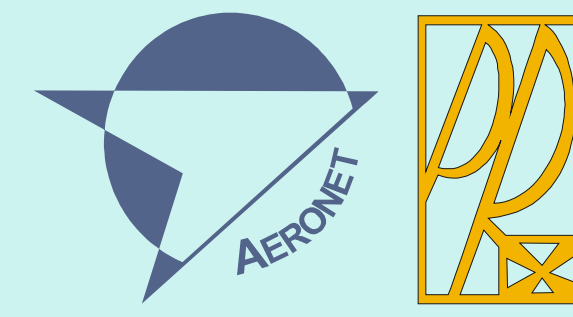


Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry



Konferencja Rady Partnerów RP CZT AERONET
i Konferencja Podsumowująca Projekt PKAERO
30 Listopada- 1 Grudnia 2015

Zb10

Nowoczesne pokrycia barierowe na krytyczne części silnika

Modern barrier covers on critical engine parts

Uniwersytet Rzeszowski, Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska, Politechnika Rzeszowska, Politechnika Lubelska

Tytuł rozwiązania Innowacyjnego

Title of the innovative solution

1. Metoda rejestracji rozkładu natężenia promieniowania w czasie rzeczywistym pochodzącego od wysokotemperaturowej części spawu.
2. Sposób wykrywania podpowierzchniowych defektów metodą termograficzną poprzez skanowanie badanej powierzchni strumieniem gorącego powietrza.
3. Termograficzna kontrola jakości spawów metodą impulsową.

Krótki opis rozwiązania

Brief description of the solution

Ad1. Sposób bezdotykowego pomiaru rozkładu pola temperaturowego w czasie rzeczywistym w procesie spawania wyróżniający się tym, że pomiar odbywa się z wykorzystaniem wysokorozdzielczej kamery termograficznej.

Ad2. Sposób bezdotykowej kontroli jednorodności ochronnych powłok powierzchniowych, wykorzystujący pomiar natężenia promieniowania elektromagnetycznego wzbudzonego w badanej warstwie wskutek wprowadzenia strumienia energii o kontrolowanych parametrach od zewnątrz, znamienny tym, że w celu lokalizacji obszarów zawierających niejednorodności, energia wzbudzająca jest wprowadzana za pomocą strumienia gorącego gazu poprzez dyszę nadawczą. Proces odbywa się z jednoczesnym odzyskiem gazu odbitego od powierzchni badanej dyszą odsysającą, wskutek czego wprowadzenie energii odbywa się w ograniczonym obszarze o średnicy współmiernej z rozmiarem przekroju poprzecznego niejednorodności poprzez skanowanie powierzchni badanej z jednoczesną analizą sygnału termograficznego od ciepłego śladu na powierzchni badanej.

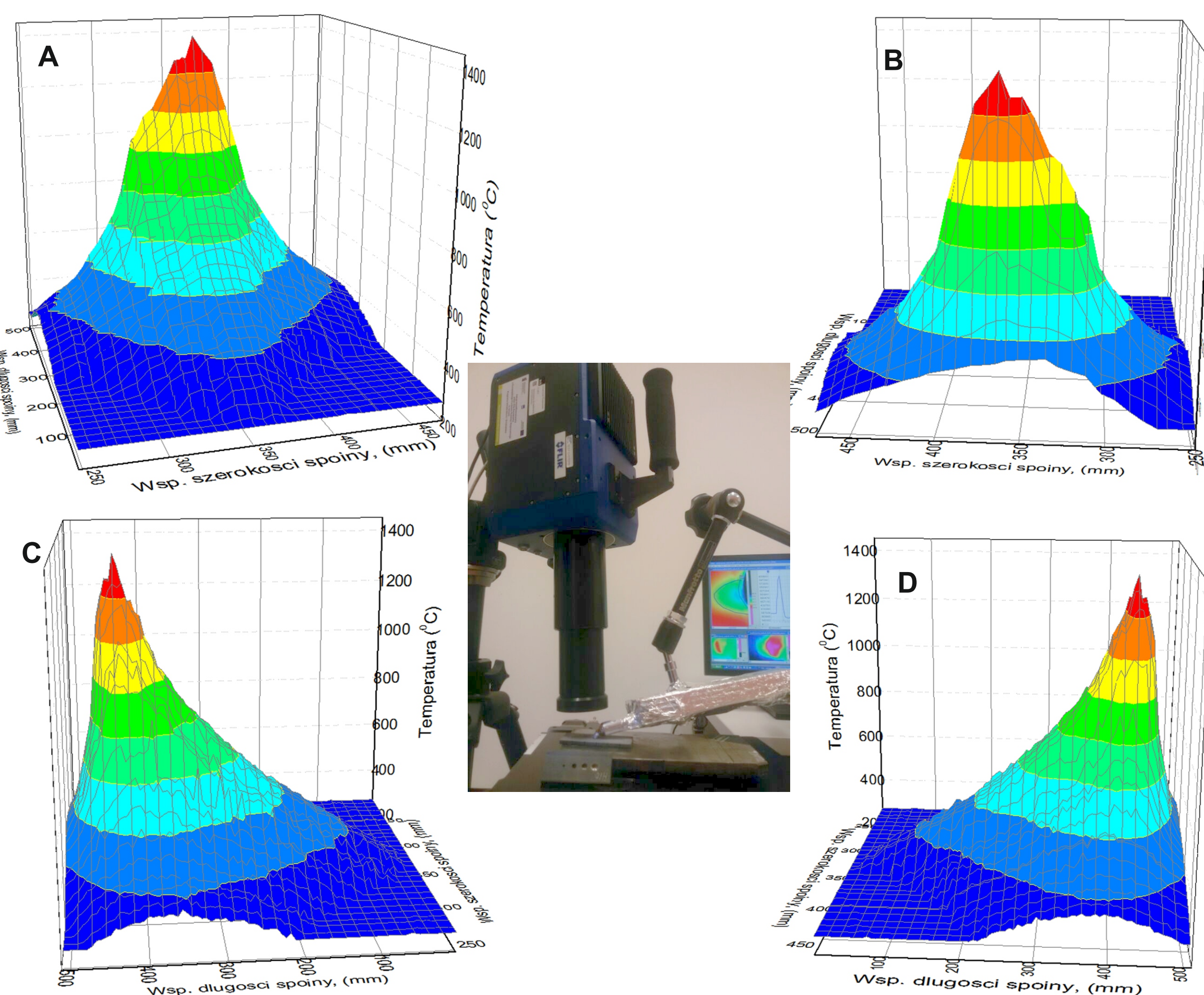
Ad3. Sposób bezdotykowej kontroli jakości spawów wykorzystujący pomiar natężenia promieniowania elektromagnetycznego wzbudzonego w badanym spawie poprzez impulsową lampę ksenonową. Zamiennie tym, że w celu lokalizacji powstałych defektów w spawie, sygnał termograficzny rejestrowany jest z całego obszaru spawu z zastosowaniem programu komputerowego w celu selekcji tego obszaru.

