

Piotr DŁUGOSZ

Paweł DARŁAK

Maciej KOCHEL

Marcin MATUSZEWSKI

WYKORZYSTANIE RADIOGRAFII CYFROWEJ W INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Streszczenie. W artykule opisano zasadę działania radiografii cyfrowej i metodykę prowadzenia badań. Artykuł prezentuje także możliwości techniki cyfrowej wizualizacji w aspekcie konstruowania elementów ochrony balistycznej. Przedstawiono wyniki analizy rentgenowskiej wielowarstwowych struktur kompozytowych typu przekładkowych (ang. sandwich), składających się z elementów prasowanych w stanie ciekłym (ang. squeeze casting), przerabianych plastycznie, fragmentów ceramiki oraz związków elastomerowych połączonych za pomocą innowacyjnych technik klejenia. Przedstawiono również możliwości analizy jakościowej stalowych połączeń spawanych przeznaczonych do zastosowań w technice wojskowej.

Słowa kluczowe: radiografia cyfrowa, panele wielowarstwowe, ochrona balistyczna.

1. WPROWADZENIE

Badania nieniszczące stosowane w warunkach braku dostępności do obszarów podlegających analizie służą określeniu wszelkich wad objętościowych obecnych wewnątrz badanego detalu. Racjonalnym jest korzystanie z aparatury do badań nieniszczących, zwłaszcza mobilnej, gdy istotne jest tempo badań, a procedury umożliwiają natychmiastowy dostęp do wyników badań. Badania nieniszczące mają dość liczną reprezentację, w postaci analogowych i cyfrowych metod rentgenowskich, termowizyjnych, pirometrycznych, ultradźwiękowych, etc. Oferują zatem szerokie spektrum możliwości badawczych w takich gałęziach przemysłu, jak hutnictwo, odlewnictwo, przemysł budowlany, chemiczny, petrochemiczny, czy przemysł obronny, a także w spawalnictwie, elektronice i energetyce [2], [3]. Obecnie wymienia się siedem podstawowych metod NDT (ang. NDT - non destructive technics), do których należą: ultradźwiękowa, radiograficzna, prądów wirowych, magnetyczna, penetracyjna, wizualna oraz metoda badań szczelności [2], [3], [4].

Do tej grupy zaliczana jest także metoda pomiaru temperatury z użyciem kamer termowizyjnych oraz pirometrów bazująca na podczerwieni, która stanowi obecnie najbezpieczniejszy sposób analizy termicznej w przemyśle energetycznym, budowlanym, czy też odlewniczym [5].

mgr inż. Piotr **DŁUGOSZ** – Instytut Odlewnictwa, Kraków

mgr inż. Paweł **DARŁAK** – Instytut Odlewnictwa, Kraków

mgr inż. Maciej **KOCHEL** – Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Urządzeń Mechanicznych „OBRUM” sp. z o.o., Gliwice

mgr inż. Marcin **MATUSZEWSKI** – Casp System Sp. z o.o., Jaworzno

Rozwój rentgenowskich metod diagnostycznych jest szczególnym przykładem ewolucji, która wymusiła w obszarach produkcyjnych wzrost jakości m.in.: części samochodowych, odpowiedzialnych elementów dla wojska, lotnictwa cywilnego czy też struktur dla przemysłu kosmicznego, przyczyniając się do wzrostu trwałości oraz bezpieczeństwa użytkowania różnego rodzaju środków transportu.

Przebieg ewolucji opierał się na rezygnacji z analogowych wzmacniaczy obrazu, pokrywanych emulsją światłoczułą na rzecz detektorów cyfrowych, pozwalających na śledzenie struktury wyrobu w trakcie badania. Radiografia cyfrowa stała się tym samym niezwykle skutecznym narzędziem badawczym i diagnostycznym, służącym do oceny konstrukcji, połączeń spawanych, struktury odlewów żeliwnych, kompozytów metalowo-ceramicznych, polimerowych, a nawet tworzyw sztucznych. Zaliczana do technik nieniszczących radiografia cyfrowa służy obecnie do natychmiastowej analizy nieciągłości strukturalnych, takich jak porowatości, pęcherze, wtrącenia, niespawy, rzadzizny, a także pęknięcia i wady konstrukcji.

