

Małgorzata GRABOWSKA, Jarosław MIKOŁAJCZYK, Sebastian BASIAK

**ZASTOSOWANIE TOMOGRAFII KOMPUTEROWEJ CAT
W NIENISZCZĄCYCH BADANIACH TEOWYCH
ZŁĄCZY SPAWANYCH**

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań nieniszczących z wykorzystaniem tomografu komputerowego Somaton Definition AS firmy Siemens. Próbkami były złącza teowe wykonane w pozycji podolnej PA. Jako materiał próbek zastosowano stal węglową konstrukcyjną C45. Spoiny wykonano dla poziomu jakości C (wymagania średnie).

Słowa kluczowe: tomografia komputerowa CAT, tomograf

1. WSTĘP

Do grupy niekonwencjonalnych metod nieniszczących badań jakości złączy spawanych zaliczamy tomografię komputerową. Tomografia komputerowa jest nowoczesną dziedziną, której rozwój jest praktycznie ściśle zintegrowany z innymi naukami, m.in. z matematyką, informatyką, elektroniką, medycyną, fizyką. Umożliwia ona wykonywanie zdjęć warstwowych, czyli tomogramów. Na podstawie tomogramów możliwe jest zbudowanie trójwymiarowego modelu praktycznie dowolnego badanego obiektu. Podstawowa zasada tomografii brzmi: zdjęcia warstwowe uzyskuje się wówczas, gdy dwa z trzech zasadniczych elementów układu – lampa/źródło promieniowania, film/układ detektorów, przedmiot badany – w czasie ekspozycji znajdują się w ruchu, przy czym kierunek ruchu każdego z elementów jest przeciwny, lecz tory ich ruchu są homotetyczne. Obecnie produkowane tomografy bardzo często mają kilka źródeł promieniowania i kilka układów detektorów. Dzięki temu otrzymywane modele trójwymiarowe są jeszcze bardziej dokładne.

Próby zastosowania metody CAT, metody dedykowanej głównie do celów medycznych, do badań wewnętrznej struktury materiałów jest pomysłem oryginalnym, jednak prawdopodobnie nie dla wszystkich rodzajów materiałów ma ona zastosowanie [4, 6, 7, 11, 15].

¹ mgr Małgorzata GRABOWSKA, Zakład Rezonansu Magnetycznego,
Wojewódzki Szpital Zespolony w Toruniu,
e-mail: gragosa@op.pl

² dr inż. Jarosław MIKOŁAJCZYK, PWSZ im. S. Staszica w Piłie,
e-mail: jmikolajczyk@pwsz.pila.pl

³ inż. Sebastian BASIAK, Exalo Drilling S.A., Oddział Piła,
e-mail: basiaksebastian@gmail.com

Tomografy komputerowe powstały zaraz po rozpowszechnieniu się w latach 80. ubiegłego wieku komputerów typu PC i rejestrowały natężenie promieniowania rentgenowskiego przechodzącego przez dany obiekt lub obiekty przy różnych kątach pochylenia wokół nieruchomej osi obrotu źródło-detektor w pewnym zakresie i z pewnym zadaniem krokiem. Dla obrazów rentgenowskich kontrast obrazów obiektu/ obiektów zależy głównie od wartości współczynnika absorpcji materiału obiektu, przez który przechodzi promieniowanie X [6, 7, 11].

Podjęto próbę zastosowania tomografii komputerowej CAT, dedykowanej głównie diagnostyce medycznej, do badań spoin złączy teowych w pozycji PA wykonanej metodą MAG 135. Jako tworzywo konstrukcyjne zastosowano stal C45 spawaną w temperaturze 18°C. Spoiny wykonano dla poziomu jakości C (wymagania średnie).

Stal C45 jest stalą trudnospawalną. Po to, aby prawidłowo wykonać połączenie spawane elementów z tego materiału, konieczne jest ich podgrzanie do temperatury ok. 150°C. W badaniach świadomie nie wykonano podgrzania łączonych elementów w celu uwypuklenia potencjalnych wad powstałego złącza spawanego. Badania tak powstałego nieprawidłowego złącza zostały uzupełnione następującymi metodami badań [1–3, 10, 12]:

- magnetyczno-proszkową (fluoroscencyjną) MT,
- penetracyjną PT,
- ultradźwiękową UT,
- wizualną VT.

Zastosowanie dodatkowych metod badawczych miało na celu potwierdzenie lub wykluczenie powstałych ewentualnych wad w złączu z wykorzystaniem metody CAT.

Badanie za pomocą metody magnetyczno-proszkowej (fluoroscencyjnej) MT przeprowadzono, namagnesowując za pomocą defektoskopu powstałe złącze spawane, po naniesieniu na nim zawiesziny kontrolnej typu 14A oraz użyciu lampy ultrafioletowej UV K+D Flux-Technic.

Badanie za pomocą metody penetracyjnej PT przeprowadzono, odtłuszczać złącze z użyciem zmywacza MR 79 firmy Marker oraz po naniesieniu na złącze penetrantu. Po upływie ok. 30 minut usunięto z powierzchni badanych penetrant i na tak oczyszczoną spoinę naniesiono wywoływacz MR 70.

Badanie za pomocą metody ultradźwiękowej UT wykonano za pomocą urządzenia USM 25 firmy Krautkramer.