Graficzna prezentacja rozwiązania innowacyjnego

Visualization of the innovative solution

Ad1. Spawanie metodą TIG odbywało się za pomocą dwóch metod: z materiałem dodatkowym oraz bez dodatku spoiwa. Materiałem dodatkowym użytym w eksperymencie był pręt spawalniczy Oerlikon Nirod 625 o średnicy 1,2 mm. Natężenie prądu spawania wynosiło 30A, natomiast przepływ gazu (argonu) 12l/min. W badaniach wykorzystane zostały próbki wykonane ze stopu Inconel 718 o wymiarach 1mm x 60mm x 80mm.

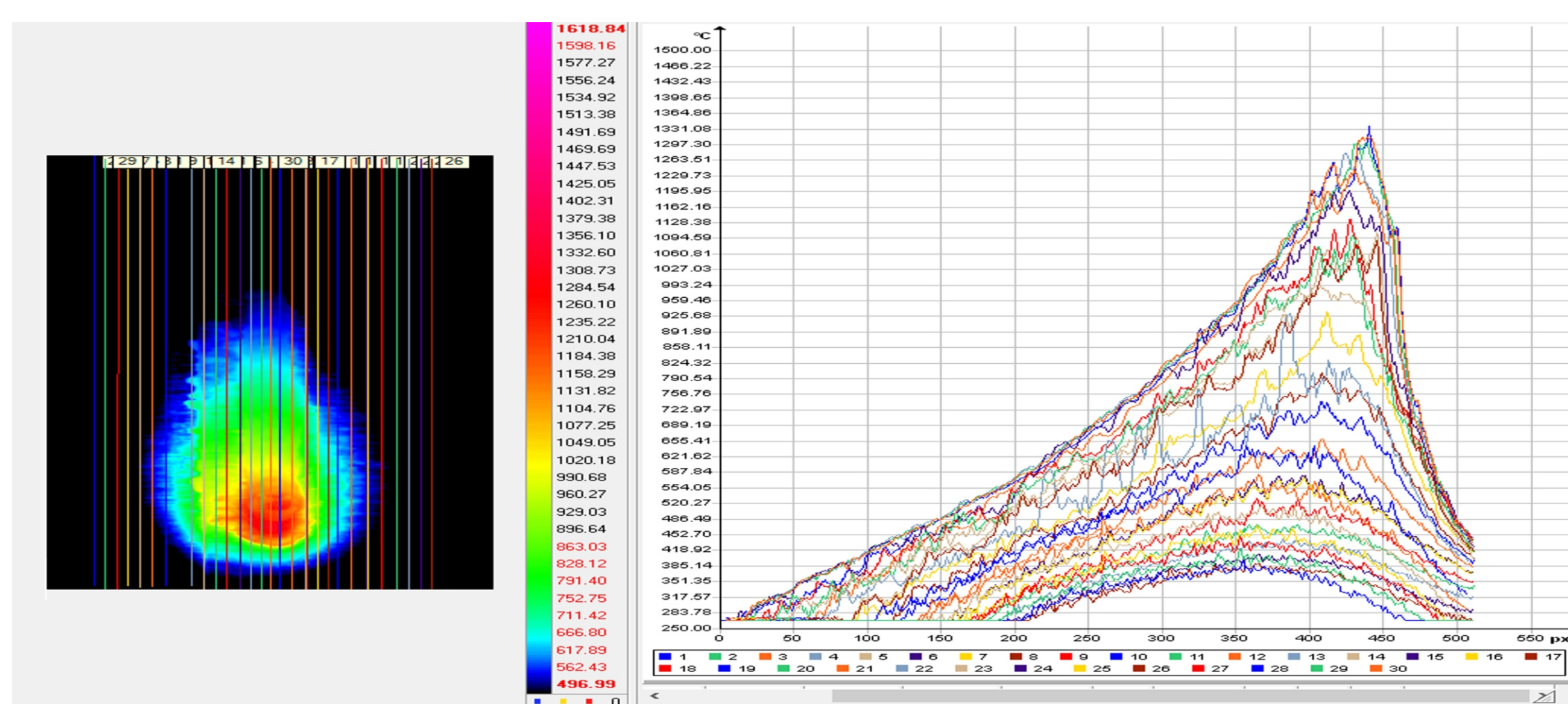
Podczas procesu spawania zarejestrowano za pomocą kamery termograficznej rozkład temperatury powstającej na powierzchni spawów oraz w jeziorce spoiwa.



