (09): 1,170-1,174.
- CELIA M.A., BACHU S., NORDBOTTEN J.M., GASDA S.E., DAHLE H.K. 2004 - Quantitative estimation of CO₂ leakage from geological storage: Analytical models, numerical models and data needs. Proceedings of 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. (GHGT-7).
- CROOK R., HEALTHMAN J. 1998 - Predicting potential gas-flow rates to help determine the best cementing practices. Halliburton Energy Services Inc: Drilling Contractor.



Rys. 7. Widok izometryczny oraz na oś. Z po analizie wyników
Fig. 7. Z axis cross-section and isometric view after pore analysis

- DOCHERTY K., KEFI S., KHALFALLAH I., TAOUTAOU S., OFFENBACHER M., RAVITZ R. 2016 - Mud removal - clearing the way for effective cementing. Schlumberger: Oilfield Review 28.
- HERMAN Z. 2005 - Problemy migracji i ekshalacji gazu w odwiertach. Technické univerzity, Ostrava.
- JUNG H.B., JANSIK D., UM W. 2012 - Imaging wellbore cement degradation by carbon dioxide under geologic sequestration conditions using X-ray computed microtomography. Environmental science & technology 47 (1): 283-289.
- KARPIŃSKI B., SZKODO M. 2015 - Clay Minerals—Mineralogy and Phenomenon of Clay Swelling in Oil & Gas Industry. Advances in Materials Science 15 (1): 37-55.
- KREMIENIEWSKI M. 2011 - Proces migracji gazu w trakcie wiązania zaczynu cementowego. Nafta-Gaz 67 (3): 175-181.
- KREMIENIEWSKI M. 2014 - Modyfikacje receptur zaczynów uszczelniających w celu zminimalizowania przepuszczalności powstałych kamieni cementowych. Nafta-Gaz 70 (3): 170--175.
- KREMIENIEWSKI M., STRYCZEK S. 2011 - Zaczyny cementowe odporne na zjawisko migracji gazu. Wiertnictwo, Nafta, Gaz 28: 599-616.
- KUTCHKO B.G., STRAZISAR B.R., DZOMBAK D.A., LOWRY G.V., THAULOW N. 2007 - Degradation of well cement by CO₂ under geologic sequestration conditions. Environmental science & technology 41 (13): 4787-4792.
- KUTCHKO B.G., STRAZISAR B.R., LOWRY G.V., DZOMBAK D.A., THAULOW N. 2008 - Rate of CO₂ attack on hydrated Class H well cement under geologic sequestration conditions. Environmental science & technology 42 (16): 6237-6242.
- MASON H.E., WALSH S.D., DUFRANE W.L., CARROLL S.A. 2014 - Determination of diffusion profiles in altered wellbore cement using X-ray computed tomography methods. Environmental science & technology 48 (12): 7094-7100.
- MUELLER H., HEROLD C.P., BONGARDT F., HERZOG N., VON TAPAVICZA S. 2004 - Lubricants for drilling fluids. Google Patents.
- RACZKOWSKI J. 1997 - Ekspertyza dotycząca stanu technicznego odwiertów na PMG Husów-105K, Husów-132K i Wierzchowice WM-A. Dokumentacja IGNiG, Kraków.
- RATAJCZYK E. 2012 - Rentgenowska Tomografia komputerowa (CT) do zadań przemysłowych. Wyższa Szkoła Ekologii i Zarządzania w Warszawie: Pomiary Automatyka Robotyka
- RIMMELÉ G., BARLET-GOUÉDARD V., PORCHERIE O., GOFFÉ B., BRUNET F. 2008 - Heterogeneous porosity distribution in Portland cement exposed to CO₂-rich fluids. Cement and Concrete Research 38 (8): 1038-1048.
- SZEWCZUK P., BOLEWSKI L. 2016a - Projekt narzędzia typu guide-shoe w ramach Projektu NCBiR-testy otworowe. „Przeгляд Górnicy” 72 (11): 76-80.
- SZEWCZUK P., BOLEWSKI L. 2016b - Wpływ zaburzeń geometrii na proces wypierania w przestrzeni pierścieniowej otworów wiertniczych. „Energetyka” (8): 451-456.
- SZOSTAK L., CHRZĄSZCZ W. 1999 - Technologia cementowania. Nafta & Gaz Biznes (5d).
- TINSLEY J.M., MILLER E.C., SABINS F.L., SUTTON D.L. 1980 - Study of factors causing annular gas flow following primary cementing. Journal of Petroleum Technology 32 (08): 1,427-1,437.
- VAN GEET M., LAGROU D., SWENNEN R. 2003 - Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography (μ CT). Geological Society, London, Special Publications 215 (1): 51-60.
- VAN GEET M.V., SWENNEN R., WEVERS M. 2000 - Quantitative analysis of reservoir rocks by microfocus X-ray computerized tomography. Sedimentary Geology 132:25-36.
- WELLINGTON S.L., VINEGAR H.J. 1987 - X-ray computerized tomography. Journal of Petroleum Technology 39 (08): 885-898.
- YALCINKAYA T., RADONJIC M., WILLSON C.S., BACHU S. 2011 - Experimental study on a single cement-fracture using CO₂ rich brine. Energy Procedia 4:5335-5342.
- ZALEWSKA J., DOHNALIK M. 2009 - Wizualizacja przestrzeni porowej skał z wykorzystaniem mikrotomografii rentgenowskiej. Geologia. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie 35: 625-632.

Artykuł wpłynął do redakcji – sierpień 2016
Artykuł akceptowano do druku 5.04.2017 r.