Współczesna radiografia bazuje na zjawiskach znanych w fizyce od czasu odkrycia promieniowania w 1895 roku przez Wilhelma Roentgena. Promieniowanie rentgenowskie powstaje w próżni w wyniku przyspieszania strumienia elektronów do poziomu 1012 pomiędzy dwoma elektrodami: katodą i anodą. Wiązka promieniowania generowana podczas wyhamowywania elektronów na anodzie (tarczy) powoduje powstanie tzw. promieniowania hamowania. Dodatkowo w wyniku reakcji elektronów z materiałem anody powstaje promieniowanie charakterystyczne. Efektem takiego połączenia jest utworzenie charakterystyki ciągłej dla widma hamowania oraz pików pochodzących od widma charakterystycznego [1]. W tym celu tarcza lampy rentgenowskiej musi być odpowiednio zaprojektowana; dla przykładu w rozwiązaniach stacjonarnych tarcza najczęściej wykonana jest z wolframu i ustawiona pod kątem około 45° – 65° do osi padania wiązki promieniowania i połączona jest z układem odprowadzającym ciepło, zapewniającym stabilne parametry ekspozycji podczas prowadzonych prac. Z kolei w lampach przenośnych, gdzie liczy się waga i szybkość kontrolnych badań, korzysta się z rozwiązań z wirującą anodą, tak by wiązka promieniowania nie padała w to samo miejsce i nie powodowała wypalenia materiału. Producenci tego typu urządzeń zwykle wymagają, by w trakcie eksploatacji lamp prowadzono regularne, okresowe (raz na pół roku lub raz na rok) czynności sprawdzające, zwłaszcza wymiar ogniska, w celu zapewnienia powtarzalności wyników oraz utrzymania zakresu wykrywalności na jednakowym poziomie [6].

To, co w radiografii analogowej było rzeczą niemożliwą - czyli prowadzenie badań z użyciem systemu powiększania obrazu (widoczny był tu wpływ nieostrości obrazu poprzez duży udział składowej nieostrości geometrycznej pochodzącej od wymiaru ogniska lampy), stało się możliwe w radiografii cyfrowej, w której używa się lamp rentgenowskich z jak najmniejszym wymiarem ogniska (0,4; 1,0 mm). Pozwala to na zmniejszenie odległości lampa – detal, obniżenie parametrów ekspozycji, a w efekcie przekłada się na wzrost wykrywalności i ostrości obrazu [7].

Sercem układu radiografii cyfrowej jest płaski detektor DDA (ang. – Digital detektor array), który dokonuje inwersji promieniowania rentgenowskiego poprzez folię scyntylacyjną na światło widzialne. Za jego pomocą następnie prowadzony jest odczyt wartości poziomu światła przez matrycę fotodiod i w ostatnim kroku następuje przekształcenie obrazu na sygnał cyfrowy. Sygnał ten, po przetworzeniu do postaci obrazu, trafia na ekran monitora [8], [9].

Współczesne detektory DDA zbudowane są z matrycy złożonej z fotodiod, które ułożone blisko siebie pokrywają cały badany zakres, zapewniając ogromną precyzję i szybkość działania. Poza standardowymi parametrami detektora DDA, jak rozmiar piksela

i liczba klatek na sekundę, każdy producent dodatkowo określa takie parametry, jak: podstawową rozdzielczość przestrzenną, czułość kontrastową, wartość zwłoki, wydajność detektora oraz zakres badanej grubości zgodnie z normą ASTM E2597 [10]. Zbiór wszystkich wymienionych parametrów prezentowany jest za pomocą tzw. wykresu „pajęczynowego”.