Rys. 1. Obraz 3D rozkładu temperatury w trakcie spawania
Fig. 1. 3D figure of temperature distribution at the welding process

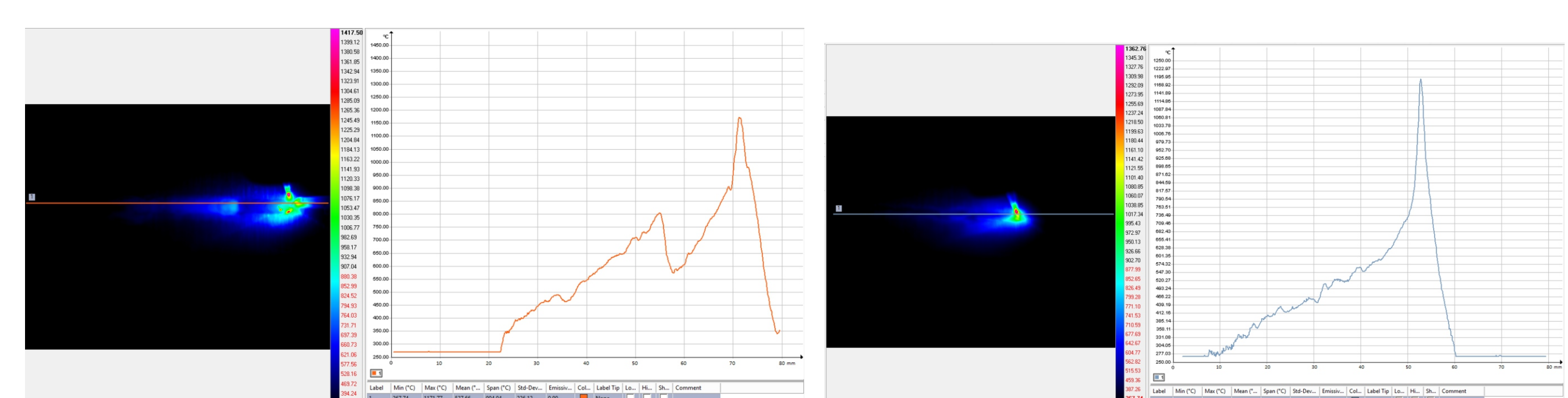
Za pomocą kamery termograficznej zarejestrowano rozkład temperatury na przekroju wzdłużnym ściegu spoiwa.

Za pomocą programu komputerowego Altair wyznaczono 30 liniowych profili temperaturowych próbki (Rys. 2) oraz wyznaczono dystrybucję ciepła rozchodzącego się od spoiwa w kierunku łączonych materiałów.

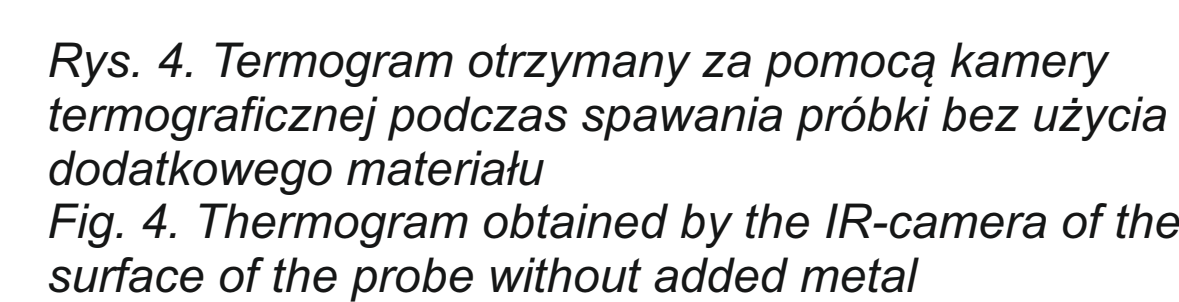


Rys. 2. Rozkład temperatury w spoinie podczas spawania materiału
Fig. 2. Temperature distribution of material during welding

Rysunek 3 przedstawia prawidłową charakterystykę profilu temperaturowego wykonanej spoiwa. Na poniższym rysunku wyraźnie widać brak lokalnych maksimum związanych z nieodpowiednią prędkością podawania materiału dodatkowego w trakcie przebiegu procesu spawania. Zauważyć można natomiast jedno lokalne maksimum temperatury (pik 1) związanej z odpowiednim ułożeniem względem elektrody wolframowej i prędkością podawania materiału dodatkowego oraz minimum związanej z przepływem wykorzystywanego w procesie gazu.



Rys. 3. Termogram otrzymany za pomocą kamery termograficznej podczas spawania próbki z użyciem dodatkowego materiału
Fig. 3. Thermogram obtained by the IR-camera of the surface of the probe with added metal



Rys. 4. Termogram otrzymany za pomocą kamery termograficznej podczas spawania próbki bez użycia dodatkowego materiału
Fig. 4. Thermogram obtained by the IR-camera of the surface of the probe without added metal

Graficzna prezentacja rozwiązania innowacyjnego

Visualization of the innovative solution

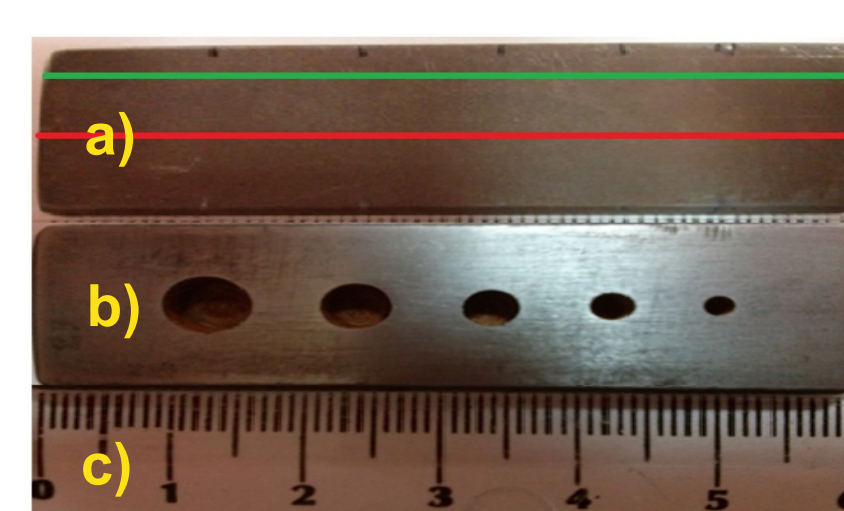
W przypadku pomiarów bez użycia materiału dodatkowego (Rys. 4) można zauważyć równomierny rozkład temperatury w trakcie spawania oraz zaobserwować brak lokalnym maksimum pochodzących od nadmiaru spoiwa.