Badania wizualne VT przeprowadzono za pomocą wzrokowych oględzin spoin, jak również spoinomierza oraz suwmiarki. Zmierzona grubość spoin spoinomierzem uniwersalnym wynosiła 7 mm i była prawidłowa dla tej grubości łączonych elementów.

Badania nieniszczące metodą CAT wykonano z wykorzystaniem dwurzędowego 128-detektorowego tomografu komputerowego Somaton Definition AS firmy Siemens.

Do wykonania próbek połączeń zastosowano stal węglową konstrukcyjną wyższej jakości C45 (PN-75/H-8401945). Tworzywo to charakteryzuje się łatwą obrabialnością, dobrą zgrzewalnością, a równocześnie jest trudnospawalna. Stal C45 stosowana jest m.in. na korpusy przyrządów czy też form dla przetwórstwa tworzyw sztucznych. Charakteryzuje się dużą wytrzymałością oraz ciągliwością.

Podstawowe właściwości mechaniczne zastosowanego gatunku stali (C45) są następujące:

- twardość ≤ 229 HB,
- granica plastyczności Re: $275 \div 490$ MPa,
- przewężenie Z: $35\% \div 45\%$,
- wytrzymałość na rozciąganie: $560 \div 860$ MPa,
- wydłużenie A5: $14 \div 17\%$.

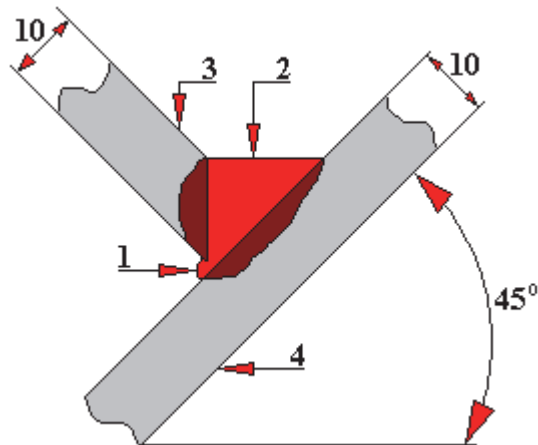
Po to, aby uzyskać poprawne spoiny dla tego materiału, norma wymaga jego podgrzania przed spawaniem do temperatury 150°C . W celu jednak uwypuklenia wewnętrznych wad powstałej spoiny złącza świadomie zostały wykonane bez podgrzewania łączonych elementów (w temperaturze 18°C).

W celu wykonania próbek, arkusz blachy o grubości 10 mm został pocięty na elementy o wymiarach 125 mm x 200 mm. Charakterystyka wykonanego złącza teowego jest następująca:

- pozycja spawania: podolna (PA),
- napięcie łuku spawalniczego: 23,5 [V],
- natężenie prądu spawania: 230 [A],
- temperatura otoczenia: 18°C ,
- natężenie przepływu gazu osłonowego: 12 [litr/min],
- średnica drutu elektrodowego: 1,2 [mm],
- prędkość spawania: 7,5 [m/min].

Do spawania użyto spawarki Esab mig 4000i feed 3004 oraz drutu spawalniczego OK AristoRod 12.50. Jest to niemiedziowany lity drut elektrodowy z dodatkiem manganu i krzemu, klasy G3Si1/ER70S-6. Drut ten jest przeznaczony do spawania metodą MIG/MAG stali niestopowych, które są używane głównie w przemyśle motoryzacyjnym, okrętowym oraz w budowie zbiorników ciśnieniowych.

Grubość spoiny zmierzona spoinomierzem w złączu teowym spawanym w pozycji podolnej PA wynosiła 7 mm (rys. 1).



Rys. 1. Pozycja podolna (PA) wykonanego spawanego złącza teowego. 1 – grąż spoiny, 2 – lico spoiny, 3 – element (blacha) nr 1, 4 – element (blacha) nr 2
Fig. 1. Welded T-joint in a downhand position (PA). 1 – weld ridge, 2 – face of the weld, 3 – element no. 1 (steel plate), 4 – element no. 2 (steel plate)

Fotografię badanej próbki przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Widok badanej próbki nr 11 (fot. J. Mikołajczyk)
Fig. 2. View on the sample no. 11

2. WYNIKI BADAŃ

Badania wizualne VT odnośnie wartości granicznej niezgodności spawalniczej dla wymagań średnich złączy teowych dotyczącej grubości spoiny wykazały wartość grubości spoiny wynoszącą 7 mm, co dla grubości łączonych elementów jest wartością prawidłową. Poza tym badania wizualne przeprowadzone na próbkach złączy teowych nie wykazały żadnych wad ani niezgodności występują-

cych w złączach. Badanie polegało na oględzinach wzrokowych, pomiarze spoinomierzem, jak i również za pomocą suwmiarki.

Badania nieniszczące z wykorzystaniem metody magnetyczno-proszkowej MT (fluoroscencyjnej) nie wykazały żadnych niezgodności występujących w spoinach badanych złączy teowych, co było wynikiem nieoczekiwanym, biorąc pod uwagę warunki wykonania złączy.

Badania nieniszczące z wykorzystaniem metody penetracyjnej PT również nie wykazały żadnych niezgodności znajdujących się w badanych złączach.