Prawidłowo dobrany detektor, odpowiedni do planowanych kontroli materiałów i stosowanych energii, cechuje się zwiększoną żywotnością. Najczęściej przejawia się to ograniczeniem pojawiającej się z czasem liczby martwych pikseli lub klastrów, które wpływają na tworzenie stref martwych w kontrolowanym obszarze. Prawidłowy wybór powinien dotyczyć także lampy rentgenowskiej. Dobrze dobrana lampa, zwłaszcza w kontekście rodzaju badanych materiałów oraz ich wymiarów, umożliwia prowadzenie znormalizowanych badań i kontroli, przyczyniając się do poprawy jakości produkcji.

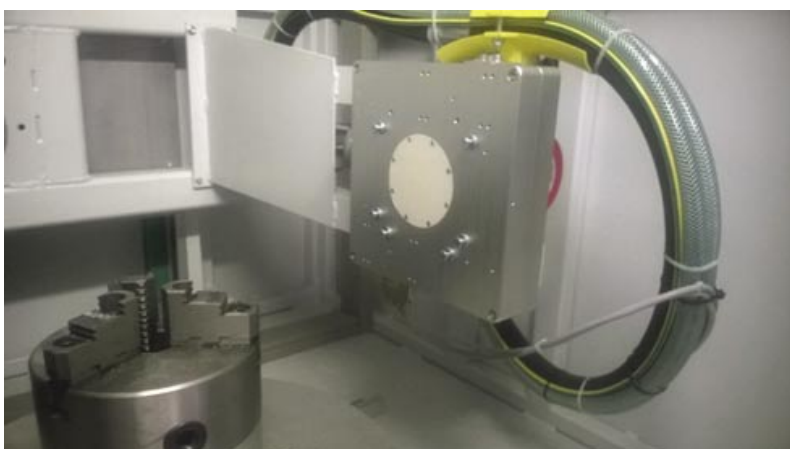
Radiografia cyfrowa najbardziej sprawdza się w warunkach produkcji odlewów ciśnieniowych, a więc odlewów, których dotyczą szczególne wymagania ze strony przemysłu motoryzacyjnego, AGD lub lotniczego. Kontrola jakości prowadzona tą metodą w trakcie lub na końcu cyklu produkcyjnego dopuszcza prawidłowo wykonane odlewy do dalszych zastosowań, pozwalając na wyodrębnienie szczególnie tych o podwyższonej szczelności, eliminując jednocześnie wyroby wadliwe. „Szczelne” lub nawet „super szczelne” odlewy ciśnieniowe są w dużym stopniu pozbawione porowatości gazowej powstałej w procesie odlewniczym w wyniku okluzji gazów. Ocenie porowatości poddaje się odlewy ciśnieniowe na podstawie takich norm jak: ASTM 2973, zastępująca starszą E 505, oraz VDG P201/VW 50097 i P202 / VW50093 [11], [12], [13]. Spełnienie tych norm bezpośrednio przekłada się na zapewnienie bezpieczeństwa eksploatacji poszczególnych komponentów w motoryzacji [14]. Spotyka się również wyniki badań radiograficznych dotyczących odlewów żeliwnych lub stalowych, do analizy których wymagane są znacznie mocniejsze lampy rentgenowskie niż w przypadku metali nieżelaznych [15].