Ad2. Metoda termograficzna wykrywania defektów podpowierzchniowych polegała na skanowaniu powietrzem gorącym badanej próbki w celu generowania promieniowania elektromagnetycznego od powierzchni. W celu wykrycia podpowierzchniowych wad materiałowych za pomocą skanowania dyszą gorącego powietrza przygotowana została próbka wykonana ze stali C45 pokryta warstwą ochronną Al₂O₃ o wymiarach 80 mm x 30 mm x 5 mm. Próbkę zawierała specjalnie utworzone wady w postaci 5 otworów na tylnej stronie o różnej wielkości średnicy: 6 mm, 5 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm. Głębokość otworów wynosiła 4mm.

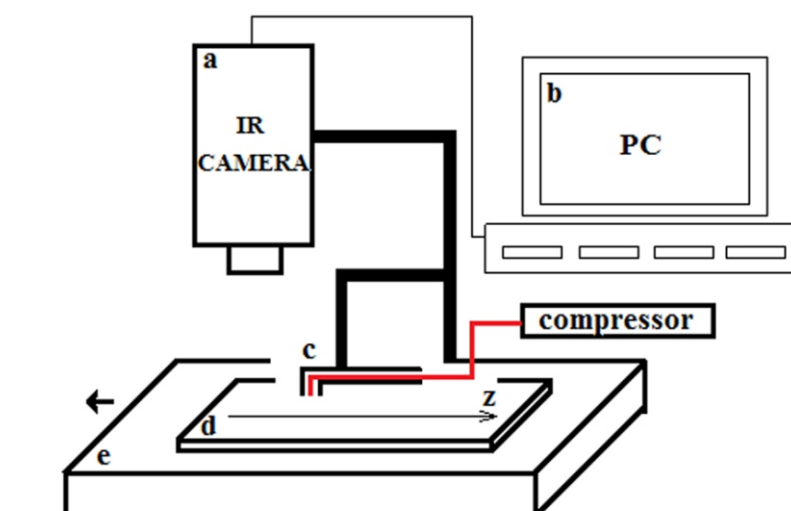
Dysza skanująca (patrz Rys. 7) zamontowana została na nieruchomej platformie razem z kamerą termowizyjną FLIR SC7000 (patrz Rys. 6). Próbkę umieszczono na ruchomym stole poruszającym się w kierunku osi Z z prędkością 4,8 mm/s. Ciśnienie powietrza wychodzące z dyszy wynosiło ponad 2 Atm., natomiast temperatura gorącego powietrza powyżej 100°C. Próbkę o wymiarach 60 mm x 20 mm x 5 mm została wykonana ze stali C45 i zawierała specjalnie utworzone wady w postaci 5 otworów na tylnej stronie próbki o różnej wielkości średnicy: 6 mm, 5 mm, 4 mm, 3 mm, 2 mm (patrz Rys. 5). Głębokość otworów wynosiła dwie trzecie grubości.

Pomiar polegał na przeskanowaniu próbki za pomocą dyszy wzdłuż centralnej osi (czerwona linia) w miejscu ukrytych defektów oraz wzdłuż obszaru znajdującego się poza obszarem dziur (zielona linia).

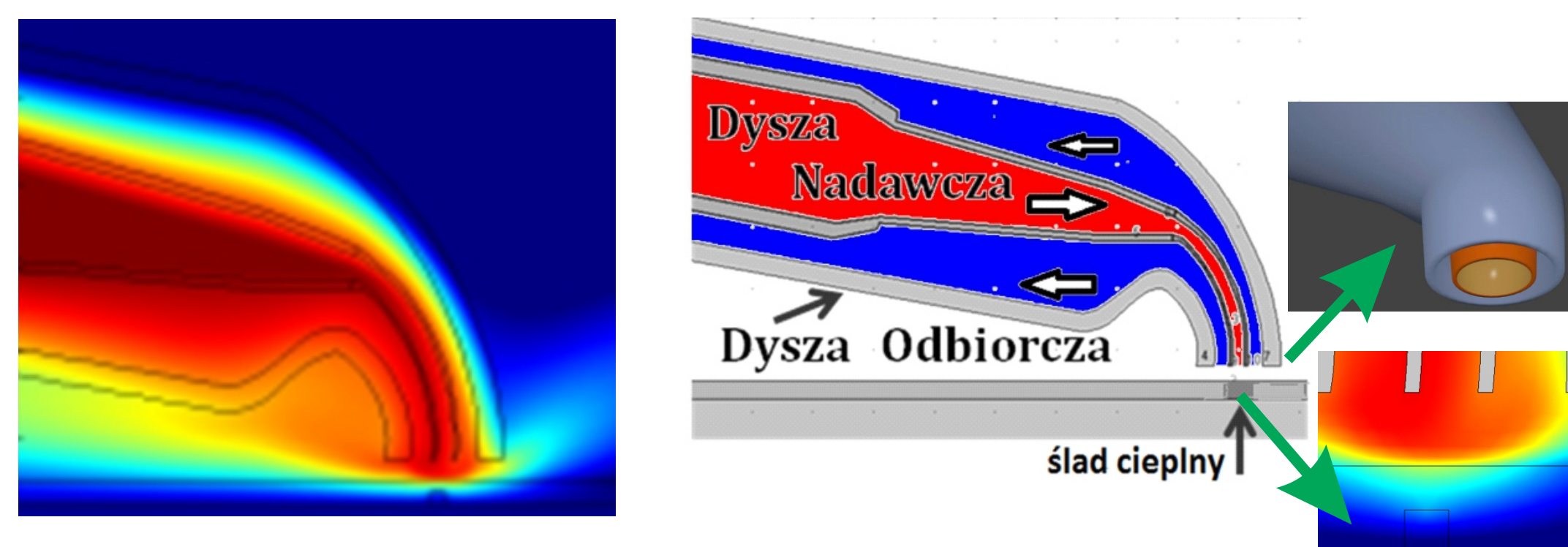
Kamera termograficzna FLIR SC7000 zarejestrowała promieniowanie generowane przez próbkę w miejscach dziur podczas skanowania dyszą gorącego powietrza. Za pomocą oprogramowania Altair wybrany został obszar na powierzchni śladu ciepłego w celu ustalenia natężenia promieniowania z tegoż regionu (patrz Rys. 8).