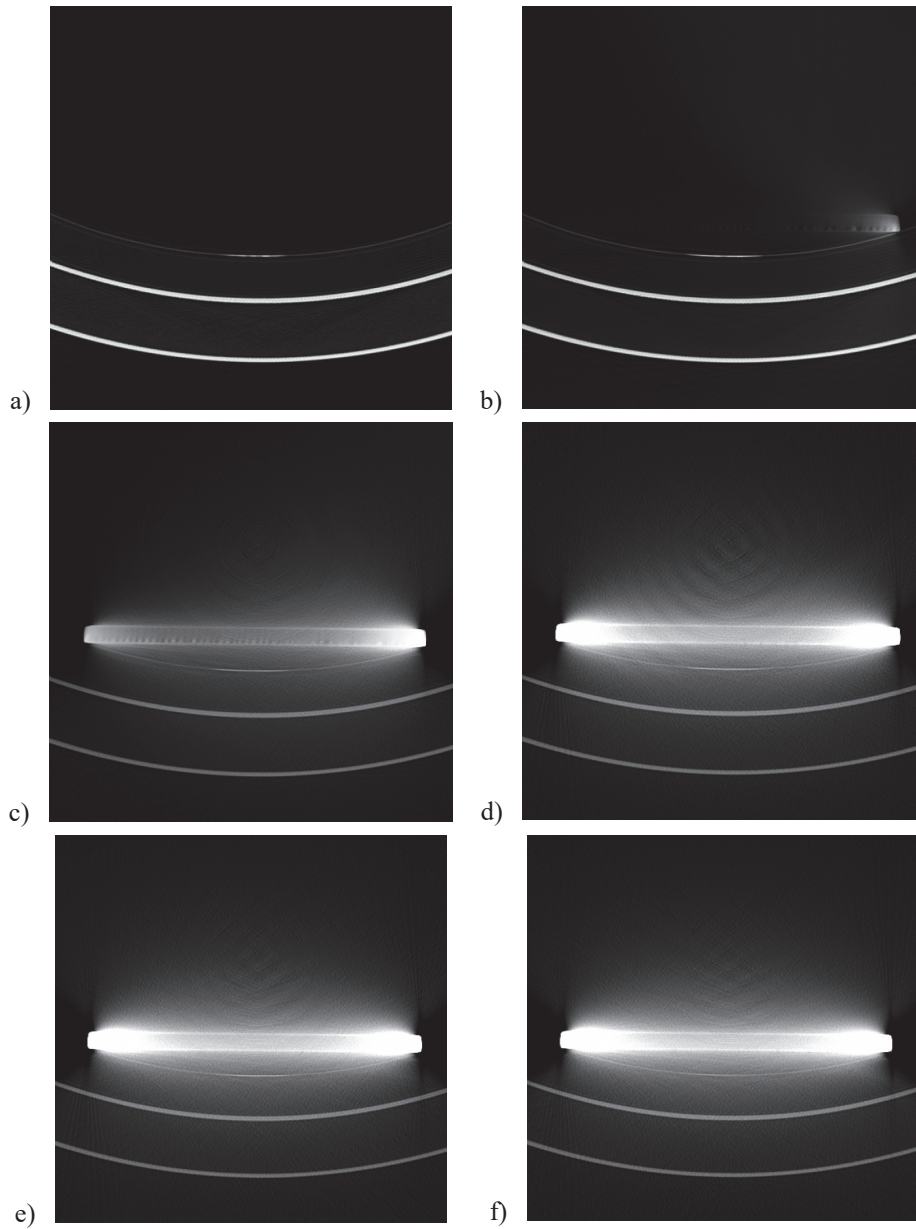
Ostatni rodzaj klasycznych badań nieniszczących z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej UT wykazały, że żadna z wykonanych spoin teowych nie jest prawidłowa. Na ekranie defektoskopu widoczne były linie (impulsy) wykraczające poza krzywą wzorcową. We wszystkich wykonanych w temperaturze 18°C złączach teowych na całej długości spoin widoczny był brak wtopienia się spoiwa w rodzimy materiał. Wyżej wymienione badania przeprowadzone przez kontrole jakości dały wynik negatywny.

Na rysunku 3 przedstawiono pierwsze 6 tomogramów z 37 wykonanych dla próbki o numerze 11. Na tomogramie (rys. 3a) płaszczyzna przejścia promieni X przechodzi przez powietrze, dlatego jej tło jest koloru czarnego. Na tomogramach 3b oraz 3c widać wyraźnie, z której strony jest wykonana spoina – od strony dolnej. Jednak przejście koloru tła w miejscu spoiny oglądane na tych tomogramach przy powiększeniu ok. 10x nie jest stopniowe, a raczej skokowe w porównaniu z krawędzią górną (na której nie ma spoiny). Świadczyć to może o pewnych nieciągłościach w strukturze wewnętrznej badanego materiału. Tomogramy 3d, 3e oraz 3f ze względu na silne promieniowanie (świecenie) utrudniają czytelność. Podobna sytuacja występuje również na kolejnych tomogramach (rys. 4). Zaistniała intensywna zmiana barwy na obrazach otrzymanych z tych tomogramów uniemożliwia określenie, z której strony została wykonana spoina.

Na rysunku 5 przedstawiono ostatnie 6 tomogramów dla próbki nr 11 wykonanych już przy wychodzeniu z obszaru spoiny. Praktycznie na przedostatnim z tych tomogramów (dolny lewy) widoczne są od strony dolnej złącza jego wady – brak ciągłości przetopu.

