

DOI: <https://doi.org/10.26628/simp.wtr.v98.1203.75-84>

Original Article

Comparison of temperature measurement methods in welding conditions of basic structure materials

Porównanie metod pomiaru temperatury w warunkach spawania podstawowych materiałów konstrukcyjnych

Paweł Cegielski ¹, Kamil Pruszyński ²

¹ Politechnika Warszawska, pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, Poland; dr inż.; pawel.cegielski@pw.edu.pl

² inż.; kamil.pruszyński2.stud@pw.edu.pl

Received: 10.05.2026; Accepted: 11.06.2026; Published: 13.06.2026

Abstract: Controlling the conditions and parameters of heat treatment requires reliable temperature measurements. These measurements should be carried out with appropriate accuracy and repeatability. The article presents an experiment illustrating the influence of the choice of temperature measurement method on the quality and accuracy of measurements in relation to basic. Measurements were compared using a thermocouple, a pyrometer, a thermal imaging camera and a thermopencil.

Keywords: temperature measurement, emissivity coefficient, control of the welding process, pyrometer, thermocouple

Streszczenie: Kontrola warunków oraz parametrów obróbki cieplnej wymaga wykonania wiarygodnych pomiarów temperatury. Pomiaru te powinny być prowadzone z zapewnieniem odpowiedniej dokładności i powtarzalności. W artykule przedstawiono eksperyment obrazujący wpływ wyboru metody pomiaru temperatury na jakość i dokładność pomiarów w odniesieniu do podstawowych materiałów konstrukcyjnych. Porównano pomiary termoparą, pirometrem, kamerą termowizyjną oraz termokredką.

Słowa kluczowe: pomiar temperatury, współczynnik emisyjności, kontrola procesu spawania, pirometr, termopara

Wprowadzenie

W warunkach spawania i zgrzewania [1] istotna jest kontrola temperatury podgrzania wstępnego i międzyścigowej. Jako uzupełniające mogą być dodatkowo prowadzone pomiary temperatury utrzymana, temperatury podgrzewania osuszającego. Odrębne zagadnienie stanowią pomiary temperatury o badawczym charakterze [2][3], obróbki cieplnej [4] czy serwisowym (naprawczym) w odniesieniu do eksploatowanych maszyn i urządzeń [5].

Wybór metody (**Tab. 1**), przyrządu i techniki pomiaru temperatury uzależniony jest m.in. od: przeznaczenia pomiaru (ocena warsztatowa, ocena laboratoryjna, ustalanie warunków procesu, rejestracja, walidacja itp.), jej wartości, zakładanej dokładności, a także stanu i rodzaju mierzonej powierzchni [6]. Wraz z rozwojem spawalnictwa doskonalone są techniki i metody pomiarowe, w tym temperatury, a ich prawidłowy dobór i obsługa są kluczowe dla prawidłowego i powtarzalnego przebiegu procesu technologicznego spawania [7][8].

Punktem wyjścia do pomiarów oraz klasyfikacji metod jest norma EN ISO 13916 [9]. Określono w niej wymagania dotyczące pomiaru temperatury podgrzewania wstępnego, temperatury międzyścigowej i temperatury utrzymania dla spawania z wyłączeniem obróbki cieplnej po spawaniu.

W dalszej części przedstawiono krótką charakterystykę poszczególnych metod pomiaru temperatury: Termoindykatory kredkowe, tzw. termokredki (symbol TS):

- do orientacyjnego określania temperatury w pracach spawalniczych i obróbce cieplnej do ok. 800 °C,
- dogodna i szybka metoda sprawdzenia temperatury wstępnego podgrzewania i międzyścigowej,
- temperaturę określa topiący się ślad, naniesiony na powierzchnię przedmiotu,
- pomiar skokowy, wykrywanie tylko przekroczenia temperatury znamionowej indykatora,
- nie zalecane w bezpośrednim pobliżu spoiny.

Tab. 1. Zestawienie podstawowych metod pomiaru temperatury stosowanych w procesach spawalniczych [9]

Rodzaj pomiaru	Typowy przyrząd	Warunki pomiaru
Stykowy nieelektryczny	Termoindykatory kredkowe tzw. „termokredki”	Oczekiwanie na upłynięcie śladu kredki, dla różnych progów temperatury
Stykowy elektryczny	Termometry stykowe oraz termopary	Przez przytknięcie sondy pomiarowej lub złącza pomiarowego (termopary) do mierzonej powierzchni Galwanicznie połączenie złącza pomiarowego (termopary) z mierzoną powierzchnią
Bezstykowy przyrządy optyczne	Pirometry Kamery termowizyjne	Pomiar punktowy z określonej odległości i obszaru Pomiar powierzchniowy (obraz lub film) z określonej odległości i obszaru

Termopary (symbol TE):