2. BADANIA STRUKTUR KOMPOZYTOWYCH

Przedmiotem badań przeprowadzonych w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie były zbudowane w ramach projektu MODPANC wielowarstwowe panele ochronne oraz wybrane elementy systemu ich mocowania do chronionych obiektów. Badania zrealizowano z wykorzystaniem przemysłowego systemu rentgenowskiego typu MU2000 firmy Yxlon International GmbH (rys. 1) służącego do prowadzenia badań kontroli, jakości odlewów, odkuwek, złączy spawanych, ceramiki i innych. Celem badań rentgenowskich było ujawnienie niezgodności w postaci pęknięć, przesunięć warstw, braków wypełnienia klejem lub elastomerem, rzadzisz i pęcherzy gazowych, a także rozwarstwień powstałych w wyniku oddziaływania drgań na strukturę paneli wielowarstwowych. Analizowano także rodzaj i zakres deformacji paneli poddanych próbom balistycznym oraz jakość spawów wykonanych w panczerzu zasadniczym służących do mocowania uchwytów pod dodatkowe panele wielowarstwowe. Badanie realizowano poprzez przemieszczanie zamocowanego na stole manipulatora badanego obiektu w sześciu osiach. Podczas kontroli wykorzystano półautomatyczny program, pozwalający na prowadzenia prac w sposób powtarzalny i usystematyzowany, oraz nastawy ręczne w celu zmian parametrów detektora DDA i dostosowanie powiększenia geometrycznego do wykonywanego zadania. Charakterystyczne parametry urządzenia pomiarowego podane zostały w pkt. 2.1. artykułu.

2.1. Parametry urządzenia MU 2000

1. Zamknięta lampa rentgenowska Y.Tu160-D06 o napięciu przyspieszającym 160 kV.
2. Mała plamka ogniskowa 0.4 mm (wg norm EN 12543).
3. Duża plamka ogniskowa 1.0 mm (wg norm EN 12543).
4. Moc lampy dla małej plamki ogniskowej 0.8 kW.
5. Moc lampy dla dużej plamki ogniskowej 1.8 kW.
6. Cyfrowy detektor DDA o obszarze powierzchni roboczej: 200x200 mm.
7. Ilość klatek (częstotliwość próbkowania): do 25 klatek/s przy pełnej rozdzielczości.
8. Maksymalny rozmiar pojedynczego piksela: 200 μm .



Rys. 1. Wnętrze urządzenia MU 2000 – widoczna lampa rentgenowska 160 kV

2.2. Zastosowane nastawy aparatury badawczej

1. Napięcie: 82 - 160 kV.
2. Prąd: 2,0 mA.
3. Ognisko lampy: 0,4 mm (wg PN EN 12543).
4. Odległość lampa – detektor (FFD): 700 mm.
5. Powiększenie: $M = 2$.
6. Czas integracji: 133 ms.
7. Czułość detektora: 50%.
8. Rozmiar piksela: 200 x 200 μm .

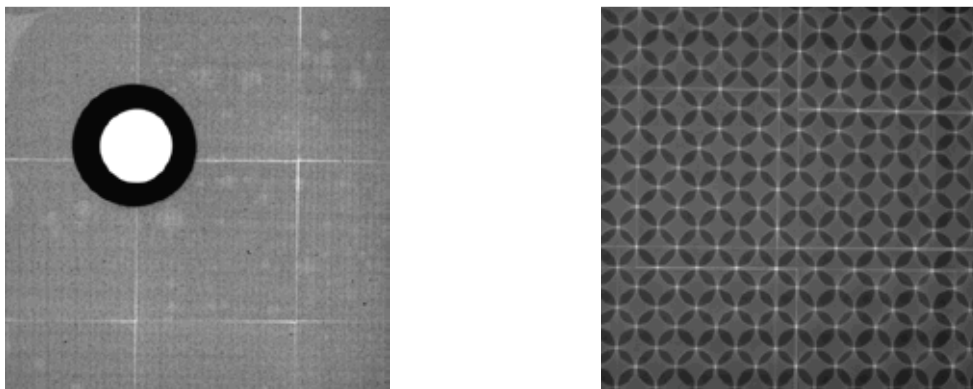
2.3. Metodyka badań

Przygotowanie detali do badań odbywa się zazwyczaj poprzez określenie oczekiwanych przez klienta poziomów jakości lub klas oceny, normatywnie założonych dla materiałów, z których detal jest zbudowany. W przypadku wielowarstwowych struktur kompozytowych badania RTG nie mieszczą się