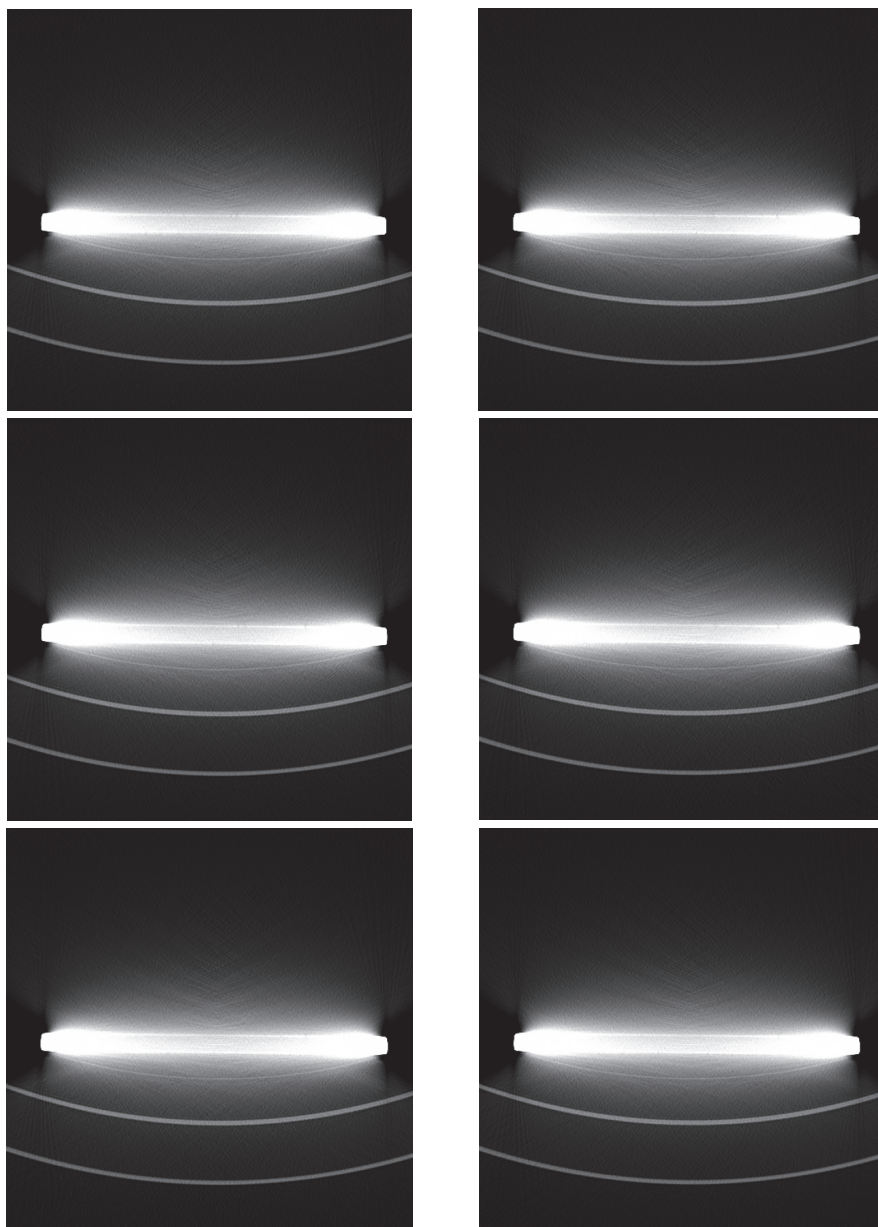
Rysunek 6 przedstawia widok złącza od strony blachy poziomej (niejako od spodu). Wizualnie patrząc na próbkę z tego kierunku praktycznie nie jesteśmy w stanie powiedzieć o badanym złączu, pamiętając, że łączone blachy mają grubość 10 mm. Natomiast na rekonstrukcji zbudowanej z wykonanych tomogramów można stwierdzić, że spoina jest położona od strony dolnej krawędzi blachy pionowej. Jednak czytelność tak otrzymanej rekonstrukcji jest niewielka.

Rysunek 7 przedstawia tę samą spoinę od strony jej lica (z góry). Rozłożenie spoiny jest nierównomierne – jest przesunięta bardziej na blachę poziomą niż pionową mimo, że spoina wykonana została przy ustawieniu łączonych elementów pod kątem 45° (rys. 1). Przyczyną mogło być złe (niesymetryczne) prowadzenie spoiwa względem łączonych krawędzi.