- Termopara wykorzystuje zjawisko Seebecka – generuje napięcie zależne od różnicy temperatur między złączem pomiarowym (utworzonym z pary przewodów wykonanych z różnych metali i połączonych stykowo), a końcem odniesienia.
- Pomiary w zakresie ok. $-200 \div +2300$ °C [10].
- Umożliwiają pomiar temperatury w jeziorku spawalniczym, np. przy łuku krytym.
- Nie wymagają zewnętrznego zasilania czujnika.
- Niewielkie rozmiary – możliwość lokalnego pomiaru.
- Niska pojemność cieplna, mała bezwładność czasowa, szeroki zakres pomiarowy przy dobrej liniowości.
- W najprostszym przypadku czujnik może być utworzony ze zgrzanej pary różnych metali i przystawiany bezpośrednio do mierzonej powierzchni. W celu eliminacji błędów styku z mierzoną powierzchnią zaleca się mechaniczne umocowanie złącza pomiarowego [11].
- Najlepsze rezultaty osiągane są przy mechanicznym, a przede wszystkim galwanicznym połączeniu termopary z mierzoną powierzchnią (eliminuje błędy operatora) [7].
- Mogą też być stosowane specjalne sondy, w których złącze pomiarowe przytykane jest do mierzonej powierzchni za pośrednictwem blaszki kontaktowej. W takim przypadku pomiar obarczony jest dodatkowym błędem; tym większym, im większa jest różnica temperatur między nagrzanym elementem a otoczeniem (wskutek wychładzania sondy w zimnym powietrzu) [7].
- Możliwe różne wskaźniki temperatury (analogowe i cyfrowe), rejestratory, a nawet uniwersalne multimetry z funkcją termopary.

Termometry bezstykowe – pirometry (symbol TB):

- Pomiar emitowanego promieniowania podczerwonego dochodzącego od przedmiotu do jego obiektywu.
- Zakres pomiarowy ok. $-30 \div +3000$ °C.
- Rozdzielczość optyczna pirometru – stosunek odległości pomiarowej (D) do średnicy pola pomiarowego (S), wyrażany jako „D:S” który określa, jak mały obiekt można zmierzyć z danej odległości (np. 12:1, 50:1).
- Intensywność emitowanego promieniowania cieplnego zależna jest od temperatury oraz współczynnika emisyjności badanego elementu.
- Współczynnik emisyjności ($0 \div 1$) zależny jest od: rodzaju materiału, jego struktury, stanu powierzchni w tym utlenienia) oraz temperatury.
- W dostępnych przyrządach współczynnik emisyjności może być stały lub regulowany.
- Pomiar powinien być prowadzony z odległości gwarantującej obserwację mierzonego obszaru całą powierzchnią czujnika (wymaga uwzględnienia rozdzielczości optycznej).
- Wskaźnik laserowy „celownik”: jedno (orientacyjny) lub wielopunktowy (wskazujący przybliżony obszar prawidłowego pomiaru).

Termometry bezstykowe – kamery termowizyjne (symbol TB):

- Pomiar emitowanego promieniowania podczerwonego.
- Pełen obraz termiczny badanego obszaru (fotografia, a nawet film).

- Zakres pomiarowy ok. $-20 \div 1200$ °C.
- Rozdzielczość obrazowa wpływa na dokładność pomiarów (liczba punktów detekcji).
- Czułość temperaturowa (wykrywanie różnic temperatury sąsiadujących obszarów).
- Współczynnik emisyjności dominującego obszaru (stały lub nastawiany).

Wspólną cechą pomiarów bezstykowych jest wrażliwość na rodzaj i stan powierzchni emitującej ciepło, promieniowanie odbite (łuk spawalniczy), dymy, wilgotność oraz kąt padania wiązki pomiarowej [12][13] i stan skupienia metalu [14]. Charakteryzuje je również silne uzależnienie od emisyjności mierzonej powierzchni (zależy od jej gładkości i barwy). Materiały o powierzchni matowej i ciemnej lepiej emitują promieniowanie podczerwone niż materiały o powierzchni gładkiej i jasnej. Prawidłowy pomiar wymaga uwzględnienia odpowiedniego współczynnika lub kalibracji przyrząd w oparciu o pomiar gwarantujący odpowiednią dokładność, np. stykowy). Przyczyną znacznych błędów przy pomiarach pirometrem (posiadającym pojedynczy detektor) jest obserwacja zbyt dużego obszaru, w obrębie którego znajdują się elementy o różnej temperaturze.

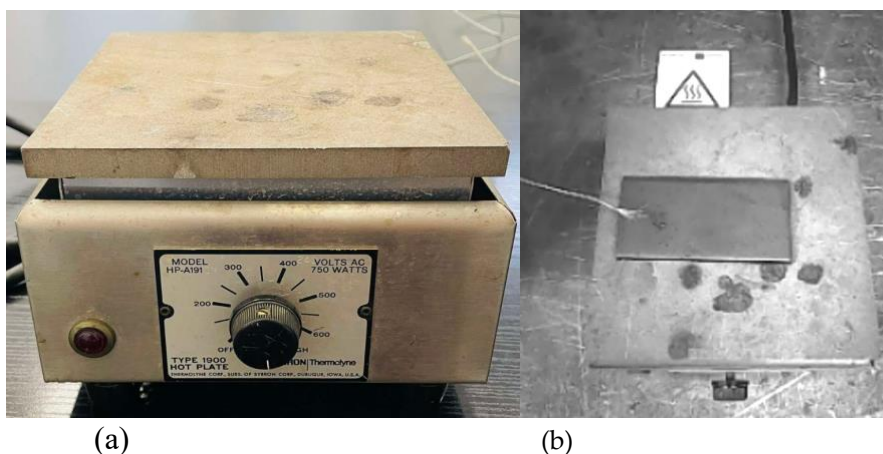
Material i metodyka badań

W celu oceny wpływu wyboru metody pomiaru temperatury na jakość i dokładność pomiarów w odniesieniu do wybranych materiałów konstrukcyjnych o różnym stanie powierzchni przeprowadzono eksperymenty o następujących założeniach:

1. Pomiary temperatury próbek wykonanych z materiałów konstrukcyjnych o różnym stanie powierzchni (**Tab. 2**). Próbki o wymiarach ok. $50 \times 100 \times 4 \div 8$ mm zostały wyczyszczone i odłuszczone.
2. Wykorzystano szereg przyrządów i narzędzi pomiarowych (**Tab. 3**).
3. Próbki nagrzewano za pomocą płyty grzewczej Sybron Thermolyne HPA191, o zakresie regulacji temperatury $0 \div 370$ °C (**Rys. 1a**).
4. Zgodnie z dostępną wiedzą i praktyką [7] za metodę odniesienia uznano pomiar stykowy z wykorzystaniem termopary przymocowanej galwanicznie (przygrzanej) do próbki ze stali niestopowej (**Rys.1b**).
5. Do badań wykorzystano powszechnie stosowaną i łatwo dostępną termoparę typu K (Chromel-Alumel), o zakresie mierzonych wartości temperatury: -200 °C \div 1200 °C.
6. Po osiągnięciu zadanej wartości temperatury rejestrowano ją za pomocą termopary K przygrzanej do próbki ze stali niestopowej. Wobec braku możliwości zgrzania termopary do innych próbek, przyjęto założenie upraszczające – podczas ich badania próbka odniesienia kładziona była obok na płycie grzewczej.
7. W przypadku pomiarów z wykorzystaniem pirometrów umieszczano je w odległości dobranej na podstawie ich nominalnej rozdzielczości optycznej tak, aby tylko nagrzana próbka znajdowała się w polu widzenia sensora.
8. W przypadku pirometru i kamery termowizyjnej z regulowanym współczynnikiem emisyjności dobierano go dwoma metodami: przez dopasowanie do metody odniesienia tak aby uzyskać zbliżone wskazanie przyrządów oraz na podstawie dokumentacji technicznej (instrukcji) dla podobnych materiałów.

Tab. 2. Wykaz materiałów użytych podczas prób

Materiał	Stan powierzchni próbek
Stal niestopowa S235	nieskorodowana powierzchniowo skorodowana
Stal nierdzewna 304	błyszcząca
Stal niestopowa S235 ocynkowana	błyszcząca
Stop aluminium PA2	lekko matowa



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe. Płyta grzewcza -a. Próbką z przymocowaną galwanicznie termoparą -b

Tab. 3. Wykaz przyrządów pomiarowych użytych podczas prób

Typ przyrządu	Główne właściwości	Konfiguracja
Miernik temperatury	<ul style="list-style-type: none"> • wskaźnik cyfrowy, • 4 – o kanałowy, • obsługuje wiele rodzajów termopar, 	termopara K: zgrzana do próbki ze stali niestopowej lub samo złącze termoparowe bez osłony
Pirometr 1	<ul style="list-style-type: none"> • bez regulacji współczynnika emisji, • zakres pomiarowy do 420 °C • wskaźnik laserowy jednopunktowy, • rozdzielczość optyczna 8:1 	stały współczynnik emisji 0,95
Pirometr 2	<ul style="list-style-type: none"> • z regulacją współczynnika emisji, • zakres pomiarowy do 1850 °C • wskaźnik laserowy 3-y punktowy, • rozdzielczość optyczna 75:1 	współczynnik emisji: dopasowany do wskazań pomiarów termoparą oraz ustawiany na podstawie dokumentacji technicznej
Kamera termowizyjna	<ul style="list-style-type: none"> • z regulacją współczynnika emisji, • rozdzielczość w podczerwieni 256x192 piksele, • zdjęcia i filmy 640x480, • zakres pomiarowy do 550 °C 	Współczynnik emisji taki jak dla pirometru 2
Termokredki	<ul style="list-style-type: none"> • temperatura granicy upłynięcia: 125 i 150 °C 	Ślady rysowane na środku próbek ze stali niestopowej.

Wyniki pomiarów

W związku z wytypowaniem metody odniesienia, zarejestrowane pomiary uzupełniono o obliczone błędy, gdzie: x – wartość dokładna (odniesienia), x_0 – wartość zmierzona:

Błąd względny wyrażony w procentach:

$$\delta = \frac{\Delta x}{x} = \frac{|x - x_0|}{x} * 100\% \quad (1)$$

Błąd bezwzględny (uchyby):

$$\Delta x = |x - x_0| \quad (2)$$

Za wartość dokładną (odniesienia) uznano (dla każdej próbki) wskazanie uzyskane dla termopary przymocowanej galwanicznie do próbki ze stali niestopowej

Ponadto pomiarom mogą towarzyszyć błędy o charakterze jakościowym (niemierzalne), np.:

- Nadmierne – wynikające np. z niestaranności wykonania pomiaru (odrzucać).
- Systematyczne – polegające na nieuwzględnieniu jakiegoś czynnika stale wpływającego na pomiar.
- Przypadkowe – niewynikające z czynników systematycznych i powtarzalnych, losowe.