w istniejących normach, dając jedynie jakościowy wgląd w stan struktury. Możliwe jest zatem stwierdzenie, że pewien układ podstruktur lub poszczególnych elementów pozostaje w zgodzie z założeniami projektu lub został zmieniony w wyniku oddziaływania czynników zewnętrznych, wynikających z warunków wcześniej przeprowadzonych testów (badań mechanicznych, prób balistycznych itp). Dlatego ustalenie parametrów badań, przy których spełniona będzie wykrywalność niezgodności odbywa się na bieżąco, zgodnie z oczekiwaniami operatora. Po wstępnym doborze takich parametrów ekspozycji, jak napięcie i natężenie prądu, dokonuje się ustawień systemu w zakresie tzw. kalibracji offsetu i wzmocnienia obrazu. W przypadku natomiast odlewów monolitycznych i jednolitych pod względem materiału - budulca, po przygotowaniu systemu do badań weryfikuje się jakość otrzymanych obrazów poprzez sprawdzenie poziomu wykrywalności przy użyciu wzorców pręcikowych i/lub otworkowych zgodnie z normami. Tak przygotowany system jest gotowy do kontroli badanych detali z możliwością badania na żywo lub w formie zapisu zdjęć z prowadzonych prac. Natomiast w przypadku złożonych materiałów kompozytowych - identycznych z opisywanymi w artykule, sprawa jest niezmiernie utrudniona ze względu na wielorakość wykorzystanych w budowie paneli materiałów. Stosowanie wzorców pręcikowych i/lub otworkowych wydaje się być sensowne w momencie, gdy operator decyduje się na analizę panelu w oparciu o parametry wyregulowane względem pierwszego, wybranego materiału, z którego zbudowany jest element złożonego układu. Należy jednak pamiętać, że każdy z użytych materiałów struktury charakteryzuje się odmiennym spektrum właściwości fizykochemicznych, z gęstością na czele.

3. WYNIKI BADAŃ

Wykonane badania paneli wielowarstwowych, w wyniku których otrzymano zdjęcia cyfrowe pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Cyfrowe obrazy rentgenowskie wielowarstwowych paneli ochronnych

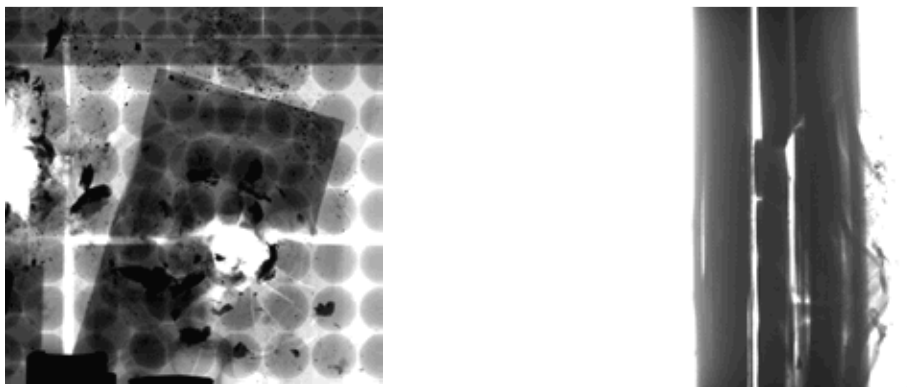
- a) wielowarstwowy moduł opancerzenia IMN OML Skawina z otworem mocującym b) moduł opancerzenia IOD złożony z układu brył ceramicznych w osnowie metalowej

Rysunek 2a przedstawia wielowarstwowy panel wykonany metodą klejenia. Jasne plamy sugerują rozwarstwienie kleju powstałe w wyniku cyklicznie zmiennych obciążeń przyłożonych w próbie wibracyjnej.