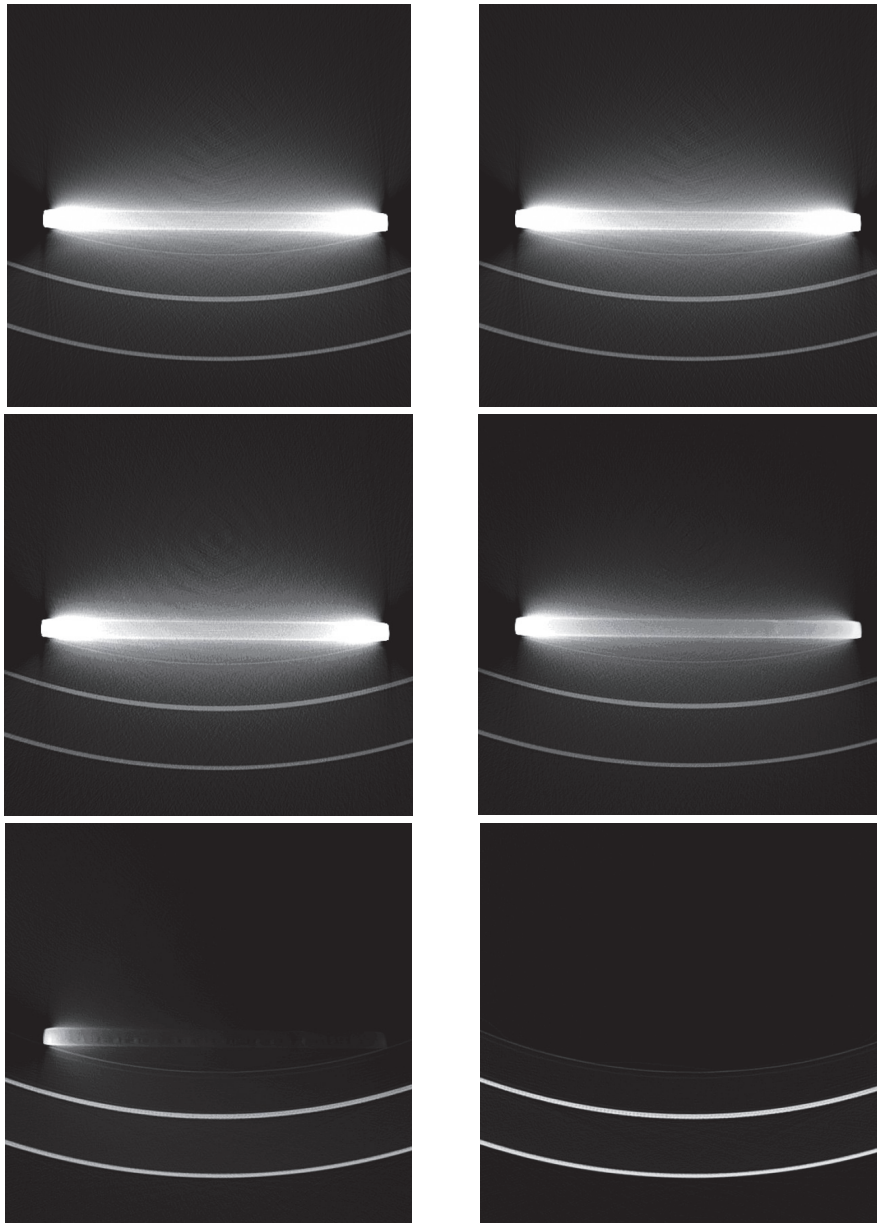


Rys. 3. Pierwsze 6 tomogramów z 37 wykonanych dla próbki nr 11 przy następujących parametrach: obraz warstw o grubości 5,0 mm, algorytm skanowania B60s

Fig. 3. The series of tomograms no. 1-6 out of total 37 tomograms made for sample no. 11 with the following parameters: image layers of thickness 5.0 mm, scanning algorithm B60s

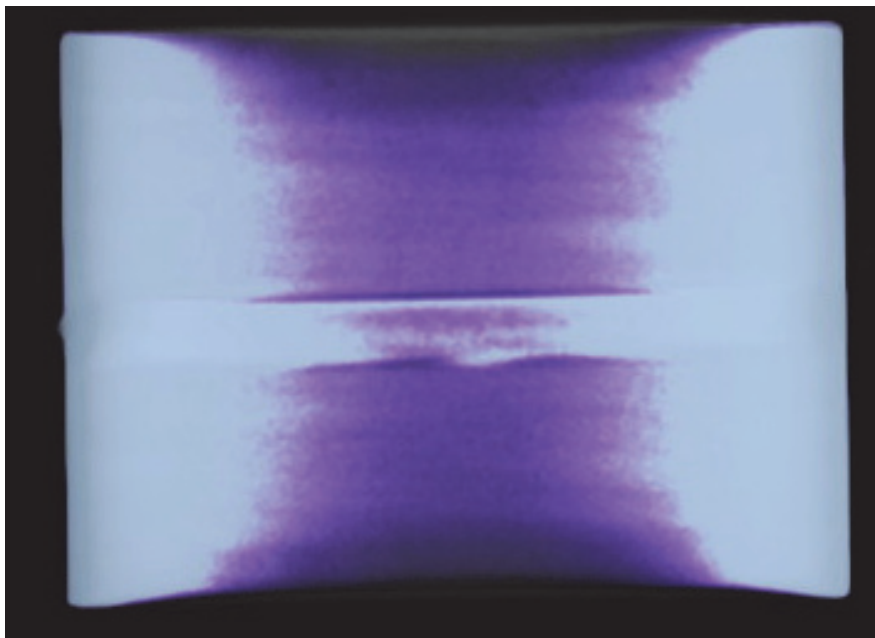


Rys. 4. Drugie 6 tomogramów z 37 wykonanych dla próbki nr 11 przy następujących parametrach: obraz warstw o grubości 5,0 mm, algorytm skanowania B60s
Fig. 4. The series of tomograms no. 7-12 out of total 37 tomograms made for sample no. 11 with the following parameters: image layers of thickness 5.0 mm, scanning algorithm B60s