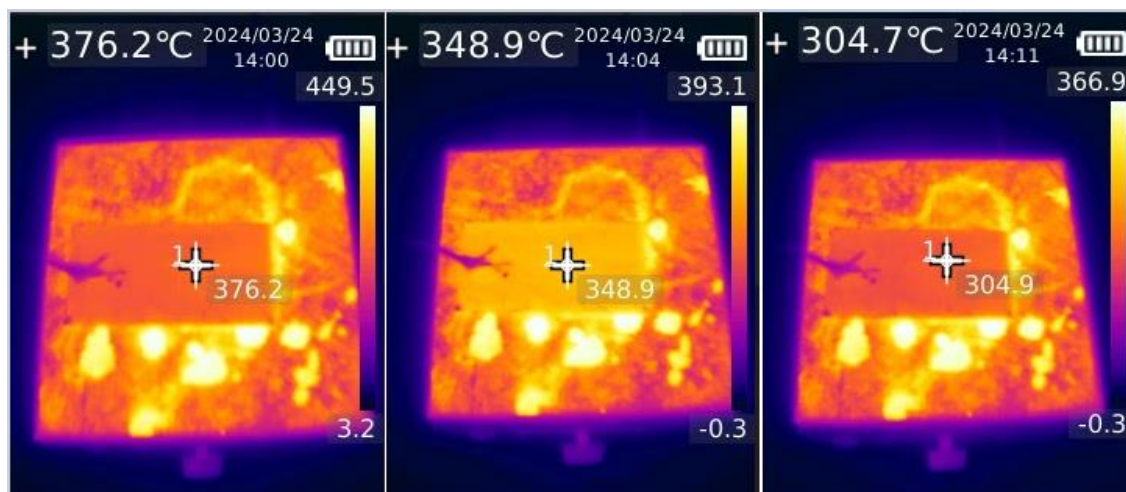
Wyniki uzyskane dla próbek ze stali niestopowej zestawiono w **Tab. 4**, a na **Rys. 2** pokazano zarejestrowane obrazy z kamery termowizyjnej. Zaobserwowano dużą różnicę przy pomiarach termoparą przygrzaną i przystawianą. Ręczne przystawianie termopary skutkowało znacznym obniżeniem wskazywanej temperatury, co mogło być spowodowane utrudnionym kontaktem złącza termoparowego z próbką, jego wadliwym wykonaniem lub lekkim wystudzeniem w zimnym powietrzu.

Stały współczynnik emisyjności w pirometrze 1 (0,95) okazał się zbliżony do wartości uzyskanej w wyniku dopasowania (0,8) co skutkowało błędem względnym 7,72%. Spośród współczynników dostępnych w dokumentacji pirometru 2 tylko najwyższa wartość 0,9 dała wynik zbliżony do wzorca. Pozostałe wartości dały wskazania znacznie zawyżone.

W przypadku próbek ze stali niestopowej skorodowanej, zaobserwowano podobne zależności, jednak zgodnie z założeniami teoretycznymi dopasowany współczynnik emisyjności wzrósł z 0,8 do 0,95 (ciało ciemniejsze), co idealnie dopasowało się do właściwości pirometru pozbawionego regulacji współczynnika (o stałej wartości 0,95).

Tab. 4. Wyniki pomiarów dla próbek ze stali S235

Stal niestopowa S235 nieskorodowana		Współczynnik emisyjności			
		wg instrukcji			dopasowany
		0,6	0,7	0,9	0,8
Przyrząd pomiarowy		Pomiar			
Miernik temperatury z termoparą K zgrzaną	Temperatura	313,50			
	Temperatura [°C]	289,30			
Pirometr 1	Błąd bezwzględny [°C]	24,20			
	Błąd względny [%]	7,72			
	Temperatura [°C]	396,20	358,80	308,20	310,10
Pirometr 2	Błąd bezwzględny [°C]	82,70	45,30	5,30	3,40
	Błąd względny [%]	30,30	16,62	1,94	1,25
	Temperatura [°C]	376,20	348,90	306,40	304,70
Kamera termowizyjna	Błąd bezwzględny [°C]	62,70	35,40	7,10	8,80
	Błąd względny [%]	23,01	12,99	2,61	3,23



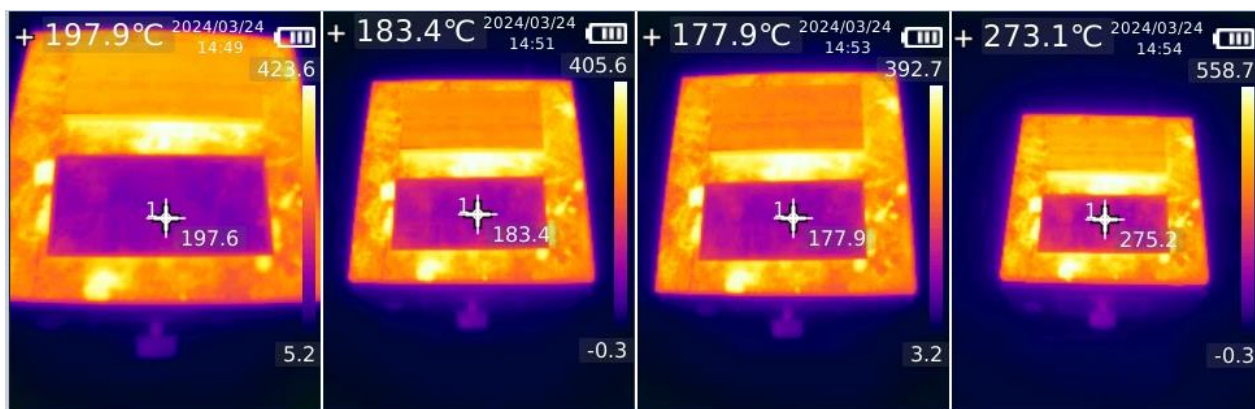
Rys. 2. Obrazy z kamery termowizyjnej dla różnych współczynników emisyjności (0,6, 0,7, 0,8)