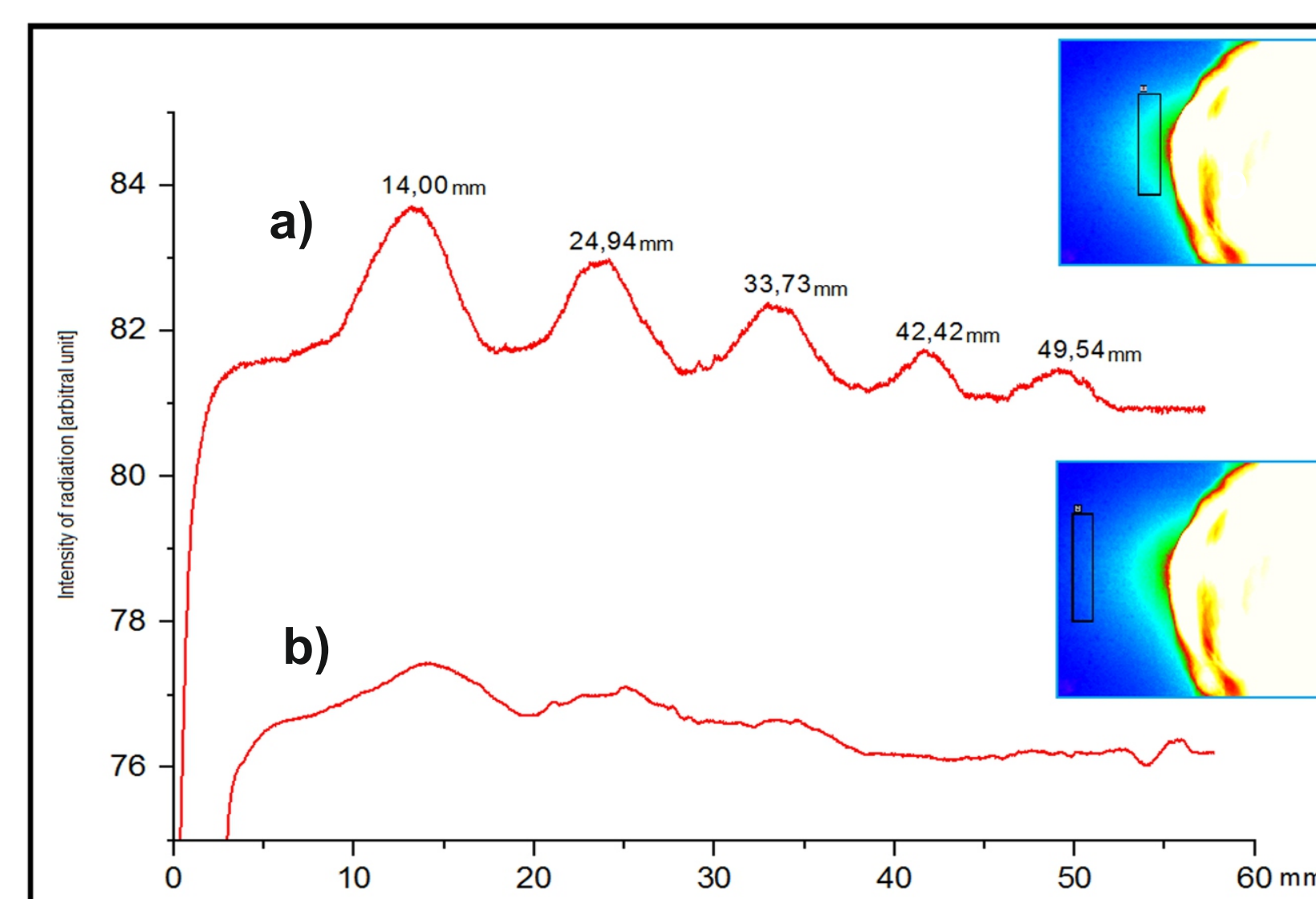
Rys. 5. Badana próbka: a) przód, b) tył, c) skala
Fig. 5. Picture of the sample: a) front size, b) back size, c)



Rys. 6. Schemat eksperymentu
Fig. 6. Scheme of experiment



Rys. 7. Dysza gorącego powietrza o średnicy 0.4 mm
Fig. 7. A hot air nozzle of 0.4 mm diameter

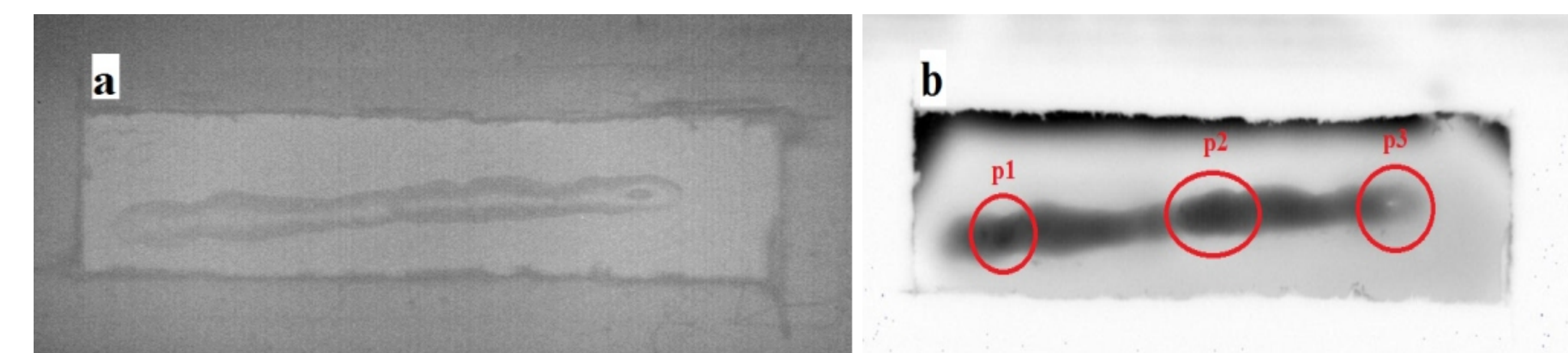


Rys. 8. Krzywe otrzymane po przeskanowaniu próbki wzdłuż czerwonej linii (Rys. 5a); a) w obszarze śladu ciepłego; b) poza obszarem śladu ciepłego
Fig. 8. The (z)-curves obtained at scanning along the red line (see Fig. 5a); a) using the radiation from the region of the heat track, shown in insert; b) using the radiation from the region out of the heat track.

