

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

**Lokalizacja wtrąceń materiałowych
w wybranych przegrodach budowlanych
za pomocą termografii aktywnej**

Raport serii PRE nr 3/2022

Praca doktorska

mgr inż. Paweł Noszczyk

Słowa kluczowe:

badania nieniszczące

badania termowizyjne

termografia aktywna

wtrącenia materiałowe

lokalizacja defektów

Promotor: Prof. dr hab. inż. Henryk Nowak

Wrocław, kwiecień 2022

Autor:

mgr inż. Paweł Noszczyk

.....

Politechnika Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Budownictwa Ogólnego
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. 71 320 32 03
e-mail: pawel.noszczyk@pwr.edu.pl

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej w kwietniu 2022 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	2 egz.
Promotor	1 egz.
Autor	1 egz.
CWiINT PWr	1 egz.
Archiwum W-2	1 egz.

Razem 6 egz.

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania dla
promotora prof. Henryka Nowaka
za poświęcony czas, wyrozumiałość i ofiarowaną pomoc.

Dziękuję również mojej żonie Agnieszce,
Rodzicom, Dziadkom i Przyjaciołom
za wiarę we mnie, że uda mi się to skończyć.

Pracę dedykuję mojemu synkowi, Tymoteuszowi – mojej definicji szczęścia.

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	11
1.1. Wprowadzenie do zagadnienia	11
1.1.1. Badania nieniszczące w budownictwie	11
1.1.2. Termografia aktywna w badaniach materiałowych	12
1.1.3. Interdyscyplinarność zagadnienia	13
1.2. Przedmiot, cel i zakres pracy	13
1.2.1. Motywacja podjęcia tematu	13
1.2.2. Przedmiot	14
1.2.3. Cel	14
1.2.4. Zakres	14
2. AKTUALNY STAN WIEDZY	17
2.1. Analiza literatury przedmiotu	17
2.1.1. Krajowe grupy badawcze	18
2.1.2. Międzynarodowe grupy badawcze	22
2.2. Podsumowanie aktualnego stanu wiedzy	32
3. TEZY	45
4. TEORETYCZNE ASPEKTY ZAGADNIENIA	47
4.1. Podstawy przepływu ciepła	47
4.1.1. Rodzaje przekazywania ciepła	47
4.1.2. Parametry fizyczno-cieplne	48
4.1.3. Modelowanie zjawiska przepływu ciepła	54
4.2. Pomiar termowizyjny	56
4.2.1. Promieniowanie podczerwone	56
4.2.2. Metodyka pomiaru termowizyjnego	57
4.2.3. Ograniczenia metody termowizyjnej	59
4.2.4. Termowizja aktywna i jej rodzaje	60
4.3. Analiza obrazu termowizyjnego	64
4.3.1. Podstawy teoretyczne	64
4.3.2. Metody analizy obrazu termowizyjnego	66
4.4. Interdyscyplinarność badań metodą termografii aktywnej	70
4.4.1. Występujące zjawiska cieplne podczas badań	70
4.4.2. Odwrotne zagadnienia przewodzenia ciepła	71
5. OPIS PROBLEMU BADAWCZEGO	73
5.1. Sformułowanie problemu badawczego	73
5.2. Rodzaje wtrąceń	74
5.3. Przyjęta metodyka badawcza oraz założenia materiałowe	76
6. BADANIA WŁASNE	79
6.1. Badania doświadczalne	79
6.1.1. Przyjęte założenia	79

6.1.2. Stanowiska doświadczalne	93
6.1.3. Pomiary	101
6.1.4. Wyniki badań doświadczalnych.....	106
6.2. Badania terenowe	155
6.2.1. Terenowe stanowisko badań	155
6.2.2. Opis badania.....	157
6.2.3. Wyniki badań terenowych.....	160
7. ROZWIĄZANIE PROBLEMU BADAWCZEGO	163
7.1. Lokalizacja wtrąceń w elementach budowlanych.....	163
7.1.1. Metodyka lokalizacji	163
7.1.2. Wpływ warunków pobudzenia cieplnego na lokalizację wtrąceń	166
7.1.3. Wpływ rodzaju materiału bazowego na lokalizację wtrąceń.....	182
7.1.4. Rozwiązanie problemu lokalizacji wtrąceń materiałowych.....	185
7.2. Ocena rozwiązania	187
7.2.1. Porównanie wartości oszacowanych z rzeczywistymi.....	187
7.2.2. Zakres stosowania otrzymanych wyników badań.....	190
7.2.3. Ograniczenia zastosowanej metodyki badawczej	190
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	191
8.1. Wnioski ogólne	191
8.2. Wnioski szczegółowe.....	192
8.3. Podsumowanie rozprawy	194
8.3.1. Ocena wkładu rozprawy do rozwoju wiedzy	194
8.3.2. Dalsze kierunki badań	195
LITERATURA	197
STRESZCZENIE	209
ABSTRACT	211
ZAŁĄCZNIKI.....	213
Załącznik A – wyniki analizy w Wolfram Mathematica 11	213
Załącznik B – wartości ekstremów funkcji wg załącznika A	221

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

Litery łacińskie:

A	dyfuzyjność cieplna	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
c_p	ciepło właściwe	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
C_a	absolutny kontrast termiczny	$[K], [^{\circ}C]$
C_b	bieżący kontrast termiczny	$[-]$
C_{DAC}	różnicowy kontrast termiczny (DAC)	$[K], [^{\circ}C]$
C_v	objętościowa pojemność cieplna	$[J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$
C_w	względny (standardowy) kontrast termiczny	$[-]$
C^t	znormalizowany kontrast termiczny (NTC)	$[-]$
C_{NAC}	nowy absolutny kontrast termiczny (NAC)	$[-]$
D	grubość materiału	$[m]$
D	głębokość zalegania defektu pod powierzchnią	$[m]$
E	efuzyjność cieplna	$[J \cdot m^{-2} \cdot K \cdot s^{-1/2}]$
F	pole powierzchni	$[m^2]$
FC	filtrowany kontrast termiczny	$[K], [^{\circ}C]$
h_c	współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
K	numer kolejnego termogramu w zapisanej sekwencji	$[-]$
L	efektywna droga dyfuzji termicznej	$[m]$
M	masa ciała	$[kg]$
m_w	masa próbki materiału w stanie wilgotnym	$[kg]$
m_s	masa próbki materiału w stanie suchym	$[kg]$
N	częstotliwość	$[Hz]$
N	liczba termogramów w zapisanej sekwencji	$[-]$
P	współczynnik przepuszczalności (transmisyjności)	$[-]$
R^2	współczynnik determinacji	$[-]$
q_c	gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję	$[W \cdot m^{-2}]$
q_r	gęstość radiacyjnego strumienia ciepła	$[W \cdot m^{-2}]$
Q	ilość energii cieplnej	$[J], [W \cdot s]$
R	współczynnik refleksyjności (odbicia)	$[-]$
R	opór cieplny	$[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$
RFC	względny filtrowany kontrast termiczny	$[K], [^{\circ}C]$
T	czas	$[s]$
T	wartość temperatury	$[K], [^{\circ}C]$
V_o	jednostkowa objętość materiału w stanie naturalnym	$[m^3]$
W	wilgotność materiału	$[\%]$
W	natężenie promieniowania powierzchni rozpatrywanego ciała	$[-]$
W_b	natężenie promieniowania powierzchni ciała czarnego	$[-]$

Litery greckie:

α	współczynnik absorpcyjności (pochłaniania)	[-]
ρ_o	gęstość objętościowa	[kg·m ⁻³]
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Φ	strumień energii padającego promieniowania cieplnego	[W]
Φ_a	strumień energii pochłoniętego promieniowania cieplnego	[W]
Φ_r	strumień energii odbitego promieniowania cieplnego	[W]
Φ_p	strumień energii przepuszczonego promieniowania cieplnego	[W]
ε	współczynnik emisyjności (emisyjność)	[-]
Γ	współczynnik dopasowania termicznego	[-]
σ	stała Stefana-Boltzmana, równa $5,6694 \cdot 10^{-8}$	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]

Indeksy:

0	czas tuż przed stymulacją cieplną
'	czas pomiędzy wyłączeniem źródła ciepła a pojawieniem się defektu
ΔT_L	szacowana szerokość defektu po lewej stronie od jego teoretycznego środka
ΔT_P	szacowana szerokość defektu po prawej stronie od jego teoretycznego środka
BBK_L	termopara umieszczona na bloczku z betonu komórkowego po lewej stronie słupa
BBK_P	termopara umieszczona na bloczku z betonu komórkowego po prawej stronie słupa
d	przekrój z defektem lub wtrąceniem materiałowym
def	defekt
filter	filtrowany (wygładzony) termogram
fi20	przekrój niejednorodny z wtrąceniem w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm
i	współrzędna pozioma obrazu termowizyjnego
j	współrzędna pionowa obrazu termowizyjnego
JEDN	przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia
JEDN_Ż	przekrój jednorodny, materiał bez wtrącenia (żelbet)
L	ekstremum funkcji po lewej stronie punktu środkowego defektu
mat	materiał bazowy, w którym defekt lub wtrącenie się znajduje
otocz.	temperatura powietrza wokół badanego elementu
p	powietrze
P	ekstremum funkcji po prawej stronie punktu środkowego defektu
PowT	pomiar z termopar umieszczonych na tylnej powierzchni badanego elementu
przód	termopara umieszczona na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego
PŚ	teoretyczny punkt środkowy defektu
s	ciało stałe
S	powierzchnia referencyjna bez defektu (Sound Area)
tył	termopara na przeciwnej stronie wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego
W	funkcja wielomianowa

ROZDZIAŁ 1

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie do zagadnienia

Elementy budowlane w postaci przegród budowlanych takich jak: ściany zewnętrzne oraz wewnętrzne, stropy, dachy, stropodachy, podłogi, słupy, płyty itp. są przedmiotem badań od początku istnienia budownictwa. Elementy takie mogą być badane na etapie ich projektowania (różnego rodzaju obliczenia) lub w istniejących obiektach budowlanych jako elementy rzeczywiste, wykonane i wbudowane w ten obiekt. Jedną z najważniejszych cech makroskopowych wyżej wymienionych elementów jest ich struktura materiałowa. Niejednokrotnie struktura ta zawiera wiele materiałów połączonych ze sobą w celu stworzenia kompozytu spełniającego oczekiwania projektantów (oczekiwania wizualne, konstrukcyjne, czy też oczekiwania stawiane przez fizykę budowli). To właśnie struktura materiałowa elementu budowlanego decyduje o jego właściwościach fizycznych (np. wytrzymałość na różnego rodzaju oddziaływania). W obiektach już istniejących do badań elementów budowlanych najczęściej stosuje się badania nieniszczące, do których zaliczają się również badania termowizyjne. Między innymi dzięki termowizji można badać np. murowane przegrody budowlane w celu lokalizacji wtrąceń materiałowych, które zmieniają strukturę materiałową takich elementów, co w konsekwencji zmienia ich zaprojektowaną wytrzymałość i izolacyjność cieplną. Występowanie wtrąceń materiałowych w elementach budowlanych jest najczęściej niepożądanym zjawiskiem, które negatywnie wpływa na trwałość całego obiektu. Lokalizacja takich wtrąceń materiałowych jest kluczowa z uwagi na podniesienie bezpieczeństwa użytkowalności obiektów budowlanych.

1.1.1. Badania nieniszczące w budownictwie

W badaniach materiałowych możemy wyróżnić 3 rodzaje badań: badania niszczące, semi-niszczące oraz nieniszczące. Klasyczne badania niszczące powodują całkowite zniszczenie badanego materiału, z tego względu bardzo często nie mogą być one wykonywane. Badania semi-niszczące są to badania, które wpływają na strukturę badanego elementu, ale

nie powodują jego całkowitego zniszczenia. Przykładem takich badań może być np. pobieranie z istniejącej konstrukcji próbek, które są poddawane dalszym analizom. Najkorzystniejszymi badaniami z punktu widzenia nienaruszalności badanego materiału są oczywiście badania nieniszczące. Nie wpływają one w żaden negatywny sposób na badany materiał, który zarówno przed jak i po badaniu cechuje się takimi samymi parametrami fizycznymi.

W budownictwie istnieje wiele różnego rodzaju badań nieniszczących, które wykorzystywane są do badania struktury materiałowej danego elementu. Opis stosowalności większości z tych badań w budownictwie można znaleźć w bogatej literaturze przedmiotu [9], [28], [61], [94], lub publikacjach dotyczących szczególnych konstrukcji jak np. mosty [75]. Do takich badań nieniszczących należy również termografia, zwana inaczej badaniami termowizyjnymi, które od wielu lat znajdują szerokie zastosowanie w budownictwie [13], [14], [79], [129], [130]. Od lat liczba zastosowań oraz jakość badań termowizyjnych wzrasta [78]. Specjalistyczną odmianą badań termowizyjnych są badania przy użyciu termografii aktywnej.

1.1.2. Termografia aktywna w badaniach materiałowych

Pierwsze kamery termowizyjne zostały wyprodukowane w latach '60 XX wieku. Początkowo urządzenia te były bardzo duże i ważyły kilkadziesiąt kilogramów. Z biegiem lat kamery termowizyjne stawały się coraz mniejsze i tańsze, co oczywiście korzystnie wpłynęło na ich dostępność i wzrost zastosowania w wielu dziedzinach nauki i przemysłu. Od początku produkcji kamer termowizyjnych do lat 90' XX wieku były one wykorzystywane jedynie do badań przy użyciu termowizji pasywnej. Termowizja pasywna (obecnie najczęściej stosowany typ badań) polega na rejestracji rozkładu pola temperatury na badanej powierzchni bez ingerencji termicznej w badanym układzie, czyli badania obiektu (budynku) „w stanie takim w jakim jest”. W latach 90' XX wieku zaczęły pojawiać się pierwsze prace naukowe pokazujące nowe podejście do pomiaru termowizyjnego. Jednymi z pierwszych prac tego typu, są artykuły: Vavilov i in. [179] (z 1992 roku), Wu i in. [194] (z 1992 roku) oraz Maldague i Marinetti [110] (z 1996 roku). W pracach tych wskazali na alternatywny (do termografii pasywnej) sposób badania elementów, który polega na pobudzeniu cieplnym badanej powierzchni, a następnie cyklicznej rejestracji termogramów w czasie stygnięcia badanych elementów¹. Pobudzenie cieplne może być np. w postaci impulsu cieplnego wysłanego w kierunku badanej powierzchni przez promiennik podczerwieni. Podczas cyklicznej rejestracji termogramów niejednorodna struktura materiałowa badanego elementu w różny sposób przewodzi/pochłania/odbija falę cieplną, co skutkuje zróżnicowanym rozkładem pola temperatury na powierzchni tego elementu w czasie jego stygnięcia. Przedstawiona wyżej metoda badań nazywana jest termografią aktywną.

Obecnie stosuje się wiele różnych metod pobudzenia cieplnego badanych elementów, od pojedynczego impulsu ciepła (bądź też chłodu), poprzez długie impulsy ciepła, pobudzenia harmoniczne, magnetyczne, wibracyjne i wiele innych. Wyróżniamy również różne metody analizy otrzymanych obrazów termalnych. W różny sposób można też ustawiać względem siebie źródła pobudzenia, kamery termowizyjne i badane elementy, zmieniać czas trwania i częstotliwość pobudzenia. Wszystkie te elementy wpływają na rozkłady pola temperatury oraz

¹ W literaturze przedmiotu jest to tzw. termografia aktywna lub termografia dynamiczna.

możliwości zastosowania poszczególnych technik w różnych dziedzinach przemysłu. Rozchodzenie się energii cieplnej w elementach jest zależne od budowy materiałowej badanego elementu i ich właściwości cieplnych. Badania termowizyjne są stosowane wszędzie tam, gdzie rozkład pola temperatury na badanej powierzchni daje nowe informacje o badanym elemencie. Termografia aktywna umożliwia detekcję różnego rodzaju niejednorodności w strukturze materiałowej, pozwalając na lokalizację i detekcję np. rozwarstwień, pęknięć, rys, czy wtrąceń materiałowych. Ta technika badawcza jest również z powodzeniem stosowana w budownictwie [192]. Szczegółowy opis różnych technik badawczych przy użyciu termowizji aktywnej oraz sposoby jej zastosowania w badaniach materiałowych opisano w rozdziale drugim niniejszej pracy doktorskiej, w którym przeprowadzono analizę literatury przedmiotu.

1.1.3. Interdyscyplinarność zagadnienia

Wykonywanie badań metodą termowizji aktywnej łączy ze sobą wiele dziedzin nauki. W niniejszej pracy, termowizja aktywna była zastosowana do lokalizacji wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych. Tak sformułowane zadanie badawcze wymaga połączenia wiedzy z zakresu zarówno pomiaru termowizyjnego, cyfrowego przetwarzania obrazu, materiałoznawstwa, jak i konstrukcyjnej budowy przegród i elementów budowlanych.

1.2. Przedmiot, cel i zakres pracy

1.2.1. Motywacja podjęcia tematu

W budownictwie często istnieje potrzeba zbadania istniejącego obiektu budowlanego, a badania dotyczą, m. in., konstrukcji budynku oraz użytych w nim materiałów. Najczęściej są one przeprowadzane przed remontami i przebudową budynków. Badania materiałowe i konstrukcyjne wspomagają procesy projektowe w zakresie architektury, konstrukcji i fizyki budowli w obiektach budowlanych. Wskazane jest, aby były to badania nieniszczące, ponieważ w przypadku braku dokumentacji technicznej obiektu lub elementu budowlanego, wykonanie takich badań, np. w obiektach zabytkowych, jest szczególnie przydatne z uwagi na ochronę konserwatorską. Obecnie dzięki stosowaniu badań termowizyjnych w budownictwie w nieniszczący sposób można np. zlokalizować miejsca słabej izolacji termicznej w obudowie budynku, miejsca występowania mostków cieplnych lub wskazać punkty przecieku instalacji ogrzewania. Natomiast zupełnie nowe możliwości daje zastosowanie termografii aktywnej, umożliwiającej nieniszczące badania struktury materiałowej elementów i przegród budowlanych, co jak już wcześniej wspomniano, ma ogromny potencjał w budynkach zabytkowych. Dotychczas, większość prac badawczych w Polsce i na świecie było poświęcone elementom powierzchniowym, których grubości wynosiły od kilku milimetrów do 2-3 cm. Autorskie badania przeprowadzono dla elementów budowlanych, których wymiary w przekroju wynoszą od kilku (dla modeli ścian lekkich) do kilkudziesięciu centymetrów (przegroda murowana). Autor ma nadzieję, że jego badania pozwolą rozwinąć tę metodę badawczą w zastosowaniach budowlanych.

1.2.2. Przedmiot

Przedmiotem niniejszej pracy doktorskiej były badania modeli ścian lekkich i przegród budowlanych przy użyciu termografii aktywnej. Badanymi elementami były modele przegród budowlanych wykonanych z płyt gipsowo-kartonowych i płyt OSB oraz murowana ściana składająca się z bloczków z betonu komórkowego oraz słupów żelbetowych. Wtrącenia materiałowe były modelowane z materiałów o mocno zróżnicowanym współczynniku przewodzenia ciepła: były to stal, styropian oraz granit. Do pobudzenia cieplnego używano długiego impulsu cieplnego (co najmniej kilka minut) z promienników podczerwieni o mocy kilku kW.

1.2.3. Cel

Głównym celem wykonywanych badań była lokalizacja wtrąceń materiałowych w elementach i przegrodach budowlanych o grubości co najmniej kilku centymetrów. Lokalizacja polegała na wyznaczeniu głębokości zalegania wtrąceń pod badaną powierzchnią oraz szerokości tych wtrąceń jedynie na podstawie analizy cyklicznie rejestrowanych termogramów (rozwiązanie geometrycznych odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła) po wyłączeniu nagrzewania elementów.

Ponadto, celem pracy było zbadanie wpływu parametrów źródła ciepła oraz geometrii badanych elementów na możliwość detekcji wtrąceń materiałowych w tych elementach. Zmiennymi parametrami były:

- a) odległość źródła ciepła od ogrzewanej powierzchni,
- b) czas nagrzewu badanej powierzchni,
- c) moc źródła ciepła,
- d) rodzaj materiału jednorodnego, w którym występowały wtrącenia,
- e) rodzaj materiału zamodelowanego wtrącenia.

1.2.4. Zakres

Zakres rozprawy doktorskiej obejmował zastosowanie badań z użyciem termowizji aktywnej do lokalizacji wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych, a w tym: wykonanie modeli różnych elementów ścian, wykonanie badań, analiza wyników badań, dyskusja wyników, wnioski. Poniżej przedstawiono zawartość poszczególnych rozdziałów.

Rozdział I

1. Przedstawiono charakterystykę interdyscyplinarnego obszaru badań naukowych zawartych w rozprawie.
2. Ogólne wprowadzenie do zagadnień związanych z nieniszczącymi badaniami materiałowymi przy użyciu techniki termowizyjnej.
3. Przedstawiono motywację podjęcia tematu badawczego, jego przedmiot, cel i zakres.

Rozdział II

4. Dokonano przeglądu i analizę literatury przedmiotu rozprawy z usystematyzowaniem aktualnej wiedzy z podziałem na pochodzenie źródła (krajowe i zagraniczne) oraz jego rodzaj (czasopisma, referaty konferencyjne, książki, prace doktorskie).
5. Krytycznie podsumowano przegląd literatury w celu wyszukania zagadnień jeszcze nierozwiązanych, tzw. „białych plam”, w opisywanym obszarze badań naukowych.

Rozdział III

6. Postawiono tezy naukowe rozprawy.

Rozdział IV

7. Przedstawiono podstawy teoretyczne analizowanego zagadnienia, tj.: podstawy przepływu ciepła, pomiaru termowizyjnego oraz analizę przetwarzania obrazu termowizyjnego.

Rozdział V

8. Sformułowano problem badawczy rozprawy.
9. Opisano przyjęte założenia i metodykę badawczą prowadzącą do rozwiązania problemu badawczego i udowodnienia postawionych tez.

Rozdział VI

10. Opisano budowę modeli badawczych oraz stanowisk doświadczalnych.
11. Szczegółowo przedstawiono wykonane badania własne: doświadczalne laboratoryjne oraz terenowe.
12. Przedstawiono wybrane wyniki badań w postaci termogramów oraz zmiany temperatury w czasie w charakterystycznych miejscach termogramu, tj. w punkcie i profilu temperatury.

Rozdział VII

13. Przedstawiono metodykę określania głębokości zalegania wtrącenia materiałowego i jego szerokości.
14. Przeanalizowano wpływ warunków pobudzenia cieplnego, rodzaju materiału wtrącenia oraz rodzaju materiału bazowego na możliwość lokalizacji wtrąceń materiałowych.
15. Przeanalizowano i przedyskutowano otrzymane wyniki badań.
16. Dokonano oceny otrzymanego rozwiązania problemu badawczego. Porównano obliczone wartości z wartościami rzeczywistymi.

Rozdział VIII

17. Sformułowano wnioski ogólne i szczegółowe.
18. Dokonano podsumowania pracy oraz określono zalecane dalsze kierunki badań.

ROZDZIAŁ 2

2. AKTUALNY STAN WIEDZY

2.1. Analiza literatury przedmiotu

Badania termowizyjne przy użyciu termografii aktywnej są bardzo często opisywane w literaturze przedmiotu. Dokonując jej analizy znaleziono setki publikacji dotyczących tego sposobu badań. Prace największych światowych autorytetów z tej dziedziny nauki najczęściej pojawiają się w publikacjach w ramach cyklicznej konferencji Quantative InfaRed Thermography Conference (QIRT) [10]. Konferencja ta jest jedną z najaktualniejszych i największych baz danych artykułów o tematyce badań termowizyjnych. Podczas poszukiwania prac naukowych posłużono się przede wszystkim ogólnosiwiatowymi bazami danych literaturowych dostępnych w zasobach bibliotecznych Politechniki Wrocławskiej, artykułami dostępnymi w zasobach konferencji QIRT oraz portalem internetowym ResearchGate. Znalezione artykuły pojawiały się w takich czasopismach ogólnosiwiatowych jak (kolejność alfabetyczna): *Cement and Concrete Composites*; *Cement and Concrete Research*; *Construction and Building Materials*; *Experimental Heat Transfer*; *Heat and Mass Transfer*; *Transactions on Image Processing*; *Infrared Physics & Technology*; *Inverse Problems in Science and Engineering*; *Journal of Heat Transfer*; *Journal of Imaging*; *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*; *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*; *Materiales de Construction*; *Materials Testing*; *NDT & International*; *Nondestructive Testing and Evaluation*; *Quantative InfraRed Thermography Journal*; *Research in Nondestructive Evaluation*; *Russian Journal of Nondestructive Testing*; *Sensor* oraz *Sensors and Materials*. Interesujące prace znaleziono również w czasopismach polskojęzycznych: *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*; *Inżynieria i Budownictwo*; *Materiały Budowlane*; *Pomiary Automatyka Kontrola*; *Przegląd Elektrotechniczny* oraz *Rudy i Metale*. Konferencje naukowe, w ramach których pojawiają się prace dotyczące termowizji aktywnej to np.: *Conference on Damage in Composite Materials (CDMC)*; *InfraMation*; *World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT)* oraz wcześniej wspomniana konferencja QIRT. Powstało również kilka prac doktorskich poświęconych poruszanej w tej dysertacji problematyce.

Przedstawiona w pracy literatura przedmiotu skupia się na badaniach przy użyciu termografii aktywnej. W celu ograniczenia materiału źródłowego podano jedynie najważniejsze (zdaniem autora) prace, które w swoich badaniach poruszają problemy detekcji

defektów w materiałach. W szczególności położono nacisk na analizę publikacji naukowych, które opisują badania elementów dużych, tj. zbliżonych wymiarami do elementów budowlanych.

Przytoczone publikacje podzielono na krajowe oraz zagraniczne grupy badawcze. Przypisując pracę do danej grupy, brano pod uwagę narodowość autorów prac. Dzięki takiemu podziałowi łatwiej było zobrazować jakie prace naukowe są wykonywane w dziedzinie termowizji aktywnej w Polsce oraz na arenie międzynarodowej. Autor ma świadomość, że nie był w stanie dotrzeć do całego materiału naukowego dotyczącego zagadnień poruszanych w niniejszej pracy doktorskiej. Przedstawiona analiza literatury jest próbą dokonania krytycznej analizy literatury i przedstawienia aktualnego stanu wiedzy na temat badań z użyciem termografii aktywnej w kraju i za granicą.

2.1.1. Krajowe grupy badawcze

Czasopisma krajowe

W Polsce funkcjonuje kilka grup badawczych zajmujących się tematyką termowizji aktywnej, które proponują jej zastosowanie w różnych dziedzinach nauki. Analizując zastosowania budowlane warto wymienić publikację dotyczącą wykrywania ognisk korozji w elementach stalowych za pomocą krótkiego impulsu ciepła 0,5Hz (Więcek i in. [190]). Autorzy wskazali na konieczność dokonania dodatkowej obróbki otrzymanych termogramów za pomocą analizy Fouriera w celu otrzymania fazogramu, na którym możliwa była lokalizacja ognisk korozji na badanej próbce stalowej. Na próbkach niewielkich grubości badania przeprowadzili Suszyński i Bednarek (również używając krótkiego impulsu cieplnego) [161]. Badali oni cienkie struktury złożone z 3 warstw (w sumie 1,5 mm grubości). W celu poprawienia możliwości lokalizacji (zwiększenia kontrastu temperaturowego) zamodelowanego defektu struktury, używali funkcji korelacji liniowej Pearsona. Badania na niewielkich defektach o różnych średnicach (od 1 do 5 mm) oraz głębokościach zalegania pod powierzchnią (od 0,3 do 1,5 mm) można znaleźć w pracy Wysocka-Fotek i in. [196]. Autorzy oszacowali dwa parametry, tj. średnicę i głębokość zalegania z dokładnością do około 10 % w stosunku do wartości rzeczywistych. Na uwagę zasługuje fakt, że badano defekty bardzo małych rozmiarów. Niewątpliwie jednak, praca ta jest dobrym początkiem i przykładem do prowadzenia dalszych badań na coraz to większych elementach. Ciekawe rozwiązanie problemu ilościowej detekcji defektów w materiale przedstawili Dudzik i Minkina w pracy [45]. Badali oni próbkę z tworzywa sztucznego o wymiarach około 10 x 10 cm oraz grubości 1 cm, w której zamodelowano powietrzne defekty materiałowe zlokalizowane na różnych głębokościach (od 1 do 2,6 mm). Do ogrzewania próbki użyto dwóch lamp o mocy 500 W działających przez 2 minuty. Na podstawie otrzymanych termogramów przy zastosowaniu dwuetapowego neuronowego algorytmu (sztuczne sieci neuronowe) autorzy wyznaczyli głębokość położenia defektów. Obliczone wartości w stosunku do rzeczywistych głębokości nie przekraczały błędu 10 %. Autorzy wykazali, że do oszacowania szukanego parametru najlepiej nadawały się termogramy z fazy nagrzewania i stygnięcia powierzchni zarejestrowane przez pierwsze 2 min (wydłużanie czasu rejestracji stygnięcia próbki nie wpływało znacząco na poprawę otrzymywanych wyników). Termografia może być również

wykorzystywana do wyznaczania cieplnych parametrów materiałów. W tym zagadnieniu grupa badawcza Prof. Waldemara Minkiny z Politechniki Częstochowskiej prowadziła badania, z których wyniki zostały umieszczone w artykule autorstwa Chudzik, Minkina [29]. W pracy tej wskazano przydatność wykorzystania sztucznej sieci neuronowej do rozwiązania współczynnika zagadnienia odwrotnego i identyfikacji parametrów cieplnych badanego materiału. Kolejną pracą powyższej grupy badawczej jest artykuł [53], w którym podjęto próbę lokalizacji defektów metodą termografii aktywnej z wykorzystaniem kontrastu filtrowanego. Badana próbka była niewielkich rozmiarów, wykonana z pleksiglasu z 9 defektami w postaci nawierceń w materiale. W przedstawionej metodzie problematyczne jest dobranie odpowiedniego parametru B^2 w obliczeniach kontrastu filtrowanego (rozdział 4.3.2), którego optymalna wartość jest zależna od wymiarów defektu. Dobieranie tego parametru jest niekiedy intuicyjne i stanowi problem badawczy. Może to być zatem znaczny minus przedstawionej metody badawczej. Innymi godnymi uwagi pracami³ zespołu badawczego z Politechniki Częstochowskiej są artykuły: Dudzik [41], Gryś [52] Gryś, Minkina [54] oraz Minkina i Dudzik [122], (badania modelowe wyznaczania granic defektów). W pracy badaczy Suszyński, Kosikowski [162] opisano dwa różne pobudzenia cieplne: optyczne oraz konwekcyjne. Porównano efektywność obu metod i możliwości ich stosowania. Wskazano, że tryb grzania konwekcyjnego może być przydatny gdy np. badany obiekt charakteryzuje się dużym współczynnikiem refleksyjności optycznej (co wtedy utrudnia ogrzewanie optyczne). Element masywny wykonany z betonu (o wymiarach 60 cm x 60 cm x 10 cm) z zamodelowanymi wtrąceniami w postaci pustek powietrznych (pudełek) umieszczonych na różnych głębokościach (od 1,5 do 3 cm) został przebadany przez Różańskiego i Ziopaję [147]. Wewnątrz badanego elementu dodatkowo znajdowały się pręty zbrojeniowe średnicy 10 i 12 mm, umieszczone na głębokości 2,5 cm. Do ogrzewania użyto ciągłego impulsu cieplnego przez 5 min. Niestety, na termogramach trudno było zlokalizować defekty. Wpływ na otrzymane wyniki prawdopodobnie miało nierównomierne ogrzanie powierzchni. O lokalizacji defektów można było wnioskować na podstawie zmieniających się wartościach temperatur a nie izoterm. Równomierność ogrzania poprawiono w badaniu, w którym do pobudzenia cieplnego betonowej próbki użyto gorącego powietrza, które ogrzewało powierzchnię przez 18 min. Dzięki tej metodzie można było zlokalizować defekty na podstawie 1 termogramu i charakterystycznych układów izoterm. Wtrącenia w postaci pustek powietrznych były widoczne przez okres około 10 min od rozpoczęcia fazy stygnięcia elementu. W obu pomiarach nie udało się zlokalizować prętów zbrojeniowych.

Wykazane publikacje w krajowych czasopismach pokazują duże zainteresowanie problematyką detekcji wtrąceń w materiałach wśród polskich badaczy. Jednakże prawie wszystkie prace (oprócz Różański i Ziopaja [147]) dotyczą niewielkich rozmiarów próbek, nieprzekraczających kilkunastu centymetrów powierzchni i kilkunastu mm grubości.

Czasopisma międzynarodowe

Polscy naukowcy publikują również swoje prace w czasopismach o zasięgu światowym. Wiele wyników prac polskich badaczy jest docenianych na arenie międzynarodowej.

² Arbitralnie przyjmowany parametr filtru, zależny od wymiarów defektu [53].

³ Prace dotyczące pomiarów metodą termografii aktywnej, metodyki wykonywania pomiarów oraz szacowania błędów i niepewności pomiarów.

Badaniami na niewielkich elementach stalowych zajmował się zespół badawczy Wysocka-Fotek, Olifieruk, Maj [197]. W ich pracy defekty były zamodelowane jako nawiercenia (na niepełną grubość) w płycie stalowej o grubości 5 mm. Do pobudzania cieplnego naukowcy użyli lampy halogenowej o mocy 6 kJ i krótkiego impulsu. Do analizy termogramów użyto kontrastu standardowego (rozdział 4.3.2). Uzyskane wyniki oceny głębokości występowania defektów można uznać za satysfakcjonujące, gdyż nie przekraczały błędu względnego na poziomie 10 %. W pracy Dudzika [42] zastosowano algorytm „Principal Component Analysis” (PCA) oraz sztuczne sieci neuronowe do lokalizacji defektów (nawiercenia na niepełną grubość elementu) w płycie z pleksiglasu niewielkich rozmiarów, tj. kilku mm. Głębokości defektów były oszacowane z błędem nieprzekraczającym 5%. Dudzik w swojej innej pracy [43] zastosował dwuetapowy algorytm lokalizacji defektów również oparty na sztucznych sieciach neuronowych. W pracy tej testował trzy różne bazy danych termogramów tj. z etapu ogrzewania, chłodzenia lub ogrzewania i chłodzenia powierzchni. Symulacje numeryczne i analizy analityczne 1D badań z użyciem termografii aktywnej, również na płytkach z pleksiglasu, przeprowadzili Gryś i in. [51]. Prace badawcze bliższe zastosowaniom budowlanym zostały opisane w artykule Szymanik i in. [165]. Autorzy przedstawili możliwości termografii aktywnej z pobudzeniem mikrofalami do detekcji zbrojenia w elementach żelbetowych. Największą zaletą przedstawionych badań jest możliwość jednoczesnego pomiaru dużej powierzchni. Badania eksperymentalne i numeryczne przedstawione w pracy stwierdzają możliwość lokalizacji prętów zbrojeniowych (średnicy 8 – 14 mm) do głębokości 20 mm pod warstwą betonu. Praca autorstwa Wawrzyńska i in. [186] opisująca teoretyczną analizę rozwiązywania odwrotnych problemów przewodzenia ciepła dla elementu walcowego z zaprawy cementowej podaje procedurę badawczą wyznaczania parametrów cieplnych materiału na podstawie pomiaru termowizyjnego. Natomiast w artykule autorstwa Ziopaja i in. [200] do lokalizacji defektów i szacowania ich głębokości użyto dyskretnej transformaty falkowej (z ang. discrete wavelet transform - DWT). Parametry cieplne przegród budowlanych na podstawie pomiaru termowizyjnego były wyznaczone w pracy współautorstwa Kisilewicza i Nowak-Dzieszkó [169]. W roku 2019 Noszczyk i Nowak [127] opublikowali pracę, w której z powodzeniem lokalizowali wtrącenia materiałowe w modelach lekkich przegród budowlanych metodą termowizji aktywnej.

Referaty konferencyjne

Przedstawiciele polskich jednostek badawczych publikują również swoje referaty na największych międzynarodowych konferencjach poświęconych zagadnieniom termowizji. W 2010 roku na konferencji „InfraMation” Nowak i Kucypera [131] opublikowali pracę poświęconą wstępnym badaniom nad zastosowaniem termografii aktywnej do lokalizacji defektów w przegrodach budowlanych. Autorzy wykazali, że istnieje możliwość detekcji wtrąceń pod powierzchnią z płyty OSB po ówczesnym ogrzaniu badanego elementu przez promiennik podczerwieni o mocy kilku kW przez okres co najmniej kilkunastu minut.

Najbardziej rozpoznawalną na świecie konferencją termograficzną, gdzie można znaleźć prace dotyczące zastosowania termowizji aktywnej w badaniach materiałowych jest konferencja QIRT. Impreza naukowa odbywa się cyklicznie co 2 lata od 1992 roku. Duża część publikacji pochodzi z Polski. Najlepsze artykuły konferencyjne są drukowane w międzynarodowym czasopiśmie Quantitative InfraRed Thermography Journal, publikacje

dotyczące termowizji aktywnej zostały przytoczone w punkcie dotyczącym artykułów w czasopismach. Wśród referatów konferencyjnych można znaleźć publikacje dotyczące zastosowań termowizji aktywnej takich polskich badaczy jak: Gryś i Minkina [55] (badania małych płytek i zastosowanie nowego kontrastu filtrowanego – FC, oszacowano głębokość położenia defektów z błędem do 20%); Więcek i Poksińska [191] (badania autentyczności historycznej tkanki budowlanej i lokalizacja przemurowań); Maj i in. [107] (wpływ głębokości i wielkości defektów w małej stalowej płytce na standardowy kontrast termiczny); Szymanik i in. [166] (badania kompozytu z włókna szklanego z wtrąceniami z jednoczesną analizą fal podczerwonych i terahercowych); Marynowicz [113] (wyznaczanie właściwości cieplnych materiałów budowlanych); Kurpiński i Fidali [85] (badanie jakości połączenia dwóch płyt stalowych). Nowatorskie podejście do pobudzenia cieplnego zostało przedstawione w pracy Bajorka i Nowakowskiego [8], którzy chłodzili badany element i sprawdzali różnice temperatur na powierzchni w przekroju bez defektu i z defektem drewnianym (badano również defekty w postaci pustek powietrznych)⁴. Autorzy badali próbki o rozmiarze kilkunastu centymetrów, gdzie defekty znajdowały się na głębokości od 2 do 15 mm, sprawdzano również wpływ długości chłodzenia powierzchni na otrzymany rozkład pola temperatur. Dla najkrótszych okresów chłodzenia wynoszących 10 s różnice dla najpłycej położonych defektów wynosiły do 1,87 °C (1,28 °C) natomiast dla pobudzenia długości 200 s nawet 11 °C (4,81 °C). Należy jednak zauważyć, że tak duże różnice temperatur występowały dla defektów pod warstwą materiału grubości tylko 2 mm, przy 15 mm kontrast termiczny (rozdział 4.3.2) był niewielki i wynosił jedynie 0,14 °C (0,5 °C – dla głębokości 6 mm). W pracy Olifieruk i in. [136] autorzy podali metodykę wyznaczenia dyfuzyjności termicznej materiału na podstawie pomiaru z użyciem termografii pulsacyjnej (rozwiązanie odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła). Zastosowanie budowlane termowizji aktywnej zostało przedstawione w artykule Swiderski i in. [163]. Badacze lokalizowali w płytach warstwowych defekty w postaci rozwarstwień i odspojeń okładziny od wypełnienia oraz jego pęknięć. Do pobudzenia cieplnego używano ultradźwięków (wibrotermografia) o różnej częstotliwości. Przedstawiona metodyka badawcza wykazała przydatność tej metody pobudzenia do lokalizacji defektów materiałowych w strukturach warstwowych.

Również w Polsce odbywa się duża konferencja o tematyce termowizyjnej. Największa liczba prac polskich badaczy z zakresu termowizji jest prezentowana właśnie na polskiej konferencji Termografia i Termometria w Podczerwieni. Najlepsze artykuły są drukowane w czasopiśmie Pomiary Automatyka Kontrola - Measurement Automation Monitoring (MAM), publikacje te zostały opisane w punkcie a) niniejszego podrozdziału.

Książki

Dokonując rozeznania literaturowego można znaleźć kilka książek napisanych przez polskich naukowców, które traktują o problematyce poruszanej w niniejszej pracy. Pozycje książkowe opisują takie zagadnienia jak: podstawy teoretyczne badań termowizyjnych, Więcek i Mey [189], Więcek [188]; nieniszczące badania materiałowe, Olifieruk [135]; zastosowania termowizji w budownictwie Nowak [130], rozwiązywanie odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła, Taler [72] czy opis metod pomiarowych i przetwarzania obrazów

⁴ W nawiasach okrągłych podano wartości kontrastu termicznego (rozdział 4.3.2) dla wtrąceń w postaci powietrza.

w badaniach termografią aktywną, Suszyński [159]. Cenną pozycją książkową poruszającą problem błędów i niepewności pomiarowych w badaniach termowizyjnych jest książka autorstwa Waldemara Minkiny i Sebastiana Dudzika z Politechniki Częstochowskiej „Infrared Thermography – Errors and Uncertainties”, Minkina i Dudzik [123]. Powstały również dwie książki związane bezpośrednio z tematem detekcji wtrąceń materiałowych przy użyciu termowizji aktywnej. Pierwsza z nich jest napisana pod redakcją Waldemara Minkiny [120]. Druga pozycja autorstwa Dudzika [44] opisuje metodykę wyznaczenia głębokości defektów powierzchniowych przy użyciu termowizji aktywnej i sztucznych sieci neuronowych. W obu pozycjach opisywana jest metodyka lokalizacji wtrąceń powierzchniowych w cienkich płytkach z tworzywa sztucznego. Przedstawione metody ilościowe pozwalają na wyznaczenie głębokości położenia (od 0,8 do 2,6 mm) zamodelowanych wtrąceń z dokładnością do kilku lub kilkunastu procent (w zależności od użytych zbiorów danych do uczenia sieci neuronowej). W zastosowaniu budowlanym w pracy autorstwa Aliny i Andrzeja Wróbel oraz Kisilewicza [79], przy użyciu badań termowizyjnych określono właściwości cieplne przegród budowlanych. Jedną z nowszych pozycji książkowych ujmującą poruszane zagadnienie jest praca Marynowicza [114]. Rozwiązano w niej odwrotne problemy przewodzenia ciepła tj. wyznaczono parametry cieplne budowlanych materiałów porowatych jedynie na podstawie analizy rozkładu pola temperatury, zarejestrowanego podczas badania termowizją aktywną z pobudzeniem laserowym.

Prace doktorskie

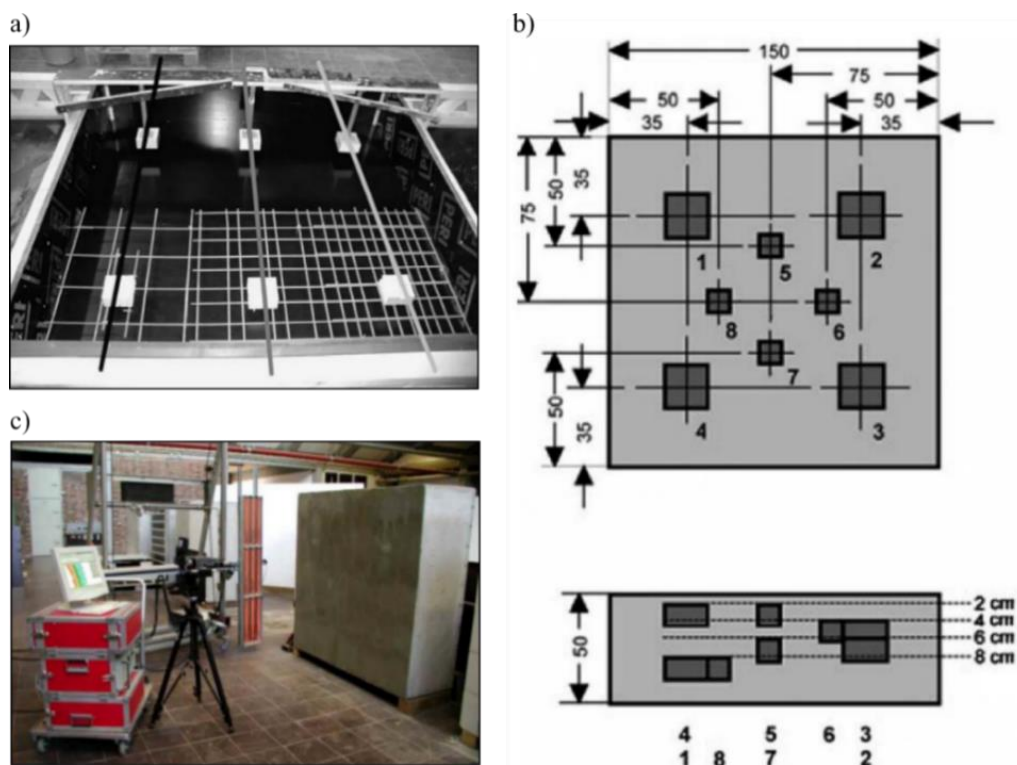
W Polsce powstały dwie prace doktorskie z zakresu badań materiałowych z użyciem termografii aktywnej. Pierwsza z nich jest autorstwa Olgi Wysockiej-Fotek [195] z 2011 roku. Praca dotyczy szacowania wielkości i położenia defektów przypowierzchniowych z użyciem termografii impulsowej. W badaniach użyto próbki w postaci stalowej płyty o grubości 5 mm, defekty w postaci nawierconych otworów znajdowały się pod powierzchnią na głębokości od 0,3 do 4,0 mm. Próbkę nagrzano lampą błyskową o energii impulsu 6,0 kJ z odległości 0,5m (czas trwania impulsu wynosił 3 ms). Do szacowania szukanych wielkości posłużono się wyznaczeniem pochodnej temperatury względem czasu. Średnica defektów została oszacowana z błędem nie większym niż 4 % natomiast głębokość defektu z błędem do 10 %. Druga praca doktorska została obroniona w roku 2013, Szymanik [164]. W pracy tej zastosowano termografię aktywną ze wzbudzeniem mikrofalowym do wykrywania niemetalicznych min lądowych. Przedstawiona metoda okazała się skuteczna. Na podstawie otrzymanych termogramów miny mogły być w łatwy sposób lokalizowane (pod 5 cm warstwą piasku), parametry geometryczne min zostały oszacowane z błędem około 7 % dla szerokości, 167 % dla wysokości i 20 % dla głębokości zalegania miny pod badaną powierzchnią.