Wyniki uzyskane dla próbek ze stali nierdzewnej (304) zestawiono w **Tab. 5**, a na **Rys. 3** pokazano zarejestrowane obrazy z kamery termowizyjnej. W tym przypadku próbka odniesienia z przymocowaną termoparą umieszczana była na płycie grzewczej obok próbki badanej. Z uwagi na analogowy (potencjometryczny) regulator temperatury, w kolejnych seriach pomiarów uzyskano inną, niższą temperaturę nagrzewania.

Zaobserwowano, że stały współczynnik emisyjności w pirometrze 1 (0,95) okazał się całkowicie nieprzydatny wobec wartości uzyskanej w wyniku dopasowania (0,35) co skutkowało błędem względnym 51,57%. Spośród współczynników dostępnych w dokumentacji pirometru 2 (0,6÷0,8) żadna wartość nie pozwoliła na uzyskanie poprawnego pomiaru piometrem i kamerą termowizyjną. Wszystkie wartości dały wskazania znacznie zaniżone. Współczynnik 0,35 uzyskany na drodze dopasowania pozwolił na uzyskanie wyniku z 6,89% błędem względnym dla pirometru 2 oraz 0,40% dla kamery.

Tab. 5. Wyniki pomiarów dla próbek ze stali 304

Stal nierdzewna 304		Współczynnik emisyjności pirometru			
		wg instrukcji			dopasowany
		0,6	0,7	0,8	0,35
Przyrząd		Pomiar			
Miernik temperatury z termoparą K zgrzaną	Temperatura [°C]	274,20			
Pirometr 1	Temperatura [°C]	132,80			
	Błąd bezwzględny [°C]	141,40			
	Błąd względny [%]	51,57			
Pirometr 2	Temperatura [°C]	174,10	160,10	154,30	255,30
	Błąd bezwzględny [°C]	100,10	114,10	119,90	18,90
	Błąd względny [%]	36,51	41,61	43,73	6,89
Kamera termowizyjna UTi260B	Temperatura [°C]	197,90	183,40	177,90	273,10
	Błąd bezwzględny [°C]	76,30	90,80	96,30	1,10
	Błąd względny [%]	27,83	33,11	35,12	0,40



Rys. 3. Obrazy z kamery termowizyjnej dla różnych współczynników emisyjności (0,6, 0,7, 0,8, 0,35)

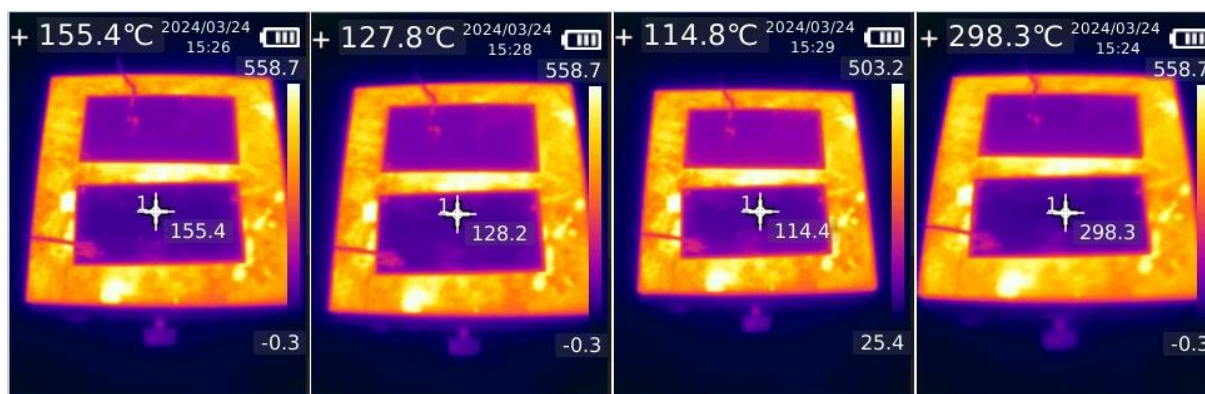
Wyniki uzyskane dla próbek ze stali niestopowej S235 ocynkowanej zestawiono w **Tab. 6**, a na **Rys. 4** pokazano zarejestrowane obrazy z kamery termowizyjnej. Próbka odniesienia z przymocowaną termoparą umieszczana była na płycie grzewczej obok próbki badanej.