Krzywe sygnału termograficznego zarejestrowane przez kamerę pokazane zostały na Rys. 8. dla dwóch przypadków: krzywa górna kiedy region, z którego wyselekcjonowany został sygnał termograficzny znajduje się na śladzie ciepłym oraz krzywa dolna, kiedy ten obszar jest poza śladem ciepłym. Jak pokazano na Rys. 8, kamera zarejestrowała wszystkie pięć otworów na krzywej górnej (ostatnia najmniejsza dziura jest niewidoczna przy użyciu wzbudzenia impulsowego lampą ksenonową). Dlatego też porównując te dwie metody (skanowanie za pomocą dyszy gorącego powietrza oraz wzbudzenie ciepłe za pomocą lampy ksenonowej) można stwierdzić, że skanowanie dyszą gorącego powietrza pozwoliło wykryć defekt, którego minimalna wielkość wynosiła 2 mm.

Ad3. Metoda impulsowa termograficzna polega na wzbudzeniu kontrolowanego obszaru krótkotrwałym impulsem promieniowania elektromagnetycznego (głównie w zakresie ultrafioletu) pochodzącego od lampy ksenonowej. W czasie trwania impulsu i bezpośrednio po impulsie następuje proces rejestracji sygnału w zakresie podczerwieni całego wzbudzonego obszaru. W miejscach niejednorodności materiału (np. spoiny) obserwuje się zmiany temperatury obszaru wzbudzonego, co przejawia się na termogramach uzyskanych kamerą termograficzną Flir S.C. 7000.

Metoda termograficzna



Rys. 9. Termogramy próbki nr 23 z napoiną; a- termogram bezpośrednio zarejestrowany kamerą termowizyjną, b- termogram uzyskany po obróbce matemat. w programie InrNTD
Fig. 9. Thermograms of welding layer sample no. 23, a-thermogram directly registered by thermal imaging camera, b-thermogram obtained after computer treatment in InrNTD program

Na Rys.9 został przedstawiony termogram wykonany dla próbki 23. Na Rys 9. b) zostały ujawnione niejednorodności. Ta sama próbka została zbadana z wykorzystaniem metody penetracyjnej, przy użyciu substancji fluorescencyjnej.

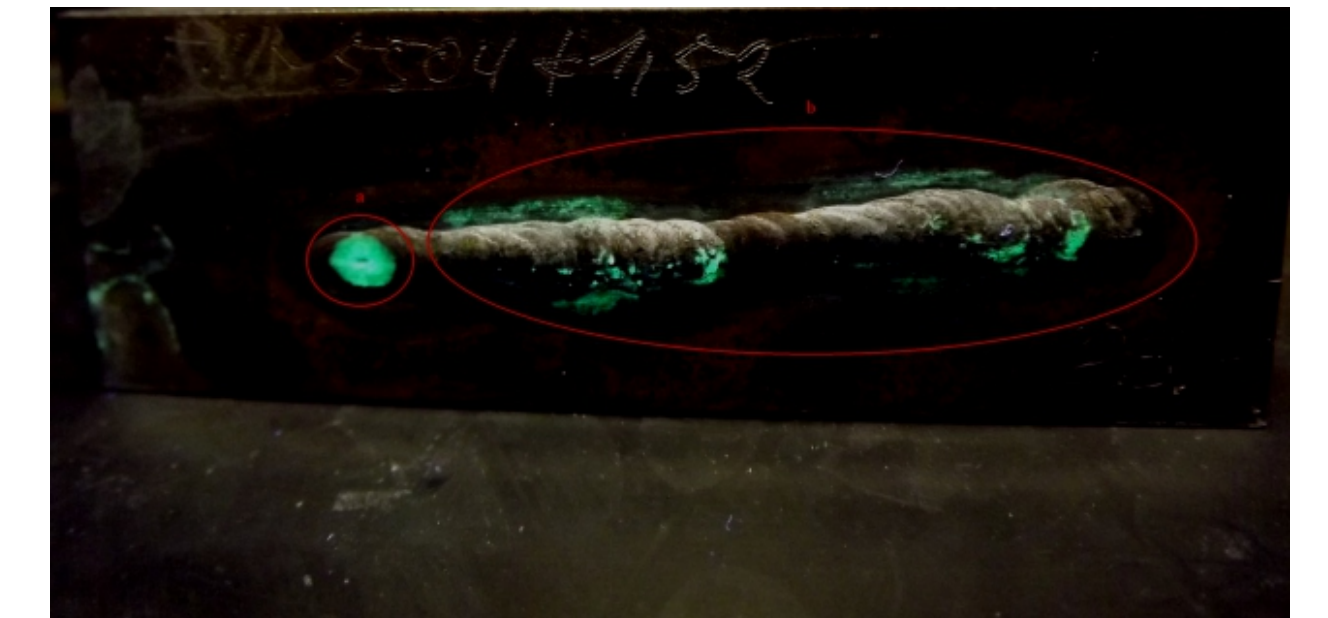
Rys. 10 przedstawia mapę fluorescencyjną tej samej próbki 23, poprzednio zbadanej metodą termografii impulsowej (Rys.9). Widać, że w miejscach niejednorodności materiałowej wykazanych metodą termograficzną, mają miejsce krateru ujawnione metodą penetracyjną.

Podczas obserwacji zarejestrowano następujące obszary występowania wad:

Obszar „p1” to miejsce zimniejsze na napoinie (ciemniejszy stopień szarości), w którym temperatura była niższa niż w obszarze „p3”. Zauważono kontur defektu o charakterze kołowym. Po porównaniu wyników termograficznych z wynikami badań radiologicznych próbki nr 23 stwierdzono, że w miejscu „p1” znajdował się pęcherz wypełniony powietrzem. Powietrze znajdujące się wewnątrz pęcherza izolowało przejście impulsu ciepłego, stąd niższa temperatura w tym miejscu.