2.1.2. Międzynarodowe grupy badawcze

Czasopisma

Interesującą serię artykułów z uwagi na badania z użyciem termografii aktywnej w zastosowaniu budowlanym można znaleźć w dorobku naukowym grupy badawczej skupionej wokół osoby Christiane Maierhofer. Jest ona pracownikiem Federalnego Instytutu

Badania Materiałów i Testowania (z niem. w skrócie BAM) w Niemczech i prowadzi nieniszczące badania materiałowe ze szczególnym uwzględnieniem użycia termografii aktywnej. Jej badania były wykonywane na dużych masywnych elementach betonowych, które swoją budową imitują przegrody budowlane. Jedną z ciekawszych prac (opublikowana w 2006 roku) jest artykuł autorstwa Maierhofer i in. [96], w którym poruszono problem detekcji wtrącenia materiałowego wykonanego ze styropianu umieszczonego w masywnym bloku betonowym. Styropian zlokalizowano na różnych głębokościach od 2 do 8 cm pod powierzchnią betonu. Do ogrzewania masywnej próbki betonu (1,5 x 1,5 x 0,5 m) użyto promienników podczerwieni o mocy 3x2,4 kW (rys. 2.1.) Pobudzenie termiczne trwało 30 min, a następnie w fazie stygnięcia cyklicznie rejestrowano termogramy. Wyniki przedstawiono w postaci zwykłych termogramów oraz po przekształceniu ich przy użyciu transformaty Fouriera, otrzymując fazogramy⁵.



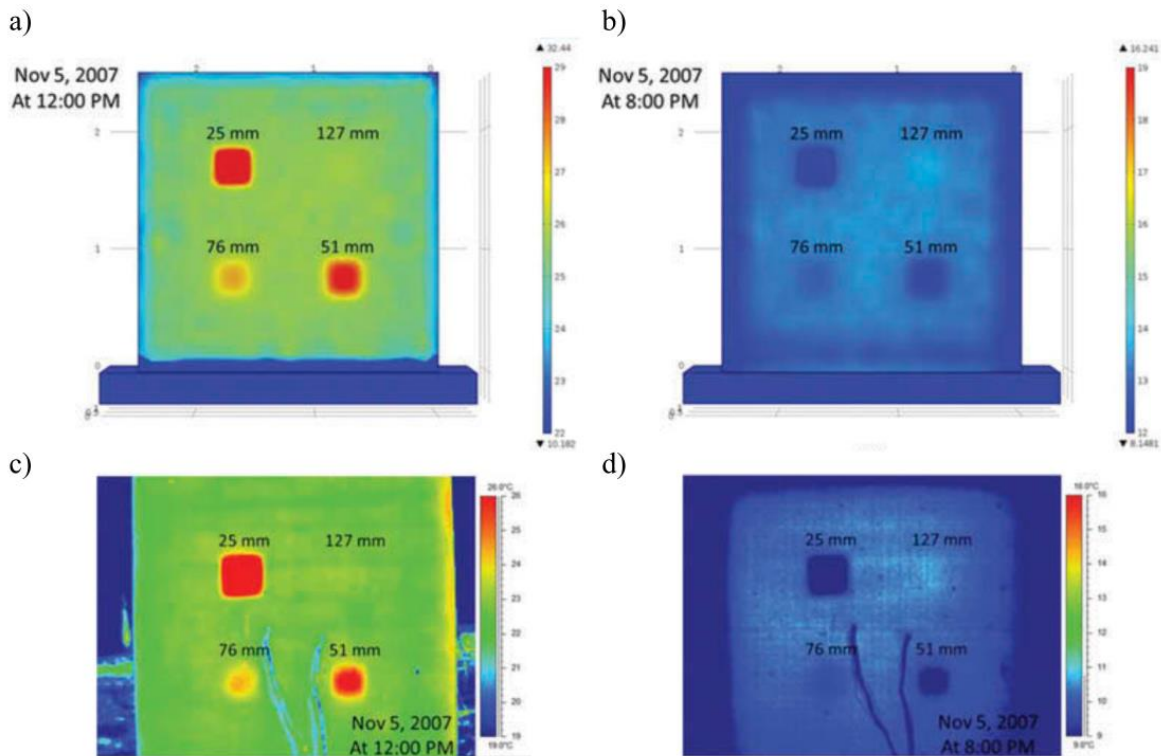
Rys. 2.1. Element betonowy z wtrąceniami, badany przez zespół naukowy pod kierownictwem Christiane Maierhofer, a) zdjęcie podczas wykonywania elementu; b) rysunek zlokalizowania wtrąceń materiałowych ze styropianu oraz c) zdjęcie stanowiska badawczego [96]

Wszystkie zamodelowane wtrącenia były dobrze widoczne i możliwe do zlokalizowania. W tej samej pracy wskazano również na przydatność opisywanej metody badawczej do lokalizowania delaminacji taśm CFRP przyklejanych do powierzchni betonowej oraz opisano zastosowanie pobudzenia cieplnego od środka elementu przy użyciu zabetonowanych przewodów grzejnych w betonowej belce. Autorzy stwierdzili, że impulsowa termografia aktywna jest przydatna do lokalizacji defektów zlokalizowanych do 10 cm pod

⁵ Fazogramy, czyli przekształcone termogramy z użyciem transformaty Fouriera, wprowadził już w latach 90' XX wieku, kanadyjski badacz Xavier Maldague, podczas swoich badań z wykorzystaniem Pulse-phase thermography (PPT).

badaną powierzchnią. Jednakże dokonując krytycznej analizy oceny metody badawczej, należy zwrócić uwagę na fakt, że zamodelowane wtrącenia materiałowe były dużych rozmiarów, a grubość defektu była większa niż głębokość jego położenia. Dodatkowo przebadano tylko defekty wykonane ze styropianu, w materiale jednorodnym z betonu. Niewątpliwie jest to jednak jedna z najbardziej cennych publikacji, która opisuje badania bardzo bliskie zagadnieniom poruszonym w niniejszej dysertacji. Powyższa grupa badawcza opisuje również przeprowadzone symulacje numeryczne wykonanego eksperymentu [103], które potwierdzają przydatność tej metody do lokalizacji defektów w elementach betonowych.

W pracy [187] w opisanym powyżej eksperymencie, dokonano porównania wyników otrzymanych metodą numeryczną i doświadczalną. Oba te modele dawały bardzo zbliżone wyniki w postaci rozkładu pola temperatury na powierzchni stygnącego elementu. Można zatem stwierdzić, że dobrany model matematyczny zachodzącego zjawiska fizycznego był dobrany poprawnie. Maierhofer z różnymi naukowcami publikowała wiele podobnych prac [97], [98], [105], a przedstawiony betonowy element był analizowany w różny sposób również przez naukowców w innych pracach [6]. Powyższa grupa badawcza zajmowała się również badaniami elementów małych rozmiarów [142]. Drugi ciekawy element, z uwagi na swe rozmiary, został przebadany przez naukowców z USA w roku 2014, Khan i in. [77]. W pracy opisano badania elementów murowych o wymiarach blisko 4 x 4 m oraz 1 x 1 m. W każdej z przegród wyodrębniono obszary nieprzewiązane zaprawą. Masywne elementy pobudzano cieplnie długim impulsem cieplnym z lamp halogenowych przez okres 200 min. Zarówno badania doświadczalne jak i numeryczne potwierdziły przydatność termowizji aktywnej do poszukiwania w przegrodach murowych defektów w postaci braku przewiązania zaprawą poszczególnych elementów murowych. Różnice w wartości temperatury na powierzchni obszaru poprawnie przewiązanego a obszaru bez zaprawy wynosiły około 2°C i były dobrze widoczne na termogramach. Kolejna praca opisująca badania na dużym elemencie (1 x 1 m) jest autorstwa badaczy z Włoch, Donatelli i in. [40]. W swoim modelu ściany o grubości 10 cm, przy użyciu termografii aktywnej wyznaczali oni współczynnik przenikania ciepła U badanej przegrody, która była wykonana z pustaków ceramicznych z wydrążonymi otworami i obustronnie otynkowana tynkiem wapiennym. Badacze wykonali badania doświadczalne oraz numeryczne dla dwóch różnych struktur materiałowych tj. pustką powietrzną lub materiałem termoizolacyjnym (naturalne włókna konopi) w miejscu wydrążonych otworów w pustakach. Inne badania na elemencie wielkogabarytowym z żelbetu z wtrąceniami ze styropianu zostały opisane w pracy Rumbayana i Washera [148]. W badaniach tych ciekawym jest fakt zastosowania do ogrzewania bloku betonowego (2,4 x 2,4 x 0,9 m) promieni słonecznych. Autorzy sprawdzili możliwość detekcji zamodelowanych wtrąceń przy pobudzeniu energią Słońca i swoje pomiary porównali z badaniami numerycznymi. Naukowcy otrzymali bardzo zbliżone wyniki kontrastu termicznego w obu metodach (eksperymentalna i numeryczna), współczynnik korelacji (Pearsona) kontrastu termicznego wynosił dla okresu 6 miesięcznych pomiarów 0,92 (styropian pod warstwą 51 mm betonu) oraz 0,89 (styropian pod warstwą 76 mm betonu). Na rys. 2.2. pokazano otrzymane przez nich wyniki.



Rys. 2.2. Rozkład pola temperatury na powierzchni badanego elementu, a) i b) wyniki z symulacji numerycznej, c) i d) odpowiadające im wyniki z pomiarów eksperymentalnych [148]

Dokonując analizy literatury przedmiotu, która dotyczy dużych elementów stosowanych w budownictwie, szczególną uwagę należy poświęcić cennym badaniom terenowym. Takich badań opisanych w literaturze znajduje się niezwykle mało. Przykładem takiej publikacji jest praca Ibarra-Castanedo, Maldague i in. [69]. Badacze pokazali, że wykorzystując do ogrzewania powierzchni promieniowanie słoneczne można badać całe elewacje budynków. Jest to bardzo ważna publikacja z uwagi na fakt, że do tej pory większość naukowców badała elementy małych rozmiarów, a niewielu autorów podejmowało próbę badania elementów dużych, nie mówiąc już o całych budynkach. W przytoczonej pracy, pomiary termowizyjne były wykonywane przez kilka kolejnych słonecznych dni. Równocześnie z pomiarem termowizyjnym mierzono intensywność promieniowania słonecznego (bezpośredniego i rozproszonego). Po wykonaniu pomiarów termowizyjnych z ogrzewaniem powierzchni słońcem, dokonano obróbki sygnału termowizyjnego i w efekcie otrzymano wysokie (tj. do kilku °C) kontrasty temperaturowe pokazujące defekty w przegrodzie budowlanej w postaci wieńców oraz zamurowanych otworów. Pomiary zostały wykonane dla 3 różnych obiektów budowlanych, w tym w jednym obiekcie zabytkowym. Podobne badania zostały opisane w pracy Sfarra i in. [155] oraz Krankenhagen i Maierhofer [83]. Badacze zwracają uwagę w swoich pracach, że Słońce może być skutecznie używane do pobudzenia cieplnego badanych elementów, ale należy szczególnie uważać na panujące warunki zewnętrzne takie jak, wiatr, opady oraz w szczególności rzucający cień przez sąsiednie obiekty.

Duże elementy (np. betonowe, murowe) były również badane z użyciem termografii aktywnej do lokalizacji rys i pęknięć [1], [2]; procesu hydratacji cementu⁶ podczas produkcji elementów betonowych [7]. Badacze w różny sposób pobudzali cieplnie elementy betonowe, np. promieniowaniem słonecznym, czekając aż elementy zostaną ogrzane w naturalny sposób, a następnie wykonywano serię termogramów [90]. Ciekawym zastosowaniem była również inspekcja mostów betonowych. W pracy autorstwa Kurita i in. [84] do ogrzewania przęsła mostu od spodu zastosowano ksenonową lampę lotniczą o mocy 6kW. Badacze z USA, Halabe i in. [56], lokalizowali podpowierzchniowe defekty w mostach analizując jedynie proste kontrasty termiczne, w pobudzeniu cieplnym wykorzystywali oni między innymi energię promieni słonecznych. W podobnej pracy Escobara i in. [47] do badań dodatkowo wykorzystywano bezzałogowe statki powietrzne – drony. Poszukiwanymi wtrąceniami w betonie może być również stal konstrukcyjna. Badania w tym zakresie przeprowadzili Keo i in. [76], którzy pobudzali żelbetową ścianę grubości 6,5 cm za pomocą mikrofal. Byli oni w stanie zlokalizować pręty zbrojeniowe średnicy 12 mm znajdujące się pod 3,8 cm warstwą otuliny. Szerokie badania w zakresie detekcji defektów na różnych głębokościach w modelu ściany betonowej o grubości 30 cm przeprowadzili Cotic i in. [33].

Często opisywanym w literaturze zastosowaniem termografii aktywnej w budownictwie jest poszukiwanie defektów w postaci delaminacji i odspojenia taśm wzmacniających do betonu. W takich przypadkach defektem nazywamy miejsce braku połączenia obu elementów występujące w warstwie żywicy epoksydowej lub otulinie. Zespół badawczy z Chin w swojej publikacji [88] badał taśmy CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Badacze zastosowali ciekawy sposób pobudzenia cieplnego – 50 tygodniowa kąpiel wodna w temperaturach 25 °C, 40 °C oraz 60 °C (3 belki, każda w innej temperaturze). Współczynnik korelacji pomiędzy powierzchniami defektów (degradacji połączenia) obliczonymi na podstawie termogramów, a rzeczywistymi wynosił 0,89. W pracy stwierdzono, że kąpiel wodna w 25 °C nie wykazała zaburzeń na termogramach, natomiast przy wyższych temperaturach wody wykazano większe zaburzenia pola temperatur (na termogramach) w strukturze połączenia obu materiałów (betonu i taśm wzmacniających). Przyczyną tej sytuacji jest oczywiście wywołanie wyższej różnicy temperatur pomiędzy badanym obiektem, a powietrzem wokół niego⁷. Dodatkowo, wyższa temperatura wody mogła mieć negatywny wpływ na zastosowaną żywicę epoksydową. Niewątpliwie przeprowadzone badania potwierdzają przydatność termografii aktywnej do oceny wzmocnienia elementów z użyciem taśm wzmacniających. Podobne badania przeprowadzali również: Brown i Hamilton (taśmy FRP o różnych grubościach) [20]; He i Yang (badania taśm CFRP z pobudzeniem cieplnym przy użyciu prądów wirowych - Eddy Current) [58]; Waugh i in. [185]. Szerokie badania eksperymentalne można także znaleźć w pracach Criniere i in. [34] oraz Liu i in. [92], gdzie badacze zamodelowali różnego rodzaju wtrącenia materiałowe występujące pomiędzy taśmą a betonem jak i w samej taśmie.

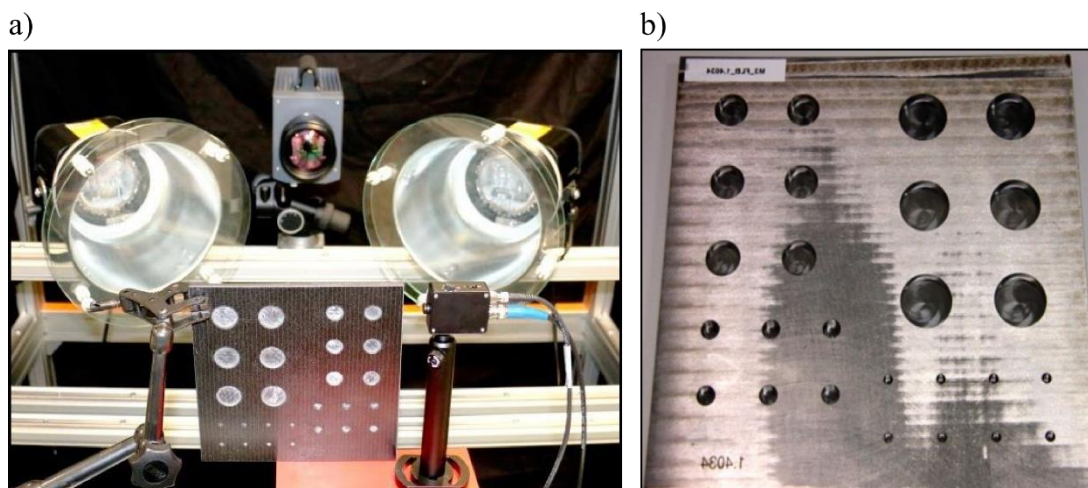
⁶ Proces hydratacji cementu uwalnia duże ilości ciepła, które podgrzewają element betonowy. Badania opisane w publikacji autor zalicza do badań z użyciem termografii aktywnej, ponieważ pobudzeniem cieplnym są procesy chemiczne zachodzące wewnątrz badanego elementu jakim jest wiążący beton.

⁷ Ogólnie znanym faktem jest zależność, że im większa różnica temperatur pomiędzy badanym elementem, a otaczającym go powietrzem tym podczas badań termowizyjnych osiąga się wyższy kontrast termiczny, który pozwala dokładniej identyfikować defekty.

Ważną postacią, która miała duży wkład w początkowy rozwój badań z użyciem termografii aktywnej jest niewątpliwie, wcześniej już wspomniany, Xavier Maldague. Jego publikacje dotyczą najczęściej zagadnień bardziej teoretycznych, ale nie tylko. W artykule [109] opisał podstawy badań termografią impulsowo – fazową tzw. pulsed phase thermography (PPT), zaproponował również podwójno-impulsową metodę pobudzenia cieplnego [111]. Można stwierdzić, że jest on pionierem wykorzystania termowizji impulsowej w badaniach materiałowych. W roku 2004 wraz z Ibarra-Castanedo napisał pracę przeglądową podsumowującą dotychczasowe osiągnięcia nauki w dziedzinie badań z użyciem termografii aktywnej impulsowej [65]. Obaj naukowcy publikują często wspólnie na łamach wielu czasopism poświęconych tematyce badań nieniszczących [66] (metodyka detekcji kilkumilimetrowych defektów), [67] (lokalizacja defektów w materiałach o strukturze plastra miodu).

W literaturze można doszukać się również wielu innych zastosowań termografii aktywnej w dziedzinie badań materiałowych: nieniszcząca ocena degradacji fresków [68], [81], ochrona obiektów zabytkowych [124]; poszukiwania mozaiki pod jednorodną warstwą wierzchnią [171]; lokalizacji min lądowych pod warstwą gruntu [170]; lokalizacja pustek powietrznych w rurach [87], badania znalezisk archeologicznych [116], [154], badania nad korozją i pęknięciami w stali [184], [198], czy nawet ocena jakości procesu pakowania produktów spożywczych [38]. Powstało również wiele prac dotyczących materiałów o strukturze plastra miodu (honeycomb sandwich), [30], [175] (lokalizacja wody z użyciem termografii terahercowej⁸).

Wielu autorów zajmowało się badaniami na małych elementach tj. grubości kilkunastu milimetrów i powierzchni kilkudziesięciu centymetrów kwadratowych. Przykładowe stanowisko badawcze oraz badane małe elementy pokazano na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Przykładowe stanowisko badawcze z użyciem termografii aktywnej używane do badań małych elementów a) widok ogólny, b) widok z bliska przykładowego elementu małogabarytowego [99]

Metody badawcze oraz wyniki badań na niewielkich elementach można zobaczyć w pracach różnych autorów z całego świata, np.: Niemcy [99] (metoda Lock-in), Kolumbia i Kanada [48], Chiny [167], [73], [74], Korea Południowa [27], [157], Indie [26], [37], [86],

⁸ Zakres promieniowania elektromagnetycznego w zakresie tzw. fali terahercowej (dawniej submilimetrowe) o częstotliwości fali w zakresie od 300 GHz do 10,0 THz.

[176], Hiszpania [145] (elementy drewniane) Japonia [71] (stanowisko badawcze wewnątrz modelu ciała czarnego), Anglia [3], [139], Hiszpania [95], USA [112], Australia [91], Rosja [182] (detekcja wtrąceń z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych). W wielu z tych prac pokazano ciekawe wyniki, jednakże wykorzystywana metodyka badawcza dla przebadanych małych elementów z defektami jest trudna lub prawie niemożliwa do powtórzenia z taką samą efektywnością w dużych elementach, które występują w budownictwie.

Ważnym zagadnieniem poruszonym w niniejszej dysertacji są również problemy związane z rozwiązaniem odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła. Naukowcy do ich rozwiązania stosują różnego rodzaju metody. Knupp i in. [80] oraz Naveira-Cotta i in. [126] z powodzeniem stosowali algorytm Markov Chain Monte Carlo (MCMC) do wyznaczania parametrów cieplnych badanej próbki materiału. Należy zwrócić uwagę, że badany element był z materiału jednorodnego (płytką bakelitową) i nie posiadał defektów, co znacznie upraszcza metodykę badawczą. W pracy Bison i in. [16] rozwiązano odwrotne zagadnienie przewodzenia ciepła dla cienkiej aluminiowej oraz stalowej płytki o zmiennej grubości (od 0,39 mm do 0,78 mm). Często wykorzystywane są również sztuczne sieci neuronowe. Jedną z pierwszych prac na ten temat przedstawili Saintey i Almond [149]. Oszacowali oni wymiary defektów wielkości kilku milimetrów z błędami nieprzekraczającymi 12 %. Inne prace wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe to np. [36]. W artykule Qiu i in. [141] skutecznie wykorzystali termografię aktywną z pobudzeniem laserowym do wyznaczenia parametrów cieplnych próbek niemetalicznych. W innej pracy autorstwa Youcef i in. [199] autorzy wyznaczyli opór cieplny przegrody budowlanej. Badany model przegrody składał się z elementu betonowego, pustki powietrznej oraz materiału termoizolacyjnego. Powierzchnię pobudzono cieplnie przez 90 min przy użyciu 24 halogenów (każdy o mocy 20 W). Opór cieplny R badanej przegrody był oszacowany z błędem około 20 % w stosunku do wartości obliczonej analitycznie.

Referaty konferencyjne

Jedną z większych na świecie konferencji o tematyce termowizyjnej, która zrzesza głównie praktyków jest cykliczna konferencja InfraMation organizowana w USA przez znany na całym świecie ośrodek szkoleniowy Infrared Training Center (ITC). Wśród referatów konferencyjnych można znaleźć publikacje dotyczące badań z użyciem termografii aktywnej, również w ujęciu budowlanym. W referacie autorstwa Scotta i Krugera [152] opisano badania masywnego elementu betonowego o wymiarach 2,5 x 2,8 m z wtrąceniami styropianowymi wielkości od 25 do 50 cm zagłębionymi na 3 różnych głębokościach: 5 cm, 7,5 cm oraz 10 cm. Betonowy blok był ogrzewany energią Słońca (okres badawczy maj-czerwiec 2013 roku w Południowej Afryce). Wszystkie wtrącenia były możliwe do zlokalizowania na podstawie otrzymanych termogramów. Kontrasty termiczne wskazujące na występowanie defektów osiągały wartości nawet ponad 8 °C. Na uwagę zasługuje jednak fakt, że zamodelowane wtrącenia były bardzo dużych rozmiarów w stosunku do całego elementu co niewątpliwie ułatwiało ich lokalizację. Autorzy sugerują, że przy wykorzystaniu do pobudzenia cieplnego promieni słonecznych najlepsze kontrasty termiczne (najwyższe) można uzyskać podczas późnego poranka oraz wczesnego popołudnia (w godzinach 11:00 – 13:00) w momencie maksymalnego natężenia promieniowania słonecznego (około południa). Na przestrzeni kilkunastu lat podczas konferencji InfraMation opublikowano również inne prace związane

z tematyką poruszaną w niniejszej dysertacji, do ciekawszych prac można zaliczyć: Tarin i Rotolante [168] (różne rodzaje termografii aktywnej w badaniach materiałów kompozytowych), kolejna praca Scott i Kruger [153] oraz Shepard [156] (termowizja impulsowa).

Jak już wspomniano wcześniej, najbardziej docenianą w środowisku, międzynarodową konferencją zrzeszającą naukowców z zakresu badań termowizyjnych, jest niewątpliwie konferencja Quantitative InfraRed Thermography (QIRT). W publikacjach konferencyjnych można odszukać wiele cennych referatów zagranicznych autorów dotyczących badań materiałów z zastosowaniem termowizji aktywnej. Szczególnie wartościowe są prace dotyczące elementów masywnych i zastosowań budowlanych: lokalizacja prętów zbrojeniowych w żelbecie z pobudzeniem cieplnym mikrofalami, Brachelet i in. [17] (możliwa lokalizacja prętów o średnicy 12 mm – nie podano grubości otuliny); badania fresków w budownictwie historycznym, Grinzato [49], Bendada i in. [15]; szukanie defektów w dużych elementach betonowych ogrzewanych długim ciągłym źródłem ciepła, Brink i in. [19], Arndt i in. [5] (ogrzewanie przez 12 minut); francuscy badacze Ibos i in. [70] użyli termowizji aktywnej do oszacowania oporu cieplnego przegrody budowlanej; badania delaminacji połączenia betonu z taśmami FRP badali Grinzato i in. [50], którzy z sukcesem zastosowali termowizję aktywną do lokalizacji defektów w badanych połączeniach. Inne prace dotyczące stosowania termowizji aktywnej do badań taśm wzmacniających przedstawili Corvaglia i in. [31], Corvalia i Largo [32], Cantini i in [23] (badanie jakości połączeń taśm FRP z murem ceglany) czy Maierhofer i in [101] (przebadano wiele wariantów rozmiarów defektów i ich położenia). W pracy Nahant i in. [125] badano możliwość detekcji pęknięć w elemencie betonowym oraz lokalizacji w nim wtrąceń materiałowych w postaci obszarów wypełnionych kruszywem. Wykazano, że ogrzewanie statyczne (w jednym miejscu) powoduje niejednorodne nagrzanie powierzchni i utrudnia detekcję wtrąceń. Dobre efekty dała również metoda ogrzewania powierzchni bezpośrednim promieniowaniem słonecznym. W pracy zwrócono uwagę na największą wadę badań termowizją aktywną: problem szybkiego przebadania dużych powierzchni, tj. powyżej kilkuset m². Lokalizowanymi defektami może być również woda zawarta w materiale. Takimi badaniami zajmowali się Vavilov i in. [183]. Z powodzeniem zbadali oni możliwość detekcji wody uwięzionej w materiale o strukturze plastra miodu. Do pobudzenia cieplnego używali lampy LED, halogenów oraz ciepłego nadmuchu powietrza. Naukowcy oprócz badań laboratoryjnych przeprowadzali również pomiary terenowe: Maierhofer i in. [102] badali mury zamkowe, zabytkowe kolumny, okładziny granitowe oraz betonowe mosty, inne prace dotyczące badań terenowych to np. artykuły Maio i in [106] czy Cannard i in. [22] (badania betonowych mostów). W pracach konferencyjnych były również publikowane wyniki prac badawczych prowadzonych w NASA z zastosowaniem termowizji aktywnej do badań kompozytów materiałowych [46]. Badania defektów w warstwie termoizolacyjnej w postaci pustek powietrznych, pocienień izolacji lub wtrąceń materiałowych prowadzili Candore i in. [21]. W pracy Krankenhagen i in. [82] zbadano możliwość detekcji pustki powietrznej pod 16 milimetrową warstwą materiału (lokalizacja miejsc odspojenia tynku). Stwierdzono, że różnice w grubościach pustki od 0 do 6 mm wykazują bardzo małe różnice w pomiarze wartości temperatury na powierzchni. Termowizja aktywna jest również z powodzeniem stosowana w przemyśle lotniczym do nieniszczących badań poszycia samolotów (Ullmann i in. [173], Schmidt i in.[151]), gdzie poszukiwanymi wadami są

rozwarstwienia w materiale poszycia. Thiemann i in. [172] dzięki zastosowaniu przesuwanych lusterek, które odbijają promieniowanie cieplne, wskazują że możliwe jest szybkie badanie dużych powierzchni kadłubów samolotów i sprawne zautomatyzowanie procesu detekcji defektów. W pracy konferencyjnej autorstwa Richter i in. [143] z powodzeniem wykorzystano metodę Echo Defect Shape (EDS) do oszacowania geometrii szukanego defektu. Wykorzystując pobudzenie cieplne pochodzące od Słońca w pracy Lai i Poon [89] lokalizowali głębokość występowania defektów (od 2,8 do 20,3 mm) w blokach betonowych o grubości 100 mm z dokładnością do około 15%. Największa część prac dotyczy oczywiście elementów małogabarytowych (najczęściej stalowych z nawierconymi defektami) o wymiarach kilkunastu cm i grubości kilkunastu mm, w których zamodelowane wtrącenia są bardzo dobrze widoczne i łatwe do zlokalizowania na podstawie zaburzonego pola rozkładu temperatury na termogramach: Hedayati Vahid i in. [59] (różny materiał z nawierceniami) Mihai i in [117] Roche i in [144] (porównanie kilku metod badawczych⁹). Nowatorskie podejście do opisywanych badań przedstawiono w pracy Altenburg i in. [4], którzy szacując grubość cienkiej warstwy materiału polimerowego (0,1 – 4,1 mm) wykonywali jednocześnie badania w trybie odbiciowym¹⁰ jak i transmisyjnym¹¹. Otrzymali oni błędy bezwzględne obliczonych grubości materiałów nieprzekraczających kilku procent. W innej pracy autorstwa Halloua i in [57] naukowcy wykorzystując sieci neuronowe wyznaczyli głębokość występowania defektu z dokładnością do 3% (defekty płytkie na głębokości 3 – 5 mm). Ciekawe zestawienia dotyczące historii konferencji QIRT oraz porównanie różnych metod badawczych można znaleźć w pracach Balageasa [11], Balageas i in [12].

Inna konferencja, na łamach której można znaleźć interesujące prace naukowe to World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT) gdzie np. w pracy Dillenz i in. [39] autorzy zaprezentowali wyniki badań z użyciem metody Lock-in przy lokalizacji wtrąceń w cienkich płytkach ze stali oraz włókna szklanego (wtrącenia kilku milimetrowe); na dużych stalowych elementach przeprowadził badania Štarman i Matz [158], którzy zaprezentowali stanowisko pomiarowe do wykrywania pęknięć z wykorzystaniem prądów wirowych do ogrzewania badanych elementów. W pracy przedstawiono algorytm do automatycznej lokalizacji defektów. Niemieccy i austriaccy naukowcy w swojej pracy Rothbart i in [146] zaprezentowali metodę termowizji błyskowej (flash thermography)¹². Badane próbki (grubości kilku milimetrów) były wykonane ze stali, aluminium, miedzi oraz włókien CFRP. Defekty w postaci nawierceń na różną szerokość były dobrze widoczne na termogramach. Wynika to przede wszystkim z bardzo małych grubości badanych elementów. Autorzy stwierdzają, że na wyniki ma również bardzo duży wpływ rodzaj materiału jednorodnego, w którym występują defekty.

⁹ Porównano ze sobą wyniki dla metod: Thermographic Signal Reconstruction (TSR), Principal Component Thermography (PCT), Pulse Phase Thermography (PPT) oraz High Order Statistics (HOS).

¹⁰ Tryb odbiciowy (reflective mode) – źródło pobudzenia cieplnego i kamera termowizyjna znajdują się po tej samej stronie badanego elementu / badanej powierzchni

¹¹ Tryb transmisyjny (transmission mode) – źródło pobudzenia cieplnego i kamera termowizyjna znajdują się po przeciwnych stronach badanego elementu / badanej powierzchni

¹² Metoda polegająca na pobudzeniu cieplnym za pomocą błysku mocnego światła, o długości kilku milisekund.

Książki

W światowej literaturze możemy również znaleźć kilka pozycji książkowych o zbliżonej tematyce poruszanej w niniejszej pracy. Jedną z pierwszych książek wskazujących na możliwości stosowania termografii aktywnej w badaniach materiałowych była praca kanadyjskiego badacza Maldague [108]. W pracy zbiorowej pod red. Maierhofer, Reinhardt i Dobman [28] w rozdziale 17 zostały opisane procedury prowadzenia badań z użyciem termowizji aktywnej elementów żelbetowych. Wskazano na możliwości łączenia termowizji aktywnej z innymi metodami badawczymi. Przeprowadzone badania umożliwiły detekcję prętów stalowych pod 10, 15 i 20 mm warstwą betonu. W pracy pokazano również przeprowadzone prace pomiarowe w terenie. W innej pozycji książkowej autorstwa Lüthiego [94] w rozdziale 3 szeroko opisano rodzaje oraz metody badawcze z użyciem termowizji aktywnej, gdzie skupiono się na analizie termogramów dla przypadków niewielkich wtrąceń materiałowych. W podsumowaniu wskazano na ograniczenie stosowania termowizji aktywnej jedynie dla przypadków z prostą geometrią badanego elementu i braku możliwości uzyskania pełnego obrazu 3D (w 3 wymiarach) badanej struktury materiału. Pozycja książkowa Breitenstein i in. [18] szczegółowo porusza badania z użyciem metody termowizji aktywnej typu Lock-in. W książce opisano tę metodę pod względem stosowania jej w badaniach urządzeń elektronicznych oraz materiałowych.

Prace doktorskie

W 2000 roku opracowano pracę doktorską na temat określenia głębokości położenia defektów na podstawie analizy termogramów z użyciem sztucznych sieci neuronowych (Darabi [35]). Dowiedziono, że przedstawiona metoda badawcza lokalizuje defekty w taśmach CFRP do głębokości 3 mm z błędem nie większym niż kilkanaście procent. Jedną z pierwszych prac doktorskich, która dotyczyła bezpośrednio termowizji aktywnej, opracowano w Kanadzie. Autorem tej pracy był Clemente Ibarra Castanedo [64]. Autor poruszał w niej zagadnienie lokalizacji defektów podpowierzchniowych w płytach stalowych o grubości do 6,5 mm oraz taśmach CFRP (blisko powierzchni badanego elementu). Do badania użyto próbek niewielkich rozmiarów (kilka mm) ze stali, aluminium i plexiglasu oraz krótkiego impulsu do pobudzenia cieplnego próbek. Dla tych niewielkich próbek z małymi defektami wykazano, że zaproponowana metoda badawcza (Discrete Fourier Transform – DFT) do analizy fazogramów pozwala na lokalizację tych defektów. W roku 2010 we Francji obroniono pracę dotyczącą badania elementów żelbetowych przy użyciu termowizji aktywnej z pobudzeniem indukcyjną elektromagnetyczną. Dwa lata później również we Francji powstała ciekawa dysertacja, która opisywała badania doświadczalne całych przegród budowlanych, (Khaled [25]). W celu przeprowadzenia eksperymentu zbudowano prostopadłościenną stanowisko badawcze o wymiarach 3 x 3 x 3 m. Przebadano różnego rodzaju materiały murowe, a źródłem ciepła była energia pochodząca od promieniowania słonecznego. W pracy tej przebadano również zbudowane w laboratorium modele przegród o grubości 6,5 cm, które ogrzewano lampami halogenowymi. Kolejną pracą doktorską z zakresu detekcji defektów w elementach żelbetowych przy użyciu termografii aktywnej, jest praca autorstwa chorwackiego badacza Milovanovica [118] z 2013 roku. Milovanovic w swojej pracy zbadał elementy żelbetowe o wymiarach 50 x 50 x 10 cm. Element był pobudzany lampą o mocy 1 kW. Wtrącenia były wykonane ze styropianu i położone od 1 do 4 cm od badanej powierzchni, najmniejsze

wtrącenie było średnicy 30 mm a największe 150 mm. Przebadane elementy przedstawiono na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Budowa przebadanych betonowych elementów w doktoracie Milovanovicia [118] i ułożenie wtrąceń styropianowych w ich wnętrzu

Na uzyskanych termogramach można było łatwo zlokalizować defekty. W przypadku największych wtrąceń były również dobrze widoczne ich kształty. Wpływ na dobrą widoczność wtrąceń miała niewątpliwie ich duża powierzchnia w stosunku do całego elementu (im większe wtrącenie w stosunku do całego badanego elementu tym jest ono łatwiejsze do zlokalizowania). Głębokości położenia defektów zostały oszacowane z błędami w zakresie 0,2 – 34 % (w zależności od kształtu wtrącenia, rodzaju betonu, sposobu ogrzewania i rzeczywistej głębokości zalegania).

Jedną z nowszych prac doktorskich zajmującą się termografią aktywną jest praca z roku 2016, autorstwa Hiasa [60]. W doktoracie podjęto próbę lokalizacji defektów w elementach betonowych używanych w mostownictwie. W pracy tej przeprowadzono badania eksperymentalne zarówno w terenie jak i w laboratorium. Wtrącenia o grubości 3 mm były położone 1,27 cm pod powierzchnią betonowej próbki o wymiarach około 1 x 1 m i grubości ponad 20 cm. Zamodelowane wtrącenia symulowały występowanie delaminacji w strukturze przypowierzchniowej materiału. Próbki były ogrzewane energią promieniowania słonecznego, pomiary termowizyjne wykonywano w różnych porach dnia i przy różnych prędkościach wiatru. W ramach doktoratu zbudowano również mobilne stanowisko badawcze do prowadzenia pomiarów terenowych polegających na badaniu całych istniejących mostów żelbetowych.

2.2. Podsumowanie aktualnego stanu wiedzy

W niniejszym rozdziale zostały przedstawione prace autorów polskich oraz zagranicznych, związane tematycznie z niniejszą dysertacją. Wszystkie przytoczone artykuły w czasopiśmie, referaty konferencyjne, książki, doktoraty oraz inne publikacje poruszają temat lokalizacji i identyfikacji defektów w materiałach przy użyciu termografii aktywnej. W podsumowaniu aktualnego stanu wiedzy niewątpliwie należy przytoczyć cenne pozycje literaturowe jakimi są artykuły przeglądowe. Zestawienia aktualnych badań¹³, które dotyczą elementów żelbetowych można znaleźć w pracy Milovanovicia i Pecura [119]. Vavilov podsumował i opisał ograniczenia metody termowizyjnej w badaniach nieniszczących z uwagi

¹³ Stan na październik 2015 roku wg przytoczonej publikacji (data otrzymania artykułu przez czasopismo).

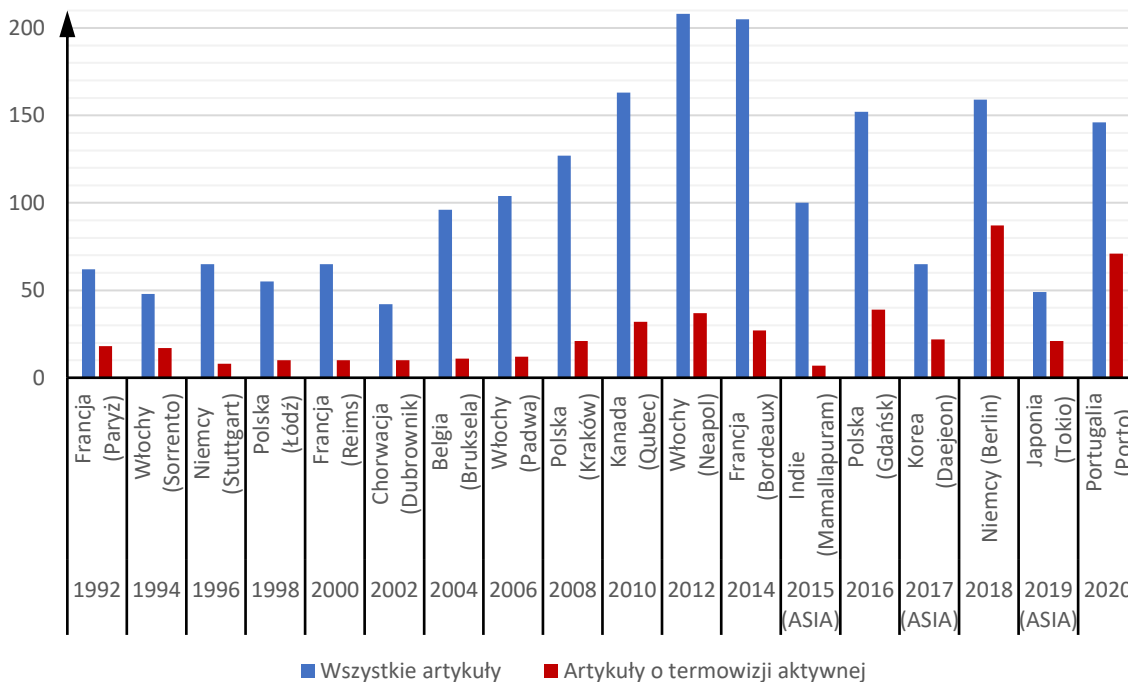
na zakłócenia [177], w innej pracy Vavilov i Burleigh [181] dokonali przeglądu światowego dorobku w badaniach przy użyciu termografii aktywnej, opisali wdrożone komercyjne systemy pomiarowe oraz wskazali na wady i zalety poszczególnych metod badawczych. Inne prace przeglądowe podsumowujące badania z użyciem termografii aktywnej i wskazujące na najnowsze trendy w tej metodzie badawczej to np.: Vavilov [178] i Umar i in. [174] (wibrotermografia). W pracy Cotic i in. [33] stwierdzili, że w elementach betonowych defekty mogą być skutecznie lokalizowane podczas analizy kontrastów temperaturowych do głębokości $0,9 D$ przy średnicy defektu równym D , a przy analizie kontrastów fazowych głębokości detekcji defektów wzrastają do $1,3 D$.

Pojawiły się również pierwsze próby standaryzacji badań z użyciem termografii aktywnej. Grupa badawcza w niemieckim ośrodku BAM zaproponowała stosowanie referencyjnej próbki stalowej do badań z pobudzeniem lampą błyskową (Maierhofer i in. [100]) oraz opracowała metodykę przeprowadzania takich badań (Maierhofer i in. [104]).

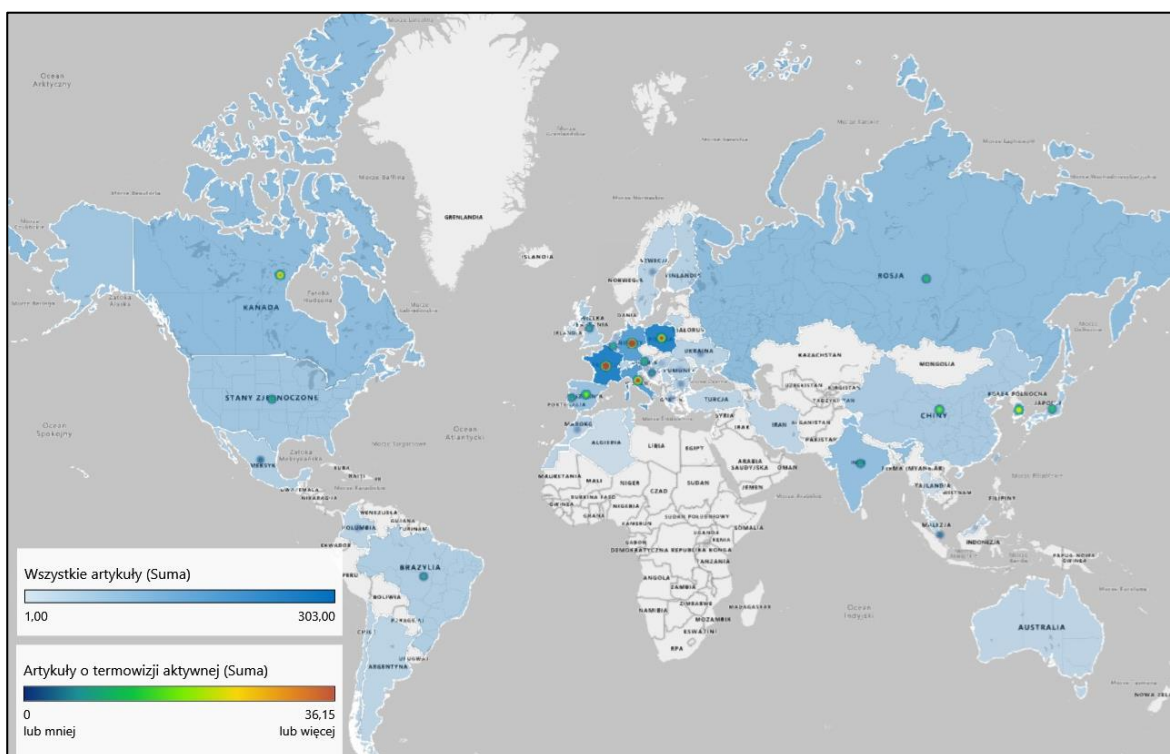
Analizę publikacyjną z uwzględnieniem kraju pochodzenia autorów artykułów można dokonać na podstawie opublikowanych prac na konferencji QIRT. Jest to największa, najbardziej rozpoznawalna i najbardziej prestiżowa konferencja o tematyce termowizyjnej. Analizy dokonano na podstawie dostępnych online prac opublikowanych na konferencji QIRT w latach 1992 – 2020. W przypadku wielu autorów jednej pracy, pochodzenie artykułu przypisywano do kraju pochodzenia pierwszego wymienionego autora. Liczba publikowanych artykułów w kolejnych latach konferencji przedstawiono na rys. 2.5. W początkowym okresie organizacji konferencji (lata 1992 – 2002) publikowano około 50 prac naukowych w tym po kilka/kilkanaście artykułów dotyczących termografii aktywnej. Wzrost zainteresowania konferencją można zauważyć od roku 2004. Najwięcej prac, bo aż ponad 200, opublikowano w latach 2012 – 2014.

Od roku 2015 rozpoczęto organizację konferencji QIRT Assia, która odbywa się zawsze na terenie Azji. Obie konferencje organizowane są cyklicznie co 2 lata, QIRT w lata parzyste, natomiast QIRT Assia w lata nieparzyste. Analizując wykres (rys. 2.5.) można zauważyć, że wzrasta zainteresowanie wykorzystania badań termowizyjnych w pracach naukowych badaczy z całego świata. Od roku 2010 wzrosła również liczba publikowanych prac z zakresu termowizji aktywnej, a od roku 2018 blisko połowa prac naukowych dotyczy już termowizji aktywnej. Na rys. 2.6. przedstawiono kraj pochodzenia autorów publikowanych prac.