Zaobserwowano, że stały współczynnik emisyjności w pirometrze 1 (0,95) okazał się całkowicie nieprzydatny wobec wartości uzyskanej w wyniku dopasowania (0,07) co skutkowało błędem względnym 76,9%. Spośród współczynników dostępnych w dokumentacji pirometru 2 (0,2÷0,8) żadna wartość nie pozwoliła na uzyskanie poprawnego pomiaru piometrem i kamerą termowizyjną. Wszystkie wartości dały wskazania znacznie zaniżone. Współczynnik 0,07 uzyskany na drodze dopasowania pozwolił na uzyskanie wyniku z 29,63% błędem względnym dla pirometru 2 oraz 1,02% dla kamery. W tym przypadku

dopasowanie okazało się lepsze w przypadku kamery. Przyczyną różnic wskazań kamery i pirometru może być mała precyzja ręcznego dopasowania prawidłowego pola widzenia pirometru, wskazywanego orientacyjnie wskaźnikami laserowymi, a wynikająca z jego rozdzielczości optycznej.

Tab. 6. Wyniki pomiarów dla próbek ze stali niestopowej S235 ocynkowanej

Stal ocynkowana		Współczynnik emisyjności pirometru			
		wg instrukcji		dobrany	
		0,2	0,35	0,8	0,07
Przyrząd	Pomiar				
Miernik temperatury z termoparą K zgrzaną	Temperatura [°C]	295,30			
	Temperatura [°C]	68,20			
Pirometr 1	Błąd bezwzględny [°C]	227,10			
	Błąd względny [%]	76,90			
	Temperatura [°C]	124,10	98,10	80,20	207,80
Pirometr 2	Błąd bezwzględny [°C]	171,20	197,20	215,10	87,50
	Błąd względny [%]	57,97	66,78	72,84C	29,63
	Temperatura [°C]	155,40	127,80	114,80	298,30
Kamera termowizyjna	Błąd bezwzględny [°C]	139,90	167,50	180,50	3,00
	Błąd względny [%]	47,38	56,72	61,12	1,02



Rys. 4. Obrazy z kamery termowizyjnej dla różnych współczynników emisyjności (0,2, 0,35, 0,8, 0,7)

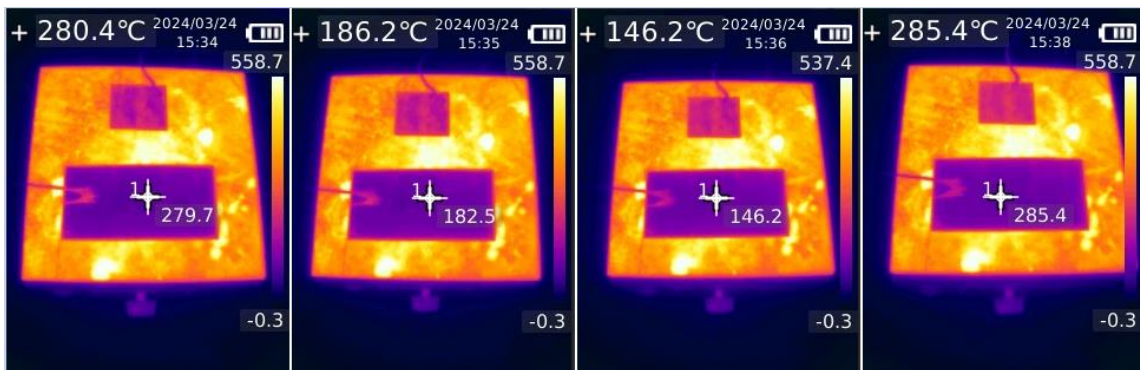
Wyniki uzyskane dla próbek ze stop aluminium PA2 zestawiono w **Tab. 7**, a na **Rys. 5** pokazano zarejestrowane obrazy z kamery termowizyjnej. Jak poprzednio próbka odniesienia z przymocowaną termoparą umieszczana była na płycie grzewczej obok próbki badanej.

Zaobserwowano, że stały współczynnik emisyjności w pirometrze 1 (0,95) okazał się całkowicie nieprzydatny wobec wartości uzyskanej w wyniku dopasowania (0,12) co skutkowało błędem względnym 72,23%. Spośród współczynników dostępnych w dokumentacji pirometru 2 (0,1÷0,4) tylko pierwsza wartość pozwoliła na uzyskanie zbliżonego pomiaru pirometrem (błąd 10,16% i kamerą termowizyjną (błąd 1,44%). Pozostałe współczynniki dały wskazania znacznie zaniżone. Współczynnik 0,12 uzyskany na drodze dopasowania pozwolił na uzyskanie bardzo dobrych wyników z 2,74% błędem względnym dla pirometru 2 oraz 0,32% dla kamery. Ponownie dopasowanie okazało się lepsze w przypadku kamery.

Wyniki uzyskane dla termoindykatorów kredkowych, tzw. „termokredki” zestawiono w **Tab. 8**, a na **Rys. 6** pokazano próbkę w trakcie pomiarów. W tym celu wykorzystano próbkę ze stali niestopowej z przymocowaną termoparą, która umieszczona została na płycie grzewczej. Wykorzystano dwie kredki, których nominalne temperatury granicy upłynięcia wynosiły 125 i 150 °C. W trakcie badania odczytywano temperaturę, przy której następowało upłynięcie śladu narysowanego kredką.