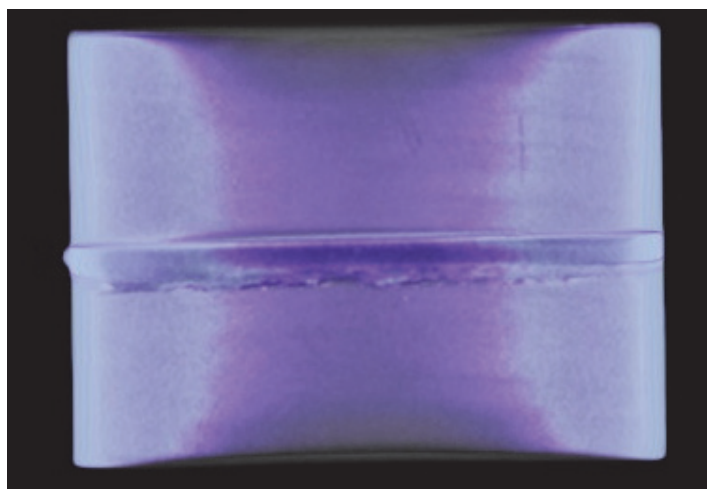


Rys. 5. Ostatnie 6 tomogramów z 37 wykonanych dla próbki nr 11 przy następujących parametrach: obraz warstw o grubości 5,0 mm, algorytm skanowania B60s

Fig. 5. The series of tomograms no. 32-37 out of total 37 tomograms made for sample no. 11 with the following parameters: image layers of thickness 5.0 mm, scanning algorithm B60s



Rys. 6. Rekonstrukcja spawanego złącza teowego wykonana dla próbki nr 11. Widok od spodu
Fig. 6. The reconstruction of a welded T-joint made for sample no. 11. Bottom view



Rys. 7. Obraz rekonstrukcji próbki stalowej nr 11. Widok z góry
Fig. 7. Image of the reconstructed steel sample no. 11. Top view

Rysunek 8 przedstawia przestrzenny obraz próbki nr 11, otrzymany na podstawie wcześniej wykonanych tomogramach. Na pierwszym planie widoczna powierzchnia przeciwnie do spoiny. Przekrój w miejscu łączenia obu blach praktycznie jest nieczytelny. Przyczyną może być silne odbicie promieni X od

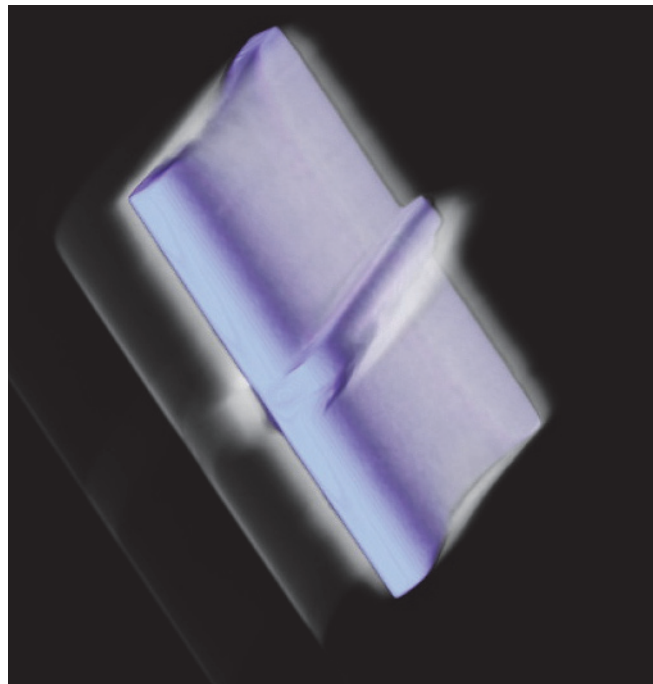
powierzchni metalu i/lub nieodpowiedni dobór kontrastu dla łączonych elementów przez operatora tomografu, w celu uwypuklenia struktury wewnętrznej łączonych blach.

Rysunek 9 przedstawia również obraz próbki nr 11 w 3D, ale w widoku od strony wykonanej spoiny.

Rysunek 10 – rekonstrukcja próbki w widoku z boku.