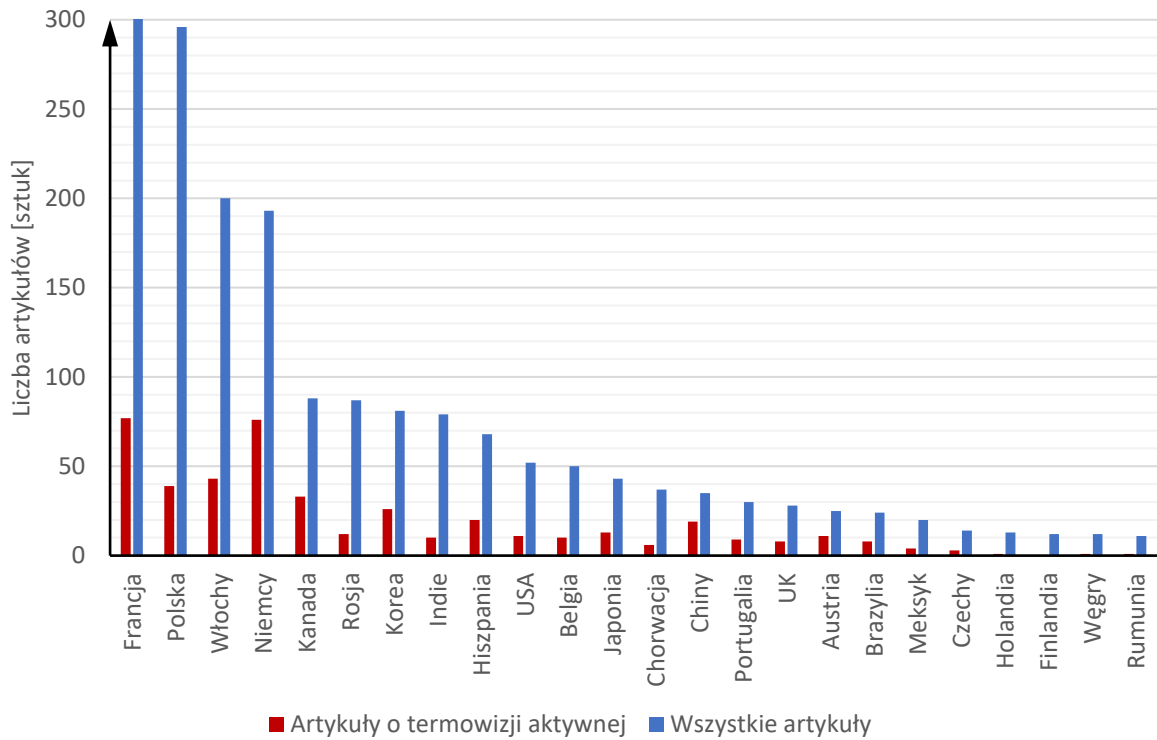
Można zauważyć, że prace naukowe z zakresu termowizji są prowadzone praktycznie na całym świecie, artykuły są nadsyłane ze wszystkich kontynentów świata. Najbardziej aktywnie publikują naukowcy z Europy, następnie Ameryki Północnej, Azji, Ameryki Południowej, Afryki i Australii. Łączna liczba opublikowanych prac na konferencji QIRT w latach 1992 – 2020 z podziałem na kraj pochodzenia autora została zobrazowana na rys. 2.7.



Rys. 2.5. Liczba opublikowanych prac na konferencji QIRT w latach 1992 – 2020, z uwzględnieniem wszystkich prac (dostępnych online) oraz tych dotyczących termowizji aktywnej; na osi poziomej zaznaczono kolejne lata organizacji konferencji wraz z podaniem ich lokalizacji: kraj (miasto) (opracowanie własne)



Rys. 2.6. Narodowości autorów prac naukowych publikowanych na konferencji QIRT; im ciemniejszy kolor niebieski tym więcej prac z danego państwa; kolorowe punkty pokazują liczbę prac z zakresu termowizji aktywnej (opracowanie własne)



Rys. 2.7. Łączna liczba opublikowanych prac na konferencji QIRT w latach 1992 – 2020 (opracowanie własne)

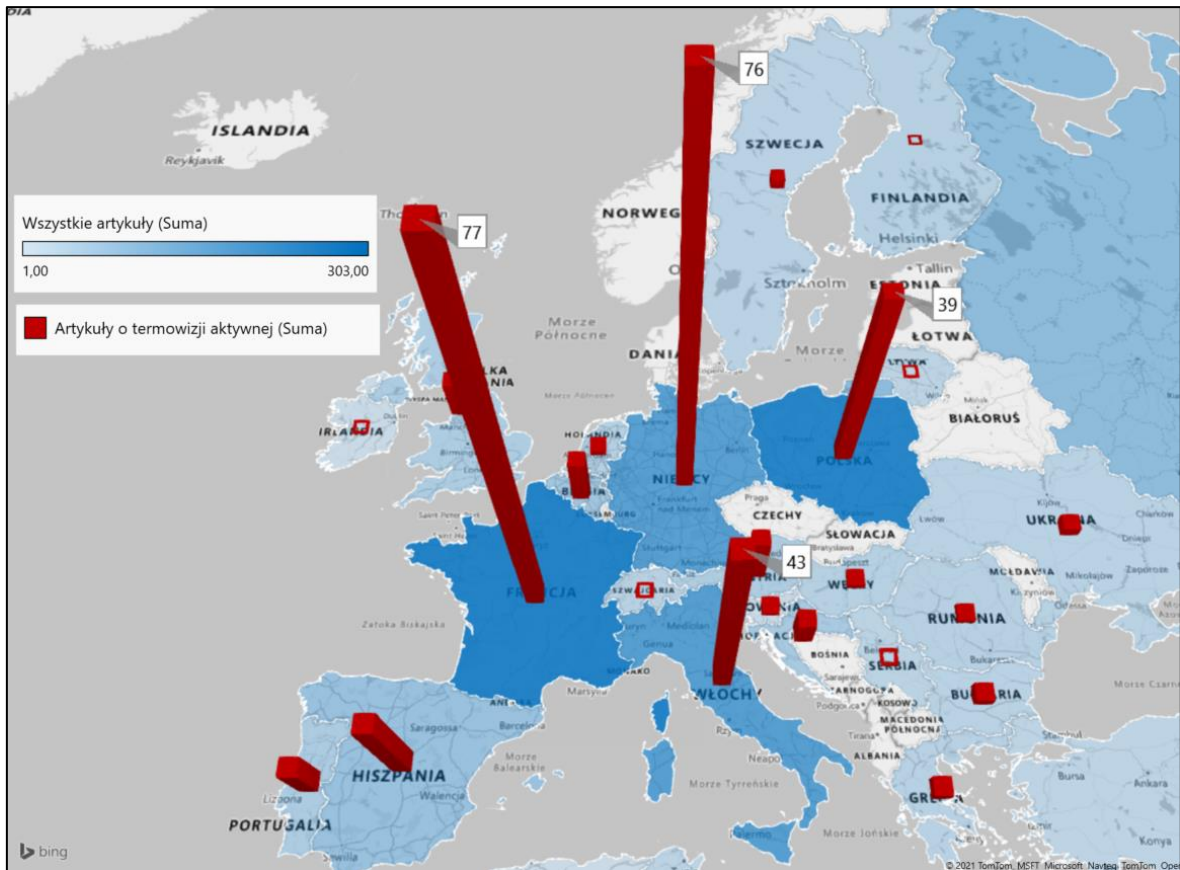
Szczegółowe liczby opublikowanych prac z uwzględnieniem nawet pojedynczych artykułów przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Szczegółowe liczby artykułów z poszczególnych państw (sumy w latach 1992 – 2020)

LP	Kraj	Artykuły o termowizji	Artykuły o termowizji aktywnej
1	Francja	303	77
2	Polska	296	39
3	Włochy	200	43
4	Niemcy	193	76
5	Kanada	88	33
6	Rosja	87	12
7	Korea	81	26
8	Indie	79	10
9	Hiszpania	68	20
10	USA	52	11
11	Belgia	50	10
12	Japonia	43	13
13	Chorwacja	37	6
14	Chiny	35	19
15	Portugalia	30	9
16	UK	28	8
17	Austria	25	11

18	Brazylia	24	8
19	Meksyk	20	4
20	Czechy	14	3
21	Holandia	13	1
22	Finlandia	12	0
23	Węgry	12	1
24	Rumunia	11	1
25	Grecja	10	2
26	Singapur	8	4
27	Tajwan	8	1
28	Ukraina	8	2
29	Maroko	7	2
30	Szwecja	7	2
31	Bułgaria	6	2
32	Szwajcaria	6	0
33	Chile	4	0
34	Izrael	4	0
35	Kolumbia	4	2
36	Serbia	4	0
37	Argentyna	3	0
38	Malezja	3	1
39	Tunezja	3	0
40	Australia	2	0
41	Iran	2	0
42	Litwa	2	0
43	Turcja	2	0
44	Algieria	1	0
45	Buthan	1	0
46	Cypr	1	0
47	Irlandia	1	0
48	Słowenia	1	1
49	Tajlandia	1	0
50	Tokio	1	0
SUMA:		1901	460

Najwięcej prac pochodzi z Francji, Polski, Włoch oraz Niemiec. W przypadku tematyki dotyczącej termowizji aktywnej najwięcej prac prowadzą Francuzi oraz Niemcy. Z poza Europy wiele ciekawych prac badawczych jest prowadzonych w Kanadzie, Stanach Zjednoczonych, Rosji, Indiach, Korei, Chinach, Japonii i Brazylii. Dokładniejszą sytuację publikowanych prac z Europy pokazano na rys. 2.8.



Rys. 2.8. Liczba publikowanych prac na konferencji QIRT z Europy (opracowanie własne)

Jak można zauważyć na podstawie publikacji artykułów na konferencji QIRT, polscy naukowcy są jedną z licznie publikujących grup naukowych na świecie, którzy zajmują się badaniami termowizyjnymi oraz badaniami z użyciem termowizji aktywnej. W tabeli 2.2. podano tytuły wybranych prac naukowych prowadzonych przez badaczy z różnych jednostek naukowych znajdujących się na terenie Polski. Prace zostały ułożone w sposób chronologiczny.

Tabela 2.2. Prace naukowe z zakresu termowizji i termowizji aktywnej prowadzone na terenie Polski z podaniem miasta i uczelni, z której pochodzili autorzy; kolejność prac wg roku ich powstania

1	2	3	4	5	6
Rok	Miasto	Uczelnia	Nazwiska	Tytuł	Źródło
2003	Warszawa	CIOP-PIB	Owczarek, Gralewicz	Lokalizacja defektów materiałowych z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego	[137]
2004	Łódź	Politechnika Łódzka	Więcek, Gralewicz, Owczarek	Wykrywanie korozji - metoda badań nieniszczących w podczerwieni	[190]
2005	Gliwice	Politechnika Śląska	Wawrzynek, Nowak, Bartoszek, Deplak	Determine thermal properties of cementitious materials	[186]
2006	Łódź	Politechnika Łódzka	Więcek, Poksińska	Passive and active thermography application for architectural monuments	[191]
2008	Warszawa	IPPT PAN	Maj, Olifieruk, Wysocka	Relation between defect depth and standard thermal contrast on the steel surface in pulsed thermography	[107]

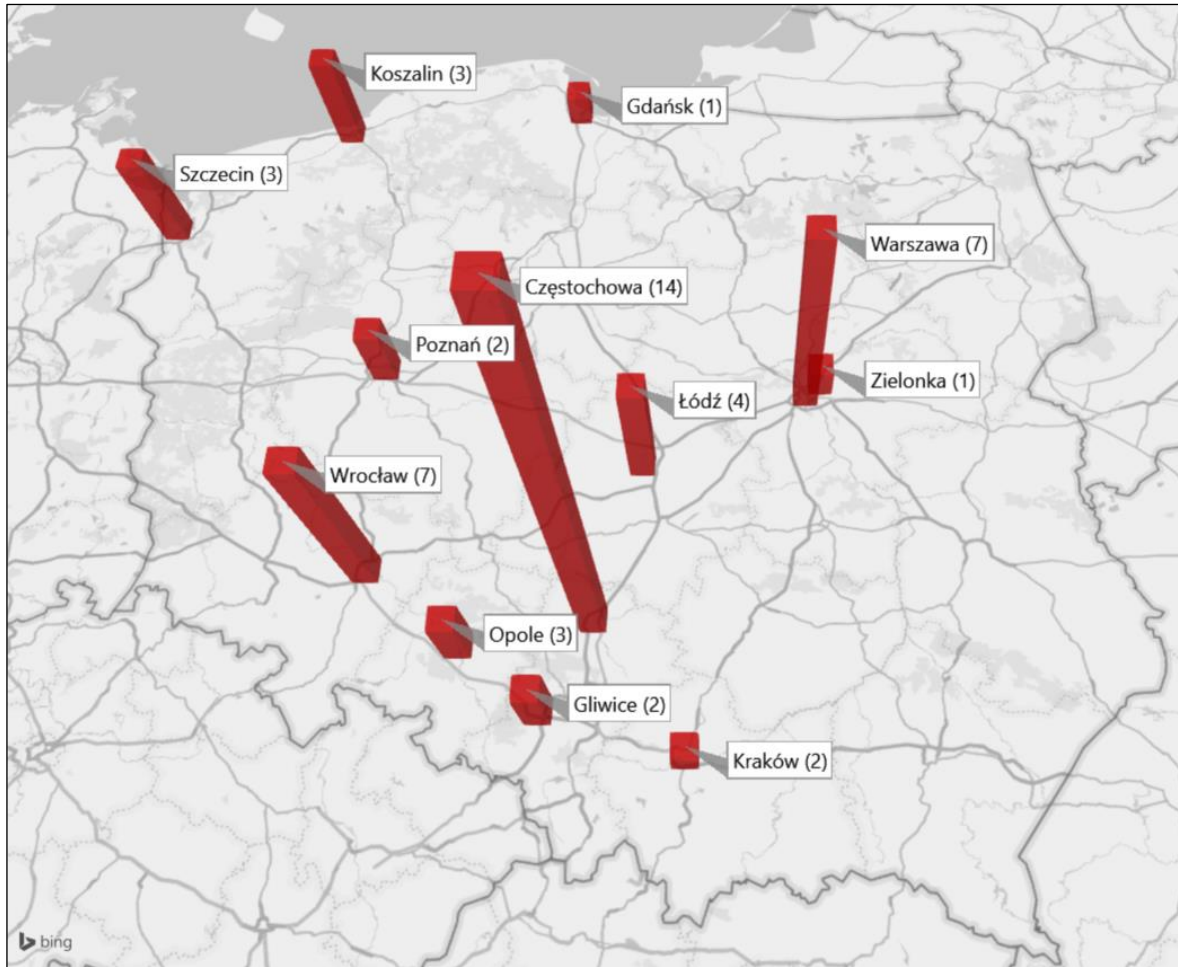
AKTUALNY STAN WIEDZY

2008	Warszawa	IPPT PAN	Oliferuk	Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałowych	[135]
2009	Warszawa	IPPT PAN	Wysocka-Fotek, Oliferuk, Maj	Use of pulse ir thermography for detection and quantitative description of subsurface defects in austenitic steel	[196]
2009	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Minkina, Dudzik	Termografia w podczerwieni - błędy i niepewności	[122]
2009	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Minkina, Dudzik	Infrared Thermography Errors and Uncertainties	[123]
2010	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Gryś, Minkina	Kontrast filtrowany w charakteryzacji wad materiałowych metodą aktywnej termografii	[53]
2010	Wrocław	Politechnika Wrocławska	Nowak, Kucypera	Application of Active Thermography for Detecting Material Defects in the Building Envelope	[131]
2010	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Gryś, Minkina	Filtered thermal contrast – error analysis	[55]
2010	Gdańsk	Politechnika Gdańska	Bajorek, Nowakowski	Analysis of the possibility of defect determination using cold excitation in thermal tomography	[8]
2011	Koszalin	Politechnika Koszalińska	Suszyński, Bednarek	Zastosowanie funkcji korelacji do detekcji niejednorodności cieplnych struktur warstwowych metodą aktywnej termografii impulsowej	[161]
2011	Koszalin	Politechnika Koszalińska	Suszyński, Kosikowski	Termografia aktywna w trybie pobudzenia optycznego i konwekcyjnego	[162]
2011	Poznań	Politechnika Poznańska	Ziopaja, Pozorski, Garstecki	Damage detection using thermal experiments and wavelet transformation	[200]
2011	Łódź	Politechnika Łódzka	Więcek, De Mey	Termowizja w podczerwieni - podstawy i zastosowania	[189]
2011	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Minkina	Wybrane problemy współczesnej termografii i termometrii w podczerwieni	[120]
2011	Warszawa	IPPT PAN	Wysocka-Fotek	Szacowanie wielkości i położenia defektów podpowierzchniowych za pomocą impulsowej termografii podczerwieni	[195]
2011	Kraków	Politechnika Krakowska	Wróbel, Wróbel, Kisilewicz	Zastosowanie termografii do ilościowej oceny parametrów cieplnych budynków	[193]
2012	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Gryś	Analysis of Temperature-rise of the Material Surface over Hidden Defect Thermally Stimulated in Active Thermography	[52]
2012	Warszawa	IPPT PAN	Wysocka-Fotek, Oliferuk, Maj	Reconstruction of size and depth of simulated defects in austenitic steel plate using pulsed infrared thermography	[197]
2012	Wrocław	Politechnika Wrocławska	Nowak	Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie	[130]
2013	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Dudzik, Minkina	Dwuetapowy algorytm wyznaczania głębokości defektów z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej	[45]

2013	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Chudzik, Minkina	Koncepcja wykorzystania metody termofalowej oraz pomiarów termowizyjnych do wyznaczania parametrów cieplnych materiałów termoizolacyjnych	[29]
2013	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Dudzik	Ocena wpływu błędu określania emisyjności powierzchni na błąd wyznaczania głębokości defektu z zastosowaniem termografii aktywnej i sztucznej sieci neuronowej	[41]
2013	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Gryś, Minkina	Wyznaczanie granic defektów podpowierzchniowych metodą aktywnej termografii - badania modelowe	[54]
2013	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Dudzik	Analysis of the accuracy of a neural algorithm for defect depth estimation using PCA processing from active thermography data	[42]
2013	Koszalin	Politechnika Koszalińska	Suszyński	Termografia aktywna: modele, metody pomiaru i przetwarzanie obrazów termograficznych	[159]
2013	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Dudzik	Wyznaczanie głębokości defektów materiałowych z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej i sztucznych sieci neuronowych	[44]
2013	Szczecin	ZUT	Szymanik	Zastosowanie aktywnej termografii podczerwonej ze wzbudzeniem mikrofalowym do wykrywania niemetalicznych min lądowych	[164]
2014	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Gryś, Vokorokos, Borowik	Size determination of subsurface defect by active thermography – Simulation research	[51]
2014	Warszawa	IPPT PAN	Oliferuk, Kosiński, Kochanowski, Adamowicz	Inverse problem in determining the thermal diffusivity of materials by means of pulsed IR thermography	[136]
2014	Wrocław	Politechnika Wrocławska	Nowak, Noszczyk	Lokalizacja wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych za pomocą termografii aktywnej	[132]
2015	Częstochowa	Politechnika Częstochowska	Dudzik	Two-stage neural algorithm for defect detection and characterization uses an active thermography	[43]
2015	Wrocław	Politechnika Wrocławska	Nowak, Noszczyk	Applying active thermography in the non-destructive investigation of historical objects	[133]
2015	Wrocław	Politechnika Wrocławska	Nowak, Noszczyk	Application of the active IR thermography for the detection of non-uniformity of materials in building partitions	[134]
2016	Szczecin	ZUT	Szymanik, Frankowski, Chady	Detection and Inspection of Steel Bars in Reinforced Concrete Structures Using Active Infrared Thermography with Microwave Excitation and Eddy Current Sensors	[165]
2016	Szczecin	ZUT	Szymanik, Lopato, Psuj	Coupled Active Thermography and Terahertz Technique in Composite Materials Defects' Evaluation	[166]

2016	Opole	Politechnika Opolska	Marynowicz	Determination of thermal properties of porous building material by infrared thermography	[113]
2016	Opole	Politechnika Opolska	Marynowicz	Transient Infrared Measurement of Laser Absorption Properties of Porous Materials	[115]
2016	Gliwice	Politechnika Śląska	Kurpiński, Fidali	Application of active thermography methods to defect detection of bounded joints	[85]
2016	Zielonka	Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia	Świdorski, Hłosta, Chuda-Kowalska	Non-destructive evaluation of sandwich plates by an ultrasonic IR thermographic method	[163]
2016	Wrocław	Politechnika Wrocławska	Noszczyk, Nowak	Termografia aktywna jako nowoczesna metoda badań elementów żelbetowych	[128]
2017	Poznań	Politechnika Poznańska	Różański, Ziopaja	Detection of material defects in reinforced concrete slab using active thermography	[147]
2017	Łódź	Politechnika Łódzka	Więcek	Termografia i spektrometria w podczerwieni. Zastosowania przemysłowe	[188]
2019	Wrocław	Politechnika Wrocławska	Noszczyk, Nowak	Inverse Contrast in Non-Destructive Materials Research by Using Active Thermography	[127]
2019	Opole	Politechnika Opolska	Marynowicz	Wyznaczanie cieplnych właściwości materiałów budowlanych przy wykorzystaniu techniki termowizyjnej	[114]
2020	Kraków	Politechnika Krakowska	Tejedor, Barreira, Freitas, Kisilewicz, Nowak-Dzieszko, Berardi	Impact of stationary and dynamic conditions on the U-value measurements of heavy-multi leaf walls by quantitative IRT	[169]

Na podstawie tabeli 2.2. sporządzono rys. 2.9., na którym pokazano liczbę prac badawczych prowadzonych w poszczególnych jednostkach naukowych na terenie Polski. Najbardziej rozwinięty ośrodek badawczy (w zakresie prowadzenia badań z użyciem termografii aktywnej) znajduje się na Politechnice Częstochowskiej. Liczne prace z tematyki termowizji aktywnej są również prowadzone w IPPT PAN w Warszawie, na Politechnice Wrocławskiej, Politechnice Łódzkiej, Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technicznym w Szczecinie, Politechnice Koszalińskiej oraz kilku innych jednostkach badawczych.

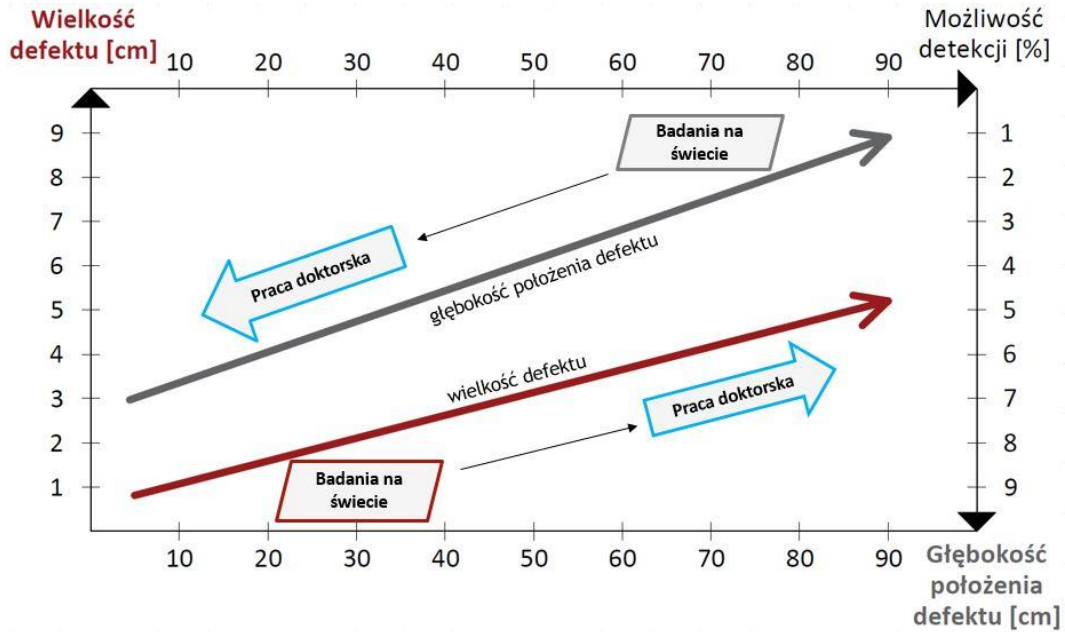


Rys. 2.9. Szacunkowe liczby prowadzonych prac badawczych (napisanych artykułów) z zakresu termowizji aktywnej w badaniach materiałowych (opracowanie własne)

Dokonując krytycznej analizy literatury przedmiotu można stwierdzić, że pomimo znacznego wzrostu zainteresowania termowizją aktywną, większość badaczy podejmuje prace eksperymentalne na próbkach niewielkich rozmiarów (tj. do kilkunastu mm grubości). Badania z użyciem termowizji aktywnej na małych elementach są łatwiejsze i dają lepsze wyniki tj. większe kontrasty temperaturowe pomiędzy przekrojami z defektami a przekrojami bez defektów. Badania materiałowe w cienkich elementach są już z sukcesem wdrożone np. do przemysłu lotniczego. Powstaje natomiast problem badania elementów masywnych (np. przegród budowlanych), których badań podejmuje się niewiele naukowców. Badania z użyciem termografii aktywnej próbek dużych (grubości do kilkunastu centymetrów) trwają bardzo długo, a uzyskane termogramy są o niższych kontrastach temperaturowych. W przejściu z badań próbek małych na próbki duże pojawia się efekt skali. W takich badaniach jest problem z równomiernym ogrzaniem badanego elementu, dostarczeniem odpowiedniej ilości energii do przekroju, znalezieniem optymalnego czasu nagrzewu i rodzaju źródła pobudzenia. Jedną z nielicznych grup badawczych, która podejmowała próby badań elementów dużych są naukowcy z niemieckiego instytutu naukowego BAM, skupieni wokół osoby Christiane Maierchofer.

Po dokonaniu przeglądu literatury zauważono luki badawcze, które mogą zostać wypełnione. Do tej pory nie przeprowadzono badań za pomocą termografii aktywnej, w odniesieniu do:

- a) **elementów dużych**, które swoją konstrukcją przypominają modele **lekkich przegród** budowlanych,
- b) elementów żelbetowych o **kształcie belki/słupa**, z różną grubością otuliny betonowej oraz różną średnicą zbrojenia,
- c) wykonywania **długiego** czasu rejestracji termogramów podczas stygnięcia badanego elementu masywnego (do kilkunastu godzin od momentu wyłączenie źródła nagrzewu),
- d) zbadania wpływu **czasu nagrzewu** na otrzymywane kontrasty termiczne (możliwości detekcji wtrąceń materiałowych w badanych elementach ciężkich),
- e) zbadania wpływu **odległości** pobudzenia cieplnego od badanej powierzchni na występowanie kontrastów termicznych (możliwości detekcji wtrąceń materiałowych),
- f) zbadania wpływu **mocy** źródła ciepła (długiego impulsu cieplnego) na możliwości lokalizacji defektów w badanych przekrojach,
- g) zbadania wpływu **usytuowania** źródła pobudzenia (rozkładu lamp grzejnych) względem badanej powierzchni na możliwości lokalizacji defektów,
- h) opracowania **metodyki badań** przegród budowlanych z użyciem termowizji aktywnej do **nieniszczącej** oceny struktury materiałowej badanego elementu,
- i) badań termowizją aktywną dla wtrąceń o **różnych** parametrach cieplnych,
- j) badań z użyciem termowizji aktywnej z jednoczesną rejestracją wartości temperatury **wewnątrz** badanego elementu,
- k) **jakościowej** oceny lokalizacji wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych jedynie na podstawie otrzymanych rozkładów pól temperatury na powierzchni,
- l) obliczeń **ilościowych** mających na celu określenie **głębokości** zalegania wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych,
- m) badań **ilościowych** mających na celu określenie **parametrów** cieplnych wtrąceń materiałowych występujących w przegrodach budowlanych,
- n) wykonania badań doświadczalnych z **jednoczesną** rejestracją termogramów w trybie **refleksyjnym** i trybie **transmisyjnym**.



Rys. 2.10. Schematyczny wykres możliwości lokalizacji defektów w zależności od wielkości defektu oraz głębokości jego położenia pod badaną powierzchnią – tendencje badań światowych (opracowanie własne)

Uogólniając, można stwierdzić, że większość prowadzonych prac badawczych na świecie dotyczy elementów niewielkich rozmiarów (do kilkunastu mm grubości) z płytko położonymi defektami, co ułatwia ich lokalizację (rys. 2.10.). W niniejszej pracy doktorskiej podjęto próbę wypełnienia „białych plam” w nauce poprzez prowadzenie badań metodą termowizji aktywnej w dużych i masywnych próbkach jakimi są przegrody budowlane i elementy konstrukcyjne.

ROZDZIAŁ 3

3. TEZY

W niniejszej pracy przedmiotem badań metodą termografii aktywnej są elementy dużych rozmiarów. Element duży w pracy został zdefiniowany jako element, którego wymiary wynoszą ponad 1,0 x 1,0 m oraz grubość ponad 5 cm – elementy powierzchniowe (modele przegród budowlanych) lub element, którego szerokość w przekroju wynosi ponad 5 cm – element konstrukcyjny typu belka/słup. W literaturze przedmiotu nie znaleziono wielu prac, które podejmują tematykę badania elementów o takich dużych wymiarach/grubościach w ujęciu budowlanym.

Dla przyjętej definicji elementu dużego oraz na podstawie przeprowadzonego krytycznego przeglądu literatury przedmiotu, postawiono pięć tez.

1. Nieniszczące badania przy użyciu termografii aktywnej impulsowej **umożliwiają identyfikację** wtrąceń materiałowych położonych głębiej niż ich grubość w dużych elementach budowlanych.
2. Zastosowanie termografii aktywnej impulsowej umożliwia **lokalizację prętów** zbrojeniowych w słupach żelbetowych.
3. Możliwe jest określenie **wymiarów** lokalizowanych wtrąceń materiałowych w lekkich przegrodach budowlanych z zastosowaniem termografii aktywnej impulsowej - rozwiązanie zagadnienia odwrotnego przewodzenia ciepła.
4. Możliwe jest określenie **głębokości** położenia pod badaną powierzchnią lokalizowanych wtrąceń materiałowych w dużych elementach budowlanych z zastosowaniem termografii aktywnej impulsowej - rozwiązanie zagadnienia odwrotnego przewodzenia ciepła.
5. **Czas** pobudzenia cieplnego, jego **moc** oraz **usytuowanie** źródła pobudzenia względem badanego dużego elementu budowlanego wpływają na możliwość detekcji wtrąceń materiałowych w tych elementach.

ROZDZIAŁ 4

4. TEORETYCZNE ASPEKTY ZAGADNIENIA

W tym rozdziale pracy zostały poruszone zagadnienia teoretyczne, które są ogólnie znane w literaturze przedmiotu. Cały obszar tematyki przepływu ciepła, promieniowania podczerwonego, jego detekcji oraz analizy otrzymanych danych jest bardzo obszerny i rozległy. Nie sposób jest przytoczyć wszystkie podstawy teoretyczne opisanych powyżej zagadnień w jednej pracy, dlatego niniejszy rozdział dotyczyć będzie jedynie najważniejszych kwestii, które bezpośrednio łączą się z tematem rozprawy doktorskiej. Bardziej szczegółowe i szerzej opisane podstawy teoretyczne można znaleźć w licznej literaturze przedmiotu: termodynamika i przepływ ciepła [24]; promieniowanie podczerwone [150]; detekcja promieniowania podczerwonego [121]; analiza i przetwarzanie obrazu [160]; odwrotne zagadnienia przewodzenia ciepła [72].

4.1. Podstawy przepływu ciepła

4.1.1. Rodzaje przekazywania ciepła

Ilość ciepła (wielkość fizyczna) rozumiana jest, jako ilość energii zmagazynowanej wewnątrz ciała (układu) odpowiadająca sumie energii kinetycznej ruchu wszystkich cząstek w tym ciele (układzie). Ciepło jest procesem przekazywania tej energii z jednego ciała (układu) do drugiego ciała (układu). Temperatura jest natomiast wielkością fizyczną, która określa średnią energię kinetyczną ruchu wszystkich cząsteczek zawartych w ciele (układzie). Proces przekazywania ciepła odbywa się zawsze od ciała cieplejszego (o wyższej temperaturze) w kierunku ciała chłodniejszego (o niższej temperaturze). Powyższe trzy definicje: ciepła, ilości ciepła oraz temperatury; są podstawą do dalszych rozważań na temat badań zawartych w tej pracy.

Podstawowym warunkiem przekazywania ciepła pomiędzy dwoma ośrodkami (ciałami) jest występowanie różnicy temperatur pomiędzy nimi. Ciepło może być przekazywane na 3 różne sposoby, za pomocą zjawiska:

- przewodzenia (kondukcja),
- konwekcji (unoszenie),

- promieniowania (radiacja).

Przewodzenie ciepła – polega na przekazywaniu energii na skutek ruchu cząsteczek i ich wzajemnym zderzeniach. Im ciało ma wyższą temperaturę (większa średnia energia kinetyczna cząsteczek) tym cząsteczki w tym ciele poruszają się szybciej. Przewodzenie ciepła może zachodzić zarówno w ciałach stałych, cieczech jak i gazach.

Konwekcja cieplna – polega na przenoszeniu ciepła na skutek unoszenia się masy płynu. Może ona zachodzić w cieczech lub gazach. Wyróżnić można konwekcję naturalną (swobodną), w której ruch płynu jest samoczynny oraz konwekcję wymuszoną, w której ruch płynu wywołany jest czynnikiem zewnętrznym.

Promieniowanie cieplne – polega na przekazywaniu energii poprzez promieniowanie elektromagnetyczne emitowane z poruszających się cząsteczek. Promieniowanie cieplne nie wymaga ośrodka pomiędzy ciałami i może zachodzić w próżni. Każde ciało o temperaturze powyżej zera bezwzględnego wypromieniowuje ciepło ze swojej powierzchni.

W rzeczywistych warunkach wszystkie 3 sposoby przekazywania ciepła w ciałach występują równocześnie i przenikają się wzajemnie. W różnych zjawiskach udział procentowy poszczególnych sposobów przekazywania ciepła może być różny, a niektóre z nich mogą być nawet pomijalnie małe.

4.1.2. Parametry fizyczno-cieplne

Z uwagi na prowadzony zakres badań metodą termowizji aktywnej, ograniczono się do wymiennienia wybranych parametrów fizyczno – cieplnych materiałów budowlanych. Wymienione poniżej właściwości mają zasadniczy wpływ na wymianę ciepła w materiałach i przegrodach budowlanych, a tym samym na rozkład pola temperatury podczas pomiarów termowizyjnych.

Do **podstawowych** właściwości materiałów budowlanych wpływających na wymianę ciepła tych materiałów z otoczeniem można zaliczyć takie parametry jak:

Gęstość objętościowa (pozorna), ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] – masa jednostki objętości materiału suchego wraz z zawartymi w niej porami w stanie naturalnym¹⁴, oblicza się ze wzoru:

$$\rho_o = \frac{m_s}{V_o} \quad (4.1)$$

gdzie: ρ_o – gęstość objętościowa, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 m_s – masa suchej próbki materiału, [kg],
 V_o – jednostkowa objętość materiału w stanie naturalnym, [m^3].

¹⁴ Stan naturalny rozumiany jest jako pokojowe warunki otoczenia tj. temperatura powietrza około 20°C oraz wilgotność względna na poziomie około 50 %. W pracy założono, że pomiary były wykonywane w warunkach otoczenia, które nie wpływały na zmiany parametrów fizyczno – cieplnych badanych materiałów i przegród budowlanych (wahania warunków laboratoryjnych i terenowych zawierały się w przedziale temperatur 0 – 30°C, badane przegrody były ogrzewane na powierzchni maksymalnie do około 100°C).

Wilgotność materiału, w [%] – zawartość swobodnej wody niezwiązanej chemicznie w materiale, określa stosunek masy tej wody zawartej w materiale do masy suchego materiału, oblicza się ze wzoru:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad (4.2)$$

gdzie: m_w – masa próbki materiału w stanie wilgotnym, [kg],
 m_s – masa próbki materiału w stanie suchym, [kg].

Ciepło właściwe, c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] – określa ilość ciepła, jaka jest potrzebna do ogrzania 1 kg masy danego materiału o 1 K (pod stałym ciśnieniem), oblicza się ze wzoru:

$$c_p = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \quad (4.3)$$

gdzie: ΔQ – ilość dostarczonej energii cieplnej, [J], [W·s],
 m – masa ciała, [kg],
 ΔT – zmiana temperatury ciała, [K].

Objętościowa pojemność cieplna, C_v [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$] – określa ilość ciepła, jaka jest potrzebna do ogrzania danej objętości materiału o 1 K; iloczyn ciepła właściwego danego materiału i jego gęstości pozornej, oblicza się ze wzoru:

$$C_v = c_p \cdot \rho_o \quad (4.4)$$

gdzie: c_p – ciepło właściwe, [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ_o – gęstość objętościowa, [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Współczynnik przewodzenia ciepła, λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] – określa ilość ciepła, która w warunkach ustalonych przepływa w ciągu 1 s prostopadle przez 1 m^2 płaskiej ścianki wykonanej z jednorodnego materiału o grubości 1 m i różnicy temperatury na obu powierzchniach 1 K, oblicza się ze wzoru:

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{F \cdot (t_1 - t_2) \cdot t} \quad (4.5)$$

gdzie: Q – ilość ciepła przepływająca przez materiał, [J], [W·s],
 d – grubość materiału, [m],
 F – pole powierzchni, prostopadłe do kierunku przepływu ciepła, [m^2],
 T_1 – temperatura na powierzchni materiału po stronie napływu ciepła, [K],
 T_2 – temperatura na powierzchni materiału po stronie odpływu ciepła, [K],
 t – czas przepływu ciepła przez materiał, [s].

Do dodatkowych parametrów cieplnych, które można obliczyć na podstawie powyższych podstawowych właściwości materiałowych, możemy zaliczyć:

Dyfuzyjność cieplna (współczynnik wyrównywania temperatury), a [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] – współczynnik ten jest miarą stopnia zależności temperatury w punkcie położonym wewnątrz materiału od zmiany temperatury na jego powierzchni, oblicza się go ze wzoru:

$$a = \frac{\lambda}{\rho_o \cdot c_p} \quad (4.6)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ_o – gęstość objętościowa, [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 c_p – ciepło właściwe, [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Efuzyjność cieplna (aktywność cieplna), e [$\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{-1/2}$] – współczynnik ten jest miarą stopnia zależności temperatury powierzchni materiału od zmian gęstości strumienia ciepła na tej powierzchni, oblicza się ze wzoru:

$$e = \sqrt{\lambda \cdot \rho_o \cdot c_p} \quad (4.7)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ_o – gęstość objętościowa, [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 c_p – ciepło właściwe, [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Opór cieplny, R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] – jest to stosunek grubości warstwy materiału do współczynnika przewodzenia ciepła, oblicza się go ze wzoru:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (4.8)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 d – grubość materiału, [m^3].

Podczas wykonywania badań termowizyjnych, a w szczególności przy użyciu techniki termowizji aktywnej, niezbędna jest znajomość kilku dodatkowych parametrów materiałowych związanych z promieniowaniem cieplnym:

Współczynnik absorpcyjności (pochlaniańca), a [-] – jest to stosunek strumienia energii promieniowania cieplnego pochłonięta przez ciało do padającego strumienia energii na ciało, oblicza się ze wzoru:

$$a = \frac{\Phi_a}{\Phi} \quad (4.9)$$

gdzie: Φ_a – strumień energii promieniowania cieplnego pochłonięty przez ciało, [W],
 Φ – strumień energii promieniowania cieplnego padający na ciało, [W].

Współczynnik refleksyjności (odbicia), r [-] – jest to stosunek strumienia energii promieniowania cieplnego odbitego od ciała do padającego strumienia energii na ciało, oblicza się ze wzoru:

$$r = \frac{\Phi_r}{\Phi} \quad (4.10)$$

gdzie: Φ_r – strumień energii promieniowania cieplnego odbitego od ciała, [W],
 Φ – strumień energii promieniowania cieplnego padający na ciało, [W].

Współczynnik przepuszczalności (transmisyjności), p [-] – jest to stosunek strumienia energii promieniowania cieplnego przepuszczonego przez ciało do padającego strumienia energii na ciało, oblicza się ze wzoru:

$$p = \frac{\Phi_p}{\Phi} \quad (4.11)$$

gdzie: Φ_p – strumień energii promieniowania cieplnego przepuszczonego przez ciało, [W],
 Φ – strumień energii promieniowania cieplnego padający na ciało, [W].

Zgodnie z prawem Kirchhoffa pomiędzy wzorami (4.9) – (4.11) zachodzi zależność:

$$a + r + p = 1 \quad (4.12)$$

Dla materiałów nieprzeziernych współczynnik przepuszczalności $p = 0$, a wzór (4.12) przyjmuje postać:

$$a + r = 1 \quad (4.13)$$

Współczynniki (a , r , p) są bezwymiarowe i zawierają się w przedziale $\langle 0;1 \rangle$. W przypadku ciał rzeczywistych (ciała szare) wymienione współczynniki nie mogą osiągać wartości granicznych tj. 0 i 1. Najważniejszy parametr powierzchni materiału podczas badań termowizyjnych, który mocno wpływa na uzyskane rezultaty pomiaru wartości temperatury to:

Współczynnik emisyjności (emisyjność), ε [-] – jest to stosunek natężenia promieniowania powierzchni rozpatrywanego ciała do promieniowania powierzchni ciała doskonale czarnego w tej samej temperaturze. Parametr ten określa zdolność ciała do wypromieniowywania ciepła ze swojej powierzchni, oblicza się go ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{W}{W_b} \quad (4.14)$$

gdzie: W – natężenie promieniowania powierzchni rozpatrywanego ciała, [-],
 W_b – natężenie promieniowania powierzchni ciała czarnego w tych samych warunkach co ciała rozpatrywanego, [-].

Współczynnik emisyjności dla ciał szarych przyjmuje wartości w przedziale (0;1). Parametr ten charakteryzuje właściwości promienne powierzchni ciała i zależy od wielu czynników¹⁵. Istnieją różne rodzaje współczynnika emisyjności¹⁶: monochromatyczna (dla wybranej długości fali promieniowania), panchromatyczna (dla całego widma promieniowania), normalna (promieniowanie prostopadłe do powierzchni), kierunkowa (promieniowanie dla wybranego kierunku) i półsferyczna (promieniowanie z powierzchni płaskiej do półsfery). Wartość współczynnika emisyjności jest równa wartości współczynnika absorpcyjności (zdolność powierzchni danego materiału do absorbowania promieniowania ciepłego jest równa zdolności do wypromieniowywania ciepła z tej powierzchni). Dlatego też w badaniach termowizyjnych wzór (4.13) przyjmuje postać:

$$\varepsilon + r = 1 \quad (4.15)$$

Więcej o rodzajach współczynnika emisyjności oraz czynnikach na niego wpływających można znaleźć w pracach [121], [150].

W literaturze przedmiotu można spotkać jeszcze jeden istotny parametr, który wstępnie może pomóc w ocenie możliwości detekcji defektu w materiale podczas badań metodą termografii aktywnej [108]:

Współczynnik niedopasowania termicznego (ang. thermal mismatch factor), $\Gamma_{mat,def}$ [-] – jest on rozumiany jako miara zróżnicowania właściwości termicznych materiału bazowego próbki i materiału defektu. Parametr ten przyjmuje wartości w zakresie od -1 do +1. Jest to podstawowy warunek wykrywalności wad metodą termografii aktywnej, parametr ten zwany jest również współczynnikiem odbicia ciepłego, oblicza się go ze wzoru:

$$\Gamma_{mat,def} = \frac{e_{def} - e_{mat}}{e_{def} + e_{mat}} \quad (4.16)$$

gdzie: e_{def} – współczynnik efuzyjności ciepłej defektu, [$J \cdot m^{-2} \cdot K \cdot s^{-1/2}$],
 e_{mat} – współczynnik efuzyjności ciepłej materiału, w którym znajduje się szukany defekt [$J \cdot m^{-2} \cdot K \cdot s^{-1/2}$].

¹⁵ Czynniki te są np.: długość fali promieniowania, temperatura powierzchni, kierunek emisji, rodzaj ciała, stan fizyczny powierzchni oraz skład chemiczny. Dla materiałów budowlanych w warunkach otoczenia przyjęto w pracy, że współczynnik emisyjności jest niezmienny (dla danej powierzchni i konkretnego kąta jej obserwacji).

¹⁶ W pracy, gdy jest mowa o emisyjności powierzchni oznacza to emisyjność panchromatyczną półsferyczną (zwaną również emisyjnością całkowitą).

W tabeli 4.1. zestawiono wpływ poszczególnych parametrów na przepływ ciepła w materiale – na rozkład pola temperatury podczas badań termowizyjnych. W ostatniej kolumnie opisano efekt zwiększania lub zmniejszania się parametru na powstające zjawiska cieplne w materiałach. Ograniczono się jedynie do opisu zjawisk w ciałach stałych – materiałach budowlanych, które są przedmiotem niniejszej rozprawy. Opisane zjawiska są ogólnie znane i nie wynikają one z przeprowadzonych badań doświadczalnych.

Tabela 4.1. Wpływ parametrów fizyczno-cieplnych na przepływ ciepła w materiale

LP	Parametr	Oznaczenie	Jednostka	Wpływ na przepływ ciepła
1	Gęstość objętościowa	ρ_o	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Im jest większa tym większa jest pojemność cieplna materiału.
2	Wilgotność materiału	w	[%]	Im większa tym większa jest przewodność cieplna materiału (λ) oraz ciepło właściwe (c_p).
3	Ciepło właściwe	c_p	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Im jest większe tym większa jest pojemność cieplna materiału.
4	Objętościowa pojemność cieplna	C_v	$[\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]$	Im jest większa tym większa jest bezwładność termiczna materiału (wolniej się ogrzewa i wolniej stygnie).
5	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Im jest większy tym ilość energii cieplnej przewodzona przez materiał jest większa.
6	Dyfuzyjność cieplna	a	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Im jest większa tym temperatura wewnątrz materiału silniej zależy od zmian temperatury powierzchni.
7	Efuzyjność cieplna	e	$[\text{W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$	Im jest większa tym temperatura powierzchni słabiej zależy od zmian gęstości strumienia cieplnego na tej powierzchni.
8	Opór cieplny	R	$[\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$	Im jest większy tym ilość energii cieplnej przewodzona przez materiał jest niższa.
9	Współczynnik absorpcyjności	α	[-]	Im większy tym materiał jest w stanie zaabsorbować więcej promieniowania cieplnego.
10	Współczynnik refleksyjności	r	[-]	Im większy tym materiał jest w stanie odbić więcej promieniowania cieplnego.

11	Współczynnik przepuszczalności	p	$[-]$	Im większy tym materiał jest w stanie przepuścić więcej promieniowania cieplnego.
12	Współczynnik emisyjności	ε	$[-]$	Im większy tym materiał jest w stanie wyemitować więcej promieniowania cieplnego.
13	Współczynnik niedopasowania termicznego	$\Gamma_{mat,def}$	$[-]$	Im parametr jest bliższy wartości granicznych (-1 i +1) tym lepsze zróżnicowanie termiczne materiału badanego i zawartego w nim defektu (łatwiej wykryć defekt).