Tab. 7. Wyniki pomiarów dla próbek ze stopu aluminium PA2

Stop aluminium PA2		Współczynnik emisyjności pirometru			
		wg instrukcji			dobrany
		0,1	0,25	0,4	0,12
Przyrząd	Pomiar				
Miernik temperatury z termoparą K zgrzaną	Temperatura	284,50			
	Temperatura [°C]	79,00			
Pirometr 1	Błąd bezwzględny [°C]	205,50			
	Błąd względny [%]	72,23			
	Temperatura [°C]	255,60	148,70	114,90	292,30
Pirometr 2	Błąd bezwzględny [°C]	28,90	135,80	169,60	7,80
	Błąd względny [%]	10,16	47,73	59,61	2,74
	Temperatura [°C]	280,40	186,20	146,20	285,40
Kamera termowizyjna	Błąd bezwzględny [°C]	4,10	98,30	138,30	0,90
	Błąd względny [%]	1,44	34,55	48,61	0,32



Rys. 5. Obrazy z kamery termowizyjnej dla różnych współczynników emisyjności (0.1, 0.25, 0.4, 0.12)

Tab. 8. Wyniki pomiarów dla termokredek

Termokredka	Temperatura nominalna	Temperatura zmierzona	Błąd względny	Błąd bezwzględny
	[°C]	[°C]	[°C]	[%]
1	125,00	112,40	10,08	12,60
2	150,00	131,30	12,47	18,70



Rys. 6. Próbkę podczas badania termokredek

Podsumowanie i wnioski

Wiarygodne i dokładne pomiary temperatury podstawowych materiałów konstrukcyjnych można prowadzić przy użyciu miernika temperatury z termoelementem (np. K), przede wszystkim przymocowanym mechanicznie do mierzonej powierzchni [8].

W trakcie badań ujawniono znaczne różnice wskazań miernika pomiędzy wariantami z termoparą K zgrzaną, a ręcznie przystawianą do mierzonej powierzchni. W przypadku braku możliwości zastosowania termopary zgrzanej do mierzonej powierzchni należy zadbać o jej dobry kontakt i odseparowanie od zakłóceń np. poprzez zastosowanie osłony termicznej i sztywnego, mechanicznego docisku [11].

Próby ujawniły całkowitą nieprzydatność pirometru ze stałym współczynnikiem emisyjności do prowadzenia bezpośrednich pomiarów temperatury wielu materiałów konstrukcyjnych. Oznacza to brak możliwości bezpośredniego porównywania wartości temperatury uzyskanych w tych samych warunkach cieplnych dla materiałów o różnej emisyjności przy użyciu pirometru pozbawionego regulacji tego współczynnika.

Stały współczynnik 0,95 okazał się przydatny w przypadku stali o skorodowanej powierzchni, natomiast dla metali wyróżniających się odcieniem metalicznej szarości (przypominającej barwę srebra) i błyszczących, jak stal nierdzewna, aluminium i powłoka cynku do ochrony katodowej dał wyniki znacznie zaniżone. Praktyka pokazuje, że tego typu przyrząd może się sprawdzić przy pomiarach szeregu konstrukcji budowlanych (beton, cegła), powłok malarskich (wiele kolorów) oraz niektórych rodzajów gumy.

Możliwość regulacji współczynnika emisyjności pozwala na dopasowanie wskazań pirometru do mierzonego materiału (jego barwy i stanu powierzchni). Pomiary ujawniły nieprzydatność współczynników zaproponowanych w instrukcjach wykorzystanych przyrządów, np. wskutek niejednoznaczności zastosowanego opisu. W celu ustalenia jego optymalnej wartości należało przeprowadzić kalibrację (dopasowanie), np. w oparciu o pomiar przy użyciu termopary. W tym celu, niektóre pirometry wyposażono w możliwość podłączenia termopary, zazwyczaj typu K.

Próby wykazały znaczną trudność wiarygodnego pomiaru temperatury niewielkich obiektów przyrządami optycznymi, zwłaszcza pirometrem. Wiąże się to z pojedynczym czujnikiem, który musi być dokładnie ustawiony na mierzony obszar, w przeciwnym przypadku pomiary będą znacząco zniekształcone. Dla łatwiejszego celowania w miejsce pojedynczej wiązki laserowej stosowane są układy wielowiązkowe, wskazujące przybliżone pole obserwacji czujnika, a nawet precyzyjne wizjery optyczne.

W przeciwieństwie do pirometrów, kamery termowizyjne działają w oparciu o matryce pomiarowe z bieżącym podglądem szerszego oraz mierzonego obszaru i wskazaniem ich temperatury. W tym przypadku również konieczne jest ustawienie współczynnika emisyjności dla materiału lub obszaru dominującego, którego temperatura ma być wiarygodnie mierzona. Dodatkowymi parametrami kamer termowizyjnych istotnymi z uwagi na ich przydatności jest rozdzielczość obrazowania (liczba punktów detekcji) oraz czułość temperaturowa (zdolność wykrywania różnicy temperatury).

Badania potwierdziły dużą wygodę, bezpieczeństwo i komfort pomiarów bezkontaktowych. Ich wiarygodność wymaga spełnienia wcześniej omówionych warunków. W świetle licznych niedogodności, jak wrażliwość na rodzaj i stan mierzonej powierzchni oraz zakłócenia (promieniowanie odbite, łuk spawalniczy, dym itp.) nie są idealnym narzędziem do kontroli doraźnej. Jak się wydaje, mogą znaleźć zastosowanie w ustalonych, powtarzalnych warunkach przy produkcji seryjnej, a przede wszystkim zautomatyzowanej.