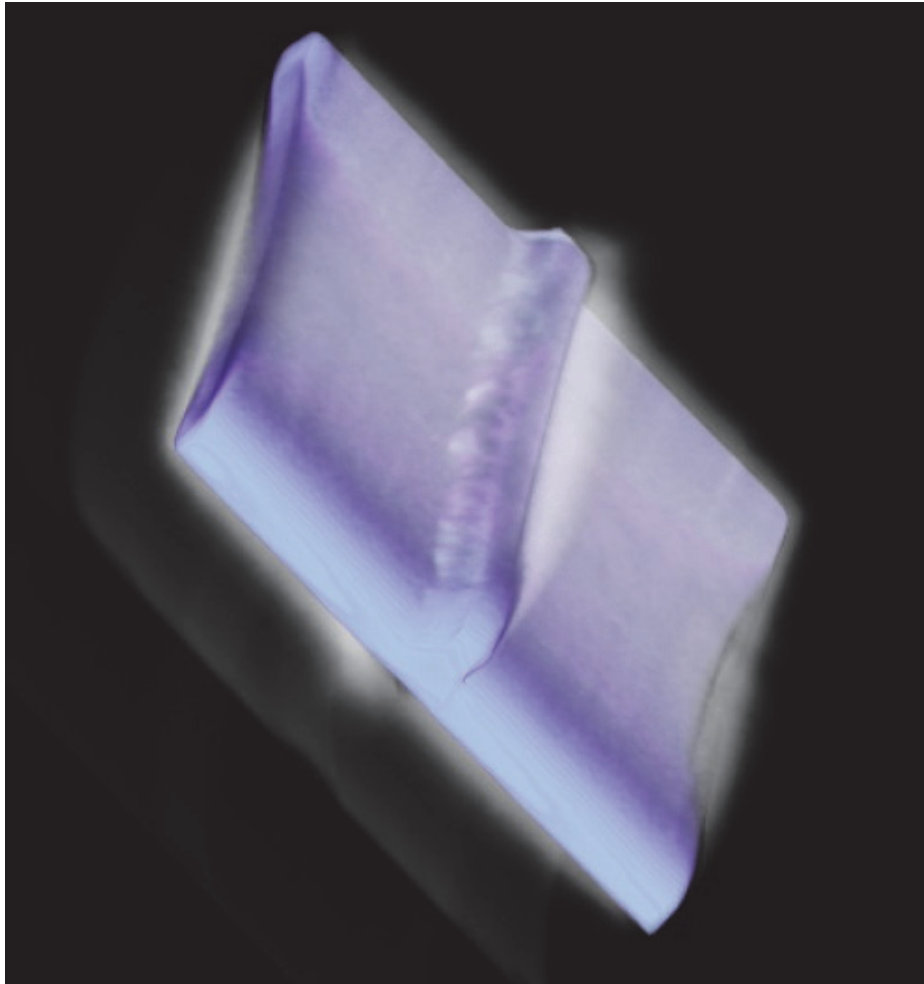
Zastanawiając się nad możliwością zwiększenia czytelności otrzymanych tomogramów wykonano rekonstrukcję dla innej grubości skanowania (0,6 mm) oraz innego algorytmu skanowania (T80f), co przedstawiono na rysunku 11. Wynik jednak nie jest zadawalający.

Zjawisko silnego odbicia promieniowania X od powierzchni metalu próbki zniekształca w pewien sposób obraz badanego obiektu. Wielkość grubości łuny odbicia tego promieniowania może znacznie przekraczać grubość badanego obiektu.



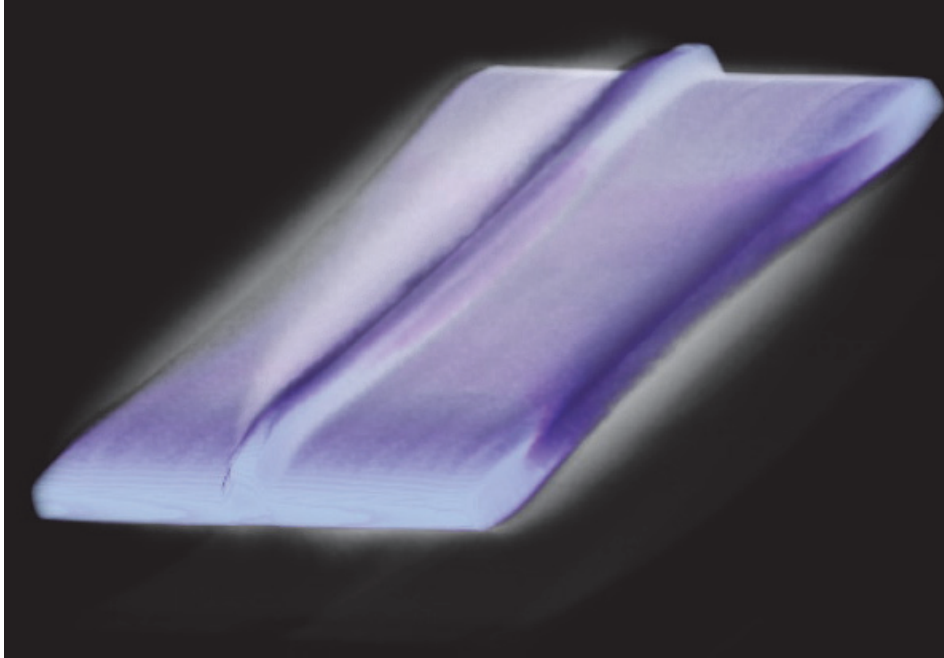
Rys. 8. Obraz jak wyżej z wyraźnie widoczną łuną odbicia promieniowania X oraz zniekształceniami powierzchni spowodowanymi tym zjawiskiem

Fig. 8. Image as above with clearly visible x-ray reflection glow and distortions of the surface caused by that phenomenon



Rys. 9. Rekonstrukcja próbki nr 11 zbudowana z tomogramów wykonanych na urządzeniu Somaton Definition AS firmy Siemens (tomograf dwurzędowy 128-detektorowy). Widok od strony spoiny

Fig. 9. The reconstruction of the sample no. 11 on the basis of tomograms made by the device Somaton Definition AS Siemens (double row tomograph with 128 detectors). View from the side of the weld



Rys. 10. Rekonstrukcja próbki nr 11 otrzymana na podstawie tomogramów
Fig. 10. The reconstruction of the sample no. 11 on the basis of tomograms