4.1.3. Modelowanie zjawiska przepływu ciepła

Wykonane badania doświadczalne były prowadzone dla charakterystycznych materiałów budowlanych, tj. o znacząco różniącym się współczynniku przewodzenia ciepła. Podczas pobudzania cieplnego badanych elementów budowlanych był wymuszany nieustalony przepływ ciepła przez te materiały. Głównym czynnikiem determinującym rozkład pola temperatury na powierzchni i wewnątrz badanych przegród było zjawisko przewodzenia ciepła. Podstawą stworzenia opisu modelu przepływu ciepła w stanie nieustalonym w materiałach stałych jest równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych, tj. *równanie Fouriera*, uzupełnione równaniami przejmowania ciepła przez konwekcję i przez promieniowanie. Zakładając wartość współczynnika przewodzenia ciepła, jako stałą i niezależną od temperatury¹⁷ (zagadnienie liniowe) oraz brak wewnętrznych źródeł ciepła, *równanie Fouriera* przyjmuje postać:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho_o \cdot c_p} \nabla^2 \cdot T = a \cdot \nabla^2 \cdot T \quad (4.17)$$

gdzie: T – temperatura, [K],
 t – czas, [s],
 λ – współczynnik przewodzenia ciepła, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ_o – gęstość objętościowa, [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 c_p – ciepło właściwe, [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 $\nabla^2 T$ – laplasjan temperatury,
 a – dyfuzyjność ciepła, [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Podczas prowadzonych eksperymentów badane modele przegród i elementów budowlanych były omywane przez otaczające je rozgrzane powietrze. W wyniku tego procesu

¹⁷ W pracy założono niezależną od temperatury wartość współczynnika przewodzenia ciepła z uwagi na niewielkie nagrzewanie badanych elementów (zjawisko liniowe), tj. maksymalnie do temperatury około 100°C.

występowała konwekcja swobodna (naturalna). Gęstość strumienia ciepłego przejmowanego przez konwekcję na styku warstwy powietrza i badanego ciała stałego wyznacza się ze wzoru:

$$q_c = h_c \cdot (t_p - t_s) \quad (4.18)$$

gdzie: q_c – gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez konwekcję, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 h_c – współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 t_p – temperatura powietrza w dużej odległości od ciała stałego, [K],
 t_s – temperatura powierzchni ciała stałego, [K].

Prostota równania (4.18) jest pozorna. Bardzo trudnym zadaniem jest poprawne wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła przez konwekcję, który zależy od bardzo wielu czynników, np. kształtu i chropowatości powierzchni, termofizycznych właściwości powietrza, jego temperatury, ciśnienia, gęstości, lepkości, charakteru przepływu. W niniejszym opracowaniu zastosowano uproszczoną metodę wyznaczenia tego parametru ze wzoru¹⁸:

$$h_c = 1,53 \cdot (\Delta t)^{1/3} \quad (4.19)$$

gdzie: h_c – współczynnik przejmowania ciepła na badanej powierzchni, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 Δt – różnica temperatury powietrza w pomieszczeniu i na powierzchni ściany, [K].

Trzecim sposobem przekazywania ciepła jest promieniowanie. Gęstość radiacyjnego strumienia ciepła emitowanego przez powierzchnię (energia wypromieniowywana) oblicza się ze wzoru:

$$q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (4.20)$$

gdzie: q_r – gęstość radiacyjnego strumienia ciepła, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 ε – współczynnik emisyjności powierzchni, [-],
 σ – stała Stefana-Boltzmana, równa $5,6694 \cdot 10^{-8}$, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$],
 T^4 – temperatura powierzchni ciała, [K].

Wzór (4.20) znany jest jako prawo Stefana-Boltzmana dla ciał szarych¹⁹. W rzeczywistości, każde ciało posiada temperaturę wyższą od zera bezwzględnego, a więc wszystkie ciała, nieprzerwanie wypromieniowują energię cieplną ze swojej powierzchni, w kierunku innych powierzchni. Wszystkie powyższe sposoby wymiany ciepła zachodzą w przyrodzie równocześnie, mówimy wtedy o *złożonej wymianie ciepła*.

¹⁸ Wzór podawany w literaturze [130], dla przypadku przejmowania ciepła przez ścianę od strony pomieszczenia – warunek spełniony w przeprowadzanych eksperymentach, gdzie pominięto wpływ prędkości ruchu powietrza/wiatru (stanowiska badawcze znajdowały się wewnątrz budynku).

¹⁹ Opis ciała szarego oraz współczynnika emisyjności został podany w poprzednim podrozdziale dotyczącym parametrów fizyczno-cieplnych.

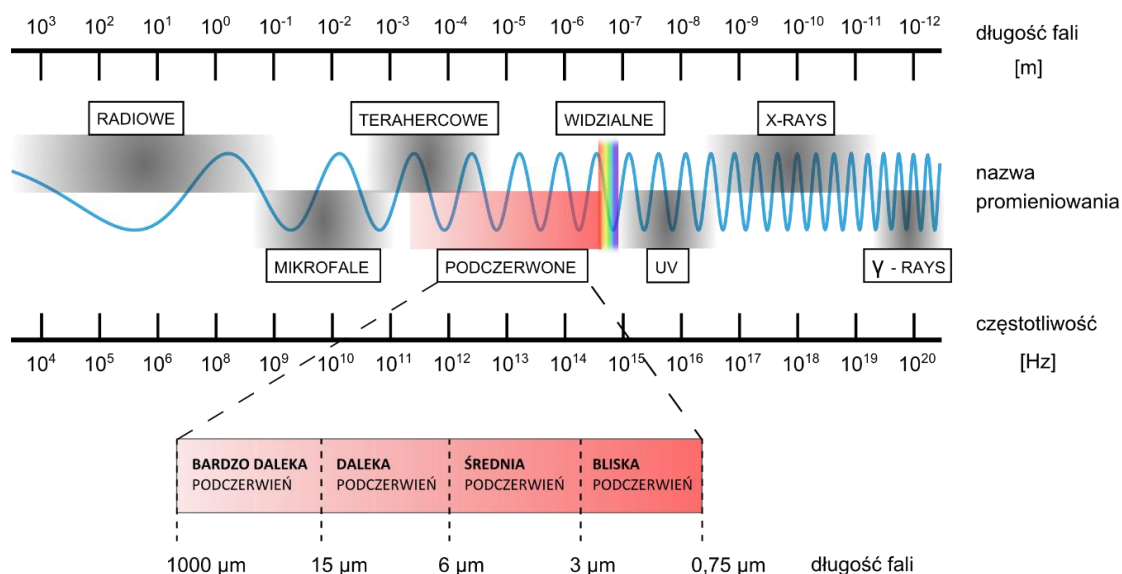
4.2. Pomiar termowizyjny

4.2.1. Promieniowanie podczerwone

Promieniowanie ciepłe, zwane również promieniowaniem podczerwonym zostało odkryte w roku 1800 przez Williama Herschela. Jest to promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali w zakresie od $0,75 \mu\text{m}$ do $1000 \mu\text{m}$ ²⁰. Umownie promieniowanie podczerwone można podzielić na 4 podzakresy:

- bliska podczerwień ($0,75 - 3,0 \mu\text{m}$);
- średnia podczerwień ($3,0 - 6,0 \mu\text{m}$)
- daleka podczerwień ($6,0 - 15,0 \mu\text{m}$)
- bardzo daleka podczerwień ($15,0 - 1000,0 \mu\text{m}$)

Podział całego zakresu promieniowania elektromagnetycznego i umiejscowienia w nim promieniowania podczerwonego²¹ pokazano na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Podział całego widma promieniowania elektromagnetycznego z podziałem na podzakresy dla promieniowania podczerwonego

Każde ciało emituje ze swojej powierzchni promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie promieniowania podczerwonego. Największa część energii promieniowania podczerwonego emitowana jest w zakresie długości fali od około $1,0 \mu\text{m}$ do około $14,0 \mu\text{m}$ ²². W pozostałych długościach fali promieniowania podczerwonego przenoszona energia jest pomijalnie mała. Energia przenoszona przez podczerwień może być rejestrowana za pomocą kamer termowizyjnych działających w różnych zakresach długości fal

²⁰ Są to wartości orientacyjne, ponieważ nie ma na sztywno postawionej granicy pomiędzy długościami fal elektromagnetycznych – granice są płynne. W literaturze możemy spotkać inne, zbliżone zakresy długości fali w podczerwieni oraz różne podziały na podzakresy.

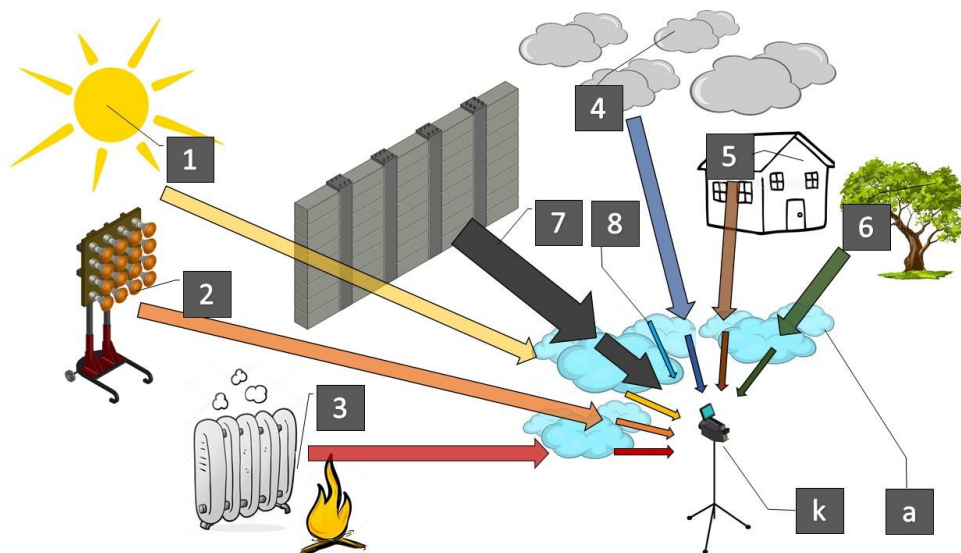
²¹ Podane wartości długości fali pomiędzy poszczególnymi zakresami są płynne i mogą się w niewielkim stopniu różnić od siebie w literaturze – podobnie jak przy podziale promieniowania podczerwonego na podzakresy.

²² Zgodnie z prawem Plancka.

podczerwonych. Najczęściej spotyka się kamery termowizyjne rejestrujące promieniowanie podczerwone w zakresach długości fali od 2,0 do 5,0 μm – promieniowanie podczerwone krótkofalowe (SW – ang. *Short Wave Bands*) oraz w zakresie 8,0 – 14,0 μm – promieniowanie długofalowe (LW – ang. *Long Wave Band*)²³. Dla temperatur występujących podczas przeprowadzanych eksperymentów na potrzeby niniejszej pracy doktorskiej tj. temperatury od około 10°C do 100°C prawie 100% energii promieniowania podczerwonego była przenoszona w zakresie 8,0 – 13,0 μm ²⁴, pozostały zakres długości fali przynosił pomijalnie małą część energii cieplnej.

4.2.2. Metodyka pomiaru termowizyjnego

Kluczowym zagadnieniem w niniejszej pracy było poprawne przeprowadzenie pomiaru termowizyjnego. Rejestracja promieniowania podczerwonego przez kamerę termowizyjną jest złożonym procesem, na który wpływa bardzo wiele czynników zewnętrznych. Źródła promieniowania podczerwonego, które docierają podczas jego rejestracji do kamery termowizyjnej pokazano na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Ilustracja przykładowych źródeł promieniowania podczerwonego docierającego do kamery termowizyjnej, zakłócających pomiar termowizyjny: 1 – naturalne źródło promieni słonecznych; 2 – sztuczne źródło ciepła wykorzystywane w termografii aktywnej do pobudzenia cieplnego, np. promienniki podczerwieni; 3 – dodatkowe sztuczne niekontrolowane źródła ciepła np. grzejniki; 4 – promieniowanie nieboskłonu; 5 – dodatkowe promieniowanie od przegród i budynków wokół badanego obiektu; 6 – dodatkowe promieniowanie od otoczenia; 7 – promieniowanie własne z powierzchni badanego obiektu oraz promieniowanie odbite całego otoczenia (całe otoczenie: oznaczenia od 1-6); 8 – promieniowanie własne powietrza pomiędzy kamerą a badanym objektem; k – kamera termowizyjna; a – atmosfera pomiędzy kamerą termowizyjną a badanym objektem, która pochłania część promieniowania cieplnego docierającego do urządzenia

²³ Promieniowanie podczerwone w zakresie długości fali elektromagnetycznej od 6,0 do 8,0 μm , jest praktycznie w całości pochłaniane przez atmosferę/powietrze występujące pomiędzy badanym objektem a kamerą termowizyjną.

²⁴ W pracy doktorskiej wykorzystywano kamerę termowizyjną (Flir P65) pracującą w długości fali w zakresie od 7,5 do 13,0 μm .

Kamera termowizyjna rejestrując rozkład pola temperatury na badanej powierzchni, „widzi” energię cieplną (w postaci różnej intensywności fali elektromagnetycznej docierającej na detektor termowizyjny urządzenia), którą przelicza wewnątrz swojej pamięci wg zadanego algorytmu i pokazuje obserwatorowi wynik w postaci temperatury dla każdego pixela. Podczas pomiaru termowizyjnego, do kamery może docierać promieniowanie cieplne zarówno od obserwowanej powierzchni jak i od:

- otaczających dodatkowych źródeł ciepła (np. lampy oświetleniowe, grzejniki, promienniki podczerwieni, otwarte źródła ognia, urządzenia itp.), (rys. 4.2. – oznaczenie 1, 2, 3);
- promieniowanie od otaczających powierzchni / elementów (np. ściany, sufit, podłoga, sąsiednie budynki) (rys. 4.2. – oznaczenie 5, 6);
- promieniowanie odbite od badanej powierzchni;
- promieniowanie nieboskłonu (rys. 4.2. – oznaczenie 4);
- promieniowanie własne powietrza pomiędzy kamerą a badaną powierzchnią (rys. 4.2. – oznaczenie 8).

Wszystkie powyższe wpływy dodatkowego promieniowania cieplnego z otoczenia, są kompensowane przez kamerę termowizyjną poprzez wprowadzenie do pamięci urządzenia takich parametrów badanej powierzchni jak:

- emisyjność;
- odległość od kamery;
- wartość temperatury odbitej;
- oraz dodatkowo temperatura i wilgotność względna powietrza znajdującego się pomiędzy kamerą a badanym obiektem.

Wartości te brane są pod uwagę w algorytmie²⁵ korygującym sumę promieniowania cieplnego docierającego do detektora w celu oszacowania rzeczywistej temperatury badanej powierzchni. Istnieją różne metodyki wyznaczania powyższych parametrów przy badaniach termowizyjnych - dokładny opis zastosowanych metod w niniejszej pracy został opisany w rozdziale 6.

Idealnym rozwiązaniem podczas prowadzenia obserwacji kamerą termowizyjną byłoby całkowite odizolowanie obserwowanego obiektu od wpływu środowiska zewnętrznego – z oczywistych względów jest to niemożliwe. W celu uzyskania środowiska prawie idealnego do wykonywania materiałowych badań termowizyjnych w laboratorium, obserwowany obiekt powinien znajdować się w wydzielonym pomieszczeniu bez okien, w którym nie ma źródeł światła i ciepła zakłócających dokonywany pomiar. Szczegółowy zakres przygotowania, aparatury i samego pomiaru termowizyjnego w zastosowaniach budowlanych można znaleźć w literaturze [130]. Metodykę pomiaru termowizyjnego można podzielić na poszczególne elementy:

- a) poznanie obiektu badań (zapoznanie się ze strukturą i budową badanego materiału, poznanie jego cech fizycznych),

²⁵ Dokładny opis procesu przetwarzania intensywności fali elektromagnetycznej o długości fali w zakresie podczerwieni na sygnał elektryczny i dalej na obraz w postaci termogramu wychodzi poza zakres pracy doktorskiej.

- b) wyeliminowanie źródeł ciepła z otoczenia, które mogłyby zakłócić dokonywany pomiar termowizyjny (o ile to możliwe),
- c) wykonanie pomiarów parametrów otoczenia (prędkość powietrza²⁶, temperatura powietrza, wilgotność względna powietrza i temperatura odbita od badanej powierzchni – promieniowanie otoczenia w kierunku obiektu),
- d) wyznaczenie emisyjności badanej powierzchni,
- e) poprawne wprowadzenie parametrów do kamery termowizyjnej (emisyjność powierzchni, wilgotność względna powietrza, temperatura powietrza, temperatura odbita, odległość kamery od badanej powierzchni),
- f) wykonanie termogramu / serii termogramów,
- g) komputerowa obróbka i analiza otrzymanych termogramów.

Podana powyżej metodyka jest bardzo ogólna i należy pamiętać, że każdy pomiar termowizyjny może charakteryzować się innymi warunkami brzegowymi, do których powyższe punkty powinny zostać dostosowane. Szczegółowy opis wszystkich czynności podczas przeprowadzania pomiaru termowizyjnego na potrzeby niniejszej pracy doktorskiej zostały opisane w rozdziale 6.

4.2.3. Ograniczenia metody termowizyjnej

Największą zaletą badań termowizyjnych jest ich nieniszczący charakter. Podczas badania nie dochodzi do kontaktu fizycznego z badanym elementem. Termowizja jest całkowicie nieinwazyjną metodą diagnostyczną. Badana próbka pozostaje w nienaruszonym /niezmienionym stanie w czasie badania jak i po badaniu termowizyjnym.

Równocześnie należy jednak pamiętać o kilku ograniczeniach i wadach podczas detekcji promieniowania podczerwonego przez kamerę termowizyjną. Głównymi ograniczeniami i wadami wykonania badań termowizyjnych są:

- a) konieczność zapewnienia odpowiednich warunków otoczenia podczas badań terenowych w zastosowaniu budowlanym:
 - różnica temperatur wynosząca min 10 – 15 K pomiędzy powietrzem po obu stronach badanej przegrody;
 - stabilność temperatur powietrza po obu stronach przegrody przez co najmniej kilkanaście godzin przed badaniem, wahania temperatur do 5K;
 - zachmurzone niebo przed i podczas badania (w dzień: brak nagrzewu przez promieniowanie słoneczne; w nocy: brak zjawiska wychładzania radiacyjnego do nieboskłonu - w praktyce pomiarowej przyjęło się unikać badań w ciągu dnia);
 - brak opadów atmosferycznych i mgły przed i w trakcie badania termowizyjnego (wilgotne przegrody i mgła pomiędzy badaną powierzchnią a kamerą termowizyjną, zaburzają detekcję promieniowania podczerwonego);
- b) poprawne zdefiniowanie emisyjności badanej powierzchni, parametr ten mocno wpływa na błąd pomiaru temperatury w danym punkcie; tabelaryczne wartości

²⁶ Duża prędkość powietrza wokół badanego elementu może spowodować zwiększenie przepływu ciepła na drodze konwekcji, z reguły ta część przekazywania ciepła jest pomijalnie mała.

emisyjności nie zawsze odpowiadają wartościom dla materiałów rzeczywistych poddawanych badaniom;

- c) w przypadku badań w budownictwie należy znajdować się relatywnie daleko od obiektu, aby kamera „widziała” dostatecznie duży obszar badanej przegrody (ewentualnie posiadać obiektyw szerokokątny), często pomiędzy kamerą a badaną powierzchnią znajdują się dodatkowe obiekty typu drzewa, krzewy, znaki, słupy, inne obiekty budowlane, które utrudniają pomiar termowizyjny;
- d) występujące dodatkowe źródła ciepła w pobliskim otoczeniu (promieniowanie słoneczne, źródła ognia, piece, grzejniki, ludzie) zaburzające rozkład pola temperatury;
- e) droga aparatura badawcza o zróżnicowanych parametrach, np. potrzeba posiadania różnych kamer do różnych celów badawczych (różne obiektywy, różna czułość termiczna, różny zakres detekcji podczerwieni, różna częstotliwość rejestracji termogramów)²⁷;
- f) w badaniach z użyciem termowizji aktywnej, odpowiednie dobranie źródła pobudzenia cieplnego, jego rodzaju, mocy, długości trwania, częstotliwości, ułożenia względem badanej powierzchni;

W przypadku badań materiałowych w laboratorium (np. te wykonywane na potrzeby niniejszej pracy doktorskiej) można pominąć ograniczenia z pkt. a) oraz c), ponieważ warunki zewnętrzne w pomieszczeniach laboratoryjnych zamkniętych, można skutecznie ograniczyć lub całkowicie wyeliminować.

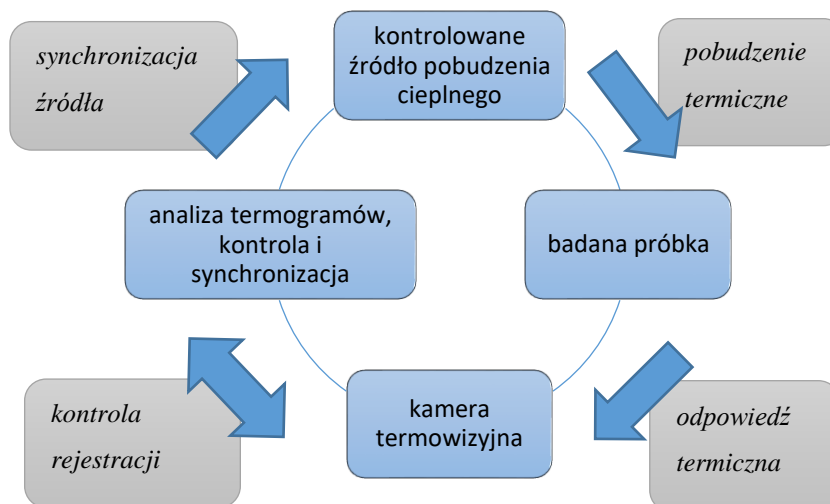
4.2.4. Termowizja aktywna i jej rodzaje

Termowizja aktywna polega na wymuszeniu przepływu ciepła w badanym obiekcie na skutek świadomego wprowadzenia do układu pomiarowego dodatkowego sztucznego lub naturalnego źródła energii (np. cieplnej, lub energii, której skutkiem będzie podniesienie/obniżenie temperatury badanego obiektu)²⁸. Najważniejszą cechą termowizji aktywnej jest zastosowanie kontrolowanej stymulacji cieplnej badanego obiektu w celu rejestracji odpowiedzi cieplnej (po wyłączeniu nagrzewania) na zadaną stymulację. Podczas badań metodą termowizji aktywnej muszą wystąpić trzy główne elementy (rys. 4.3.):

- a) kontrolowane źródło pobudzenia cieplnego – ustawiana jest jego moc, częstotliwość, czas trwania i ułożenie względem pobudzanej powierzchni;
- b) rejestracja termogramów wykonana podczas lub po stymulacji cieplnej w ściśle określonym momencie w postaci pojedynczego zdjęcia termowizyjnego lub sekwencji obrazów wykonanych w pewnych założonych odstępach czasu;
- c) ciągła kontrola i synchronizacja źródła ciepła oraz rejestracji termogramów.

²⁷ Rodzaje kamer termowizyjnych oraz ich parametry wychodzą poza zakres niniejszego opracowania. Dokładne informacje można znaleźć na stronach producentów tych urządzeń (np.: Flir, Testo, Fluke, Optris, InfraTec).

²⁸ W klasycznej termowizji pasywnej również mogą występować źródła ciepła wokół obiektu (np. Słońce) ale nie są one kontrolowane/zależne (ich moc, ułożenie, czas trwania) od obserwatora.



Rys. 4.3. Ogólna zasada pomiaru za pomocą termografii aktywnej (opracowanie własne)

Badania termografią aktywną można podzielić na sześć głównych kryteriów.

I. Źródło nagrzewania:

- a) promieniowanie optyczne (światło, podczerwień, mikrofale),
- b) indukcja elektromagnetyczna i prądy wirowe,
- c) fale mechaniczne (pobudzenie ultradźwiękami),
- d) konwekcja gorącym/zimnym powietrzem,
- e) bezpośrednie/stykowe – ogrzewanie na skutek przewodzenia.

II. Czas trwania pobudzenia cieplnego i jego charakterystykę działania:

- a) pulse thermography – do wzbudzenia stosuje się źródło energii, zapewniające bardzo krótki impuls, który można uznać za impuls Diraca²⁹ (np. lampa błyskowa lub laser). W tym pobudzeniu termogramy mogą być analizowane w funkcji czasu i funkcji częstotliwości,
- b) step thermography – do wzbudzenia używa się źródła energii (np. lampa halogenowa lub indukcja), które jest włączane/wyłączane na konkretny czas, który jest znacznie dłuższy niż w przypadku termografii impulsowej. Termogramy mogą być analizowane zarówno w funkcji czasu i funkcji częstotliwości,
- c) lock-in thermography – w celu wzbudzenia zastosowane źródło energii (np. lampa halogenowa / ultradźwięki) jest okresowo modulowane pod względem intensywności. Sygnał może być np. sinusoidalny lub prostokątny. W metodzie tej bardzo ważnym aspektem jest odpowiednie dobranie zakresu częstotliwości pobudzenia. Termogramy są analizowane w funkcji częstotliwości.

²⁹ Impuls Diraca (inaczej Delta Diraca) w fizyce jest używana do przedstawienia bardzo krótkiego impulsu. Jest on matematycznym modelem nieskończenie wąskiego impulsu występującego w chwili $t=0$, o nieskończonej dużej amplitudzie i polu równym 1. Można założyć, że Impuls Diraca jest pewną aproksymacją i próbą określenia pochodnej ze skoku jednostkowego.

III. Sposób przestrzennego pobudzenia badanego elementu:

- a) lokalne – pobudzenie na niewielkim obszarze badanego obiektu, uzyskuje się je np. poprzez zastosowanie plamki laserowej, metodą tą można lokalizować wady o wszystkich orientacjach względem powierzchni, można również użyć liniowych źródeł wzbudzenia, w metodzie tej generowana jest dyfuzja cieplna w trzech kierunkach,
- b) dwukierunkowe – stosuje się je w celu jednorodnego ogrzania lub schłodzenia całej/części powierzchni badanego obiektu np. poprzez zastosowanie lamp halogenowych lub szeregów dysz z zimnym powietrzem, ciepło rozprasza się prostopadle do powierzchni, metoda ta pozwala lokalizować głównie wady zorientowane równoległe do badanej powierzchni,
- c) objętościowe – cała objętość testowanego elementu jest wzbudzana w celu wywołania rozpraszających efektów w miejscu występowania wad, metoda wykorzystywana np. do wykrywania pęknięć oraz wilgoci zawartej w materiałach, uzyskiwana poprzez zastosowanie np. wzbudzenia mikrofalowego.

IV. Konfigurację źródła pobudzenia cieplnego i badanego elementu względem siebie:

- a) tryb refleksyjny – kamera termowizyjna i źródła pobudzenia cieplnego znajdują się po tej samej stronie badanego obiektu,
- b) tryb transmisyjny³⁰ – kamera termowizyjna i źródło pobudzenia cieplnego znajdują się po przeciwnych stronach badanego obiektu,
- c) tryb refleksyjno-transmisyjny – podczas badania dokonuje się pomiaru rozkładu pola temperatury równocześnie po obu stronach badanego elementu (pomiar dokonywany dwiema kamerami termowizyjnymi).

V. Zmienność ustawienia źródła ciepła względem badanego elementu:

- a) układ statyczny – badany obiekt, kamera termowizyjna i źródło pobudzenia cieplnego są ustawiane w jednej pozycji i pozostają nieruchome względem siebie podczas całego badania,
- b) układ dynamiczny – badany obiekt, kamera termowizyjna i źródło pobudzenia cieplnego przemieszczają się względem siebie podczas badania.

VI. Sposób analizy otrzymanej sekwencji termogramów³¹:

- a) w funkcji czasu – dane zarejestrowane podczas wzbudzenia jak i po nim są przetwarzane w funkcji czasu, do analizy wykorzystuje się charakterystykę czasową sygnału, najczęściej do przetwarzania danych używa się kontrastów temperaturowych,
- b) w funkcji częstotliwości źródła ciepła – metoda oparta jest na przetwarzaniu odpowiedzi termicznej z badanego obiektu przy określonych częstotliwościach

³⁰ Tę konfigurację pomiaru można zastosować tylko do testowanych obiektów dostępnych z obu stron i mających grubość mniejszą lub równą efektywnej długości dyfuzji cieplnej (wzór (6.1)).

³¹ Więcej informacji na temat analizy termogramów (postprocesing) kontrastów i ich rodzajów oraz analizy w funkcji częstotliwości źródła ciepła znajduje się w podrozdziale 4.3.2.

wzbudzenia, wybór częstotliwości do analizy zależy od widma częstotliwości sygnału wzbudzenia i czasu rejestracji danych.

Powyższe kryteria podziału termografii aktywnej zostało opracowane w niniejszej pracy na podstawie międzynarodowej normy EN 17119 [201] i zestawione w tabeli 4.2.

Tabela 4.2. Kryteria podziału i rodzaje badań z użyciem termografii aktywnej

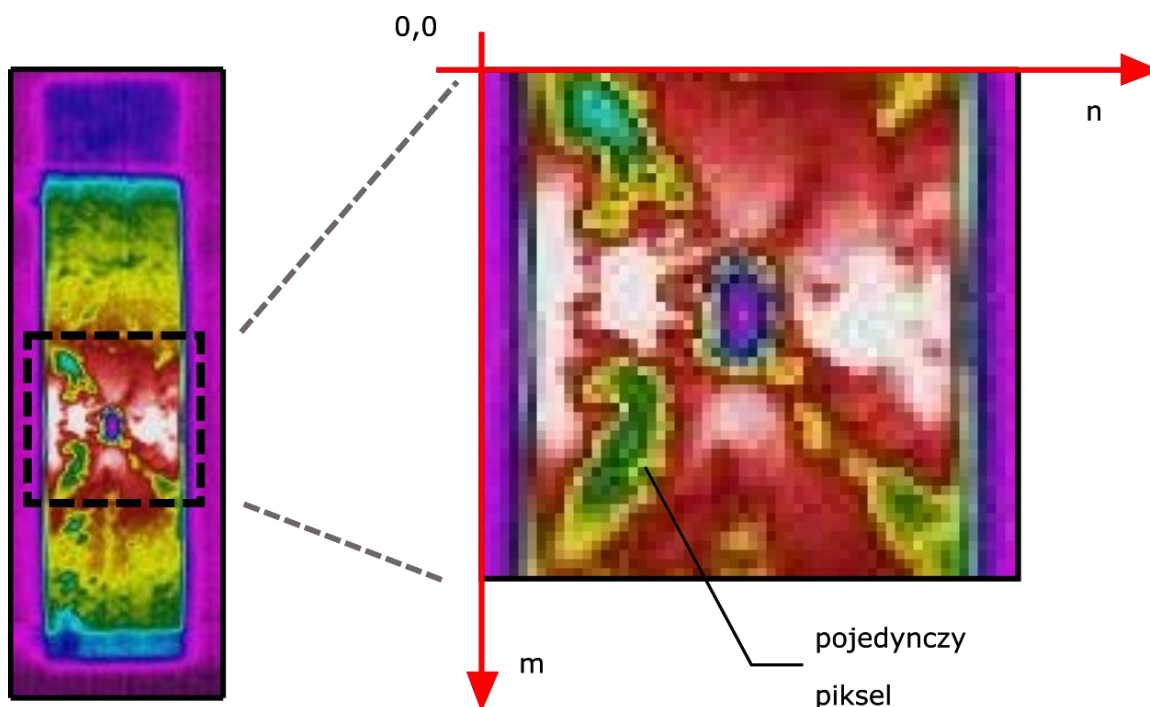
1	2
Kryterium podziału	Rodzaje termografii aktywnej
Źródło pobudzenia	<ul style="list-style-type: none"> - radiacyjna - indukcyjna - mechaniczna - konwekcyjna - stykowa
Czas trwania pobudzenia	<ul style="list-style-type: none"> - pulse, impulsowa (PT) - step, krokowa (ST) - lock-in, modulacyjna (LT)
Typ przestrzeni pobudzenia	<ul style="list-style-type: none"> - lokalna - dwukierunkowa - przestrzenna
Położenie badanego obiektu i źródła pobudzenia względem siebie	<ul style="list-style-type: none"> - refleksyjna - transmisyjna - refleksyjno-transmisyjna (podwójna)*
Ruch badanego obiektu i źródła pobudzenia względem siebie	<ul style="list-style-type: none"> - statyczna - dynamiczna
Sposób analizy termogramów	<ul style="list-style-type: none"> - z analizą w funkcji czasu - z analizą w funkcji częstotliwości pobudzenia cieplnego
* ten rodzaj położenia nie został wymieniony w normie EN 17119, został on dodany przez autora niniejszego opracowania.	

4.3. Analiza obrazu termowizyjnego

4.3.1. Podstawy teoretyczne

W badaniach metodą termografii aktywnej oprócz odpowiedniego dobrania i zsynchronizowania źródła wzbudzenia cieplnego bardzo ważnym procesem jest analiza otrzymanej sekwencji obrazów (termogramów). Proces ten nazywa się *przetwarzaniem obrazów cyfrowych* (ang. Digital Image Processing, DIP). Jest to jedna z dziedzin przetwarzania sygnałów cyfrowych zajmująca się reprezentacją obrazu w postaci cyfrowej oraz komputerowymi algorytmami przetwarzania i akwizycji obrazów cyfrowych. Cyfrowe przetwarzanie obrazów obejmuje m.in. operacje³²: filtracji, binaryzacji, segmentacji, transformacji geometrycznej, transformacji pomiędzy przestrzeniami barw, morfologiczne, kodowania i kompresji.

Zdjęcie termowizyjne jest obrazem cyfrowym, a więc jest ono przykładem sygnału dwuwymiarowego z dodatkowo zapisaną informacją o wartości temperatury przypisanej do każdego piksela. Termogram posiada określoną liczbę punktów pomiarowych (pikseli), która jest zależna od rozdzielczości detektora termicznego kamery termowizyjnej. Przykładowy termogram z przybliżeniem, na którym widać pojedyncze piksele przedstawiono na rys. 4.4. Rozdzielczość kamery termowizyjnej podaje liczbę wierszy/linii na termogramie oraz liczbę pikseli w jednym wierszu tego termogramu. Iloczyn obu wartości wyznacza liczbę pikseli (punktów pomiarowych), z których możemy odczytać temperaturę.

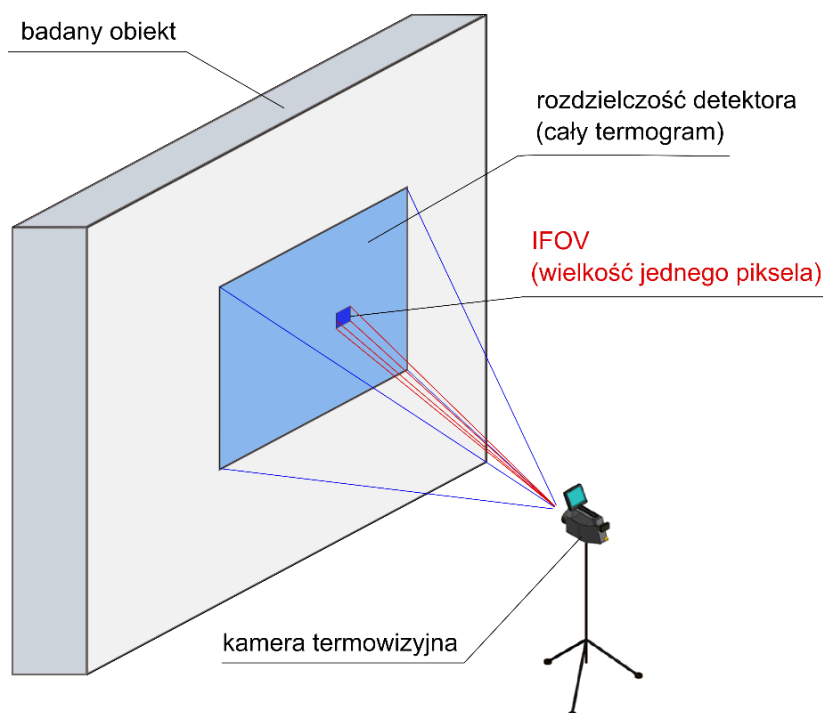


Rys. 4.4. Zdjęcie termowizyjne rozciąganego płaskownika stalowego, po lewej – widok ogólny, po prawej – zbliżenie; oznaczenia: m – liczba linii/wierszy w obrazie; n – liczba pikseli w jednym wierszu/linii (opracowanie własne)

³² Dane podane na podstawie informacji zawartych na stronie internetowej: www.wikipedia.pl (dostęp: 2019.11.27).

Podczas pomiarów wykonywanych za pomocą kamery termowizyjnej bardzo ważnym parametrem urządzenia jest wartość IFOV (z ang. Instantaneous Field of View), czyli rozdzielczość przestrzenna urządzenia. Parametr ten opisuje rozmiar obszaru badanego obiektu, który jest widziany przez pojedynczy piksel matrycy detektora (rys. 4.5.). Im ta wartość jest niższa, tym mniejszy obszar jesteśmy w stanie zarejestrować na jednym pikselu – obraz jest dokładniejszy i możemy dostrzec więcej szczegółów (w porównaniu do pomiaru termowizyjnego z tej samej odległości kamerą o większej rozdzielczości przestrzennej). Na IFOV wpływa rozdzielczość detektora oraz kąt „widzenia” obiektywu (rodzaj obiektywu). Parametr IFOV najczęściej podawany jest w jednostce mrad i oznacza on wielkość jednego piksela w mm, gdy urządzenie oddalone jest od badanej powierzchni na odległość jednego metra³³.

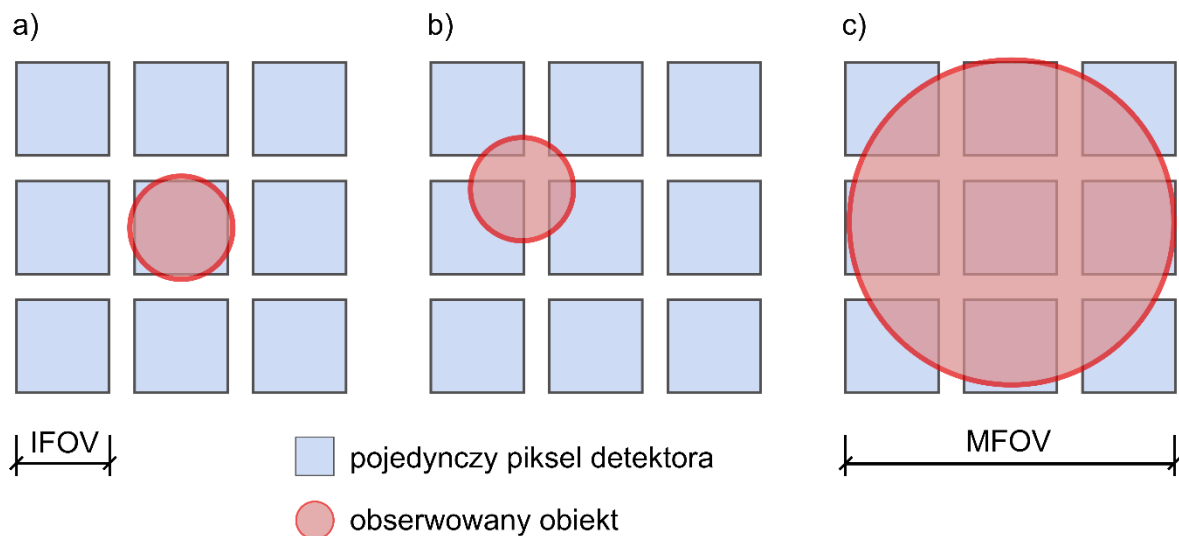
Analizując obraz termalny należy również pamiętać, że każda kamera termowizyjna charakteryzuje się parametrem czułości termicznej detektora (NETD z ang. Noise Equivalent Temperature Difference). NETD jest wyrażane w mK i oznacza jaka ilość promieniowania jest potrzebna, aby stosunek docierającego sygnału do szumu termicznego był równy 1. Parametr ten określa najmniejszą możliwą różnicę temperatur, która może być zarejestrowana przez kamerę. Jeśli np. kamera termowizyjna posiada czułość termiczną równą 100 mK to na analizowanym obrazie termowizyjnym punkty o różnicy temperatur poniżej 100 mK nie będą rozróżnialne.



Rys. 4.5. Schemat pokazujący różnicę pomiędzy rozdzielczością kamery termowizyjnej, a jej rozdzielczością przestrzenną IFOV

³³ Należy pamiętać, że po wymianie obiektywu na obiektyw o innym polu widzenia zmienia się również parametr IFOV, im kąt widzenia obiektywu jest mniejszy tym parametr IFOV jest niższy. W celu uzyskania jak najmniejszego parametru IFOV (najdokładniejszy pomiar) powinniśmy wybrać kamerą z jak największą rozdzielczością detektora oraz jak najwęższym obiektywem (teleobiektyw). Należy pamiętać, że przy takim rozwiązaniu kamera będzie obserwować bardzo małą powierzchnię.

Podczas analizy termogramu należy mieć również świadomość, że nie zawsze rozdzielczość przestrzenna (IFOV) zagwarantuje nam poprawny pomiar temperatury obiektu, którego wielkość jest równa IFOV. W idealnych warunkach cały obiekt musiałby idealnie trafić na 1 detektor kamery termowizyjnej. W rzeczywistości obiekt taki może znajdować się pomiędzy kilkoma detektorami urządzenia, w wyniku czego obiekt zostanie zarejestrowany, ale odczyt wartości temperatury nie będzie prawdziwy. W celu uzyskania poprawnych pomiarów temperatury badanego obiektu, powinien on być co najmniej równy parametrowi **MFOV** (z ang. Minimum Field of View) – **minimalne pole pomiarowe**. Zaleca się, aby parametr MFOV wynosił od 3 do 5 jednostek wielkości IFOV. Opisaną wyżej sytuację pokazano na rys. 4.6.



Rys. 4.6. Schemat pokazujący poprawny pomiar wartości temperatury obserwowanego obiektu z uwzględnieniem minimalnego pola pomiarowego MFOV: a) poprawny pomiar temperatury – sytuacja mało prawdopodobna; b) błędny pomiar temperatury – sytuacja bardzo prawdopodobna przy rzeczywistych pomiarach; c) poprawny pomiar temperatury – sytuacja rzeczywista, kiedy co najmniej jeden detektor będzie w całości „oświetlony” promieniowaniem podczerwonym dochodzącym z obserwowanego obiektu

4.3.2. Metody analizy obrazu termowizyjnego

Głównym celem analizy obrazu termalnego jest zwiększenie możliwości lokalizacji i detekcji różnego rodzaju nieciągłości, defektów i wtrąceń materiałowych w badanych elementach w porównaniu do zwykłej interpretacji nieobrobionych zdjęć termowizyjnych. Sekwencje termogramów mogą być analizowane na dwa główne sposoby: w funkcji czasu oraz w funkcji częstotliwości. Najczęściej wykorzystywanymi metodami analizy termogramów w funkcji czasu są **kontrasty temperaturowe**³⁴. Poniżej wymieniono najczęściej stosowane kontrasty:

³⁴ Wzory do obliczeń poszczególnych kontrastów temperaturowych zostały zaczerpnięte z różnych źródeł literaturowych. W celu łatwiejszego ich porównania wszystkie oznaczenia zostały ujednolicone. W oznaczeniach wartości temperatury indeks „d” oznacza przekrój z defektem lub przekrój badany, w którym szuka się defektu, natomiast indeks „s” odpowiada za przekrój referencyjny bez defektów tzw. z ang. *Sound Area*.

1. Względny lub standardowy (z ang. *Relative Thermal Contrast*):

$$C_w(i, j, t) = \frac{T_d(i, j, t) - T_d(i, j, t = 0)}{T_S(t) - T_S(t = 0)} \quad (4.21)$$

gdzie: $C_w(i, j, t)$ – względny kontrast termiczny dla piksela o współrzędnych (i,j), [-],
 t – czas, gdzie $t=0$ jest to chwila tuż przed stymulacją cieplną, [s],
 T_S – temperatura powierzchni referencyjnej (*Sound Area*) bez defektu, [K],
 T_d – temperatura powierzchni badanej (z potencjalnymi defektami), [K],

2. Absolutny (z ang. *Classic Thermal Contrast*):

$$C_a(i, j, t) = T_d(i, j, t) - T_S(i, j, t) \quad (4.22)$$

gdzie: $C_a(i, j, t)$ – absolutny kontrast termiczny dla piksela o współrzędnych (i,j), [K],
 t – czas, [s],
 T_S – temperatura powierzchni referencyjnej (*Sound Area*) bez defektu, [K],
 T_d – temperatura powierzchni badanej (z potencjalnymi defektami), [K],

3. Bieżący (z ang. *Current Thermal Contrast*):

$$C_b(i, j, t) = \frac{T_d(i, j, t) - T_S(i, j, t)}{T_S(i, j, t)} \quad (4.23)$$

gdzie: $C_b(i, j, t)$ – bieżący kontrast termiczny dla piksela o współrzędnych (i,j), [-],
 t – czas, gdzie $t=0$ jest to chwila tuż przed stymulacją cieplną, [s],
 T_S – temperatura powierzchni referencyjnej (*Sound Area*) bez defektu, [K],
 T_d – temperatura powierzchni badanej (z potencjalnymi defektami), [K].

4. Znormalizowany³⁵ (z ang. *Normalized Thermal Contrast – NTC*):

$$\bar{C}^t(i, j, t) = \frac{\Delta T_d(i, j, t) - \Delta T_S(i, j, t)}{\Delta T_d(i, j, t) + \Delta T_S(i, j, t)} \quad (4.24)$$

$$\Delta T_d(i, j, t) = T_d - T_d^0 \quad (4.25)$$

$$\Delta T_S(i, j, t) = T_S - T_S^0 \quad (4.26)$$

gdzie: $\bar{C}^t(i, j, t)$ – znormalizowany kontrast termiczny dla piksela o współrz. (i,j), [-],
 t – czas, gdzie $t=0$ jest to chwila tuż przed stymulacją cieplną, [s],
 ΔT_d – różnica temperatur w przekroju z potencjalnym defektem, [K],

³⁵ Kontrast ten został opisany i opatentowany w roku 2013 przez naukowca pracującego w NASA – Ajay M. Koshti. Numer patentu: U.S. Patent US8577120 B1.