Obszar „p2” to również miejsce, w którym temperatura była niższa niż temperatura w miejscu „p3”. Jest to rozległy obszar o ciemniejszym stopniu szarości. Po dokonaniu wizualnych obserwacji próbki oraz powierzchni napoiny, zaobserwowano, iż warstwa napawana w miejscu „p2” miała większą grubość niż w miejscu „p1”, dlatego materiał w tym miejscu wolniej ulegał nagrzewaniu.

Obszar „p3” jest miejscem, wystąpienia wysokiej temperatury w porównaniu z obszarami „p1” i „p2”. Stwierdzono, że grubość napoiny w obszarze „p3” musiała być mniejsza z powodu obecności defektu. Impuls ciepły szybko nagrzał materiał w tym miejscu stąd wyższa temperatura (jaśniejszy stopień szarości).



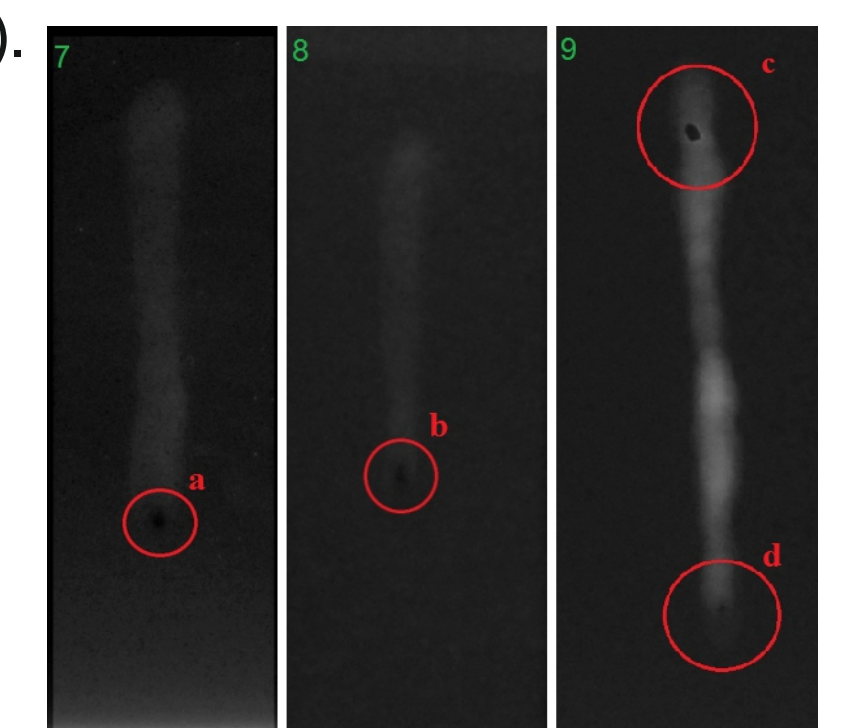
Metoda penetracyjna

Rys. 10. Próbkę nr 23 z warstwą napawaną wykonaną ze stali nierdzewnej 410 - pomiary metodą penetracyjną
Fig. 10. Welding layer sample no. 23 made of stainless steel 410 - penetration methods

Również metoda radiologiczna potwierdziła występowanie niejednorodności w próbce 23. Na Rysunku 11 przedstawiono radiogramy próbek o numeracjach: 8, 19, 23.

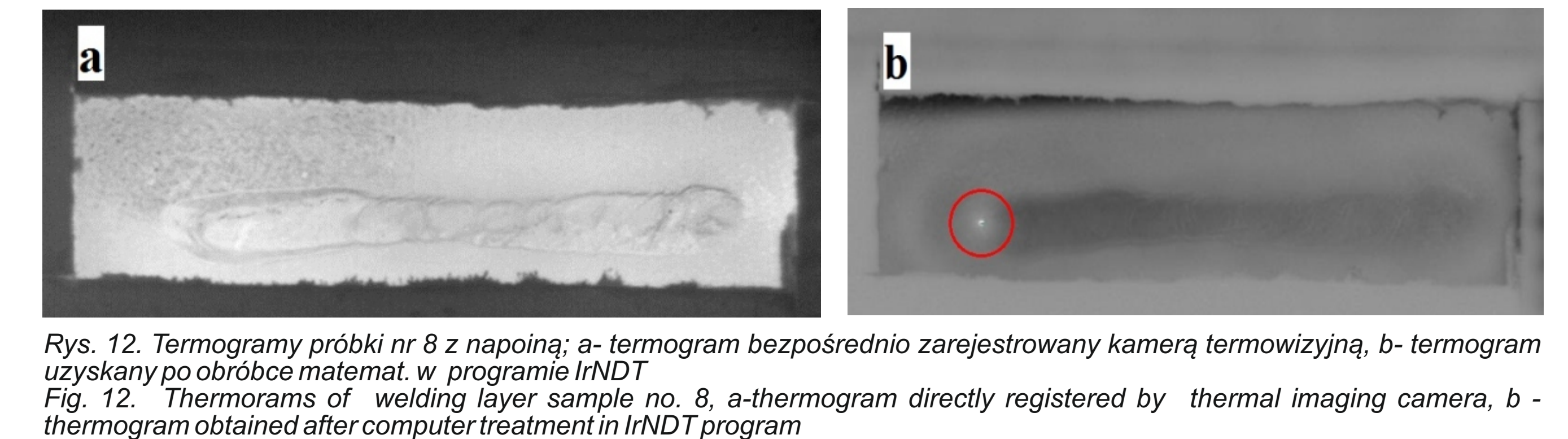
Analiza wyników, pozwoliła na zaobserwowanie następujących niezgodności:

- w próbce nr 8 obszar „a” wskazuje wystąpienie krateru wraz z pęknięciami wewnątrz nich (rozgałęziony kształt zaciemnień),
- w próbce nr 19 w obszarze „b” zaznaczonym na rysunku zauważono wystąpienie krateru, o czym świadczy ciemniejszy punkt na jaśniejszym tle warstwy,
- w próbce nr 23 w obszarze „d” wystąpił krater z pęknięciami wewnątrz niego, natomiast w obszarze „c” zarejestrowano pęcherz gazowy wewnątrz warstwy. Za pomocą tej metody udało się zaobserwować pora niewidocznego podczas badań metodą penetracyjną (wada ta należy do defektów wewnętrznych tzn. nie ma ujścia na powierzchnię).