Rysunek 2b przedstawia wielowarstwowy panel wykonany metodą odlewania. Ciemniejsze obszary przedstawiają umiejscowienie ceramicznych sfer. Odcień szarości tła otaczającego sfery przedstawia zmiany grubości metalicznej osnowy modułu.

Cyfrowa analiza radioskopowa, mimo uwarunkowań opisanych w pkt. 2.3, pozwala jednak w sposób jednoznaczny zidentyfikować rodzaj i zakres destrukcji pancerza, wynikający z wcześniej

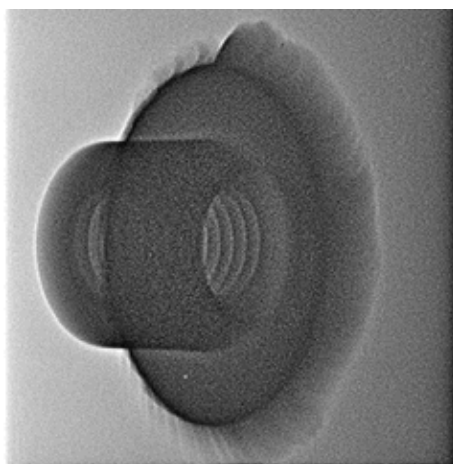
przeprowadzonych prób balistycznych. Zarówno będący śladem pocisku otwór przelotowy, odklejona płytką z osadzonymi półsferami, jak i rozproszone w strukturze odłamki zniszczonych brył ceramicznych są wyraźnie widoczne w cyfrowym obrazie rentgenowskim zaprezentowanym na rysunku 3a. Obraz dokumentujący efekty związane z penetracją pancerza przez pocisk, może być rejestrowany z wielu pozycji ze względu na możliwości sterowania układem mocowania próbki i zestawem źródło-detektor w dowolnej osi, co widoczne jest na rysunku 3b.



Rys. 3. Cyfrowe obrazy rentgenowskie wielowarstwowych modułów opancerzenia poddanych próbom balistycznym

- a) widok obszaru destrukcji modułu IOD b) ten sam moduł widziany pod kątem 90°

Przy ocenie takich elementów, jak spoina wraz z kołkiem dystansowym zamontowanym na stalowym pancerzu zaistniała potrzebawycorzystania maksymalnej wartości napięcia (160 kV) dostępnego dla lampy rentgenowskiej systemu MU 2000, ze względu na gęstość stali użytej do wykonania kołka i blachy oraz samej spoiny. Dlatego prezentowany na rysunku 4-cyfrowy obraz rentgenowski cechuje się wysokim poziomem szumów, wynikających z wartości powiększenia.



Rys. 4. Powiększony obraz rentgenowski spoiny

Przy zachowaniu pewnej szczegółowości detalu, pozwalającej na stwierdzenie równomierności w położeniu spoiny, utracono rozdzielczość, umożliwiającą identyfikację drobnych nieciągłości, takich jak pory i pęknięcia.

4. PODSUMOWANIE

Kontrola jakości przy użyciu urządzenia RTG wyposażonego w system filtrów cyfrowych pozwoliła w sposób powtarzalny i wiarygodny określić obszary nasilenia nieciągłości, dzięki czemu możliwa była identyfikacja obszarów uszkodzonych podczas prób mechanicznych i balistycznych, a w rezultacie można było określić rekomendacje dla ewentualnych zmian w konstrukcji paneli.

Radiogram cyfrowy pozwala na analizę propagacji pęknięć, jak również śladów powstałych w wyniku oddziaływań mechanicznych, takich jak wibracje, wstrząsy, uderzenia oraz oddziaływań termicznych, takich jak nadtopienia, porowatości itp. Wewnętrzna struktura wielowarstwowych paneli ochronnych, przedstawiona na rysunkach 2 i 3, zwykle nie jest widoczna okiem nieuzbrojonym.