- T_d – temp. powierzchni badanej po stymulacji cieplnej, [K],
 T_d^0 – temp. powierzchni badanej tuż przed stymulacją cieplną, [K],
 ΔT_S – różnica temp. powierzchni referencyjnej (*Sound Area*) bez defektu, [K],
 T_S – temp. powierzchni referencyjnej po stymulacji cieplnej, [K],
 T_S^0 – temp. powierzchni referencyjnej tuż przed stymulacją cieplną, [K],

5. Różnicowy absolutny (z ang. *Differential Absolute Contrast – DAC*)³⁶, [138]:

$$\Delta C_{DAC}(i, j, t) = T(i, j, t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot T(i, j, t') \quad (4.27)$$

- gdzie: $\Delta C_{DAC}(i, j, t)$ – różnicowy absolutny kontrast term. dla piksela o współrz. (i,j), [K],
 t – czas od momentu wyłączenia źródła pobudzenia cieplnego do chwili dla której bada się kontrast termiczny, [s],
 t' – czas od momentu wyłączenia źródła pobudzenia cieplnego do dokładnej chwili pojawienia się pierwszego wadliwego punktu na termogramie, [s],
 $T(i, j, t)$ – temperatura w punkcie (i,j) po czasie t, [K],
 $T(i, j, t')$ – temperatura w punkcie (i,j) po czasie t', [K],

6. Filtrowany (z ang. *Filtered Contrast – FC*), [55]:

$$FC(i, j, t) = T(i, j, t) - filter(T(i, j, t)) \quad (4.28)$$

- gdzie: $FC(i, j, t)$ – kontrast filtrowany w dowolnym punkcie (i,j) na termogramie po czasie t, [K],
 $T(i, j, t)$ – temperatura w dowolnym punkcie (i,j) na termogramie po czasie t, [K],
 $filter(T(i, j, t))$ – temperatura w dowolnym punkcie (i,j) po czasie t na filtrowanym (wygładzonym) termogramie np. za pomocą 2-D filtru Gaussa, [K],

7. Względny Filtrowany (z ang. *Relative Filtered Contrast – RFC*), [55]:

$$RFC(i, j, t) = \frac{T(i, j, t) - filter(T(i, j, t))}{filter(T(i, j, t)) - T_0} \quad (4.29)$$

- gdzie: $RFC(i, j, t)$ – kontrast względny filtrowany w dowolnym punkcie (i,j) na termogramie po czasie t, [K],
 $T(i, j, t)$ – temperatura w dowolnym punkcie (i,j) na termogramie po czasie t, [K],

³⁶ W pracy [138] zamieszczono również opis zmodyfikowanego kontrastu różnicowego $\Delta T_{DAC,mod}$.

$filter(T(i,j,t))$ – temperatura w dowolnym punkcie (i,j) po czasie t na filtrowanym (wygładzonym) termogramie np. za pomocą 2-D filtru Gaussa, [K],
 T_0 – temperatura powierzchni próbki przed stymulacją cieplną, [K],

8. Nowy Absolutny (z ang. *New Absolute Contrast – NAC*), [140]:

$$C_{NAC}(i,j,t) = \Delta T(i,j,t) - \sqrt{\frac{t'}{t}} \cdot \Delta T(i,j,t') \quad (4.30)$$

$$\Delta T(i,j,t) = T(i,j,t) - T(i,j,t_0) \quad (4.31)$$

$$\Delta T_S(i,j,t') = T_S(i,j,t') - T_S(i,j,t_0) \quad (4.32)$$

gdzie: $C_{NAC}(i,j,t)$ – nowy absolutny kontrast w dowolnym punkcie (i,j) na termogramie po czasie t, [K],
 $\Delta T(i,j,t)$ – różnica temperatur w dowolnym punkcie (i,j) na termogramie pomiędzy czasem t i czasem t_0 , [K],
 $T(i,j,t)$ – temperatura w dowolnym punkcie (i,j) na termogramie po czasie t, [K],
 $T(i,j,t_0)$ – temperatura w dowolnym punkcie (i,j) na termogramie przed stymulacją cieplną, [K],
 $\Delta T_S(i,j,t')$ – różnica temperatur w przekroju bez defektu w punkcie (i,j) na termogramie pomiędzy czasem t i czasem t' , [K],
 $T_S(i,j,t')$ – temperatura w przekroju z defektem w punkcie (i,j) na termogramie po czasie t' , [K],
 $T_S(i,j,t_0)$ – temperatura w przekroju z defektem w punkcie (i,j) na termogramie przed stymulacją cieplną, [K],
 t' – czas od momentu wyłączenia źródła pobudzenia cieplnego do dokładnej chwili pojawienia się pierwszego wadliwego punktu na termogramie, [s],
 t_0 – chwila tuż przed stymulacją cieplną, [s],

Względny kontrast temperaturowy (4.21) jest najbardziej odpowiedni do zredukowania wpływu szumów środowiska zewnętrznego (tła cieplnego) [201]. Natomiast różnicowy kontrast absolutny (4.27) jest rekomendowany do analizy z niejednorodnie ogrzaną próbką i przy braku informacji o lokalizacji obszaru referencyjnego (bez defektu) [138]. Metoda analizy sekwencji termogramów w funkcji czasu przy użyciu kontrastów temperaturowych jest zalecana do termografii aktywnej typu *Pulse* i *Step*. Norma EN 17119:2019 [201] do analizy ilościowej termogramów sugeruje zastosowanie wykresów logarytmicznych typu log-log: logarytm z kontrastu w funkcji logarytmu czasu.

Do analizy termogramów wykonanych za pomocą termografii aktywnej typu *Lock-in* najlepiej jest używać analizy w funkcji częstotliwości źródła energii. Do analizy tej najczęściej używa się *Dyskretnej Transformaty Fouriera*, określoną wzorem:

$$F_n(f_n) = \sum_{k=0}^{N-1} T(k) e^{\frac{2\pi i k f_n}{N}} = Re(F_n) + iIm(F_n) \quad (4.33)$$

gdzie: Re – część rzeczywista,
 Im – część urojona,
 n – częstotliwość,
 N – liczba termogramów w całej zapisanej sekwencji,
 k – numer kolejnego termogramu w sekwencji,

$$f_n = \frac{n}{N\Delta t}; \quad n = 1, \dots, N/2 \quad (4.34)$$

gdzie: Δt – krok czasowy rejestracji termogramów,
 n – przyrost częstotliwości.

Wszystkie przeprowadzane analizy sekwencji termogramów są wykonywane osobno dla każdego piksela termogramu. W celu zwiększenia wydajności i wygody pracy do tego celu używa się wyspecjalizowanych programów do analizy sygnału. Uniwersalnym narzędziem jest np. oprogramowanie „Matlab” z dodatkowymi narzędziami do analizy obrazu (Image Processing). Innym przydatnym i uniwersalnym narzędziem do przedstawionych powyżej analiz może być program „Origin”, który przede wszystkim jest profesjonalnym narzędziem do tworzenia wykresów, ale również posiada wiele przydatnych funkcji do analizy danych, w tym danych w formie obrazów.

Osobną grupę stanowią programy dedykowane do obróbki i analizy termogramów. Są to specjalistyczne oprogramowania opracowane najczęściej przez producentów kamer termowizyjnych. Najliczniejszą grupę tych programów stanowią produkty takich firm jak np. FLIR lub InfraTec. Na uwagę zasługuje tutaj program ResearcherIR MAX, który jest dedykowany do naukowej analizy termogramów.

Na rynku istnieje również kilka gotowych systemów do wykonywania badań z użyciem termografii aktywnej z jednoczesną analizą obrazów termalnych (źródło pobudzenia cieplnego, kamera termowizyjna, sterownik i oprogramowanie do synchronizacji i analizy). Kompaktowe rozwiązania posiadają takie firmy jak np.: InfraTec (zestaw z oprogramowaniem IRBIS 3 active), Automation Technology (mobilny system C-CheckIR), Thermal Wave Imaging (z zestawami: SysCheckIR, EchoTherm, ThermoScope, VoyageIR Pro, TAFIS, T3S, ProjectIR oraz LASLAT) czy OPTRIS (moduł TLIM - Tracer LockIn Module).

4.4. Interdyscyplinarność badań metodą termografii aktywnej

4.4.1. Występujące zjawiska cieplne podczas badań

W przeprowadzanych w niniejszej pracy eksperymentach złożona wymiana ciepła występowała w różnych proporcjach i na różnych etapach wykonywanego doświadczenia w laboratorium. Eksperymenty można podzielić na trzy zasadnicze fazy:

Faza pierwsza – badany obiekt był w równowadze termicznej z otoczeniem, temperatura elementu i otoczenia (powietrza) były sobie równe. Nie zachodziło zjawisko przewodzenia ciepła wewnątrz badanego elementu, a konwekcja ciepła na jego powierzchni była pomijalnie mała. Badany element wymieniał z otoczeniem energię cieplną jedynie poprzez promieniowanie (założono, że wypromieniowywana energia cieplna z powierzchni elementu i energia promieniowania cieplnego otoczenia są sobie równe³⁷).

Faza druga – w tej fazie badany element został ogrzany za pomocą promiennika podczerwieni przez co najmniej kilku minut. Największy udział w wymianie ciepła w tej fazie następował poprzez promieniowanie (wysyłanie ciepła ze źródła w kierunku badanej powierzchni), równocześnie w pobudzonym elemencie rozpoczynała się wymiana ciepła poprzez przewodzenia w kierunku od ogrzewanej powierzchni do wnętrza elementu. Badana powierzchnia była również ogrzewana przez otaczające powietrze (ogrzewane przez źródło ciepła) – wymiana ciepła na drodze konwekcji.

Faza trzecia – w ostatniej fazie źródło ciepła zostało wyłączone, a badany element wychładzał się, aż do wyrównania temperatury z otoczeniem. Była to najdłuższa część eksperymentu, która w przypadku elementów żelbetowych trwała nawet kilkanaście godzin³⁸. Głównymi sposobami wymiany ciepła w tej fazie było przewodzenie ciepła wewnątrz badanego elementu oraz wypromieniowywanie energii cieplnej z ogrzewanej powierzchni, która była rejestrowana przez kamerę termowizyjną.

4.4.2. Odwrotne zagadnienia przewodzenia ciepła

Klasyczna metoda rozwiązywania zagadnień z zakresu transportu ciepła ma na celu określenie rozkładu pola temperatury na podstawie pewnych założonych warunków brzegowych. Do przyjmowanych warunków brzegowych zalicza się:

- a) budowę geometryczną analizowanego elementu 3D, płaszczyzny 2D lub przekroju 1D;
- b) właściwości fizyczno-cieplne materiałów występujących w badanym elemencie (wartości stałe i zmienne w czasie lub zależne od innych parametrów);
- c) temperatury na brzegach modelu geometrycznego np. wewnętrzna, zewnętrzna i brzegi/powierzchnie adiabatyczne (wartości stałe lub zmienne w czasie);
- d) dodatkowe źródła ciepła występujące wewnątrz lub poza analizowanym modelem geometrycznym;
- e) parametry cieplne otoczenia (najczęściej powietrza) występującego pomiędzy badanym materiałem a zewnętrznym źródłem ciepła;

³⁷ Badany obiekt podczas wykonywanych doświadczeń znajdował się w zamkniętym pomieszczeniu, w którym była utrzymywana stała temperatura. Założono, że temperatura powierzchni przegród tego pomieszczenia jest równa temperaturze powietrza w tym pomieszczeniu i wszystkie powierzchnie mają taki sam współczynnik emisyjności.

³⁸ Zmiany rozkładu pola temperatury były obserwowane do około 6h od momentu wyłączenia źródła ciepła. Po tym czasie obserwowana temperatura na powierzchni obiektu była wyższa jedynie o około 1K, jednak należało poczekać do kilkunastu godzin w celu rozpoczęcia ponownego nagrzewania tego samego elementu (powtórzenie eksperymentu dla innych warunków brzegowych).

f) wartości współczynników przejmowania ciepła na powierzchniach nie adiabatycznych.

Powyższe warunki brzegowe mogą być również nazywane warunkami granicznymi. W praktyce, stosowany jest ich następujący podział [130]:

- warunek brzegowy I rodzaju (warunek Dirichleta) – znana jest zależność funkcyjna rozkładu pola temperatury na powierzchni badanego elementu w każdej chwili;
- warunek brzegowy II rodzaju (warunek Neumanna) – znana jest zależność funkcyjna rozkładu gęstości strumienia ciepła na powierzchni badanego elementu w każdej chwili;
- warunek brzegowy III rodzaju (warunek Fouriera) – znana jest zależność funkcyjna temperatury powietrza omywającego element i współczynnik przejmowania ciepła powierzchni elementu w każdym miejscu i każdej chwili;
- warunek brzegowy IV rodzaju – występowanie równości (ciągłości) temperatury i gęstości strumienia ciepła na granicy styku dwóch warstw przegrody.

Po wstawieniu do modelu obliczeniowego powyższych warunków brzegowych i wykonaniu obliczeń uzyskujemy wynik w postaci rozkładu pola temperatur na powierzchniach zewnętrznych oraz wewnątrz modelu w funkcji czasu. Wartości temperatur podawane są w węzłach obliczeniowych modelu (węzły siatki *MESH*). Dokładność otrzymanych wyników zależy od przyjęcia poprawnych warunków brzegowych oraz gęstości podziału siatki i jej rodzaju.

Sytuację można odwrócić, tzn. dysponując rozkładem pola temperatury na powierzchniach badanego elementu lub w jego wnętrzu oblicza się parametry, które w klasycznej metodzie są warunkami brzegowymi. Na podstawie rozkładu pola temperatury można określić:

- a) budowę geometryczną badanego układu;
- b) parametry fizyczno-cieplne materiałów badanego modelu;
- c) moc dodatkowych/wewnętrznych źródeł ciepła;
- d) występowanie defektów w strukturze materiałowej (pęknięć, rys, rozwarstwień)
- e) występowanie wtrąceń materiałowych w badanym elemencie;
- f) wielkość defektów i wtrąceń materiałowych;
- g) głębokość położenia defektów i wtrąceń materiałowych pod analizowaną powierzchnią.

Taka analiza modelu pod względem jego właściwości fizyczno-cieplnych, geometrii i struktury materiałowej na podstawie rozkładu pola temperatury w tym modelu nazywa się rozwiązaniem odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła.

W badaniach metodą termografii aktywnej wyniki otrzymuje się w postaci sekwencji termogramów. Znajomość zmieniającego się rozkładu pola temperatury w czasie pozwala na rozwiązywanie różnego rodzaju odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. Rozwiązanie takich zagadnień jest problemem interdyscyplinarnym. Oprócz odpowiedniego zaplanowania i wykonania badań metodą termografii aktywnej wymagana jest wiedza z zakresu: analizy sygnałów (obrazów), fizyki materiałów, termodynamiki, materiałoznawstwa a w przypadku aplikacji tej metody w naukach inżynierskich również wiedza z zakresu budownictwa.

ROZDZIAŁ 5

5. OPIS PROBLEMU BADAWCZEGO

5.1. Sformułowanie problemu badawczego

Dokonując krytycznej analizy aktualnego stanu wiedzy stwierdzono brak rozwiązań i zaleceń dotyczących badań przegród budowlanych z użyciem termografii aktywnej w celu detekcji i lokalizacji wtrąceń materiałowych występujących w tych przegrodach. Uwzględniając dotychczasowe trendy światowe stwierdzono, że dobrze rozpoznane są zagadnienia detekcji wad materiałowych w materiałach cienkich i niewielkich rozmiarów. Tylko pojedyncze prace naukowe traktują o badaniach masywnych przegród budowlanych, lecz nie uwzględniają one wpływu rodzaju, mocy czy ustawienia źródła ciepła względem badanej powierzchni na możliwości detekcji poszukiwanych wad struktury materiałowej. Nieliczne prace naukowe dotyczą wyznaczania cieplnych właściwości budowlanych badanych materiałów [114]. Podczas przeglądu literatury przedmiotu stwierdzono brak prac, w których dokonano ilościowej oceny lokalizacji wtrąceń materiałowych w masywnych elementach żelbetowych typu słupy lub lekkich przegrodach budowlanych typu szkieletowego.

Uwzględniając powyższe oraz postawione tezy w rozdziale 3 sformułowano następujący problem badawczy:

W jaki sposób parametry takie jak: czas trwania pobudzenia cieplnego, jego moc, usytuowanie źródła tego pobudzenia względem badanego elementu oraz wzajemne usytuowanie badanego obiektu, kamery termowizyjnej i źródła pobudzenia, wpływają na możliwość lokalizacji wtrąceń materiałowych w masywnych elementach budowlanych w ujęciu jakościowym oraz ilościowym z wykorzystaniem nieniszczących badań przy użyciu termografii aktywnej.

W postawionym problemie badawczym wyróżniono dwa główne problemy do rozwiązania:

1. Lokalizacja wtrąceń materiałowych wewnątrz lekkich przegród budowlanych, wyznaczenie ich wymiarów geometrycznych i głębokości zalegania pod badaną powierzchnią.

2. Lokalizacja wtrąceń materiałowych (stalowego zbrojenia) wewnątrz ciężkich elementów budowlanych typu słupy żelbetowe, wyznaczenie ich wymiarów geometrycznych i głębokości zalegania (otuliny) pod badaną powierzchnią.

Dodatkowo zbadano wpływ:

- czasu trwania źródła pobudzenia;
- moc źródła pobudzenia;
- usytuowanie źródła ciepła względem badanej powierzchni;
- oraz umiejscowienie względem siebie badanego elementu, źródła ciepła i kamery termowizyjnej,

na możliwość wyznaczenia parametrów cieplnych wtrąceń materiałowych i ich lokalizacji w elementach budowlanych.

5.2. Rodzaje wtrąceń

Głównym celem w niniejszej pracy doktorskiej jest detekcja i lokalizacja wtrąceń materiałowych w elementach budowlanych. *Wtrącenie* rozumiane jest jako zaburzenie naturalnej struktury materiałowej badanego elementu. Takie naruszenie struktury występuje najczęściej w postaci pustki powietrznej (wtrącenie powietrzne), innego materiału (wtrącenie materiałowe) lub jako np. zawilgocona część materiału (wtrącenie ciekłe). Wtrącenia mogą występować blisko badanej powierzchni (wtrącenia przypowierzchniowe) lub głęboko pod tą powierzchnią (wtrącenia wewnętrzne). Do określenia granicy pomiędzy wtrąceniami przypowierzchniowymi, a wewnętrznymi może posłużyć ogólnie znana zasada, która traktuje, że termowizja aktywna pozwala dobrze lokalizować wtrącenia umiejscowione na głębokości równej do dwóch grubości wtrącenia [119]. Wtrącenia możemy również podzielić ze względu na ich wielkość, kształt lub genezę powstania. W niniejszej pracy zaproponowano podział wtrąceń w elementach budowlanych, przedstawiony w tabeli 5.1.

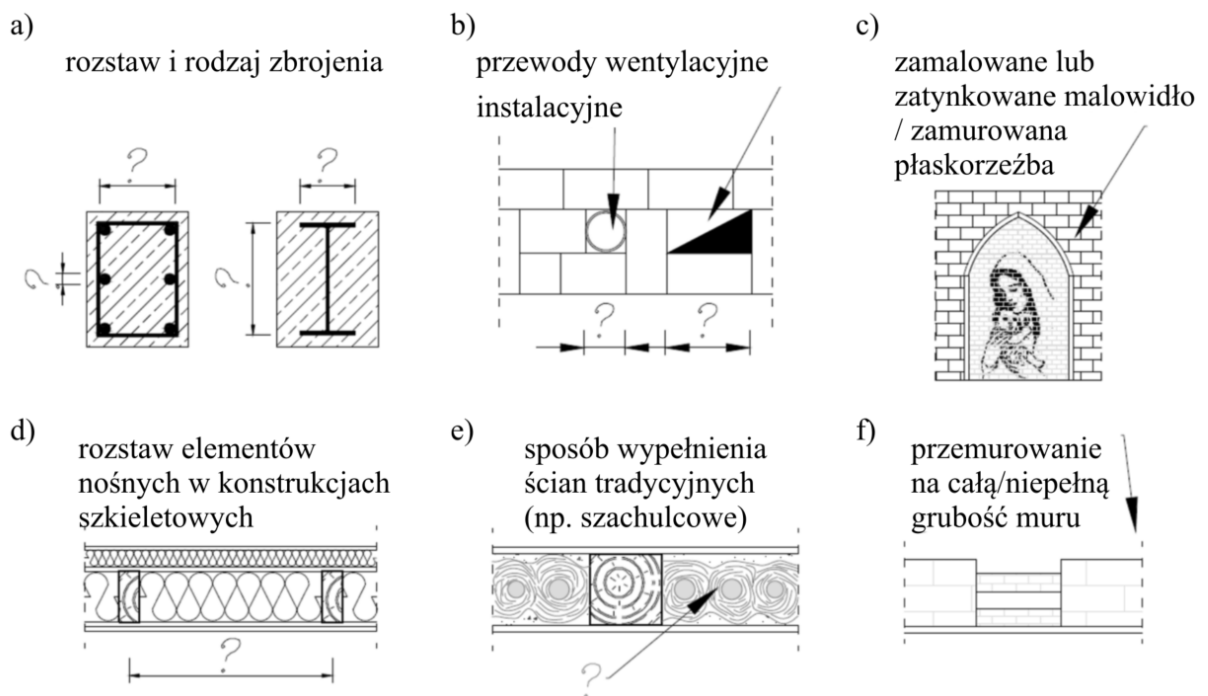
Tabela 5.1. Kryteria podziału i rodzaje wtrąceń w elementach budowlanych (opracowanie własne)

1	2	3
Kryterium podziału	Rodzaje wtrącenia wg kryterium	Przykłady z budownictwa
Stan skupienia wtrącenia	stałe (materiałowe)	przemurowania w elementach murowych
	gazowe (powietrzne)	przewody kominowe w przegrodach
	ciekłe (wodne)	instalacje wodne podtynkowe / podposadzkowe
Wielkość wtrącenia	małe ($\max(x,y,z) < 2d$) ¹	pęknięcia i rysy w elementach żelbetowych
	duże ($\max(x,y,z) > 2d$)	obetonowany stalowy słup
Głębokość położenia pod powierzchnią	przypowierzchniowe ($d < 2z$)	przewody kominowe

	wewnętrzne ($d > 2z$)	strzemiona w elementach żelbetowych
Kształt wtrącenia	przestrzenne	przewody kominowe w przegrodach
	płaskie	rozwarstwienie pomiędzy obetonowanym kształtownikiem a betonem
	podłużne	pręty zbrojeniowe w elementach żelbetowych
	nieregularne	pustki powietrzne powstałe podczas betonowania – tzw. „raki”
Geneza powstania	projektowane (kontrolowane)	zbrojenie w elementach żelbetowych
	defektowe (niekontrolowane)	pęknięcia, rysy, raki, rozwarstwienia

¹Wyjaśnienie oznaczeń:
x – szerokość wtrącenia w płaszczyźnie termogramu
y – wysokość wtrącenia w płaszczyźnie termogramu
z – grubość wtrącenia
d – odległość pomiędzy powierzchnią badanego elementu, a najbliższym punktem do wtrącenia

Wybrane przykłady wtrąceń występujących w budownictwie pokazano na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Przykładowe wtrącenie występujące w elementach budowlanych – opis na rysunku (opracowanie własne)

5.3. Przyjęta metodyka badawcza oraz założenia materiałowe

Na potrzeby realizacji głównego celu pracy, którym było rozwiązanie sformułowanego w pkt 5.1 problemu badawczego oraz udowodnienie postawionych tez (rozdział 3), przyjęto autorską metodykę badawczą oraz poczyniono pewne założenia materiałowe.

Ze względu na dużą różnorodność rodzajów wtrąceń, postanowiono ograniczyć się do wtrąceń: materiałowo – objętościowo – przypowierzchniowych (elementy prostopadłościenne) oraz materiałowo – podłużno – przypowierzchniowych (pręty zbrojeniowe). Pierwsze z nich badano na modelach lekkich przegród budowlanych szkieletowych, natomiast wtrącenia podłużne w słupach żelbetowych. Dzięki tak przyjętym założeniom w pracy sprawdzono możliwość:

- lokalizacji prętów zbrojeniowych w elementach żelbetowych,
- detekcji wtrąceń materiałowych przypowierzchniowych w lekkich przegrodach szkieletowych.

Spośród metod badawczych termografii aktywnej opisanych w rozdziale 4 do przeprowadzenia eksperymentów wybrano metodę *Step Thermography*. Metoda ta charakteryzuje się wzbudzeniem cieplnym badanych elementów za pomocą długiego impulsu cieplnego trwającego powyżej 1 s (tabela 5.2.). Ze względu na rodzaj przestrzeni wzbudzenia cieplnego zastosowano pobudzenie cieplne dwuwymiarowe z użyciem lamp halogenowych³⁹. Metoda *Step Thermography* z użyciem lamp halogenowych wg normy EN 17119:2018 [201] jest jedną z najodpowiedniejszych metod do detekcji niejednorodności objętościowych. W doświadczeniu zdecydowano się zastosować termografię aktywną zarówno w trybie odbiciowym jak i trybie refleksyjnym. Zastosowano również dwie nowości (w stosunku do eksperymentów innych autorów) w zaplanowanych badaniach doświadczalnych:

- jednoczesne zastosowanie dwóch kamer termowizyjnych usytuowanych po dwóch różnych stronach badanego elementu;
- dodatkowy pomiar temperatury wewnątrz badanych elementów przy użyciu termopar.

W badaniach doświadczalnych zaprojektowano kilka stanowisk badawczych z różnymi elementami budowlanymi. W każdym badaniu zastosowano metodę *Step Thermography*. Dwie kamery termowizyjne oraz termopary były zastosowane tylko w wybranych badaniach⁴⁰.

Zastosowana metoda badawcza była wybrana na podstawie wytycznych zawartych w normie EN 17119:2018 [201] (tabela 5.2.). Wtrącenia materiałowe występujące w elementach budowlanych są niejednorodnościami objętościowymi. Badane elementy ze względu na swoje wymiary charakteryzowały się dużą pojemnością cieplną, w wyniku czego należało zastosować pobudzenie cieplne o dużej mocy z impulsem trwającym przez odpowiednio długi czas aby dostarczyć dużą ilość energii cieplnej do badanego układu. Metoda *Step Thermography* z długim pobudzeniem (trwającym przynajmniej kilka minut) promiennikiem podczerwieni o mocy ponad 6 kW wydawała się być do tego celu odpowiednim rozwiązaniem.

³⁹ Taki rodzaj pobudzenia pozwala w miarę jednorodny sposób ogrzać całą badaną powierzchnię.

⁴⁰ Rozwiązanie to miało na celu skrócenie czasu prowadzenia badań doświadczalnych. Przeanalizowano wpływ różnych zmiennych na możliwość detekcji wtrąceń materiałowych w badanych elementach. Każde z wykonanych badań doświadczalnych było bardzo czasochłonne.

Tabela 5.2. Rodzaje technik wzbudzenia stosowane w termografii aktywnej oraz ich typowe zastosowania (tłumaczenie z normy EN 17119:2008 Aneks A Tablica A.1 str. 13) [201]

1	2	3
Źródło wzbudzenia	Rodzaj czasowego wzbudzenia	Typowe zastosowanie
Promiennik podczerwieni	Krokowe, zazwyczaj $t \geq 1s$	- rozwarstwienia materiałowe położone głęboko pod powierzchnią - niejednorodności objętościowe
Lampa halogenowa	Krokowe, zazwyczaj $t \geq 1s$ Modulacyjne, zazwyczaj $0,001 \text{ Hz} \leq f \leq 2 \text{ Hz}$	- rozwarstwienia materiałowe - niejednorodności objętościowe
Lampa błyskowa	Impulsowe, zazwyczaj $0,1 \text{ ms} \leq t \leq 10 \text{ ms}$	- rozwarstwienia materiałowe położone płytko pod powierzchnią - niejednorodności objętościowe
Laser	Impulsowe, Krokowe, Modulacyjne, zazwyczaj $0,1 \text{ Hz} \leq f \leq 100 \text{ Hz}$	- pęknięcia prostopadłe do badanej powierzchni - rozwarstwienia materiałowe
Gorące powietrze	Krokowe, Modulacyjne,	- penetracja systemów chłodzących
Fala mechaniczna (ultradźwięki)	Impulsowe, Krokowe, Modulacyjne,	- pęknięcia podpowierzchniowe
Indukcja	Impulsowe, zazwyczaj $20 \text{ ms} \leq t \leq 300 \text{ ms}$ Krokowe, Modulacyjne,	- wykrywanie defektów przypowierzchniowych z materiałów przewodzących prąd
Ogrzewanie elektryczne	Impulsowe, Krokowe, Modulacyjne,	- wykrywanie defektów z materiałów przewodzących prąd
Wielopunktowe (LED / laserowe)	Impulsowe, Krokowe, Modulacyjne,	- rozwarstwienia materiałowe - niejednorodności objętościowe - badanie ogniw słonecznych
Mikrofale	Krokowe, zazwyczaj $t \geq 10 \text{ s}$ Modulacyjne,	- rozwarstwienia materiałowe - niejednorodności objętościowe

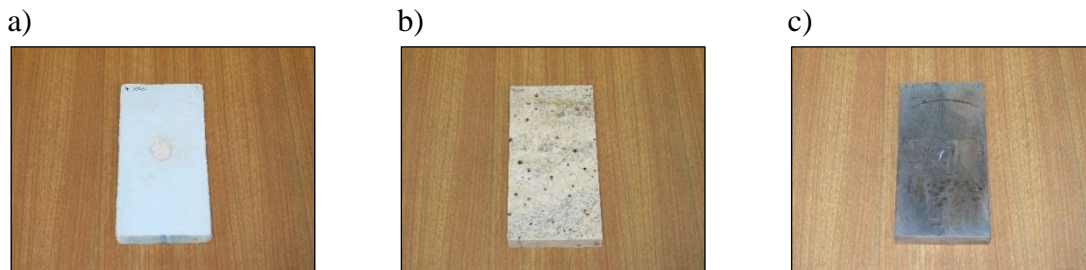
W badaniach doświadczalnych zdecydowano się przebadać możliwość detekcji różnych wtrąceń materiałowych w różnych elementach budowlanych. Podczas planowania

eksperymentu dobrano takie materiały, które najczęściej występują w elementach budowlanych i znacznie różnią się od siebie właściwościami cieplnymi (tabela 5.3.).

Tabela 5.3. Parametry cieplne materiałów budowlanych używanych w doświadczeniu (opracowanie własne na podstawie różnych źródeł literaturowych)

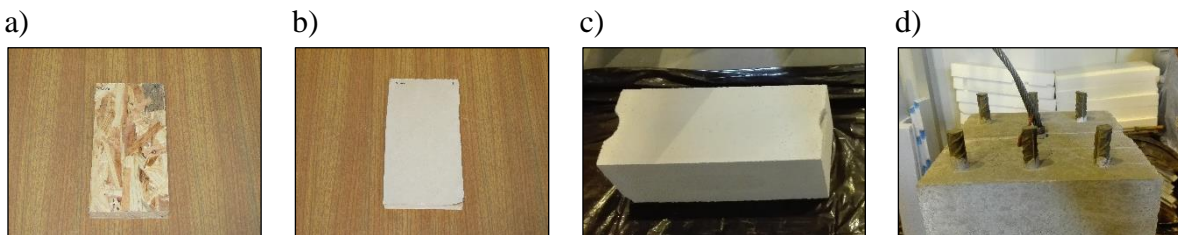
1	2	3	4	5	6
Rodzaj materiału	Gęstość objętościowa	Ciepło właściwe	Pojemność cieplna	Przewodność cieplna	Dyfuzyjność cieplna
[-]	$\rho_{obj} [\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	$c_w [\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	$C_{obj} [\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}]$	$\lambda [\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	$a [\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}]$
Styropian	30	1460	$0,04 \cdot 10^6$	0,033	$0,75 \cdot 10^{-6}$
Granit	2600	920	$2,39 \cdot 10^6$	2,80	$1,17 \cdot 10^{-6}$
Stal	7900	500	$3,95 \cdot 10^6$	50,0	$12,66 \cdot 10^{-6}$
Płyta GK	1000	1000	$1,00 \cdot 10^6$	0,23	$0,23 \cdot 10^{-6}$
Płyta OSB	650	1700	$1,11 \cdot 10^6$	0,13	$0,12 \cdot 10^{-6}$

Do badań jako wtrącenia materiałowe wybrano takie materiały jak: polistyren ekstrudowany (styropian XPS), granit oraz stal (rys. 5.2.) o wymiarach 200 x 100 x 20 mm, które znacznie różniły się właściwościami cieplnymi pomiędzy sobą (tabela 5.3.).



Rys. 5.2. Zdjęcia użytych wtrąceń materiałowych: a) polistyren ekstrudowany, b) granit, c) stal budowlana

Materiały jednorodne, z których zbudowano badane elementy to: płyty OSB, płyty gipsowo-kartonowe, beton komórkowy oraz beton. Materiały użyte do budowy badanych elementów budowlanych przedstawiono na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Zdjęcia materiałów budowlanych użytych do budowy badanych elementów: a) płyta OSB, b) płyta GK, c) bloczek z betonu komórkowego, d) beton

ROZDZIAŁ 6

6. BADANIA WŁASNE

W ramach badań własnych przeprowadzono badania doświadczalne na modelach przegród i modelach elementów budowlanych oraz badania terenowe na obiekcie rzeczywistym. W rozdziale tym opisano przyjęte założenia, badane elementy i ich właściwości materiałowe, zastosowaną aparaturę badawczą, budowę stanowisk badawczych oraz przyjętą metodę badawczą.

6.1. Badania doświadczalne

6.1.1. Przyjęte założenia

6.1.1.1. Elementy badawcze

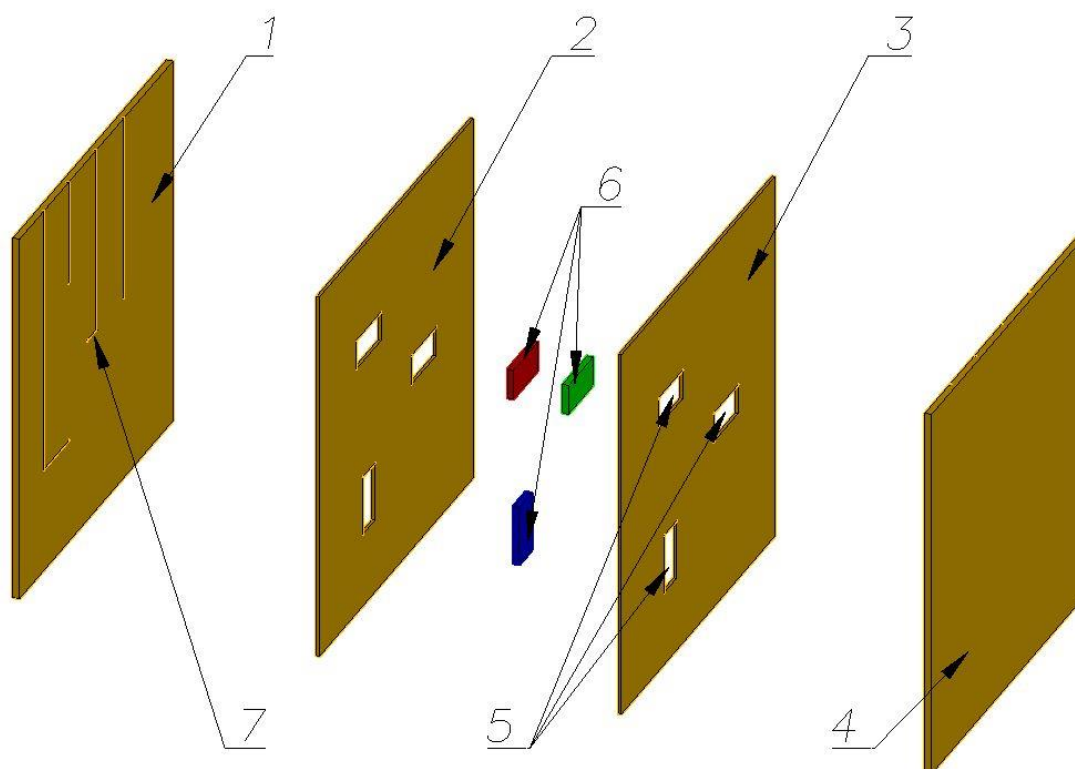
Wykonane elementy badawcze swoją budową odpowiadały rzeczywistym elementom stosowanym w budownictwie. Przebadano następujące elementy:

- A. Model ściany wykonany z **plyt OSB** (lokalizowanymi wtrąceniami objętościowymi były prostopadłościanny ze styropianu XPS, granitu oraz stali).
- B. Model ściany wykonany z **plyt GK** (lokalizowanymi wtrąceniami objętościowymi były prostopadłościanny ze styropianu XPS, granitu oraz stali).
- C. Ściana murowana z betonu komórkowego i **slupów żelbetowych** (lokalizowanym wtrąceniem były pręty stalowe w betonowym słupie).

Opis elementu badawczego A:

Model ściany został wykonany z 4 płyt OSB (rys. 6.1.) o grubościach, w kolejności ułożenia, 22 mm / 10 mm / 10 mm oraz 22 mm. Płyty o grubościach 22 mm były elementami na powierzchniach zewnętrznych modelu przegrody. W płytach tych były nacięte rowki o wielkości 4 x 4 mm, w których były ułożone termopary. W płytach wewnętrznych (tych o grubościach 10 mm) zostały wykonane otwory o wielkości 200 x 100 mm, w których były

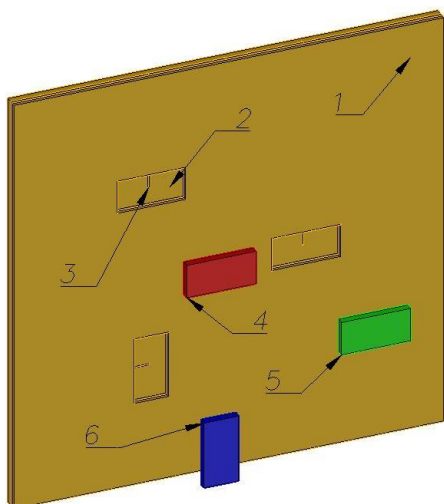
umieszczone wtrącenia materiałowe. Model przegrody miał w sumie 64 mm grubości. Wtrącenia ze styropianu XPS, granitu i stali były wymiarów 200 x 100 mm i grubości 20 mm. Czujniki temperatury (termopary) były umieszczone na tylnej powierzchni przegrody oraz wewnątrz modelu przegrody na powierzchni przedniej i tylnej wtrąceń materiałowych, dodatkowo umieszczono termopary w przekroju bez wtrącenia na tych samych głębokościach co w przypadku przekrojów z wtrąceniem tj. licząc od ogrzewanej powierzchni elementu: 22 mm; 42 mm i 64 mm (na tylnej ścianie elementu).



Rys. 6.1. Model 3D badanego elementu wykonanego z czterech płyt OSB; na rysunku przedstawiono wszystkie elementy składowe osobno: 1 – tylna płyta OSB o grubości 22 mm; 2 – wewnętrzna płyta OSB o grubości 10 mm z wyciętymi otworami pod wtrącenia materiałowe; 3 – druga wewnętrzna płyta OSB o grubości 10 mm; 4 – przednia płyta OSB o grubości 22 mm; 5 – wycięte otwory w wewnętrznych płytach; 6 – wtrącenia materiałowe umieszczane w otworach; 7 – widoczne nacięcia w płycie OSB tylnej (i przedniej) pod ułożenie termopar

Wnętrze modelu 3D (bez przedniej płyty) pokazano na rys. 6.2a. W widocznych otworach pokazano miejsce pomiaru temperatury (po obu stronach wtrącenia i na powierzchni tylnej płyty) za pomocą termopar. Miejsce to było na środku każdego z wtrąceń materiałowych. Termopary były zamocowane do wtrąceń przy użyciu pasty termoprzewodzącej. Ułożenie termopar w przekroju z defektem pokazano na rys. 6.3.

a)

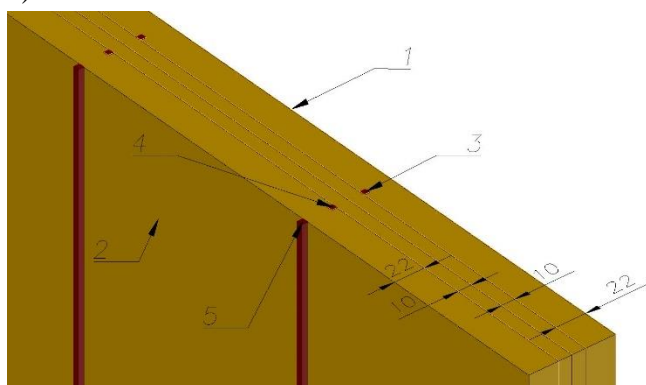


b)

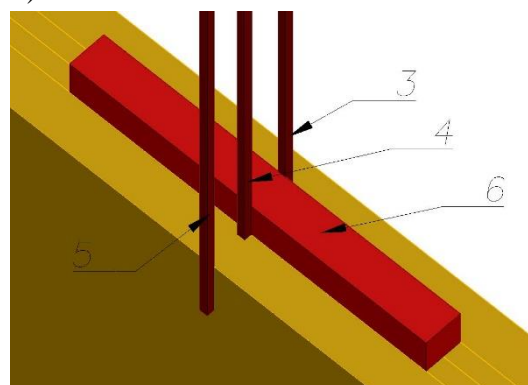


Rys. 6.2. Widok badanego elementu z płyty OSB; a) widok Modelu 3D oraz b) zdjęcie podczas wykonywania elementu; Oznaczenia: 1 – płyta OSB; 2 – wykonany otwór, w który wkładano wtrącenia materiałowe; 3 – termopara; 4 – wtrącenie ze styropianu XPS; 5 – wtrącenia z granitu; 6 – wtrącenie ze stali

a)



b)

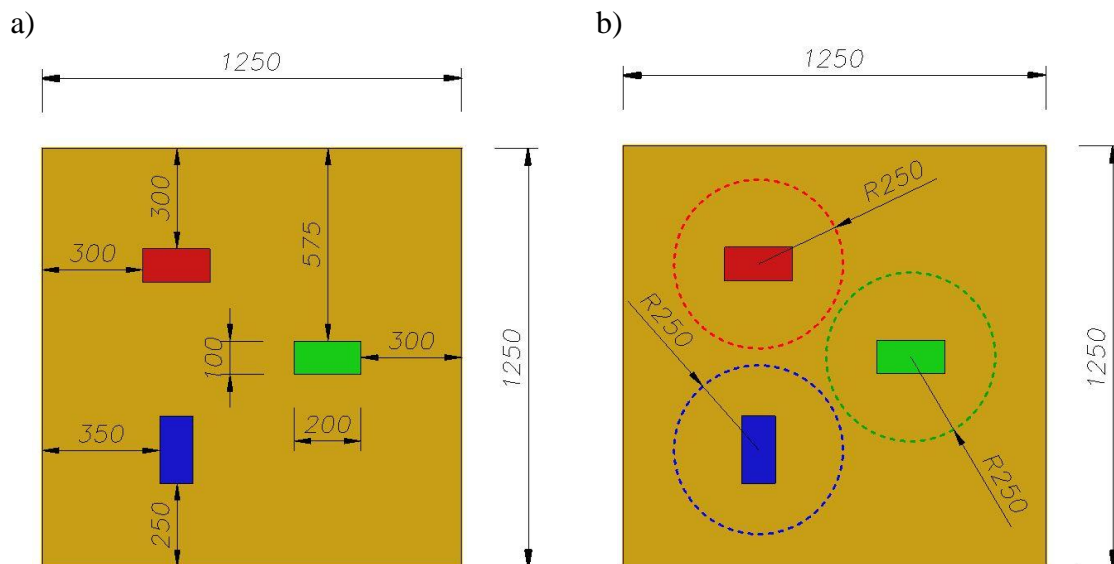


Rys. 6.3. Rysunki 3D pokazujące miejsca zamocowania termopar oraz szerokości poszczególnych płyt elementu badawczego; a) widok ogólny elementu 3D, b) widok wnętrza elementu w przekroju; oznaczenia: 1 – przednia płyta OSB; 2 – tylna płyta OSB; 3 – termopara zamocowana na przedniej powierzchni wtrącenia; 4 – termopara zamocowana na tylne powierzchni wtrącenia; 5 – termopara zamocowana na powierzchni tylnej płyty OSB; 6 – wtrącenie materiałowe wewnątrz badanego elementu

W celu uniknięcia wpływu wychładzania krawędziowego⁴¹ na rozkład pola temperatury podczas pomiarów, wtrącenia materiałowe zostały ułożone w odległości ponad 250 mm od krawędzi płyty OSB (odległość od krawędzi była większa od największego wymiaru wtrącenia materiałowego – 200 mm). Dodatkowo, aby wtrącenia nie wpływały wzajemnie na siebie (na rozkład pola temperatury podczas badań) odsunięto je od siebie co najmniej na odległość największego wymiaru wtrącenia. Odległość wtrąceń od krawędzi i wzajemnie ich położenie od siebie została ustalona na podstawie wcześniej wykonanego modelu 2D przepływu ciepła w warunkach ustalonych, gdy po jednej stronie przegrody założono temperaturę 100°C, a po

⁴¹ Przy krawędziach elementu następuje spadek temperatury na skutek wypromieniowywania energii cieplnej do otoczenia przez krawędzie elementu.

drugiej stronie temperaturę o wartości 10°C ⁴². Dla takich założeń i opisanej geometrii modelu odległość 200 mm była wystarczająca – zaburzenie pola temperatury wokół wtrąceń i przy krawędziach było widoczne jedynie do kilkudziesięciu mm. Wzajemne ułożenie wtrąceń materiałowych w elemencie pokazano na rys. 6.4.