Rys. 11. Radiogramy nr 7, 8, 9 próbek warstw napawanych z numerami 8, 19 oraz 23
Fig. 11. Radiographs nr 7, 8, 9. of pad welding samples number 8, 19 and 23

Metoda radiologiczna



Rys. 12. Termogramy próbki nr 8 z napoiną; a- termogram bezpośrednio zarejestrowany kamerą termowizyjną, b- termogram uzyskany po obróbce matemat. w programie InrNTD
Fig. 12. Thermograms of welding layer sample no. 8, a-thermogram directly registered by thermal imaging camera, b-thermogram obtained after computer treatment in InrNTD program

Rysunek 12 przedstawia termogram próbki nr 8, z warstwą napawaną, podczas rejestracji zmian temperatury na powierzchni próbki w trakcie przenikania impulsu ciepła w czasie 30 milisekund. Z obrazu termograficznego 12a, uzyskanego bezpośrednio kamerą termowizyjną, nie udało się jednoznacznie określić miejsc występowania defektów. Możliwe było jedynie zaobserwowanie nierówności powierzchni warstwy napawanej. Natomiast po analizie termogramu 12b, uzyskanego po obróbce matematycznej dokonanej w programie InrNTD, stwierdzono, iż w bardzo krótkim czasie (30 milisekunda) wysoka temperatura wystąpiła w obszarze oznaczonym czerwonym okręgiem. Powodem tego było wystąpienie w tym miejscu nieciągłości przelotowej. Porównując z wynikami radiologicznymi stwierdzono, że jest to miejsce pęknięcia występującego w kraterze.

Zalety i ograniczenia rozwiązania innowacyjnego

Advantages and restrictions of innovative solution

Ad1. Bezdotykowa metoda pomiaru rozkładu pola temperaturowego pozwala in-situ ocenić wielkość oraz rozkład termo-naprzeżeń generowanych w spawanych materiałach.

Ad2. Zaproponowany sposób bezinwazyjnej kontroli defektów z wykorzystaniem termografii i wzbudzenia „ogniskowym” strumieniem gorącego powietrza pozwala na ujawnienie ukrytych defektów, np. wad (nieciągłości) w spawie czy defektów w powłoce ochronnej o wymiarze od 2 mm i wyżej (doświadczenie pokazuje, że możliwe jest też wykrycie defektów o minimalnym rozmiarze 0,2mm). Istniejące przemysłowe metody – rentgenograficzna czy penetracyjna – nie są nakierowane na obserwację tak małych ukrytych defektów, które mogą doprowadzić jednak do dezintegracji części pracującej w ekstremalnych warunkach.

Ad3. Impulsowa metoda termograficzna może być wdrożona w przemyśle i może zastąpić dwie obecnie stosowane metody: radiologiczną i penetracyjną. Może być stosowana na szeroka skalę i może być poddana procesowi automatyzacji, co znacznie przyspieszy proces kontroli, podnosząc wydajność.

Proponowany sposób bezinwazyjnej kontroli jest efektywnym dla niewielkich obszarów badanego materiału i może okazać się skutecznym w przypadku kombinacji z taką metodą jak impulsowa termografia, gdy wzbudzenie jest wprowadzane za pomocą błysku lampy ksenonowej na stosunkowo dużych powierzchniach. Podejrzanym miejscem, później mogą być kontrolowane bardziej precyzyjnym proponowanym wyżej sposobem.

Możliwe zastosowania w lotnictwie i innych gałęziach gospodarki

Examples of application in aviation and other branches

Ad1. Zaproponowana metoda może być zastosowana w procesie spawania komory silnika oraz innych podzespołów wymagających procesu spawania.

The proposed method can be used in the welding process chamber of the engine and other components requiring a welding process

Ad2. Zaproponowane metody termograficznej kontroli jakości spawów mogą być zastosowane w przemyśle lotniczym jako metody NDT przy wykrywaniu defektów oraz nieciągłości spawów. Metody te mogą być zastosowane również do analizy jakości połączeń zgrzewanych w poszyciach lotniczych.

Thermographic methods inspection quality of welds can be used in the aerospace industry as NDT methods for detecting defects and discontinuities. This methods can also be used for analysis quality of welded joints in aircraft construction.

Oferta dla przemysłu

The offer for industry

Obecnie w przemyśle lotniczym są powszechnie stosowane 2 metody kontroli jakości spawów oraz pokryć ochronnych: metoda radiologiczna oraz metoda penetracyjna. Pierwsza polega na przesświetleniu badanych obszarów promieniowaniem rentgenowskim, a druga nanoszeniu na powierzchnię badanego obszaru substancji fluorescencyjnej. Obie metody można odnieść do bezinwazyjnych, ale są pracochłonne i trudne do automatyzacji. Przedstawione wyżej sposoby bezinwazyjnej kontroli spawów i pokryć ochronnych z wykorzystaniem wysokoczułej, wysokorozdzielczej szybkiej kamery termograficznej pozwalają zastąpić obie klasyczne metody kontroli. Przy tym metoda termograficzna może być stosowana na szeroką skalę, a pracując z maksymalną wydajnością w trybie automatycznym jedną badaną powierzchnię (w przypadku kontroli spawów metodą impulsową termograficzną może to być spaw o powierzchni do 100 cm²; w przypadku kontroli metodą skanującej dyszy może to być powłoka o powierzchni 50 cm²) umożliwia przetestować w ciągu 5 sekund.

Thermographic methods inspection quality of welds can be used in the aerospace industry as NDT methods for detecting defects and discontinuities. This methods can also be used for analysis quality of welded joints in aircraft construction.