Wykorzystanie promieniowania rentgenowskiego umożliwia ocenę prawidłowości wykonania paneli, stopnia uporządkowania elementów składowych i jakości wykonanych połączeń (rys. 2a, 2b). Daje również możliwość oceny efektów destrukcji modułów opancerzenia powstałej w wyniku ostrzału w próbie balistycznej oraz ustalenia wielkości obszaru zniszczeń, zasięgu penetracji odłamków i samego pocisku (rys. 3). Badania rentgenowskie mogą obejmować również analizę połączeń spawanych (rys. 4) systemu mocowania opancerzenia dodatkowego.

5. LITERATURA

- [1] Hanke R., Fuchs T., Uhlmann N.: X-ray based methods for non-destructive testing and material characterization, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 591 (2008) s. 14–18.
- [2] Kochel M., Pasięka D.: Badania nieniszczące konstrukcji spawanych. *Szybkobieźne Pojazdy Gąsienicowe* (43) nr 1/2017, (s. 5-13). ISSN: 0860-8369. OBRUM sp. z o.o. Gliwice, marzec 2017.
- [3] PN-EN 17636-2. Badanie nieniszczące spoin – Badanie radiograficzne. Część 2: Techniki promieniowania X i gamma z detektorami cyfrowymi.
- [4] Lewińska-Romicka A.: *Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii*. WNT-Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2001.
- [5] Długosz P., Darlak P., Reguła T., *Analiza termowizyjna procesów odlewniczych. Innowacje w odlewnictwie ciśnieniowym. Cz. IV*, Instytut Odlewnictwa, Kraków (2011), 23–37, ISBN 978-83-88770-60-9
- [6] Tomograf; www.yxlon.com, [Dostęp: 30.03.2017].
- [7] PN-EN 12543. *Badania nieniszczące – Charakterystyki ogniskowych w przemysłowych układach lamp rentgenowskich stosowanych w badaniach nieniszczących*. Części 1-5.
- [8] ASTM E2597-14. *Standard Practice for Manufacturing Characterization of Digital Detector Array*.
- [9] Detektor; www.perkinelmer.com/pl/imaging-components/detectors, [Dostęp: 30.03.2017].

- [10] Ewert U.: Progress in Digital Industrial Radiology Part I: Radiographic Techniques – Film Replacement and Backscatter Imaging. Badania nieniszczące i diagnostyka 1-2/2016. ISSN 2451-4462. Agenda Wydawnicza SIMP, październik 2016.
- [11] ASTM 2973 Standard Digital Reference Images for Inspection of Aluminum and Magnesium Die Castings.
- [12] VDG P201/VW 50097 Porosity of Metal Castings.
- [13] VDG P202 / VW50093 Porosity of Metal Castings.
- [14] Beuchner H.-J.: Veraenderungen der globalen Umfeldbedingungen in der Giesserei-Industrie, Giesserei 2014 Jg.101, H.12 s. 96-99.
- [15] Hanus U., Fuereder M. Non-destructive testing of heavy cast steel components, Foundry Tr. J. 2009, Vol. 182, nr 3666, s. 174-176.

W artykule wykorzystano wyniki prac projektu „Dodatkowe, modułowe opancerzenie kołowych transporterów opancerzonych i platform gasienicowych” finansowanego ze środków NCBIR, Warszawa w ramach 4. Konkursu BIO. Umowa nr DOBR – BIO4/024/13237/2013. NCBIR, Warszawa 2013.

APPLICATION OF DIGITAL RADIOGRAPHY IN MATERIALS ENGINEERING

Abstract. The article describes the principle of digital radiographic methods and research methodology. It also presents the capabilities of digital visualisation with regard to designing ballistic protection components. Results are presented of X-ray analyses of composite sandwich structures consisting of squeeze cast plastic worked elements and elastomeric compounds bound using innovative adhesive binding methods. Capabilities are also presented of qualitative analysis of steel welded joints for military applications.

Keywords: digital radiography, sandwich panels, ballistic protection