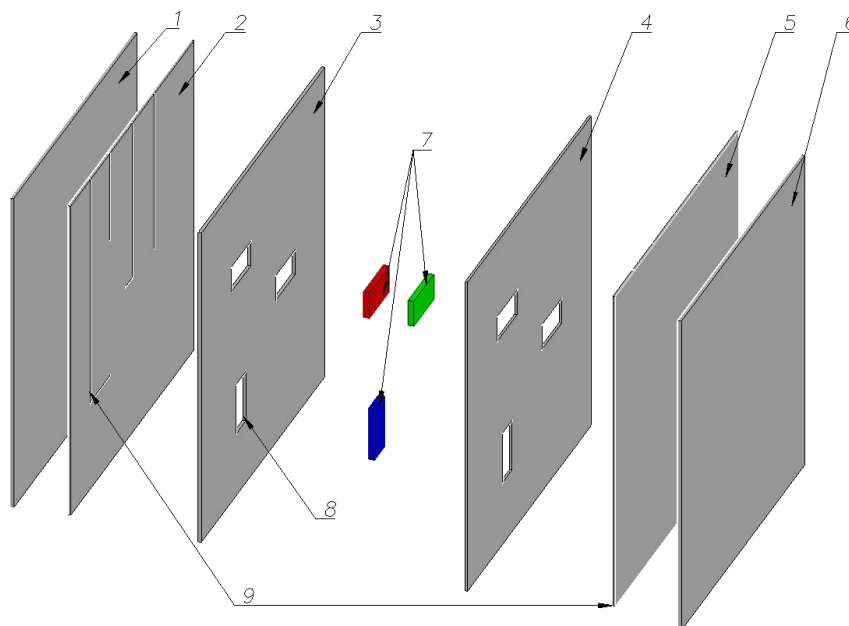


Rys. 6.4. Widok położenia wtrąceń materiałowych wewnątrz modelu przegrody z płyt OSB; a) widok wnętrza modelu od przodu z podanymi wymiarami od krawędzi płyty; b) widok wnętrza modelu od przodu z zaznaczeniem obszaru od środka wtrąceń materiałowych (każde z wtrąceń jest tych samych wymiarów, wymiary podane w mm)

Opis elementu badawczego B:

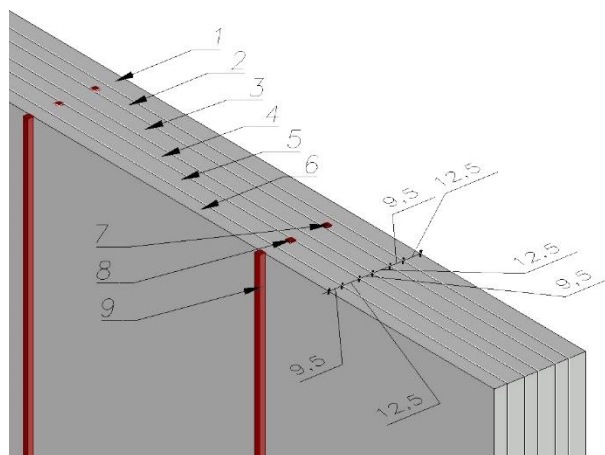
Model ściany wykonano z 6 płyt gipsowo-kartonowych (rys. 6.5.) o grubościach (w kolejności ułożenia) 12,5 mm / 9,5 mm / 12,5 mm / 9,5 mm / 12,5 mm / 9,5 mm. Skrajne 2 płyty były elementami jednorodnymi bez otworów na wtrącenia materiałowe, natomiast 2 płyty o grubościach 12,5 mm oraz 9,5 mm były elementami wewnętrznymi z zamodelowanymi wtrąceniami. Całkowita grubość modelu przegrody wynosi 66 mm. Wielkość otworów w płytach wewnętrznych, ich ułożenie, wymiary wtrąceń materiałowych, rowki pod termopary oraz ich miejsce zamocowania były dokładnie takie same jak w przypadku modelu przegrody wykonanej z płyty OSB (model elementu badawczego A). Jediną różnicą była grubość płyt wewnętrznych, która wynosiła łącznie 22 mm a nie 20 mm jak w przypadku przegrody z płyt OSB. Po zamontowaniu wtrąceń materiałowych o grubości 20 mm, brakujące 2 mm wypełniono masą gipsową – materiał o takich samych właściwościach fizycznych jak płyty GK. W modelu z płyt GK grubość jednorodnej warstwy tylnej powierzchni wynosiła 24 mm (w modelu z płyt OSB grubość ta wynosiła 22 mm). Schemat ułożenia termopar w przekroju, grubości poszczególnych płyt GK elementu badawczego oraz układ rozmieszczenia wtrąceń materiałowych zamieszczono na rys. 6.6.

⁴² Były to skrajne wartości temperatury powierzchni uzyskiwane podczas badań.

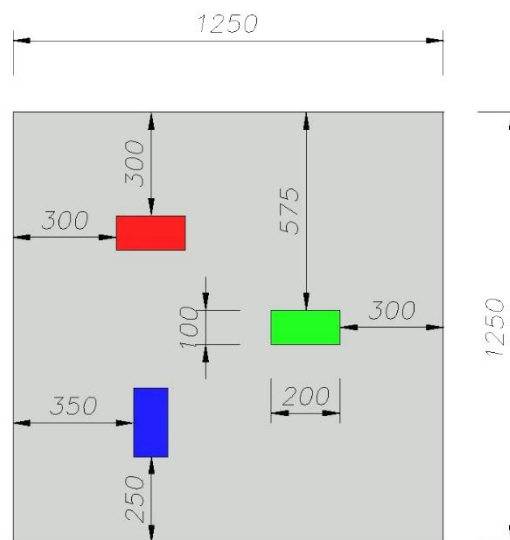


Rys. 6.5. Model 3D badanego elementu wykonanego z sześciu płyt GK z pokazaniem wszystkich elementów składowych osobno: 1 – tylna płyta GK o grubości 9,5 mm; 2 – wewnętrzna tylna płyta GK o grubości 12,5 mm z wyciętymi rowkami pod prowadzenie termopar; 3 – wewnętrzna płyta GK o grubości 9,5 mm; 4 – wewnętrzna płyta GK o grubości 12,5 mm; 5 – wewnętrzna przednia płyta GK o grubości 12,5 mm z wyciętymi rowkami pod prowadzenie termopar; 6 – przednia płyta GK o grubości 9,5 mm; 7 – wtrącenia materiałowe umieszczane w otworach; 8 – otwory w wewnętrznych płytach, w których umieszczano wtrącenia materiałowe; 9 – widoczne nacięcia w płycie GK wewnętrznej tylnej (i przedniej) pod ułożenie termopar

a)



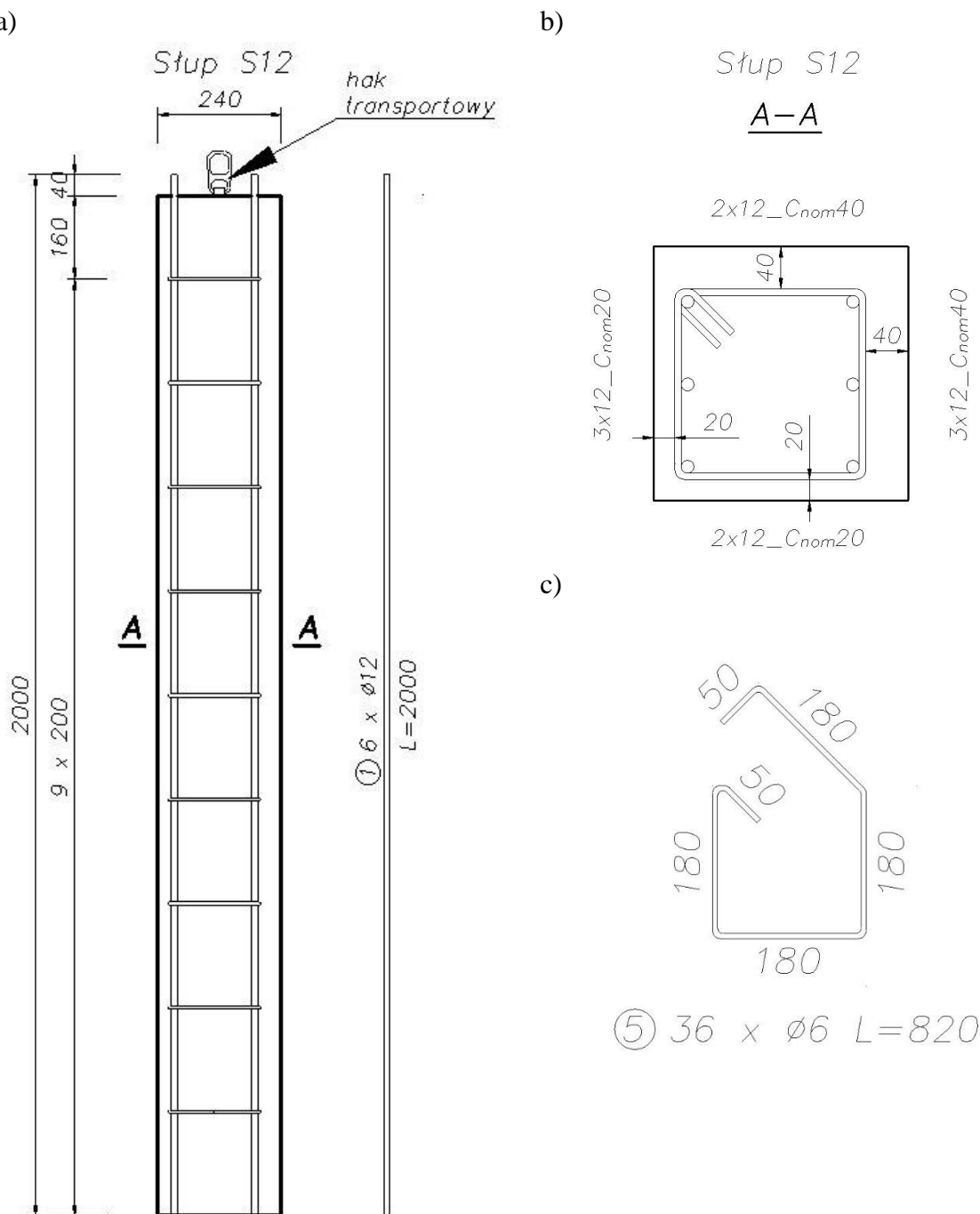
b)



Rys. 6.6. Miejsca zamocowania termopar, szerokości poszczególnych płyt elementu badawczego oraz rozmieszczenie wtrąceń materiałowych w elemencie; a) widok ogólny elementu 3D, b) widok wnętrza modelu od przodu z podanymi wymiarami od krawędzi płyty (kolory: czerwony – styropian XPS, zielony – granit, niebieski – stal; oznaczenia: 1 – przednia płyta GK (9 mm); 2 – wewnętrzna przednia płyta GK (12,5 mm); 3 – wewnętrzna płyta GK z otworami na wtrącenia (12,5 mm); 4 – wewnętrzna płyta GK z otworami na wtrącenia (9,5 mm); 5 – wewnętrzna tylna płyta GK (12,5 mm); 6 – tylna płyta GK (9,5 mm); 7 – termopara zamocowana na przedniej powierzchni wtrącenia; 8 – termopara zamocowana na tylne powierzchni wtrącenia; 9 – termopara zamocowana na powierzchni tylnej płyty GK

Opis elementu badawczego C:

Elementy badawcze stanowiły słupy żelbetowe o wymiarach w przekroju 240 x 240 mm i wysokości 2000 mm (1960 mm żelbetu, ostatnie 40 mm to wystające zbrojenie główne). Wykonano 4 słupy żelbetowe o jednakowych wymiarach zewnętrznych. Wszystkie słupy posiadały strzemiona o średnicy 6 mm w rozstawie 200 mm. Otulina do strzemion (C_{nom}) wynosiła 20 oraz 40 mm (do prętów głównych 26 oraz 46 mm). Pręty zbrojenia głównego ułożone były w jednym rzędzie po 3 sztuki po obu stronach słupa. Przykładowy rysunek słupa S12 (zbrojenie główne o średnicy 12 mm) pokazano na rys. 6.7.

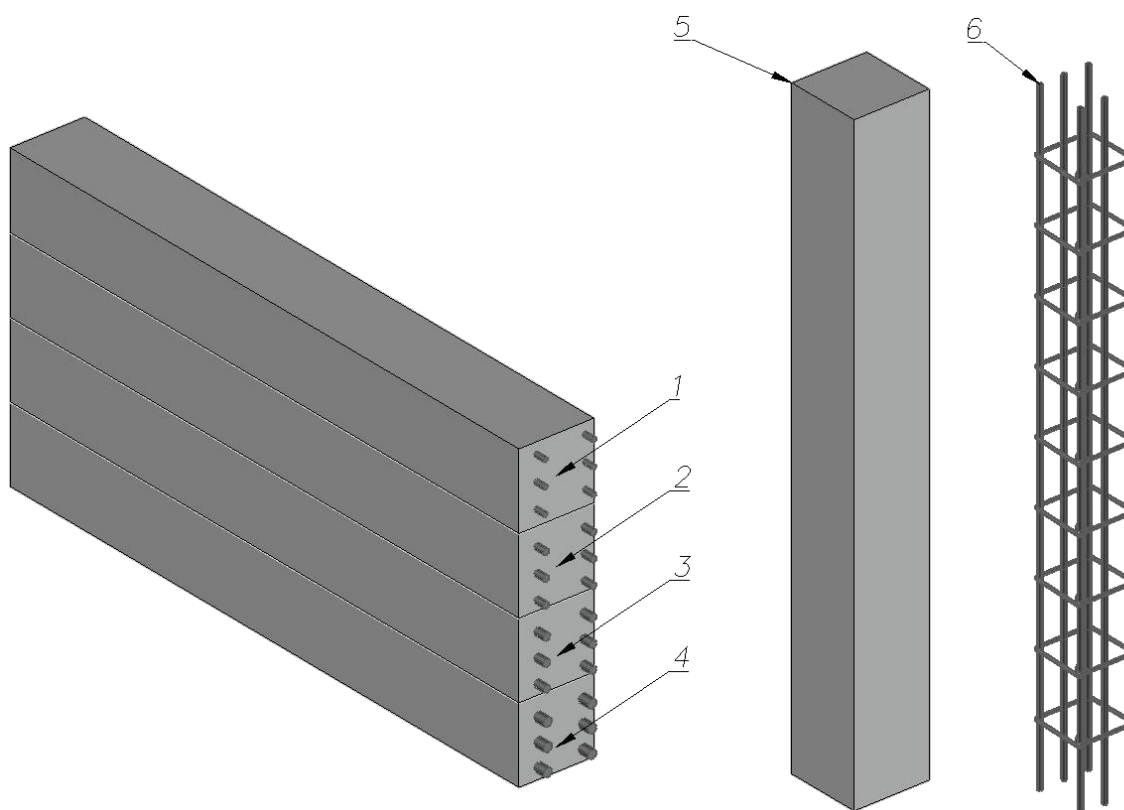


Rys. 6.7. Schemat budowy elementu badawczego C: a) przekrój pionowy; b) przekrój poziomy; c) konstrukcja strzemion

Dzięki zaprojektowanej geometrii elementu każdy ze słupów posiadał 4 zróżnicowane (pod względem geometrycznym) płaszczyzny boczne:

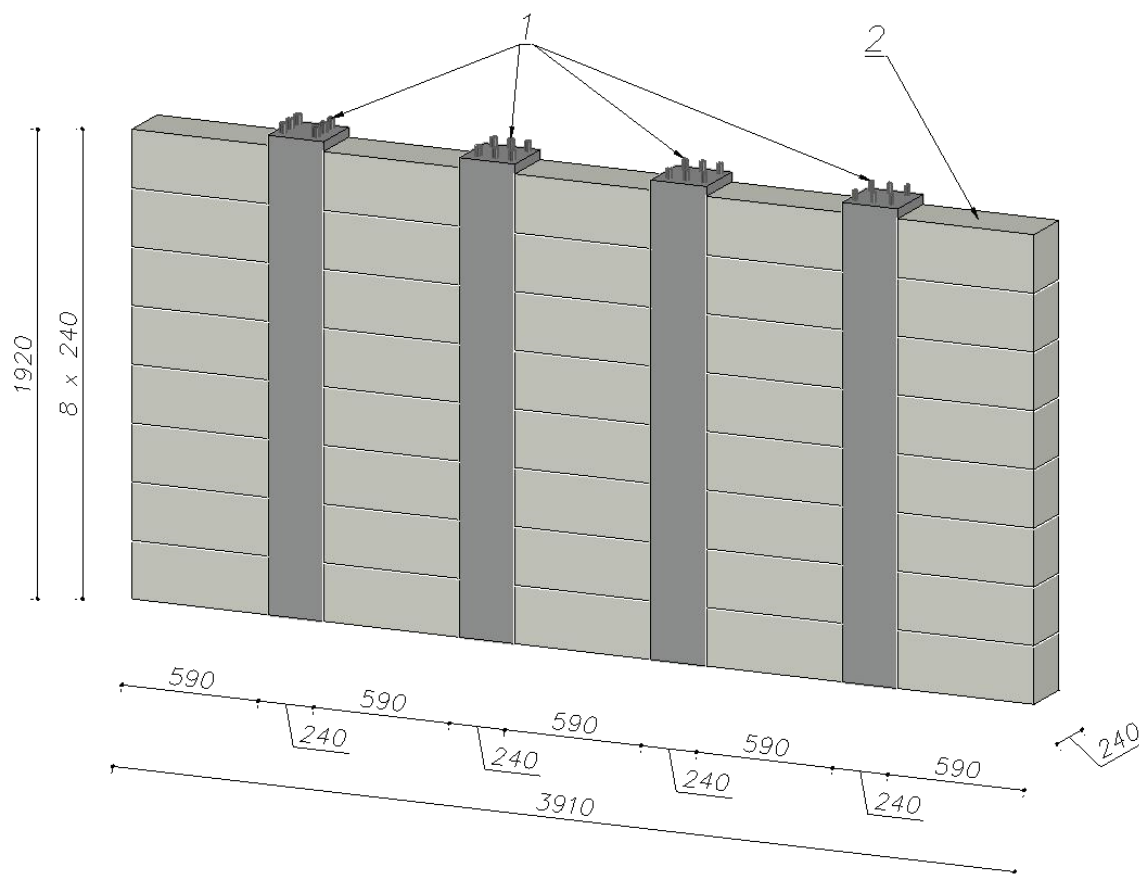
1. (oznaczenie: 2P_O46) – płaszczyzna z dwoma prętami zbrojenia głównego ułożonymi pod 46 mm warstwą betonu;
2. (oznaczenie: 3P_O46) – płaszczyzna z trzema prętami zbrojenia głównego ułożonymi pod 46 mm warstwą betonu;
3. (oznaczenie: 2P_O26) – płaszczyzna z dwoma prętami zbrojenia głównego ułożonymi pod 26 mm warstwą betonu;
4. (oznaczenie: 3P_O26) – płaszczyzna z trzema prętami zbrojenia głównego ułożonymi pod 26 mm warstwą betonu;

Dodatkowo każdy z 4 elementów różnił się średnicą zbrojenia głównego (w jednym słupie wszystkie 6 prętów głównych były tej samej średnicy). W badanych elementach zastosowano 4 różne średnice prętów: 12 mm; 16 mm; 20 mm oraz 25 mm. W sumie do przebadania przygotowano 16 różnych powierzchni. Rysunki poglądowe 3D przedstawiające słupek żelbetowy i zbrojenie wewnętrzne pokazano na rys. 6.8.



Rys. 6.8. Schemat 3D elementów żelbetowych: 1 – słupek ze zbrojeniem głównym $\text{Ø}12$ mm; 2 – słupek ze zbrojeniem głównym $\text{Ø}16$ mm; 3 – słupek ze zbrojeniem głównym $\text{Ø}20$ mm; 4 – słupek ze zbrojeniem głównym $\text{Ø}25$ mm; 5 – widok części betonowej; 6 – widok zbrojenie wewnętrzne (wtrącenia materiałowego)

Pomiędzy żelbetowymi słupami zostały wymurowane bloczki z betonu komórkowego o wymiarach 24 cm x 24 cm x 59 cm. Dzięki nim ograniczono efekt wychładzania krawędziowego podczas lokalizacji defektów znajdujących się blisko krawędzi badanego elementu (pręty w słupach). W elemencie badawczym C powierzchnia boczna słupów żelbetowych stykała się z bloczkiem z betonu komórkowego, a cały element stanowił jedną długą przegrodę budowlaną (rys. 6.9.).



Rys. 6.9. Element badawczy nr D: 1 – słupy żelbetowe o różnej średnicy zbrojenia głównego; 2 – bloczek z betonu komórkowego

6.1.1.2. Zastosowana aparatura badawcza




Główną aparaturą badawczą wykorzystywaną w doświadczeniach były kamery termowizyjne, promienniki podczerwieni oraz rejestratory danych z podłączonymi czujnikami temperatury i wilgotności względnej powietrza. Wykaz użytej najważniejszej aparatury badawczej oraz urządzeń i materiałów pomocniczych zestawiono w tabeli 6.1. Szczegółowe parametry techniczne poszczególnych kamer używanych w trakcie badań zestawiono w tabeli 6.2.

Tabela 6.1. Wykaz zastosowanej w niniejszej pracy aparatury badawczej i urządzeń pomocniczych

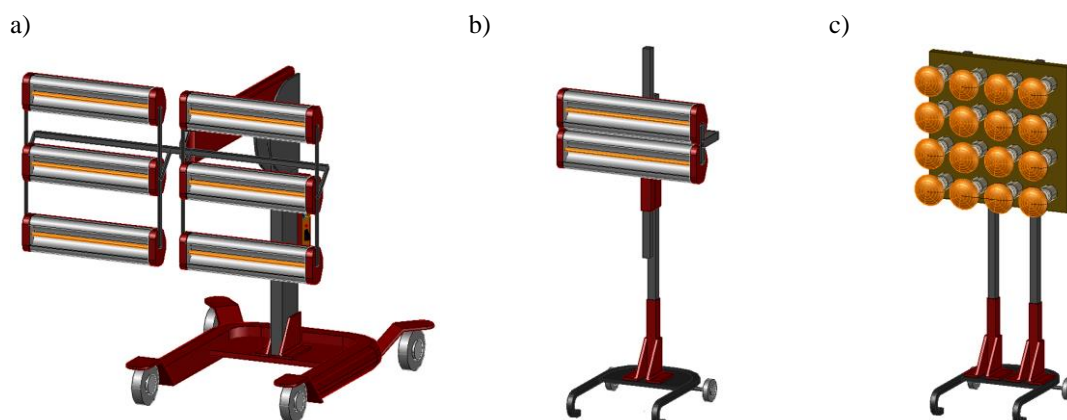
1	2	3	4
LP	Nazwa	Producent: Model	Opis użycia
APARATURA BADAWCZA			
1	Kamera termowizyjna	FLIR: P65	Pomiar rozkładu pola temperatury na badanych powierzchniach
2	Kamera termowizyjna	OPTRIS: PI400	Pomiar rozkładu pola temperatury na badanych powierzchniach
3	Kamera termowizyjna	FLIR: T640	Wyznaczenie emisyjności badanych powierzchni ⁴³
4	Promiennik podczerwieni	FOBO: GAD 2000	Wzbudzenie cieplne masywnych elementów budowlanych (moc urządzenia: 6 x 1200 W)
5	Promiennik podczerwieni	FOBO: EP 102	Wzbudzenie cieplne masywnych elementów budowlanych (moc urządzenia: 2 x 1000 W)
6	Promiennik podczerwieni	Konstrukcja własna	Wzbudzenie cieplne masywnych elementów budowlanych (moc urządzenia: 16 x 250 W)
7	Rejestrator danych - duży, 9-kanałowy	AHLBORN: ALMEMO 2890-9	Rejestracja danych temperaturowych z punktów pomiarowych termopar
8	Rejestrator danych - średni, 5-kanałowy	AHLBORN: ALMEMO 2690	Rejestracja danych temperaturowych z punktów pomiarowych termopar
9	Rejestrator danych - mały, 4-kanałowy	AHLBORN: ALMEMO 2590	Pomiar i rejestracja temperatury oraz wilgotności względnej powietrza
10	Miernik danych	FLIR MR77	Pomiar wilgotności względnej i temperatury powietrza podczas wyznaczania emisyjności
11	Wilgotnościomierz	Testo 606-2	Pomiar zawilgocenia badanych materiałów
URZĄDZENIA I MATERIAŁY POMOCNICZE			
12	Termopary	Almemo: Typ K (NiCr-Ni)	Pomiar temperatury w czasie, wewnątrz oraz na powierzchni badanych elementów
13	Komputer przenośny	Lenovo	Konfiguracja, synchronizacja i rejestracja danych temperaturowych z termopar
14	Dalmierz laserowy	BOSH	Wyznaczanie odległości pomiędzy kamerą termowizyjną a badaną powierzchnią
15	Rejestrator danych - mini, 2-kanałowy	Logger AZ 8829	Rejestracja temperatury i wilgotności względnej powietrza zewnętrznego
16	Waga laboratoryjna	Steinberg Systems: LW-10000A	Określenie podstawowych parametrów fizycznych (masy) badanych materiałów
17	Suwmiarka	Preisser Digi-Met	Określenie podstawowych parametrów fizycznych (wymiarów) badanych materiałów
18	Farba w sprayu	MFH: Czarna MAT RAL9021	Materiał pomocniczy do wyznaczenia emisyjności badanych powierzchni
19	Odblýśnik aluminiowy	Wykonanie własne	Materiał pomocniczy do wyznaczenia pozornej temperatury odbitej

⁴³ Kamera termowizyjna FLIR T640 jest o znacznie wyższej klasie niż pozostałe kamery termowizyjne użyte w doktoracie, ale została ona zakupiona pod koniec realizacji pracy doktorskiej i z tego powodu nie użyto jej w badaniach doświadczalnych (z oczywistych względów czasowych badania doświadczalne nie mogły zostać powtórzone z wykorzystaniem lepszej aparatury). Zdecydowano się jedynie na powtórzenie pomiarów parametru emisyjności i zaktualizowanie jego wartości w obliczeniach.

Tabela 6.2. Najważniejsze parametry techniczne kamer termowizyjnych wykorzystanych w niniejszej pracy (opracowanie własne na podstawie danych producentów)

1	2	3	4	5	6
LP	Parametr	Jednostka	FLIR: P65	FLIR: T640	OPTRIS: PI400
1	Zdjęcie	[-]			
2	Rodzaj detektora	[-]	Niechłodzony, FPA	Niechłodzony, FPA	Niechłodzony, FPA
3	Rozdzielczość detektora	[px]	320 x 240	640 x 480	382 x 288
4	Zakres widmowy	[μm]	7,5 - 13	7,5 - 13	7,5 – 13
5	Czułość termiczna (NETD)	[mK]	80	30	80
6	Obiektyw	[°]	24 x 18	25 x 19	62 x 49
7	Optyka (IFOV)	[mrad]	1,31	0,68	2,83

Do badań używano promienników podczerwieni o różnej mocy. Do pobudzenia cieplnego używano przede wszystkim promiennika podczerwieni o mocy 6 x 1,2 kW. Dodatkowo w celu sprawdzenia wpływu mocy pobudzenia na możliwość detekcji wtrąceń materiałowych w badaniach zastosowano również dwa mniejsze promienniki podczerwieni (rys. 6.10.).



Rys. 6.10. Promienniki podczerwieni zastosowane do pobudzenia cieplnego masywnych elementów budowlanych, urządzenia o mocy: a) 6 x 1200 W; b) 2 x 1000 W; c) 16 x 250 W (opracowanie własne)

6.1.1.3. Parametry fizyczno-ciepłne

Na mierzony rozkład pola temperatury podczas doświadczeń wpływ mają liczne parametry fizyczno-ciepłne badanych materiałów. Parametry te podzielono na 3 grupy tj.:

- przyjęte na podstawie różnych źródeł literaturowych,
- zmierzone,
- obliczone.

W tabeli 6.3. zestawiono właściwości fizyczno-ciepłne materiałów wg kolejności podanej w pkt 4.1.2.

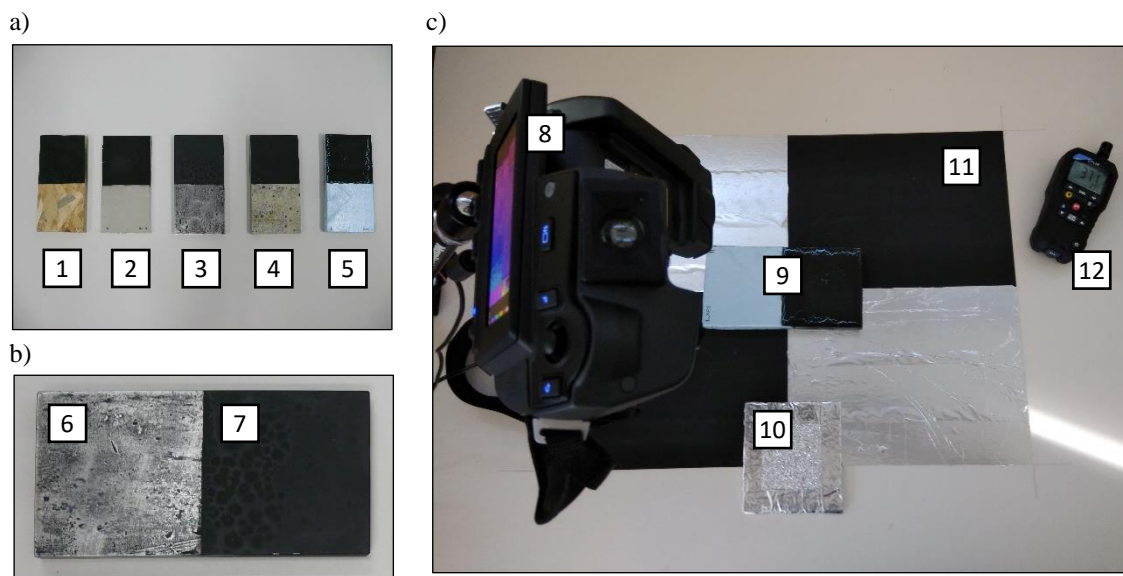
Tabela 6.3. Podstawowe parametry fizyczno-ciepłne materiałów wykorzystywanych do budowy elementów badawczych; w kolumnie 2 kolory odpowiadają parametrom: przyjętym – kolor czerwony; zmierzonym – kolor niebieski; obliczonym – kolor zielony (opracowanie własne na podstawie różnych źródeł)

L P	Parametr	Oznaczenie [Jednostka]	Wtrącenia materiałowe			Materiał bazowy (budulcowy)			
			XPS ¹	Granit	Stal ²	Płyta OSB	Płyta GK	Beton	Beton komór.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Gęstość objętościowa	ρ_0 [kg · m ⁻³]	35,6	2596,7	7837,9	594,3	581,1	2383,6	794,5
2	Wilgotność materiału	w [%]	0,0	0,0	0,0	7,1	0,5	1,3	0,7
3	Ciepło właściwe	c_p [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	1460,0	920,0	500,0	1700,0	1000,0	1000,0	840,0
4	Objętościowa pojemność cieplna	C_v [J · m ⁻³ · K ⁻¹]	0,052 · 10 ⁶	2,389 · 10 ⁶	3,918 · 10 ⁶	1,010 · 10 ⁶	0,581 · 10 ⁶	2,383 · 10 ⁶	0,667 · 10 ⁶
5	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	0,033	2,800	50,000	0,130	0,230	2,000	0,205
6	Dyfuzyjność cieplna	a [m ² · s ⁻¹]	0,635 · 10 ⁻⁶	1,172 · 10 ⁻⁶	12,759 · 10 ⁻⁶	0,129 · 10 ⁻⁶	0,396 · 10 ⁻⁶	0,839 · 10 ⁻⁶	0,307 · 10 ⁻⁶
7	Efuzyjność cieplna	e [W · s ^{1/2} · m ⁻² · K ⁻¹]	41,4	2586,3	13998,1	362,4	365,6	2183,4	369,9

8	Opór cieplny	R [m ² · K · W ⁻¹]	30,303	0,357	0,0200	7,692	4,348	0,500	4,878
9	Współczynnik absorpcyjny.	α [–]	0,504	0,830	0,516	0,966	0,912	0,931	0,728
10	Współczynnik refleksyjności	r [–]	0,496	0,170	0,484	0,034	0,088	0,069	0,272
11	Współczynnik przepuszczal.	p [–]	Nie dotyczy – patrz komentarz do wzoru 4.11 na stronie 49						
12	Współczynnik emisyjności	ε [–]	0,504	0,830	0,516	0,966	0,912	0,931	0,728
¹ XPS – styropian ekstrudowany ² Stal – parametry przyjęte jak dla stali budowlanej									
<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Gęstość objętościowa</i> – parametr obliczony na podstawie wzoru 4.1. Masa objętościowa wysuszonej próbki oraz jej objętość zostały zmierzone za pomocą suwmiarki oraz wagi laboratoryjnej (wg wykazu aparatury i urządzeń w tabeli 6.1.). Otrzymana wartość jest średnią arytmetyczną z pomiaru 5 próbek o wymiarach 200 x 100 x 20 mm. 2. <i>Wilgotność materiału</i> – parametr zmierzony za pomocą wilgotnościomierza w stanie powietrzno-suchym. 3. <i>Ciepło właściwe</i> – parametr przyjęty z literatury. 4. <i>Objętościowa pojemność cieplna</i> – parametr obliczony na podstawie wzoru 4.4. 5. <i>Współczynnik przewodzenia ciepła</i> – parametr przyjęty na podstawie literatury. 6. <i>Dyfuzyjność cieplna</i> – parametr obliczony na podstawie wzoru 4.6. 7. <i>Efuzyjność cieplna</i> – parametr obliczony na podstawie wzoru 4.7. 8. <i>Opór cieplny</i> – parametr obliczony na podstawie wzoru 4.8. Wynik jest oporem cieplnym materiału o grubości 1,0 m, dla innej grubości materiału wynik należy odpowiednio wymnożyć. 9. <i>Współczynnik absorpcyjności</i> – jest równy zmierzonemu współczynnikowi emisyjności (patrz wzory 4.13 oraz 4.15). 10. <i>Współczynnik refleksyjności</i> – parametr obliczony zgodnie ze wzorem 4.15. 11. <i>Współczynnik przepuszczalności</i> – dla nieprzeziernych materiałów budowlanych przyjmuje wartość 0. 12. <i>Współczynnik emisyjności</i> – parametr zmierzony wg procedury opisanej poniżej. 									

Na pomiar powierzchniowego rozkładu pola temperatury duży wpływ ma współczynnik emisyjności badanych powierzchni, który został wyznaczony doświadczalnie za pomocą

metody referencyjnej. Metoda ta polega na porównaniu dwóch powierzchni, które mają tę samą temperaturę, ale różną emisyjność. Jedna z badanych powierzchni ma znaną emisyjność, natomiast emisyjność drugiej powierzchni jest wyznaczana na podstawie tej pierwszej. Stanowisko oraz elementy badawcze, dla których wyznaczono nieznaną emisyjność przedstawiono na rys. 6.11.



Rys. 6.11. Stanowisko oraz elementy badawcze do wyznaczenia nieznannej emisyjności; a) widok ogólny próbek badawczych⁴⁴: 1 – OSB, 2 – GK, 3 – stal, 4 – granit, 5 – styrodur; b) widok szczegółowy próbki stalowej: 6 – powierzchnia o szukanej emisyjności, 7 – część próbki pomalowana czarną farbą matową o znanej emisyjności; c) widok ogólny stanowiska pomiarowego: 8 – kamera termowizyjna Flir T640, 9 – badana próbka, 10 – odbłyśnik, 11 – tło termiczne, 12 – rejestrator temperatury i wilgotności względnej powietrza

Stanowisko badawcze zostało szczelnie odizolowane od środowiska zewnętrznego obudową, która pozwoliła wyeliminować wpływ odbicia dodatkowych źródeł ciepła, np. promieniowania słonecznego. Procedura badawcza mająca na celu wyznaczenie szukanego parametru emisyjności składała się z 4 etapów:

1 ETAP (przygotowawczy):

- a) pomalowanie połowy badanej powierzchni próbek, czarną matową farbą w sprayu o znanej emisyjności wynoszącej 0,97 [63],
- b) odizolowanie stanowiska badawczego od środowiska zewnętrznego obudową,
- c) pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza pod obudową stanowiska badawczego, odległości kamery od badanej powierzchni i wprowadzenie tych parametrów do kamery termowizyjnej,

2 ETAP (pomiar pozornej temperatury odbitej):

- d) ułożenie odbłyśnika (wykonanego z folii aluminiowej) o dużym współczynniku odbicia na powierzchni badanej próbki ($r \approx 0,9$),

⁴⁴ Emisyjność dla betonu oraz bloczków z betonu komórkowego została wyznaczona w taki sposób jak dla próbek laboratoryjnych, ale pomiar był wykonany bezpośrednio na stanowisku badawczym.

- e) ustawienie obszarów pomiarowych w postaci prostokątów⁴⁵ w programie do analizy obrazu termowizyjnego, po jednym obszarze na powierzchni o znanej i szukanej emisyjności (w tym etapie obszary „widzą” odbłyśnik),
- f) ustawienie współczynnika emisyjności równego 1,0 i zmierzenie pozornej temperatury odbitej w każdym z obszarów pomiarowych.

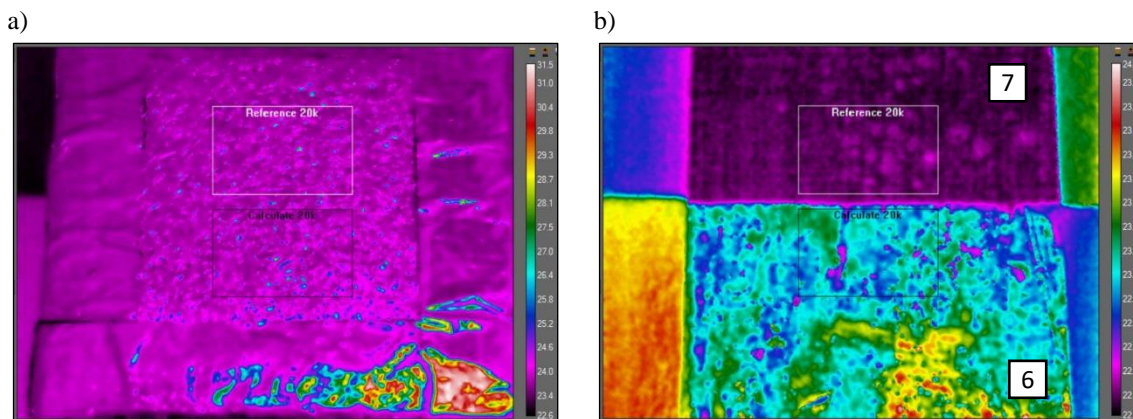
3 ETAP (pomiar rzeczywistej temperatury powierzchni o znanej emisyjności):

- a) ustawienie w kamerze parametru emisyjności dla całego obrazu o wartości 0,97,
- b) ustawienie w kamerze parametru pozornej temperatury odbitej dla obszaru pomiarowego referencyjnego (o znanej emisyjności) obliczonej w etapie 2,
- c) wykonanie termogramu z rzeczywistą temperaturą obszaru referencyjnego.

4 ETAP (obliczenie szukanej emisyjności):

- a) ustawienie temperatury pozornej odbitej w programie do analizy termowizyjnej (ResearchIR 4 MAX) dla obszaru z szukanym parametrem emisyjności,
- b) przyjęcie założenia, że temperatura całej powierzchni próbki jest taka sama,
- c) zmienianie współczynnika emisyjności obszaru pomiarowego z szukaną wartością tego współczynnika do momentu aż temperatury z obu obszarów będą równe (funkcja automatyczna w oprogramowaniu).

Przykładowe termogramy wykonane podczas procedury wyznaczenia współczynnika emisyjności metodą referencyjną pokazano na rys. 6.12.



Rys. 6.12. Przykładowe termogramy, na podstawie których wyznaczono współczynnik emisyjności dla próbki stalowej: a) etap 2 z widocznym odbłyśnikiem; b) etap 3 z widoczną powierzchnią próbki; w górnej części termogramów znajduje się powierzchnia referencyjna pomalowana czarną matową farbą, natomiast w dolnej części jest powierzchnia, której emisyjność jest wyznaczana; oznaczenia wg rys. 6.11

⁴⁵ W celu zmierzenia uśrednionego współczynnika emisyjności dla całej powierzchni badanej próbki, obszar pomiarowy składał się z 20 tysięcy punktów pomiarowych. W przypadku doboru zbyt małych obszarów pomiarowych np. punktów 3x3 piksele istnieje ryzyko wyznaczenia lokalnego współczynnika emisyjności (np. ziarna w granicy lub stali) dla badanej powierzchni, który może znacząco różnić się od uśrednionej emisyjności dla całej powierzchni.

6.1.2. Stanowiska doświadczalne

W ramach realizacji głównych celów pracy doktorskiej zbudowano 3 główne stanowiska doświadczalne. Na każdym stanowisku przebadano inny rodzaj elementu budowlanego. Wszystkie elementy badawcze, użyte materiały do ich budowy jak i wykorzystaną aparaturę badawczą i pomocnicze urządzenia oraz materiały opisano w punkcie 6.1.1.

Badania doświadczalne w niniejszej pracy zostały wykonane na następujących stanowiskach badawczych:

STANOWISKO 1: przebadano elementy badawcze nr A oraz B (modele przegród budowlanych wykonanych z płyty GK oraz płyty OSB)

STANOWISKO 2: przebadano element badawczy nr C (ściana murowana z bloczków z betonu komórkowego ze słupami żelbetowymi)

Szczegółowy opis stanowisk badawczych oraz ich zmodyfikowanych wersji zamieszczono poniżej.

6.1.2.1. Model przegrody z płyt OSB i płyt GK

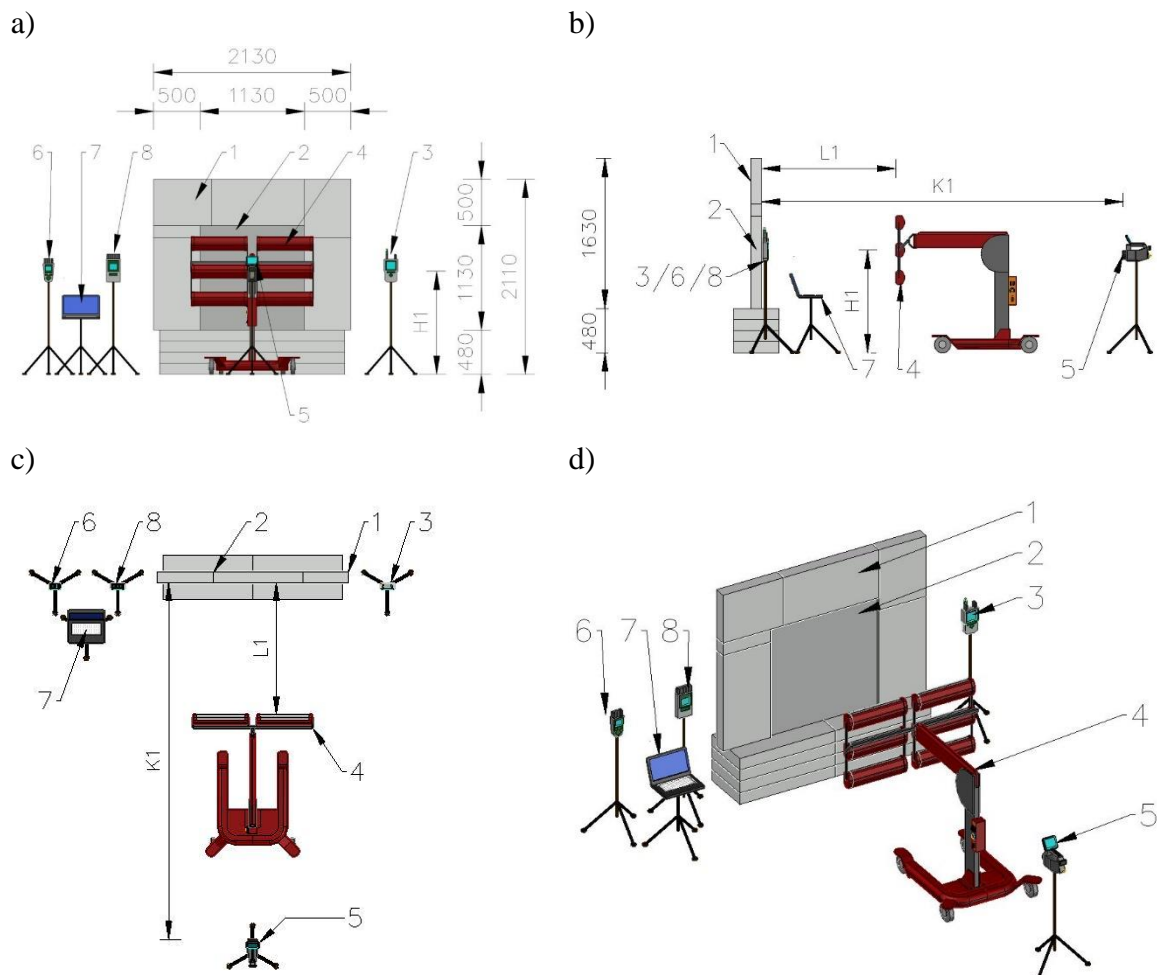
Na stanowisku badawczym nr 1 zbadano możliwości lokalizacji dużych wtrąceń materiałowych w modelach przegród budowlanych wykonanych w technologii lekkiej (np. szkieletowej) z materiałów takich jak płyty OSB i płyty GK. Głównymi elementami stanowiska badawczego były:

- badany element,
- kamera termowizyjna (2 kamery termowizyjne),
- promiennik podczerwieni o mocy 6 x 1,2 kW.

Pierwszy wariant tego stanowiska przedstawiono na rys. 6.13. Promiennik podczerwieni był usytuowany w 3 różnych odległościach od pobudzonej powierzchni, tj. 0,5 m; 1,0 m oraz 1,5 m. Dzięki temu można było zbadać wpływ odległości źródła ciepła oraz intensywności ogrzania powierzchni na możliwości lokalizacji wtrąceń. Kamera termowizyjna znajdowała się w takiej odległości od badanej powierzchni, aby cały badany element modelu przegrody znajdował się w kadrze obiektywu⁴⁶. Środek obiektywu kamery termowizyjnej oraz środek promiennika podczerwieni pokrywał się z centralnym punktem badanego obiektu i znajdował się na wysokości około 105 cm od powierzchni terenu. Wokół badanego modelu przegrody zamontowano ramkę termoizolacyjną o szerokości 50 cm wykonaną ze styropianu EPS. Ramka ta miała na celu niedopuszczenie do sytuacji jednoczesnego ogrzewania elementu po obu stronach na skutek owiewania tylnej powierzchni elementu przez ciepłe powietrze od przodu. Dzięki zastosowaniu ramki termoizolacyjnej podczas doświadczenia stymulowano cieplnie tylko jedną (przednią) stronę modelu przegrody oraz uniknięto pojawienia się zjawiska wychładzania krawędziowego, czyli zaburzenia rozkładu pola temperatury na obrzeżach

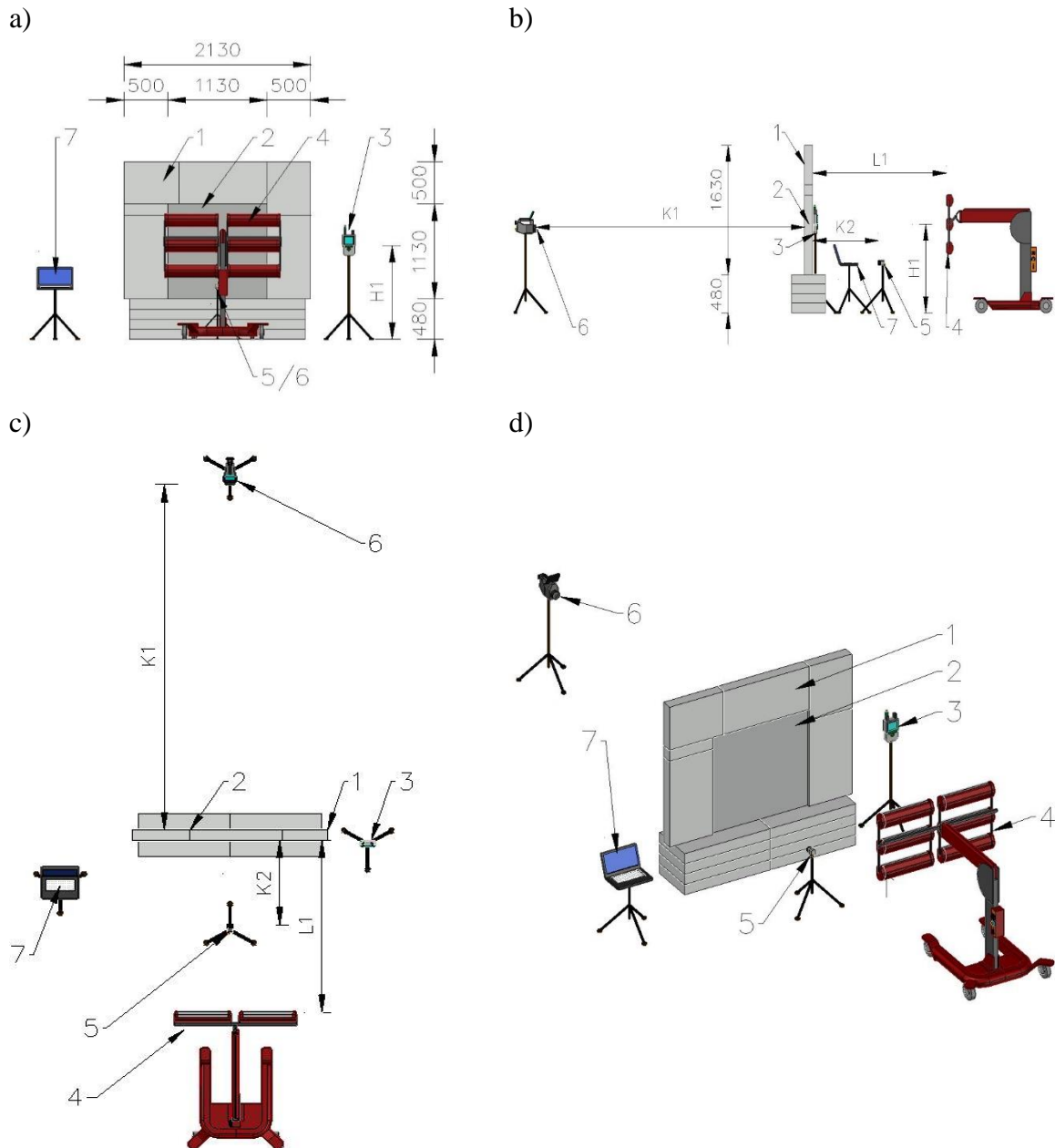
⁴⁶ Dla kamery termowizyjnej Flir P65 była to odległość około 4,0 m, natomiast dla kamery termowizyjnej OPTRIS PI400 odległość do powierzchni wynosiła około 1,5 m.

badanego elementu. Dodatkowo na stanowisku badawczym znajdowały się rejestratory temperatur z termopar (usytuowanie termopar opisano w punkcie 6.1.1), laptop do zapisu danych w czasie rzeczywistym oraz czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza obok stanowiska badawczego.