Rys. 11. Rekonstrukcja próbki nr 11 wykonana przy następujących parametrach: obraz warstw o grubości 0,6 mm, algorytm skanowania T80f
Fig. 11. The reconstruction of the sample no. 11 made with the following parameters: image layers of thickness 0.6 mm, scanning algorithm T80f

3. PODSUMOWANIE

Zastosowanie tomografii komputerowej CAT umożliwia otrzymywanie obrazów struktury badanych próbek bez konieczności ich niszczenia. Na podstawie tych obrazów możliwe jest stwierdzenie, czy w budowie wewnętrznej badanych części, elementów konstrukcyjnych ukryte są wady materiałowe np. obszary nieciągłości. W badaniach podjęto próbę oceny jakości spawanej spoiny teowej pod względem jej jakości za pomocą tomografii CAT. Rodzaj materiału próbek (w tym przypadku stali) niestety wpływa wyjątkowo niekorzystnie na otrzymane obrazy, dla której występuje zjawisko silnego odbicia promieni X od metalu. W badanych złączach teowych wykorzystano tylko jeden rodzaj materiału, nie można więc odnosić się tu do ewentualnych wyników badań otrzymanych dla innych gatunków materiału. Już w pracy [5] zauważono, że pewną barierą w tej metodzie badawczej jest rozdzielczość w 3D, która dla celów inżynierii materiałowej jest zbyt mała. Porównując jednak wyniki badań próbek stalowych, otrzymanych za pomocą tomografu jednorzędowego [5] i dwurzędowego tego samego producenta, można stwierdzić, że na przestrzeni 7 lat dzielących te dwie generacje konstrukcji nastąpił olbrzymi postęp w jakości otrzymywanych tomogramów, ich rozdzielczości oraz zastosowanych algorytmów służących do budowy obiektów 3D. Jeżeli ta tendencja rozwojowa się utrzyma, metodę CAT będzie można już w niedługim czasie z powodzeniem zastosować do badań dedykowanych również inżynierii materiałowej.

Obiecującym kierunkiem wykorzystania metody komputerowej CAT może być analiza jakości złączy spawanych materiałów polimerowych i kompozytowych.

Wyniki z przeprowadzonych badań spoin teowych dla stali C45 metodami klasycznymi (metodą wizualną, magneto-proszkową, ultradźwiękową i penetracyjną) uzupełnionych badaniami tomograficznymi z wykorzystaniem metody CAT mogą przyczynić się do poszerzenia wiedzy na temat niezgodności spawalniczych w złączach spawanych stali o których jest mowa m. in. w normach PN-ISO 8402 oraz PN-EN ISO 26520-1.

Wydaje się, że dobrym rozwiązaniem dotyczącym zwiększenia czytelności otrzymanych tomogramów dla próbek metalowych może być zastosowanie odpowiedniego programowego filtra.

4. LITERATURA

- [1] CZUCHRYJ J., KURPISZ B.: Badania złączy spawanych. Przegląd metod. Wydawnictwo KaBe Krosno, 2009.
- [2] CZUCHRYJ J., SIKORA S.: Badania penetracyjne połączeń spawanych, odlewów i odkuwek. Wydawnictwo KaBe Krosno, 2008.
- [3] FERENC K.: Spawalnictwo. Wydawnictwo WNT Warszawa, 2007.
- [4] GODET M.: The third body approach: A mechanical view of wear. *Wear*, Vol. 100/1984, 437–452.
- [5] GRABOWSKA M., MIKOŁAJCZYK J.: Zastosowanie tomografii komputerowej CAT w inżynierii mechanicznej. Wydawnictwo Uczelniane UTP w Bydgoszczy. *Czasopismo Naukowo-Techniczne: Postępy w Inżynierii Mechanicznej* 9(5), 2017.

- [6] KRUK A.: Tomografia elektronowa i jej zastosowanie w obrazowaniu i metrologii mikrostruktury materiałów. Wydawnictwo AGH Kraków, 2012.
- [7] LASS P.: Tomografia emisyjna fotonu. VIA MEDICA, Gdańsk 1998.
- [8] MIKOŁAJCZYK J.: Wpływ dodatków smarowych na transformację warstwy wierzchniej. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, 2017.
- [9] MIKOŁAJCZYK J.: Maszyny tarciove. Budowa, przeznaczenie. Wydawnictwo Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Pile, 2018.
- [10] Norma PN-ISO 8402.
- [11] Norma PN-EN ISO 13534 kat. IV.
- [12] Norma PN-EN ISO 26520-1.
- [13] PIWOWAR S.: Kontrola procesów spawalniczych. Wydawnictwo WNT Warszawa, 1979.
- [14] POLAKOWSKI K.: Tomograficzne obrazowanie lokalnych wartości parametrów przepływów produktów spalania w technice samochodowej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2011.
- [15] RIGNEY D., GLEASER A.W.: The significance of near surface microstructure in the wear process. *Wear*, 46, 1978, s. 241–250.

APPLICATION OF CAT SCANNING IN NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WELDED T-JOINTS

Summary: The article presents the results of a non-destructive conducted with the aid of computer tomograph Somaton Definition AS (Siemens). The samples were welded T-joints made in the downhand position. The material used for probes was steel C45. The joints were made on the Level C quality (medium requirements).

Key words: Computer Axial Tomography, tomograph