Najmniej dokładny pomiar przy użyciu termokredek pozwala na doraźną kontrolę podczas prac spawalniczych. Należy pamiętać, że w tym przypadku wynik pomiaru będzie uzależniony od spostrzegawczości i umiejętności operatora lub spawacza.

Na zakończenie można sformułować następujące wnioski:

1. Wybór odpowiedniej metody pomiaru temperatury uzależniony jest od jej przeznaczenia w procesie produkcyjnym, np. kontrola doraźna, rodzaj i zróżnicowanie materiałów, praca ręczna, lub automatyzacja.
2. Zgodnie z powszechną wiedzą i praktyką najwyższa dokładność i powtarzalność pomiarów możliwa jest przy wykorzystaniu miernika z termoparą
3. Pomiary bezkontaktowe, pirometrem i kamerą termowizyjną, są niezwykle wygodne i bezpieczne, ale wymagają znacznej uważności i staranności podczas pomiarów (ustalenie współczynników emisyjności, zachowanie odległości pomiarowej).

4. Pomiary z wykorzystaniem termokredek są dogodną metodą doraźnego ustalania temperatury progowej w warunkach produkcyjnych.

Wkład autorów: P.C: koncepcja, metodyka, opracowanie wyników, wnioskowanie, redakcja, pisanie; K. P.: przygotowanie próbek, pomiary, wstępne opracowanie wyników, przegląd literatury.

Konflikt interesów: Autorzy nie zgłaszają konfliktu interesów.

Literatura

- [1] A. C. F. Silva, J. De Backer, and G. Bolmsjö, "Temperature measurements during friction stir welding," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 88, no. 9–12, pp. 2899–2908, 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9007-4.
- [2] S. Bin Mamat, T. Methong, S. Tashiro, and M. Tanaka, "Droplet temperature measurement in metal inert gas welding process by using two color temperature measurement method," *Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly J. Japan Weld. Soc.*, vol. 35, no. 2, pp. 160–164, 2017, doi: 10.2207/qjwjs.35.160s.
- [3] D. Golański and T. Chmielewski, *Numerical Modeling of Selected Thermal Spraying Issues*, 1st ed. Warsaw: Publishing House of the Warsaw University of Technology, 2025.
- [4] R. Wyczółkowski, M. Salwin, P. Przybyłowicz, and T. M. Chmielewski, "Simplified model of the effective thermal conductivity of a bundle of round steel bars," *Sci. Rep.*, vol. 15, p. 32209, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-18034-6.
- [5] J. M. Longbottom and J. D. Lanham, "Cutting temperature measurement while machining - A review," *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 77, no. 2, 2005, doi: 10.1108/00022660510585956.
- [6] Z. Liu *et al.*, "Design of temperature measurement system guided by thermal dissipation coefficient of NTC thermistor," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 377, p. 115772, 2024, doi: 10.1016/j.sna.2024.115772.
- [7] M. Scheithauer, J. Scheithauer, and K. Scheithauer, "Porównanie metod pomiaru temperatury pirometrem i termometrem stykowym w operacjach spawalniczych; The Comparison of temperature measurements methods in welding operations using pyrometer and contact thermometer," *Przegląd Spaw. - Weld. Technol. Rev.*, vol. 86, no. 5, pp. 32–36, 2014.
- [8] K. Pruszyński, "Analiza metod pomiaru temperatury elementów konstrukcyjnych - praca dyplomowa inż.," Warsaw University of Technology, 2025.
- [9] "PN-EN ISO 13916:2026-03 Measurement of Preheating Temperature, Interpass Temperature and Preheat Maintenance Temperature."
- [10] A. A. Kim, M. I. Podglazova, and K. S. Shatokhin, "Errors of non-contact temperature measurement," *Izv. Ferr. Metall.*, vol. 66, no. 2, pp. 229–235, 2023, doi: 10.17073/0368-0797-2023-2-229-235.
- [11] P. Cegielski, J. Grześ, and W. Łacisz, "The influence of the cooling method on shortening the cycle of multi-layer arc-surfacing of thin walls," *Weld. Technol. Rev.*, vol. 91, no. 1, pp. 13–18, 2019, doi: 10.26628/wtr.v91i1.998.
- [12] R. Belikov *et al.*, "Fast Multi-Wavelength Pyrometer for Dynamic Temperature Measurements," *Int. J. Thermophys.*, vol. 45, no. 2, 2024, doi: 10.1007/s10765-023-03323-x.
- [13] D. Trauneker, M. Jarwitz, and A. Michalowski, "Correcting the Influence of the Angle-Dependent Emissivity on Pyrometric Temperature Measurements for Laser Processes," *Lasers Manuf. Mater. Process.*, vol. 12, no. 1, pp. 98–111, 2025, doi: 10.1007/s40516-025-00279-8.
- [14] W. Devesse, D. De Baere, and P. Guillaume, "High resolution temperature measurement of liquid stainless steel using hyperspectral imaging," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 1, p. 91, 2017, doi: 10.3390/s17010091.



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee WTR, SIMP, Poland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).