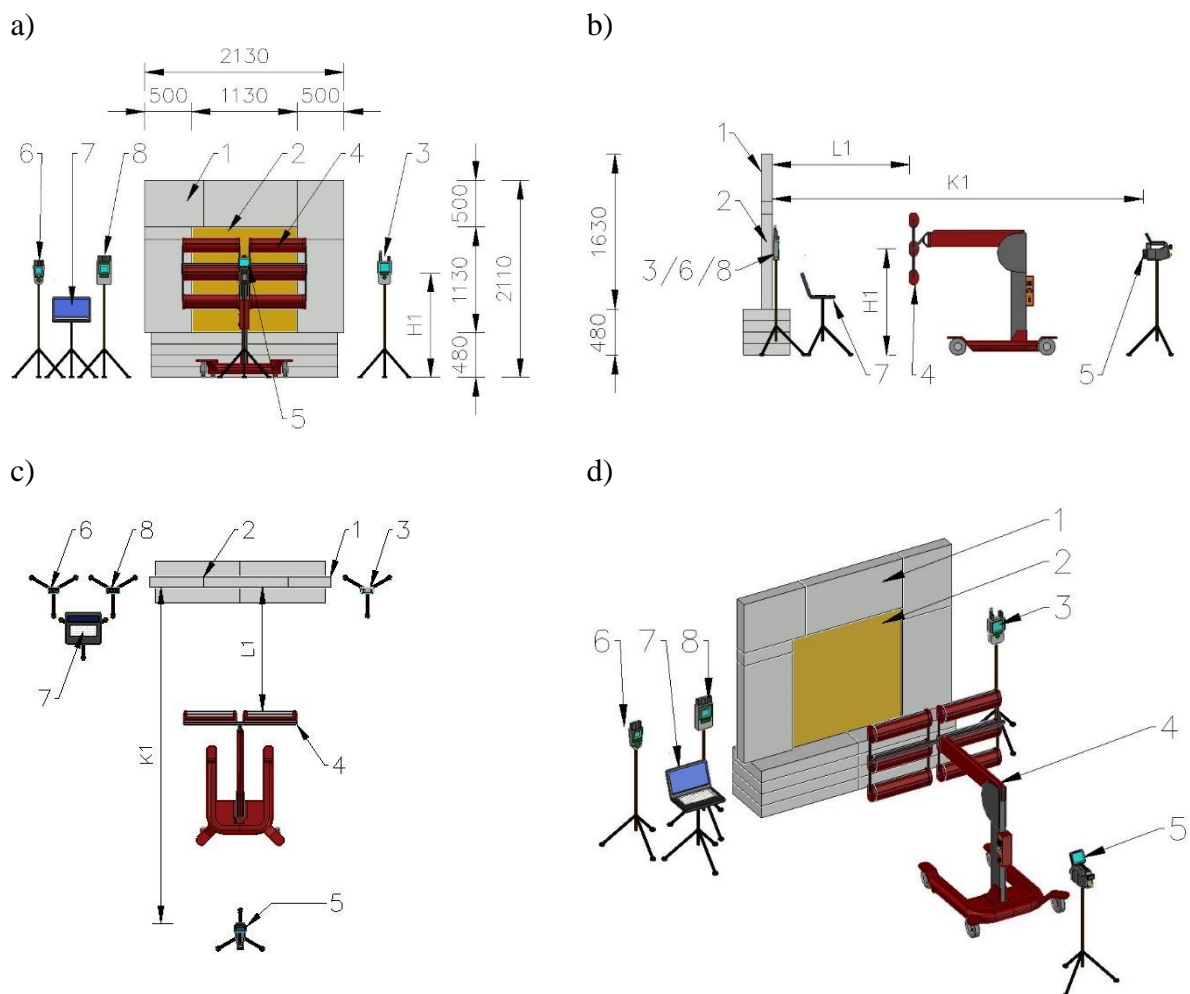
Rys. 6.13. Stanowisko pomiarowe do badań lokalizacji wtrąceń materiałowych w modelu przegrody z płyty GK, a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok ogólny 3D; oznaczenia: 1 – ramka termoizolacyjna, 2 – badany element z płyty GK, 3 – czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza, 4 – promiennik podczerwieni 6 x 1,2 kW, 5 – kamera termowizyjna FLIR P65, 6 – rejestrator temperatury z termopar, 7 – laptop, 8 – rejestrator temperatury z termopar, L1 – odległość promiennika podczerwieni od stymulowanej powierzchni, K1 – odległość kamery termowizyjnej od badanej powierzchni, H1 – wysokość środka promiennika podczerwieni i kamery termowizyjnej od powierzchni terenu (opracowanie własne)

W drugim wariacie badań (rys. 6.14.) zastosowano jednocześnie dwie kamery termowizyjne. Po stronie pobudzonej (przedniej) znajdowała się kamera OPTRIS PI400 natomiast po drugiej stronie (tylnej) kamera FLIR P65. Pierwsza kamera rejestrowała rozkład pola temperatury w trybie odbiciowym (refleksyjnym) z odległości około 1,5 m natomiast druga kamera działała w trybie transmisyjnym i była usytuowana w odległości około 4,0 m od badanej powierzchni. Pozostały układ stanowiska badawczego był taki sam jak w pierwszym wariacie.

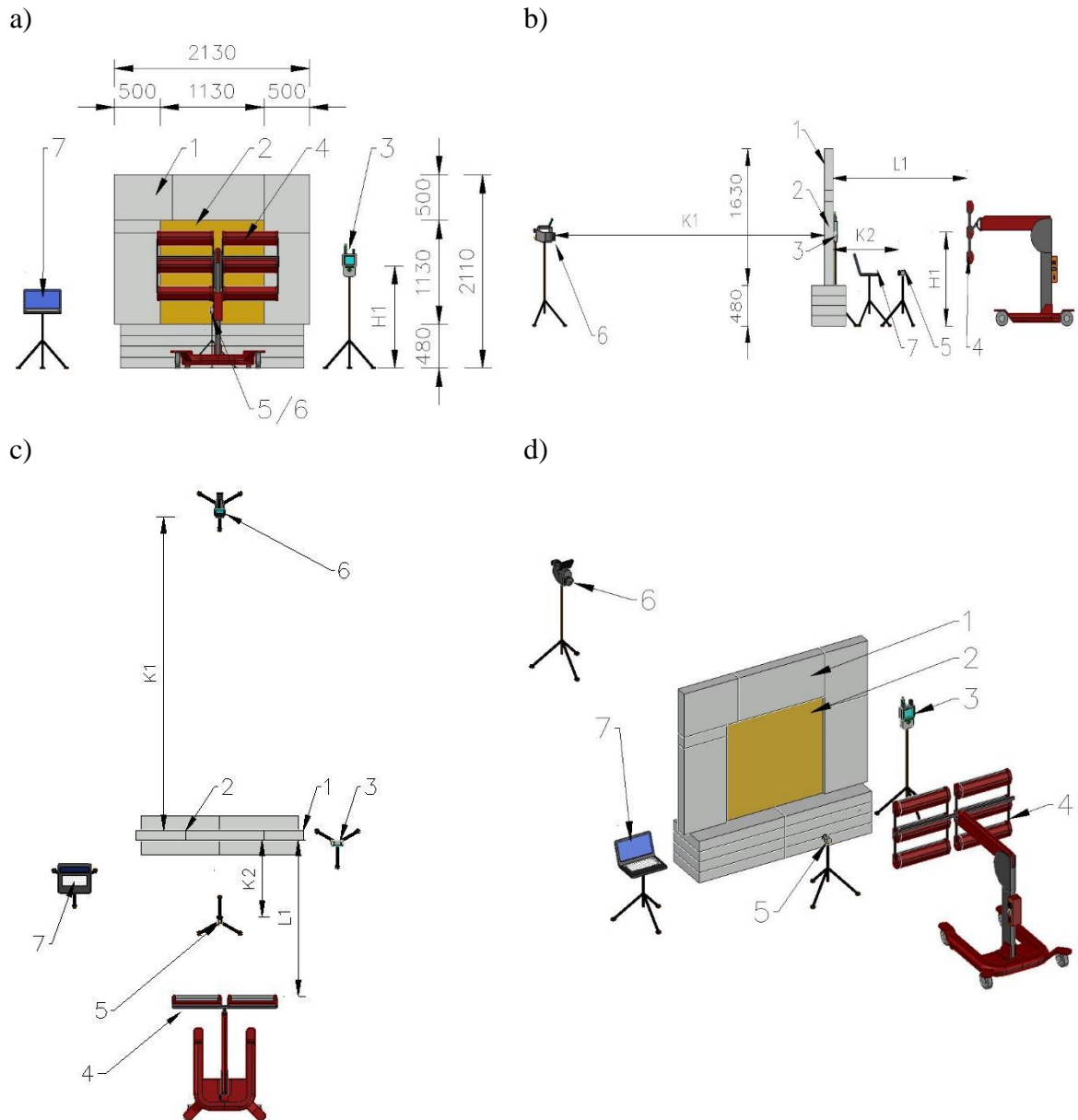


Rys. 6.14. Stanowisko pomiarowe do badań lokalizacji wtrąceń materiałowych w modelu przegrody z płyty GK z użyciem 2 kamer termowizyjnych, a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok ogólny 3D; oznaczenia: 1 – ramka termoizolacyjna, 2 – badany element z płyty GK, 3 – czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza, 4 – promiennik podczerwieni mocy 6 x 1,2kW, 5 – kamera termowizyjna OPTRIS PI 400 (tryb odbiciowy), 6 – kamera termowizyjna FLIR P65 (tryb transmisyjny), 7 – laptop, L1 – odległość promiennika podczerwieni od stymulowanej powierzchni, K1 – odległość pierwszej kamery termowizyjnej od badanej powierzchni, K2 – odległość drugiej kamery termowizyjnej od badanej powierzchni, H1 – wysokość środka promiennika podczerwieni i kamery termowizyjnej od powierzchni terenu (opracowanie własne)

Trzeci wariant badań (rys. 6.15.) odpowiada budową wariantowi pierwszemu natomiast wariant **czwarty** (rys. 6.16.) odpowiada wariantowi drugiemu. Jediną różnicą w trzecim i czwartym wariantcie jest zbadanie modelu przegrody wykonanej z płyty OSB (w wariantcie pierwszym i drugim badano model przegrody z płyty GK).



Rys. 6.15. Stanowisko pomiarowe do badań lokalizacji wtrąceń materiałowych w modelu przegrody z płyty OSB, a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok ogólny 3D; oznaczenia: 1 – ramka termoizolacyjna, 2 – badany element płyty OSB, 3 – czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza, 4 – promiennik podczerwieni o mocy 6 x 1,2kW, 5 – kamera termowizyjna FLIR P65, 6 – rejestrator temperatury z termopar, 7 – laptop, 8 – rejestrator temperatury z termopar, L1 – odległość promiennika podczerwieni od stymulowanej powierzchni, K1 – odległość kamery termowizyjnej od badanej powierzchni, H1 – wysokość środka promiennika podczerwieni i kamery termowizyjnej od powierzchni terenu (opracowanie własne)

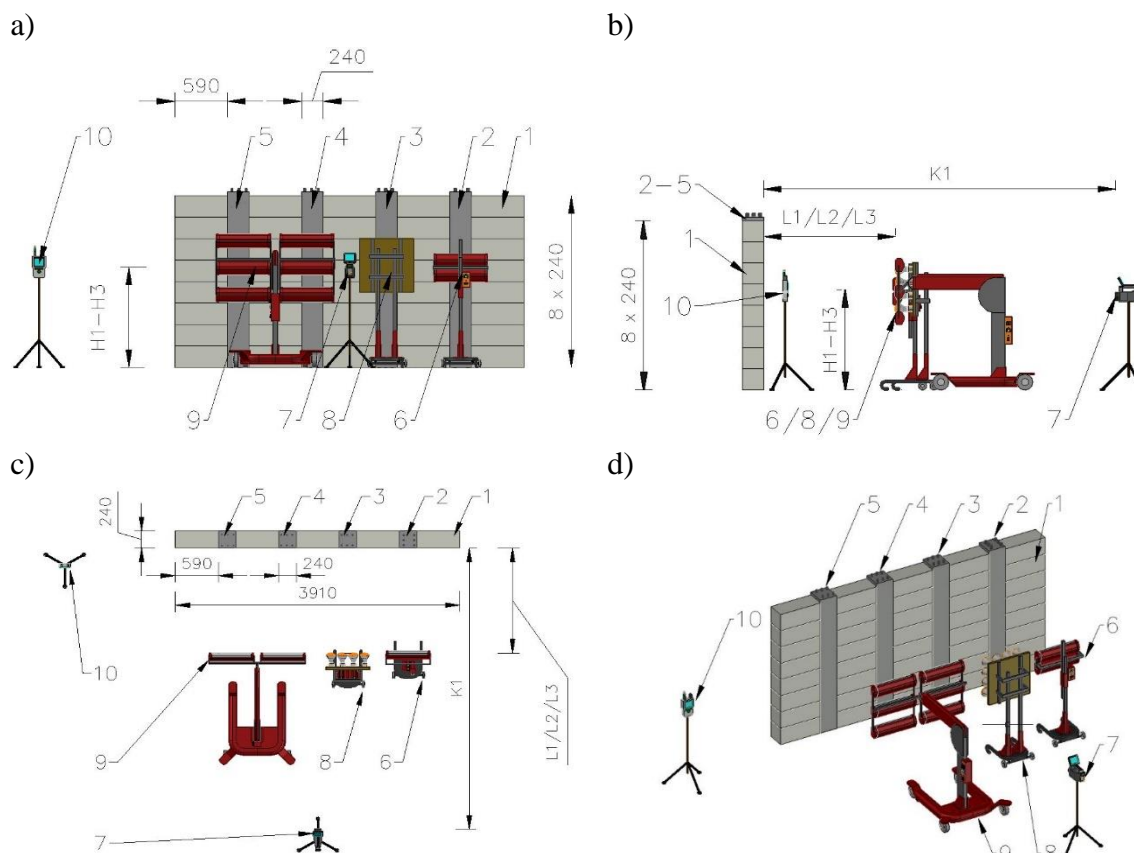


Rys. 6.16. Stanowisko pomiarowe do badań lokalizacji wtrąceń materiałowych w modelu przegrody z płyty GK z użyciem 2 kamer termowizyjnych, a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok ogólny 3D; oznaczenia: 1 – ramka termoizolacyjna, 2 – badany element z płyty OSB, 3 – czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza, 4 – promiennik podczerwieni o mocy 6x1,2kW, 5 – kamera termowizyjna OPTRIS PI400 (tryb odbiciowy), 6 – kamera termowizyjna FLIR P65 (tryb transmisyjny), 7 – laptop, L1 – odległość promiennika podczerwieni od stymulowanej powierzchni, K1 – odległość pierwszej kamery termowizyjnej od badanej powierzchni, K2 – odległość drugiej kamery termowizyjnej od badanej powierzchni, H1 – wysokość środka promiennika podczerwieni i kamery termowizyjnej od powierzchni terenu (opracowanie własne)

6.1.2.2. Ściana murowana z elementami żelbetowymi

Na stanowisku nr 2 sprawdzono możliwość detekcji wtrąceń materiałowych (w postaci prętów zbrojenia głównego) w elementach żelbetowych. Słupy żelbetowe znajdowały się w płaszczyźnie wymurowanej ściany z bloczków z betonu komórkowego. Bloczki użyte do

murowania były wymiarów 590 mm x 240 mm x 240 mm. Słupy żelbetowe były zwrócone do kamery termowizyjnej bokiem z 3 prętami (wyjątek stanowił słup z prętami o średnicy 25 mm, który był zwrócony bokiem z 2 prętami przy badanej powierzchni).

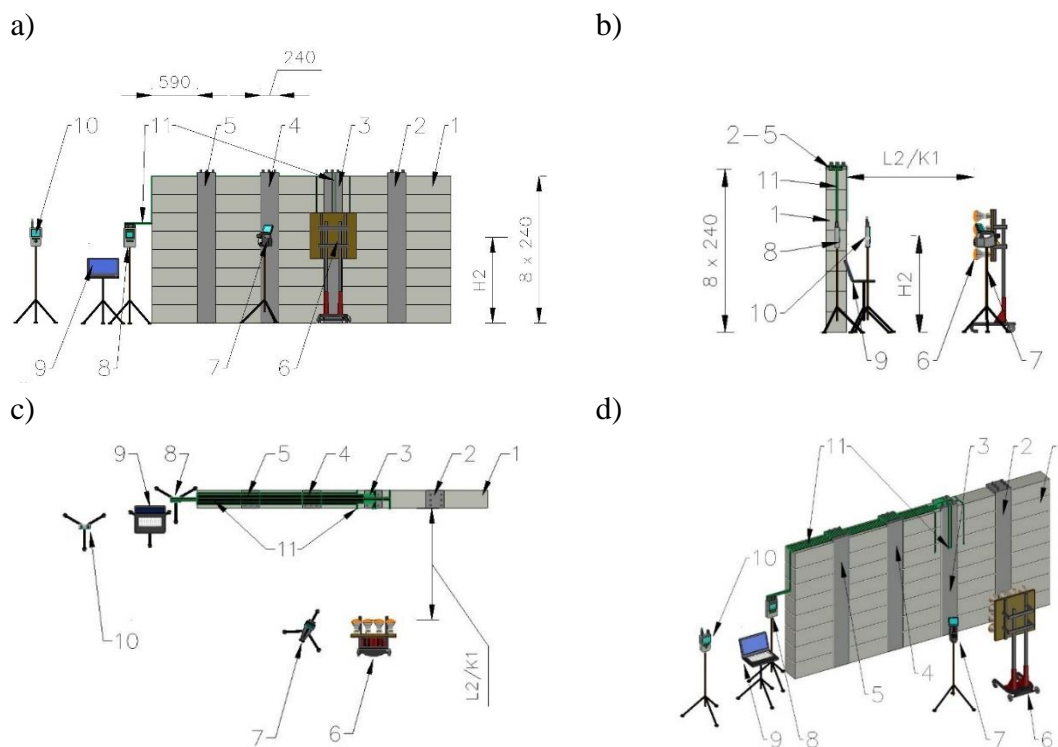


Rys. 6.17. Stanowisko pomiarowe do badań lokalizacji wtrąceń materiałowych w elementach murowych, a) widok z przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok ogólny 3D; oznaczenia: 1 – element murowy z betonu komórkowego, 2 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 25 mm, 3 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 20 mm, 4 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 16 mm, 5 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 12 mm, 6 – promiennik podczerwieni o mocy 2 x 1kW, 7 – kamera termowizyjna, 8 – promiennik podczerwieni o mocy 16 x 250, 9 – promiennik podczerwieni o mocy 6 x 1,2kW, 10 – czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza, L1-3 – odległość promienników podczerwieni od stymulowanej powierzchni, K1 – odległość kamery termowizyjnej od badanej powierzchni, H1-3 – wysokość środka promienników podczerwieni i kamery termowizyjnej od powierzchni terenu (opracowanie własne)

W pierwszy wariantcie (rys. 6.17.) sprawdzono wpływ mocy źródła ciepłego i ułożenia lamp grzewczych na sposób w jaki zostanie ogrzana powierzchnia. Wszystkie trzy promienniki podczerwieni znajdowały się w odległości 1,0 m od ściany. Kamera termowizyjna była ustawiona od ogrzewanej powierzchni w odległości około 10,0 m i obejmowała swoim obiektywem całą powierzchnię ściany.

W drugim wariantcie badań (rys. 6.18.) do pobudzenia ciepłego powierzchni użyto jednego rodzaju promienników podczerwieni o łącznej mocy 16x250W. Dodatkowo w centralnym punkcie powierzchni ogrzewanej umieszczono termopary po obu stronach badanej przegrody murowanej tj. po stronie przedniej (ogrzewanej) i tylnej (nieogrzewanej). Dzięki temu sprawdzono czy energia cieplna dostarczona na przednią powierzchnię na skutek przewodzenia

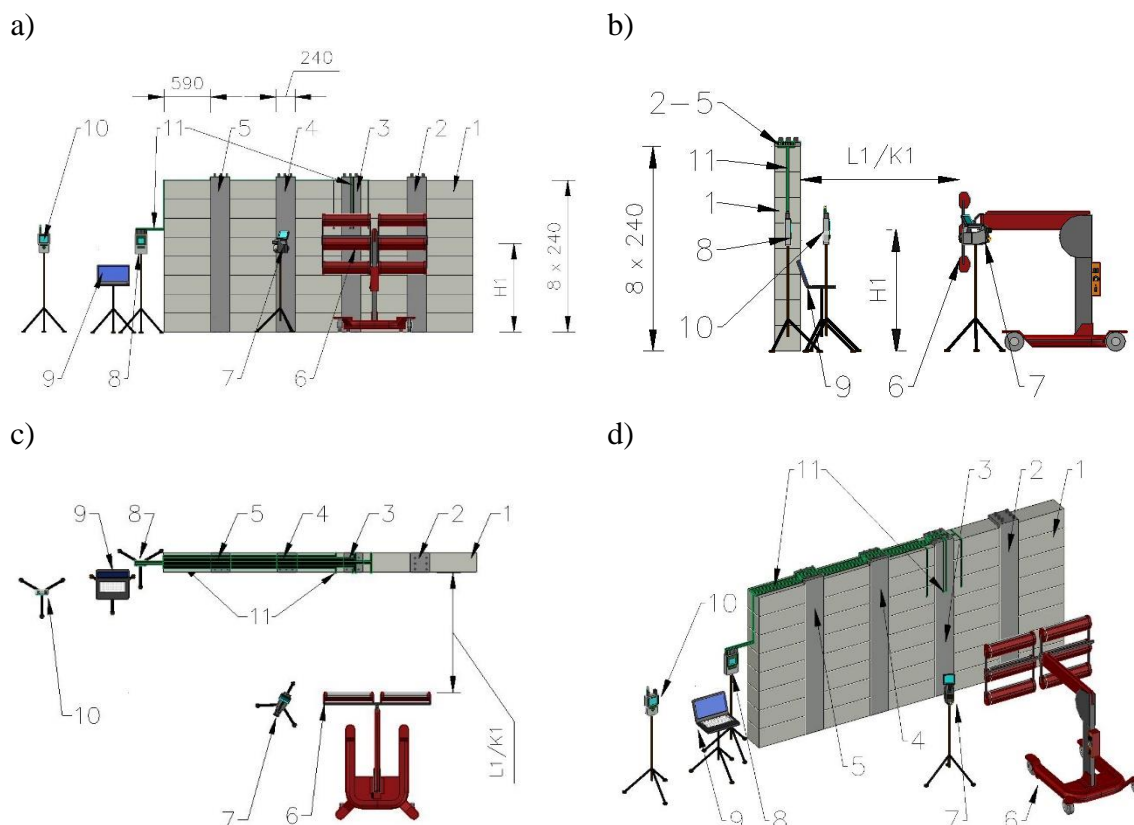
ciepła przedostała się na powierzchnię tylną. Promiennik podczerwieni był ustawiany w odległości 0,5 m i 1,0 m od powierzchni ściany⁴⁷. Kamera termowizyjna znajdowała się w odległości około 1,0 m od badanych elementów.



Rys. 6.18. Stanowisko pomiarowe do badań lokalizacji wtrąceń materiałowych w elementach murowych, a) widok od przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok ogólny 3D; oznaczenia: 1 – element murowy z betonu komórkowego, 2 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 25 mm, 3 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 20 mm, 4 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 16 mm, 5 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 12 mm, 6 – promiennik podczerwieni o mocy 16 x 250W, 7 – kamera termowizyjna FLIR P65, 8 – rejestrator temperatury z termopar, 9 – laptop, 10 – czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza, 11 – przewody termopar, L2 – odległość promiennika podczerwieni od stymulowanej powierzchni, K1 – odległość kamery termowizyjnej od badanej powierzchni, H2 – wysokość środka promiennika podczerwieni i kamery termowizyjnej od powierzchni terenu (opracowanie własne)

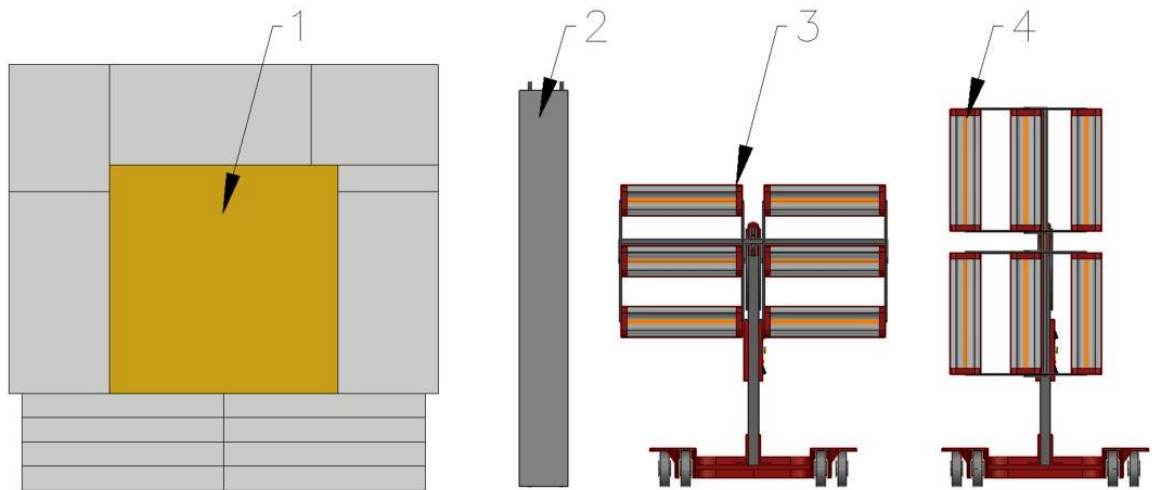
Trzeci wariant badań (rys. 6.19.) różnił się od wariantu drugiego zastosowaniem innego źródła ciepła, tj. promiennika podczerwieni o mocy 6 x 1,2 kW. Promiennik ten był usytuowany względem powierzchni ściany w odległościach 0,5 m; 1,0 m oraz 1,5 m. Wszystkie inne parametry stanowiska badawczego były takie same jak w wariacie drugim.

⁴⁷ Nie ustawiono promiennika w odległości 1,5 m z uwagi na jego zbyt niską moc grzewczą, która z tej odległości powodowała wzrost temperatury ogrzewanej powierzchni jedynie o kilkanaście stopni Celsjusza.



Rys. 6.19. Stanowisko pomiarowe do badań lokalizacji wtrąceń materiałowych w elementach murowych, a) widok od przodu, b) widok z boku, c) widok z góry, d) widok ogólny 3D; oznaczenia: 1 – element murowy z betonu komórkowego, 2 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 25 mm, 3 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 20 mm, 4 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 16 mm, 5 – badany element o średnicy zbrojenia głównego \varnothing 12 mm, 6 – promiennik podczerwieni o mocy 6 x 1,2 kW, 7 – kamera termowizyjna FLIR P65, 8 – rejestrator temperatury z termopar, 9 – laptop, 10 – czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza, 11 – przewody termopar, L2 – odległość promiennika podczerwieni od stymulowanej powierzchni, K1 – odległość kamery termowizyjnej od badanej powierzchni, H2 – wysokość środka promiennika podczerwieni i kamery termowizyjnej od powierzchni terenu (opracowanie własne)

Dla każdego stanowiska badawczego, dodatkowej analizie poddano wpływ ułożenia lamp grzejnych względem badanych powierzchni (wtrąceń materiałowych). Dla promiennika podczerwieni o mocy 16 x 250 W nie miało to znaczenia z uwagi na prostokątny kształt powierzchni grzejnej z układem żarówek w 4 rzędach po 4 lampy w kolumnie. Analizę taką przeprowadzono dla najczęściej używanego w doświadczeniach promiennika podczerwieni o mocy 6 x 1,2 kW. Pozwalał on na podgrzanie powierzchni elementów badawczych, przy odpowiednio długim czasie działania i niewielkiej odległości od powierzchni, nawet do ponad 100 °C. Promiennik ten był ustawiany pionowo lub poziomo względem badanego elementu. Ułożenie lamp grzejnych miało największy wpływ na możliwości lokalizowania wtrąceń materiałowych w przypadku defektów o kształcie podłużnym (pręty zbrojeniowe w słupach żelbetowych). Schematyczny układ lamp grzejnych względem badanych elementów pokazano na rys. 6.20.



Rys. 6.20. Przykład różnego usytuowania promiennika podczerwieni względem badanej powierzchni; oznaczenia: 1 – badany element modelu przegrody, 2 – badany element elementu żelbetowego, 3 – usytuowanie poziome lamp promiennika podczerwieni, 4 – usytuowanie pionowe źródła pobudzenia ciepłego

6.1.3. Pomiary

W badaniach wariantowano takie elementy jak:

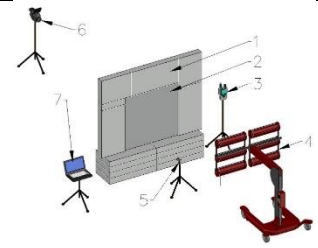
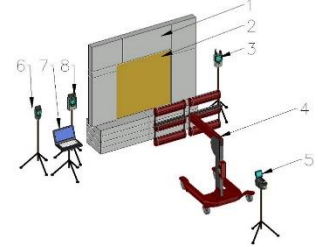
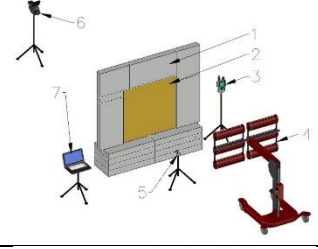
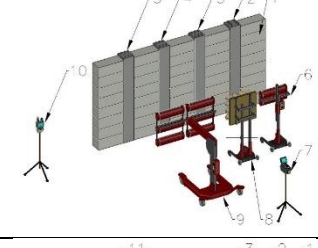
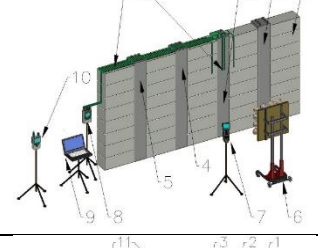
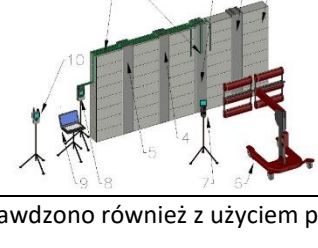
- odległość promiennika podczerwieni od badanej powierzchni,
- czas prowadzenia nagrzewu za pomocą źródła ciepła,
- układ lamp grzejnych w stosunku do badanego elementu (pionowy lub poziomy),
- moc źródła ciepła (używanie 3 promienników podczerwieni o różnej mocy).

W tabeli 6.4. zamieszczono podsumowanie przedstawiające wszystkie warianty przeprowadzonych badań doświadczalnych w laboratorium z podziałem na rodzaj stanowiska badawczego, odległość promiennika podczerwieni od elementu, czas prowadzonego nagrzewu, oraz układ lamp grzejnych względem powierzchni.

Tabela 6.4. Podsumowanie wszystkich wariantów przeprowadzonych badań doświadczalnych

Numer i wariant stanowiska	Rysunek stanowiska badawczego	Odległość promiennika od elementu	Czas nagrzewu powierzchni	Układ lamp grzejnych
[-]	[-]	[m]	[min]	[-]
1	2	3	4	5
Stanow. 1 Wariant I		0,5 m 1,0 m 1,5 m	30 min 30 min 30 min	Poziomo (a) Poziomo (b) Poziomo (c)

BADANIA WŁASNE

Stanow. 1 Wariant II		1,5 m	30 min	Poziomo (a)
Stanow. 1 Wariant III		0,5 m 1,0 m 1,5 m	30 min 30 min 30 min	Poziomo (a) Poziomo (b) Poziomo (c)
Stanow. 1 Wariant IV		1,5 m	10 min 20 min 30 min 40 min 50 min 60 min	Poziomo (a) Poziomo (b) Poziomo (c) Poziomo (d) Poziomo (e) Poziomo (f)
Stanow. 2 Wariant I		0,5 m	30 min	Poziomo (a)
Stanow. 2 Wariant II		0,5 m 1,0 m 1,5 m	120 min 120 min 120 min	Nie dotyczy (a) Nie dotyczy (b) Nie dotyczy (c)
Stanow. 2 Wariant III		0,5 m ¹⁾ 1,0 m ¹⁾	60 min 60 min	Poziomo (a) Poziomo (b)
¹⁾ Warianty sprawdzono również z użyciem promiennika podczerwieni o mocy 2x1kW.				

Dla przyjętych materiałów bazowych⁴⁸, wtrąceń materiałowych, przyjętej budowy stanowisk badawczych oraz wykonanych pomiarów wg tabeli 6.4., można już było na wstępie

⁴⁸ Materiał bazowy w literaturze przedmiotu nazywany jest też „Sound Area”. Jest to materiał, w którym poszukiwane są defekty i wtrącenia materiałowe.

wyznaczyć dwa parametry, które wskazywały na możliwość wykrywania wad metodą termografii aktywnej.

Pierwszy z parametrów był to *współczynnik niedopasowania termicznego* obliczony wg wzoru (4.16) i opisany w rozdziale 4.1.2. niniejszego opracowania. Wartości tego parametru przedstawiono w tabeli 6.5.

Tabela 6.5. Wartość współczynnika niedopasowania termicznego dla materiałów bazowych użytych w badaniach doświadczalnych

LP	Materiał bazowy	Efuzyjność cieplna materiału bazowego e_{mat}	Materiał defektu	Efuzyjność cieplna materiału defektu e_{def}	Współczynnik niedopasowania termicznego* $\Gamma_{mat,def}$
[-]	[-]	$[W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	[-]	$[W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	[-]
1	Płyta gipsowo-kartonowa	365,57	Styrodur	41,42	-0,796
2	Płyta gipsowo-kartonowa	365,57	Granit	2 586,33	0,752
3	Płyta gipsowo-kartonowa	365,57	Stal	13 998,12	0,949
4	Płyta OSB	362,42	Styrodur	41,42	-0,795
5	Płyta OSB	362,42	Granit	2586,33	0,754
6	Płyta OSB	362,42	Stal	13 998,12	0,950
7	Beton	2 183,37	Stal	13 998,12	0,730

*Parametr ten przyjmuje wartości w zakresie od -1 do +1. Im jest bliższy wartości granicznych (-1 i +1) tym lepsze zróżnicowanie termiczne materiału bazowego i zawartego w nim defektu (łatwiej wykryć defekt).

Powyższe wyniki potwierdzają, że dobrane materiały bazowe oraz materiały lokalizowanych defektów pozwalają na ich detekcję. Biorąc pod uwagę jedynie parametr współczynnika niedopasowania termicznego, najtrudniejszymi defektami do zlokalizowania były pręty stalowe w elementach betonowych (wartość parametru 0,73), natomiast najłatwiejsze do detekcji były wtrącenia stalowe zarówno w modelu przegrody z płyty OSB (wartość parametru 0,95) jak i z płyty GK (wartość parametru 0,949).

Drugim wskaźnikiem, pomocnym przy wstępnym teoretycznym wskazaniu możliwości lokalizacji defektów był parametr *efektywnej drogi dyfuzji termicznej*, L [m]. Jest on miarą głębokości wnikania ciepła w strukturę materiału podczas badania próbki metodą termografii aktywnej impulsowej, oblicza się ją ze wzoru 6.1 [44]:

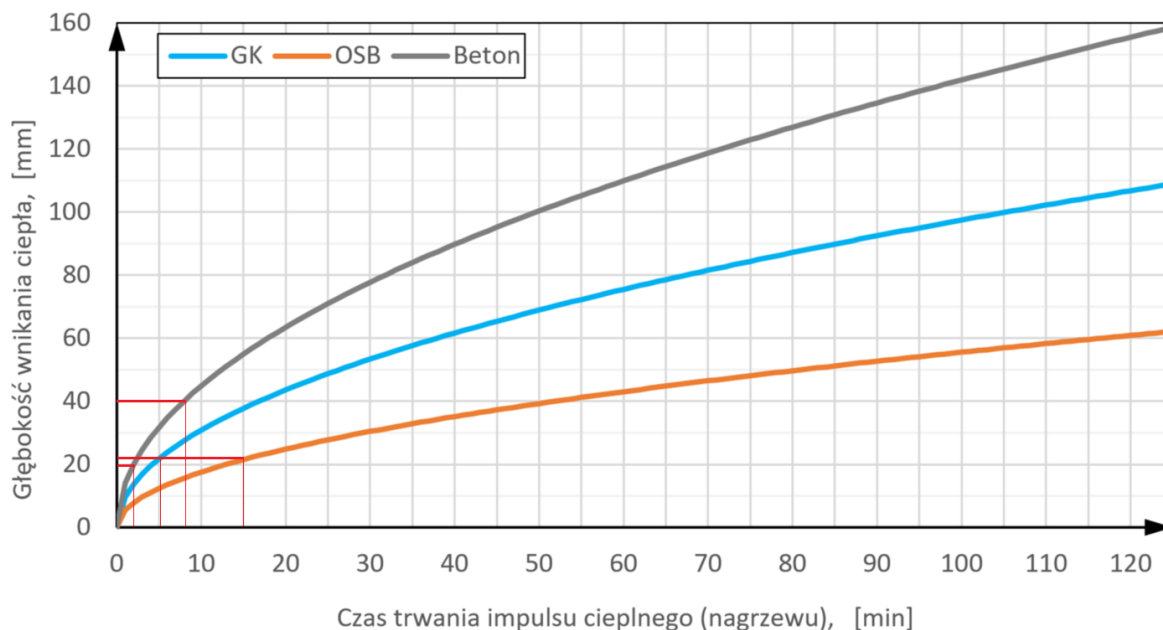
$$L = 2 \cdot \sqrt{a \cdot t}, [m] \quad (6.1)$$

gdzie: a – dyfuzyjność cieplna badanego materiału, $[m^2 \cdot s^{-1}]$,
 t – czas trwania impulsu cieplnego, [s].

Dla zastosowanych materiałów bazowych można wyznaczyć głębokość wnikania ciepła w strukturę tych materiałów w zależności od długości trwania impulsu cieplnego⁴⁹. Na

⁴⁹ Dokonana analiza nie uwzględniała mocy źródła ciepła i jego odległości od badanej powierzchni (stopnia nagrzewu powierzchni). Wzór ten w przybliżony sposób wskazuje wymagany czas trwania pobudzenia cieplnego, w celu zlokalizowania defektów umieszczonych na odpowiednich głębokościach pod badaną powierzchnią.

rys. 6.21. przeskalowano poziomą oś czasu z sekund na minuty oraz pionową oś głębokości wnikania ciepła z metrów na milimetry.



Rys. 6.21. Wykres efektywnej drogi dyfuzji termicznej w materiałach bazowych użytych w badaniach doświadczalnych (opracowanie własne)

W modelach przegród lekkich wykonanych z płyt OSB i płyt GK wtrącenia materiałowe znajdowały się na głębokości 22 mm pod badaną powierzchnią. W przypadku elementów żelbetowych, lokalizowane defekty w postaci prętów zbrojenia głównego znajdowały się pod warstwą betonu o grubości 26 mm i 46 mm. Z wykresu efektywnej drogi dyfuzji termicznej (rys. 6.21.). można zauważyć, że minimalny wymagany czas nagrzewu badanej powierzchni, aby energia cieplna dotarła co najmniej na głębokość usytuowania defektu, wynosi:

- dla płyty GK 22 mm około 5 min
- dla płyty OSB 22 mm około 15 min
- dla elementów betonowych: 20 mm około 2 min
40 mm około 8 min

Powyższe założenia dotyczyły pomiaru przeprowadzonego w trybie odbiciowym (kamera termowizyjna rejestruje rozkład pola temperatury po stronie ogrzewanej powierzchni). Dla trybu transmisyjnego (kamera termowizyjna znajduje się po przeciwnej stronie ogrzewanej powierzchni badanego elementu) minimalny czas nagrzewu powinien pozwolić przeniknąć energii cieplnej przez całą grubość badanego elementu. W przypadku założeń dla prowadzonych prac eksperymentalnych na potrzeby niniejszej pracy doktorskiej, minimalny czas nagrzewu dla pomiaru termowizyjnego w trybie transmisyjnym powinien wynosić (wzór (6.1)):

- dla płyty GK 64 mm około 43 min
- dla płyty OSB 64 mm około 130 min
- dla elementów betonowych: 240 mm około 286 min

Uwzględniając powyższe, przeprowadzono badania doświadczalne dla 3 stanowisk badawczych w różnych wariantach wg tabeli 6.4. Procedura badawcza w każdym z tych doświadczeń składała się z 5 etapów:

ETAP I (przygotowawczy):

- 1) pomiar temperatury i wilgotności względnej powietrza obok stanowiska badawczego, odległości kamery od badanej powierzchni i wprowadzenie tych parametrów do kamery termowizyjnej.

ETAP II (pomiar odbicia):

- 2) ułożenie odbłyśnika (wykonanego z folii aluminiowej) o bardzo dużym współczynniku odbicia na powierzchni badanej próbki,
- 3) ustawienie obszaru pomiarowego w postaci prostokąta⁵⁰ na powierzchni odbłyśnika usytuowanego w centralnej części badanego elementu,
- 4) ustawienie współczynnika emisyjności równego 1,0 i zmierzenie pozornej temperatury odbitej w obszarze pomiarowym,
- 5) ustawienie w kamerze parametru emisyjności dla całego obrazu,
- 6) ustawienie w kamerze parametru pozornej temperatury odbitej dla całego obszaru pomiarowego.

ETAP III (nagrzew)

- 7) rozpoczęcie rejestracji temperatury mierzonej termoparami. Pomiar był rozpoczynany na 5 min przed włączeniem nagrzewu w celu sprawdzenia stabilności cieplnej (równowagi) badanego elementu z otoczeniem. Termopary rejestrowały pomiar co 20 s,
- 8) pobudzenie cieplne badanego elementu poprzez nagrzanie powierzchni przez określony czas przy użyciu promiennika podczerwieni,
- 9) wyłączenie i odsunięcie źródła ciepła z równoczesnym rozpoczęciem rejestracji rozkładu pola temperatury na badanej powierzchni.

ETAP IV (stygnięcie):

- 10) w momencie wyłączenia źródła ciepła, następowało włączenie kamery termowizyjnej (kamer termowizyjnych) i rejestracja rozkładu pola temperatury na badanej powierzchni. Rejestracja termogramów odbywała się co 20 s zarówno dla kamery termowizyjnej FLIR P65 jak i OPTRIS PI400,
- 11) pełny etap stygnięcia trwał od kilku do kilkunastu godzin (moment uzyskania równowagi termicznej badanego elementu z otoczeniem), natomiast rejestracja termogramów trwała do 8 h od momentu wyłączenia promienników podczerwieni,
- 12) temperatura mierzona termoparami była rejestrowana cyklicznie co 20 s zarówno na etapie nagrzewu jak i stygnięcia badanego elementu (podobnie jak rejestracja kamerą termowizyjną trwała do 8 h od wyłączenia nagrzewu).

⁵⁰ W celu zmierzenia uśrednionej wartości temperatury odbitej dla całej powierzchni badanej próbki, obszar pomiarowy składał się z 20 tysięcy punktów pomiarowych (powierzchnia pomiarowa ustawiona na całą powierzchnię odbłyśnika).

ETAP V (analiza):

- 13) przeprowadzenie analizy otrzymanych termogramów w programie ResearchIR 4 MAX, Wolfram Mathematica oraz Microsoft Excel.

6.1.4. Wyniki badań doświadczalnych

6.1.4.1. Metoda opracowania wyników

Przedstawione wyniki są wartościami temperatur wprost z zarejestrowanych termogramów (dla przyjętych wartości parametru emisyjności powierzchni wg tabeli 6.3.). Odczytane wartości przedstawiono w postaci:

- a) rozkładu pola temperatur (termogram) w konkretnych momentach czasu z legendą wartości temperatury dla poszczególnych kolorów termogramu,
- b) wykresu zmiany temperatury w czasie dla charakterystycznych punktów termogramu,
- c) profilu temperatury dla charakterystycznego przekroju termogramu w konkretnej chwili czasu (profile temperatury),

Otrzymane wyniki z przeprowadzonych badań doświadczalnych opracowano w dedykowanym oprogramowaniu firmy FLIR: ResearchIR 4 MAX⁵¹. Wartości temperatury były odczytywane w programie dla punktu pomiarowego o wielkości 3x3 piksele.

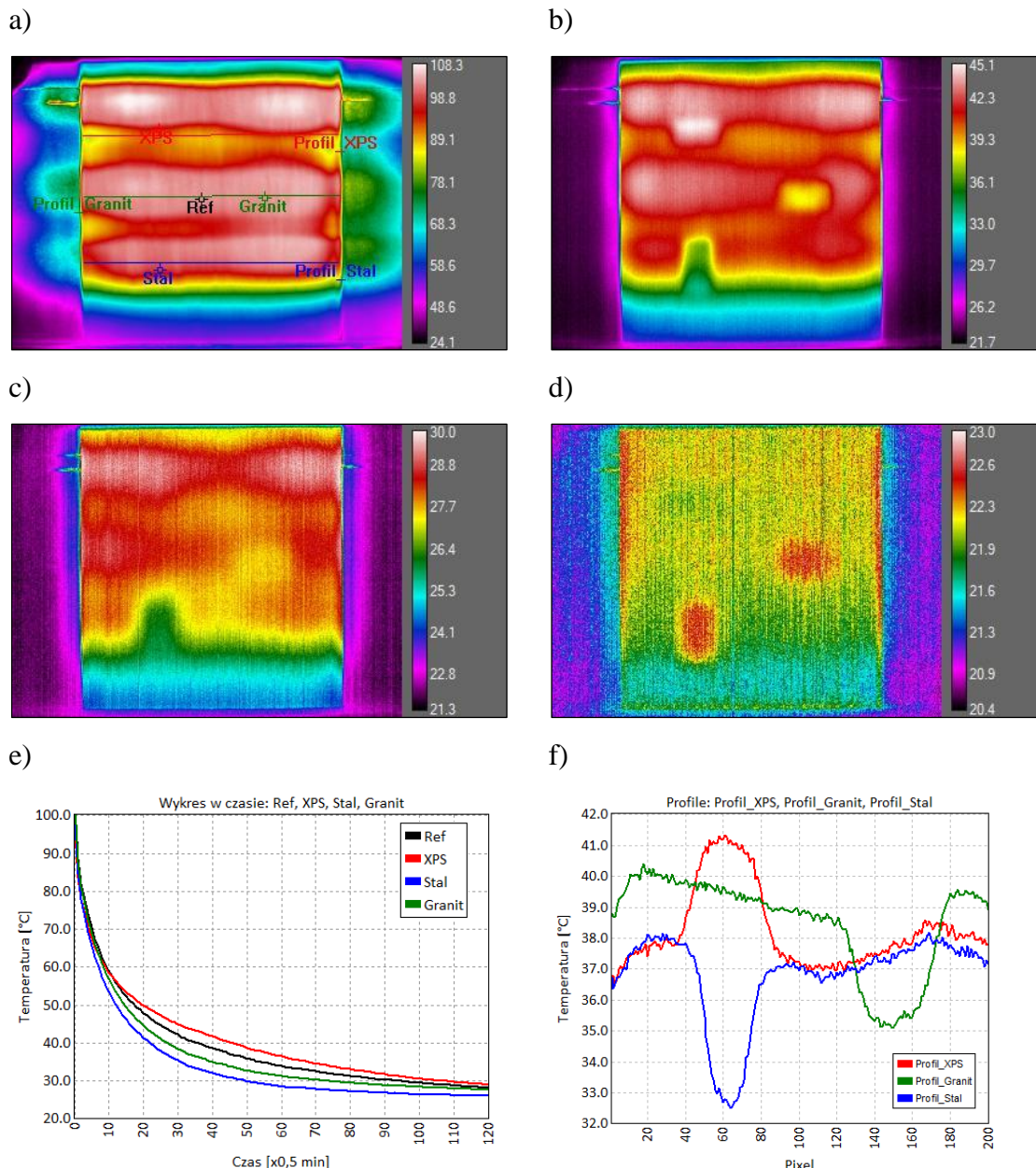
6.1.4.2. Wybrane wyniki badań

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki dla 44 kombinacji przeprowadzonych badań laboratoryjnych (wg tabeli 6.4.).

⁵¹ Ze względu na użycie drugiej dodatkowej kamery termowizyjnej innego producenta, dla stanowiska badawczego nr 1 w wariantach II i IV termogramy wykonane w trybie refleksyjnym analizowano przy użyciu oprogramowania Optris PI Connect.

STANOWISKO NR 1: WARIANT I (a)

Materiał bazowy: *plyta GK*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *0,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*



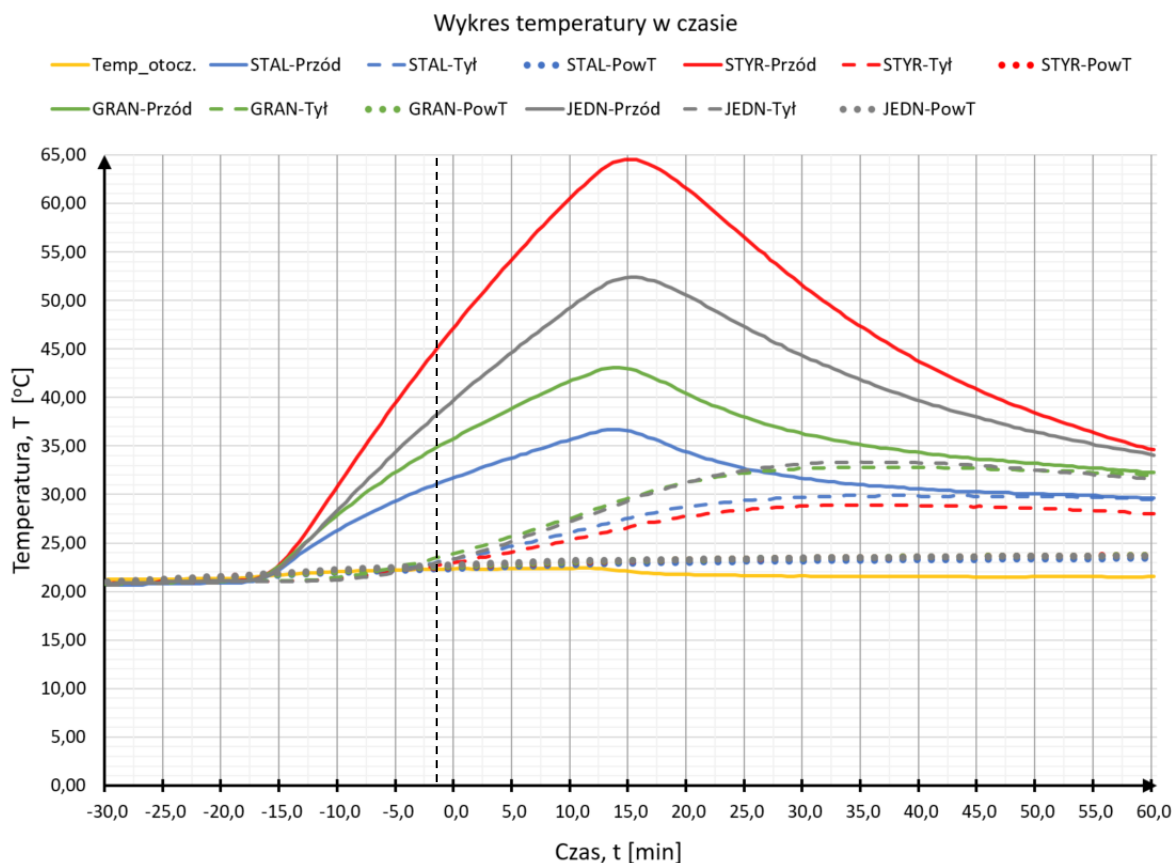
Rys. 6.22. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie Ia przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 0,5 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 15 min, c) termogram dla 60 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 20 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -30 min do 0 min

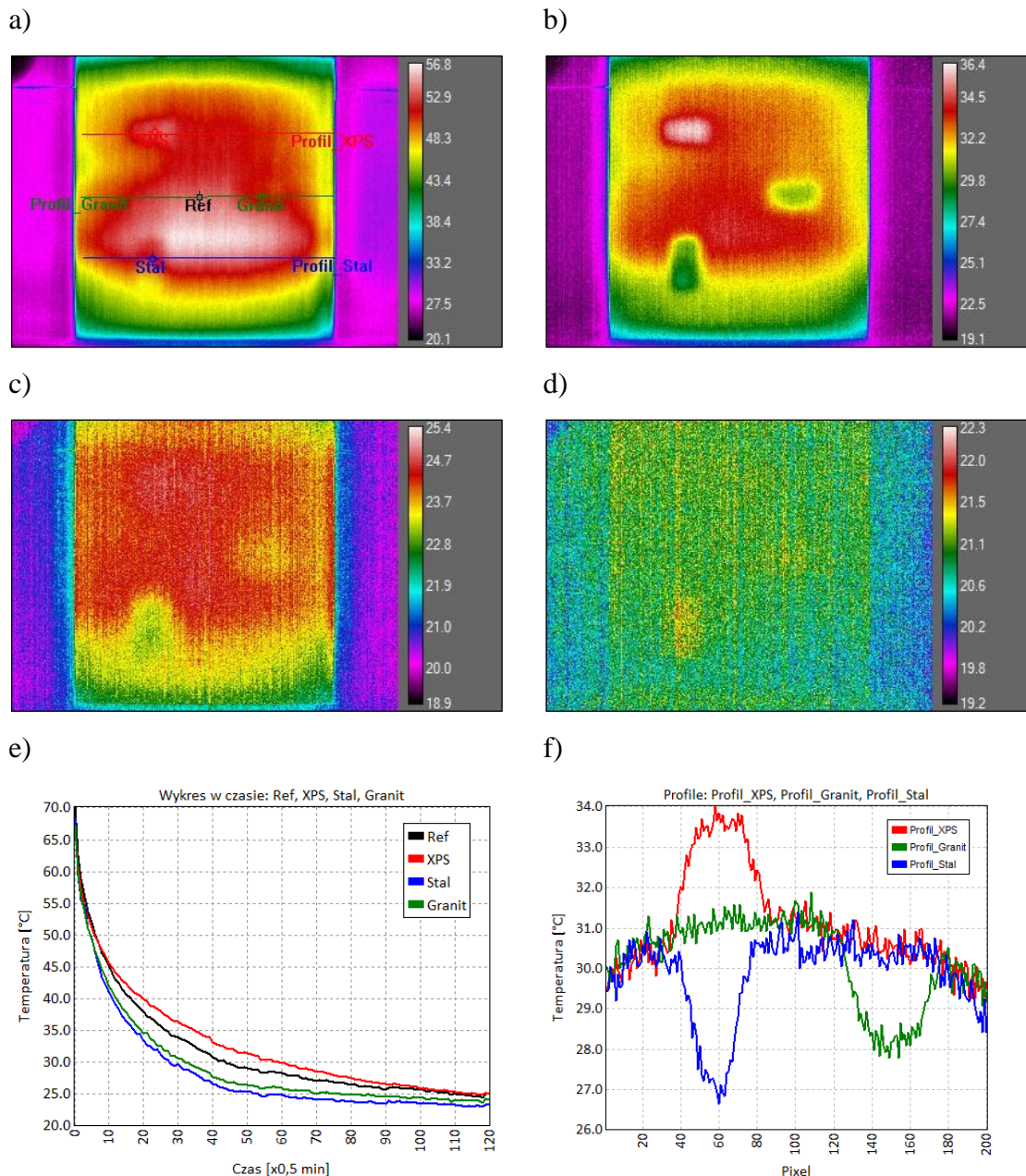
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.23. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie Ia; temperaturę mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni oraz wewnątrz elementu)

STANOWISKO NR 1: WARIANT I (b)

Materiał bazowy: *plyta GK*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,0 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*



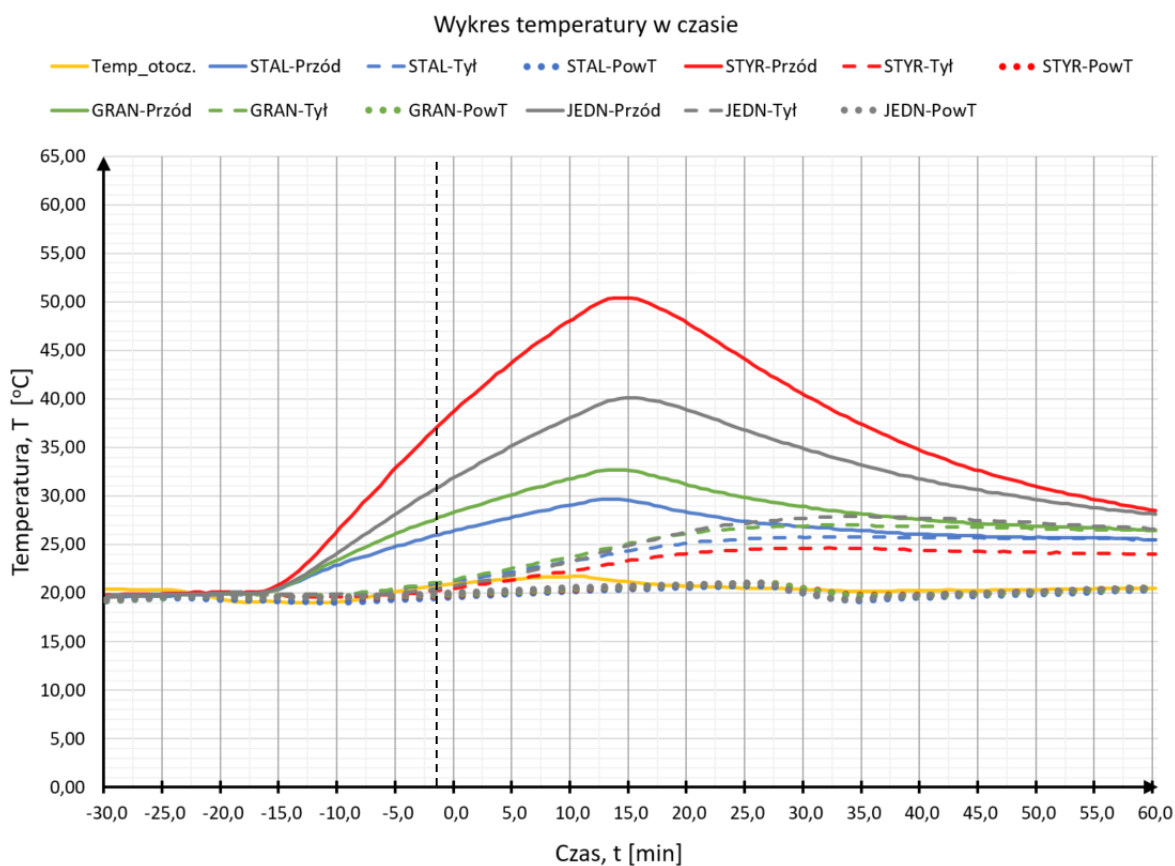
Rys. 6.24. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariancie Ib przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,0 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 15 min, c) termogram dla 60 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 20 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -30 min do 0 min

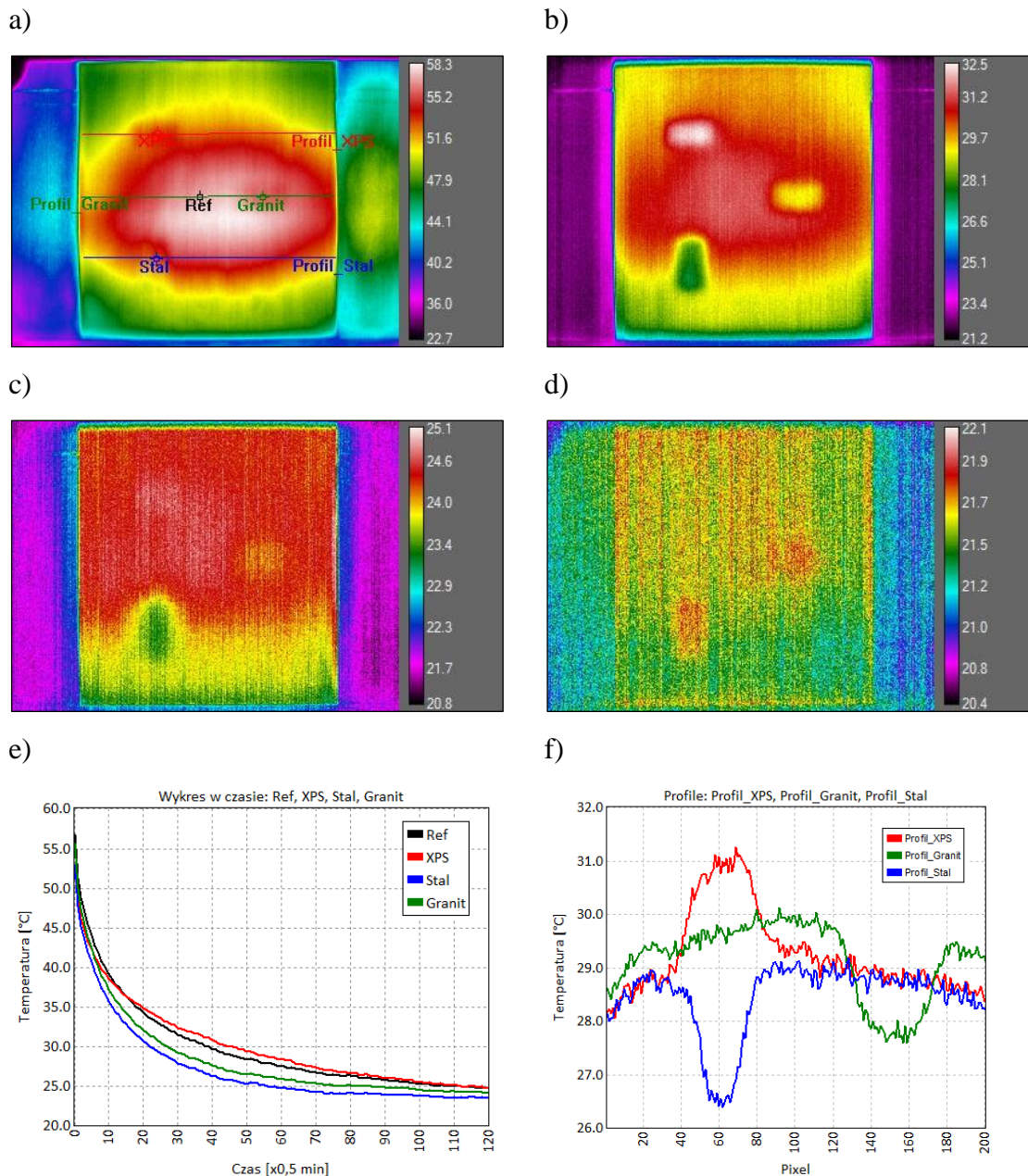
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.25. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariancie Ib; temperaturę mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni oraz wewnątrz elementu)

STANOWISKO NR 1: WARIANT I (c)

Materiał bazowy: *plyta GK*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*



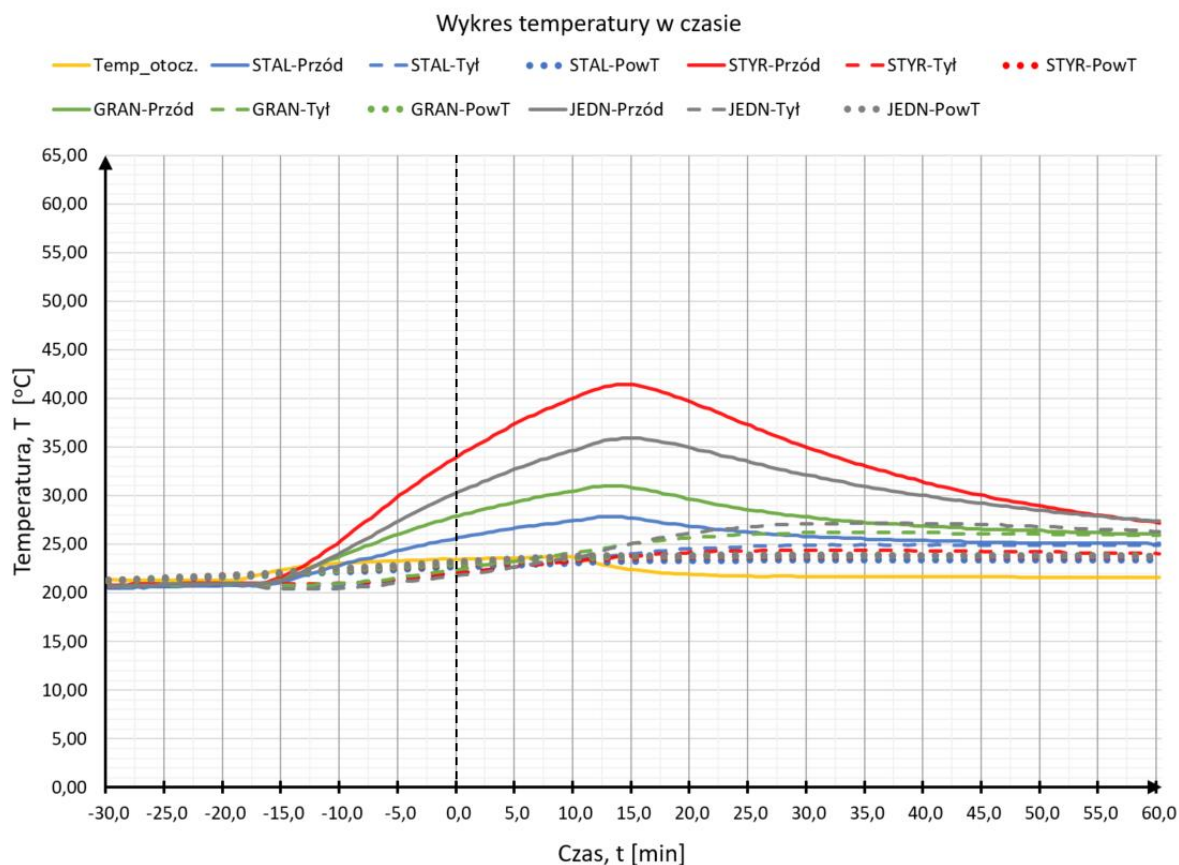
Rys. 6.26. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie Ic przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 15 min, c) termogram dla 60 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 20 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -30 min do 0 min

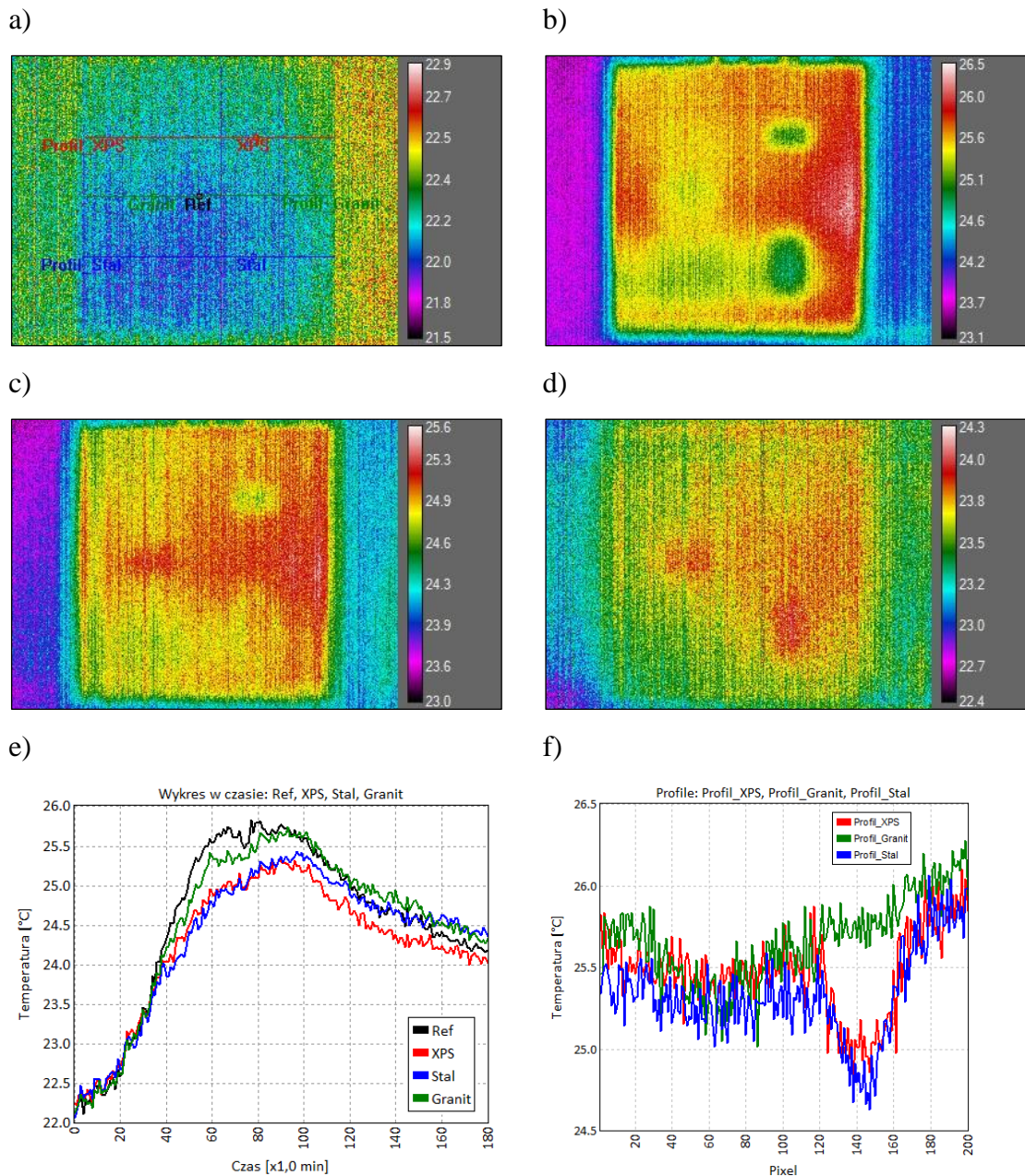
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.27. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariancie Ic; temperaturę mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni oraz wewnątrz elementu)

STANOWISKO NR 1: WARIANT II (a)

Materiał bazowy: *plyta GK*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *transmisyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*

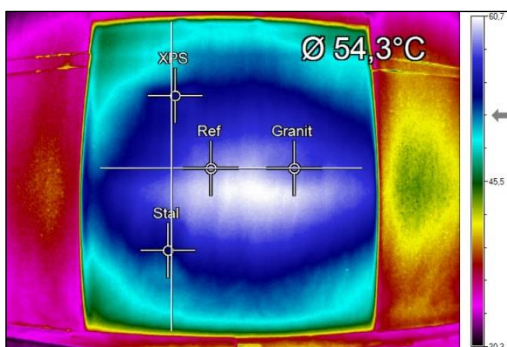


Rys. 6.28. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IIa przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 0,5 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 60 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 60 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

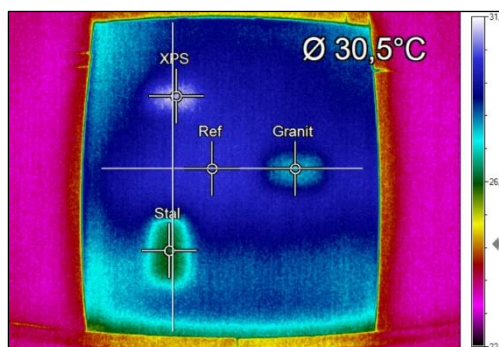
STANOWISKO NR 1: WARIANT II (a)

Materiał bazowy: *plyta GK*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,0 m*

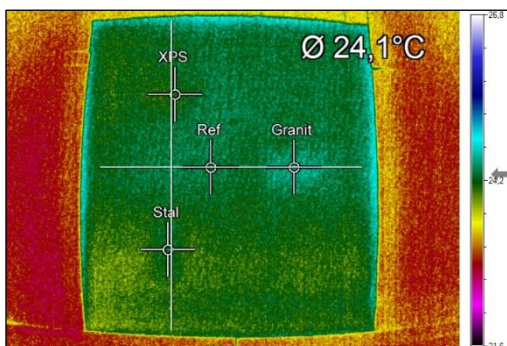
a)



b)



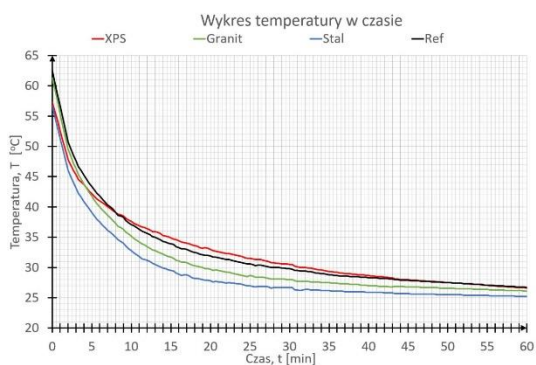
c)



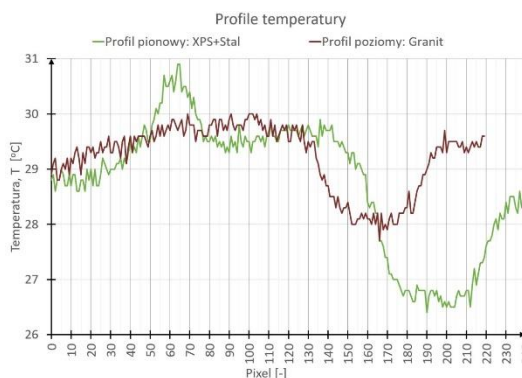
d)



e)



f)



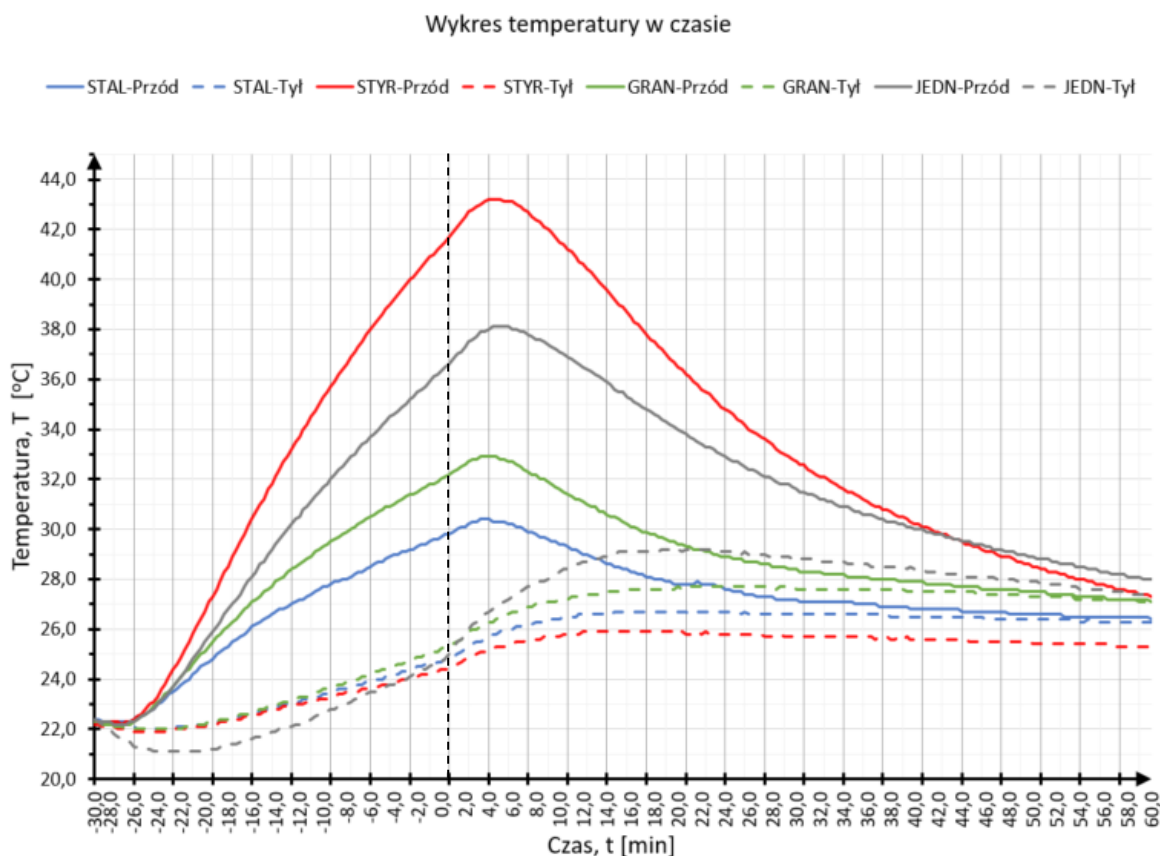
Rys. 6.29. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie II przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m w trybie refleksyjnym i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -30 min do 0 min

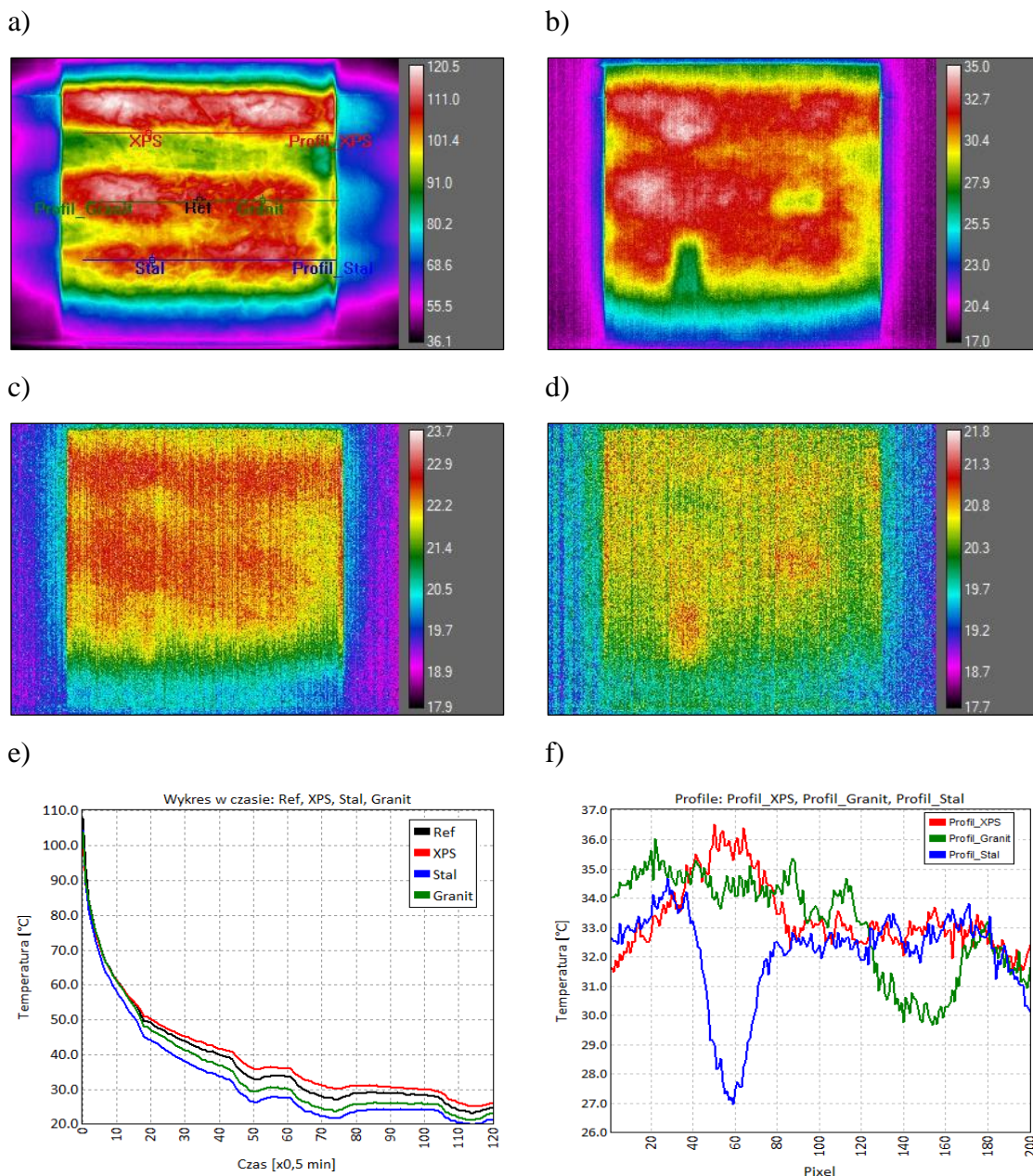
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.30. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IIa; temperaturę mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (wewnątrz elementu)

STANOWISKO NR 1: WARIANT III (a)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *0,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*



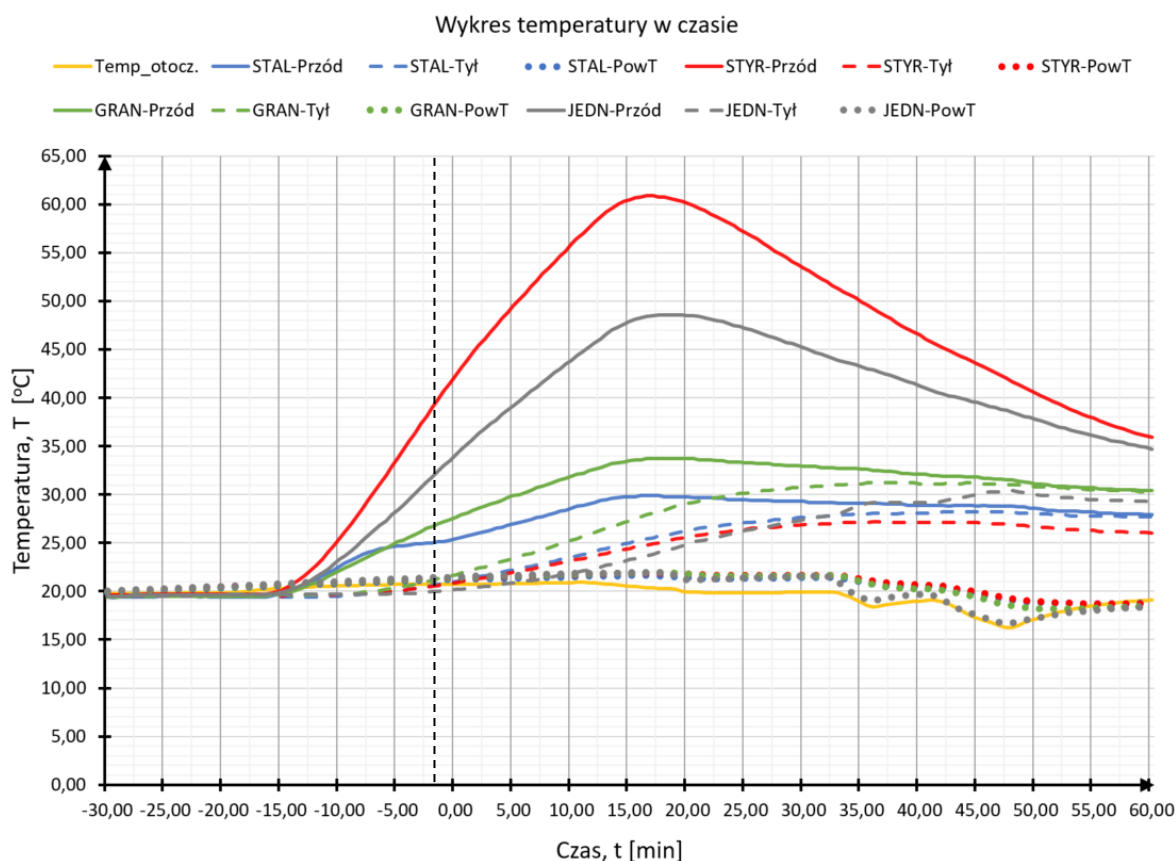
Rys. 6.31. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IIIa przy nagrzewu trwającym 30 min z odległości 0,5 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -30 min do 0 min

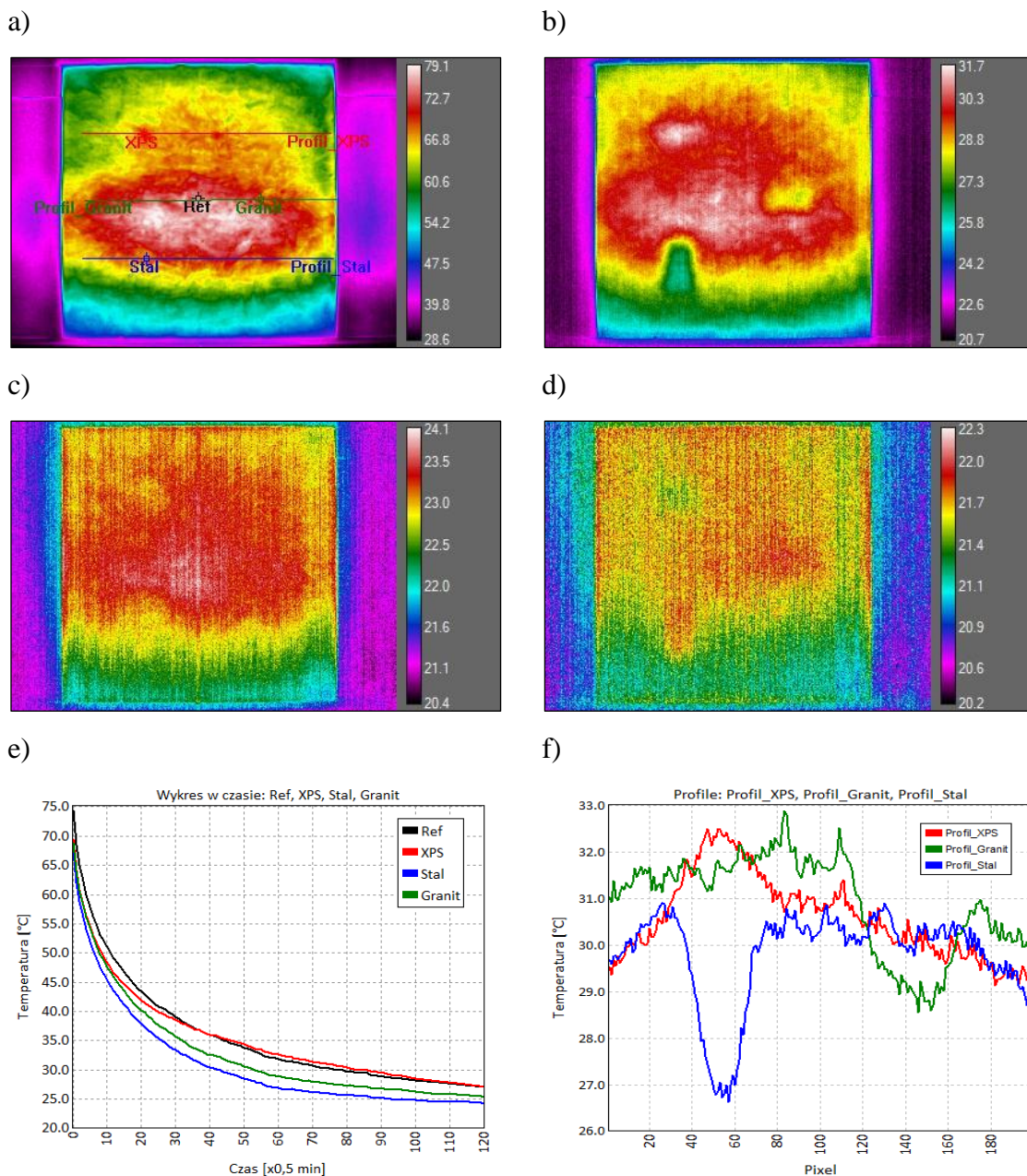
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.32. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariancie IIIa; temperatury mierzone za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni oraz wewnątrz elementu)

STANOWISKO NR 1: WARIANT III (b)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,0 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*



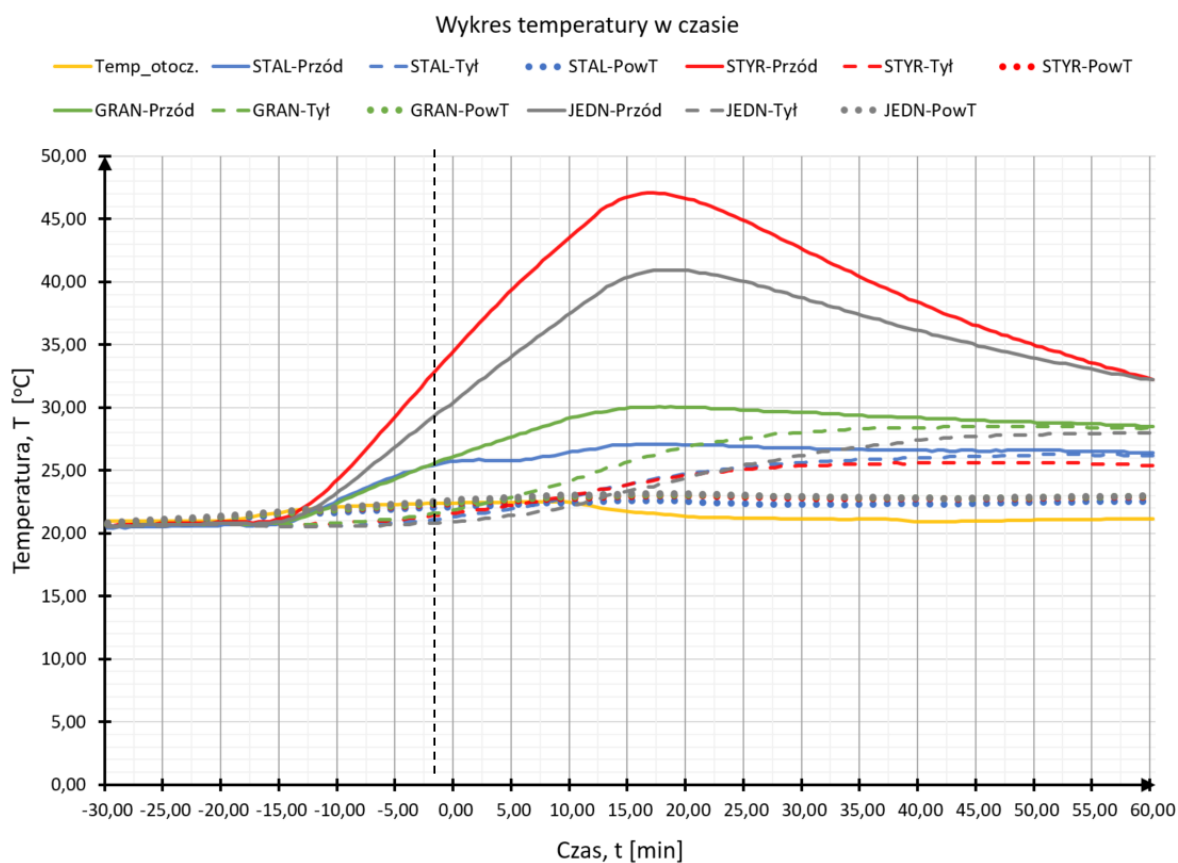
Rys. 6.33. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie IIIb przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,0 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -30 min do 0 min

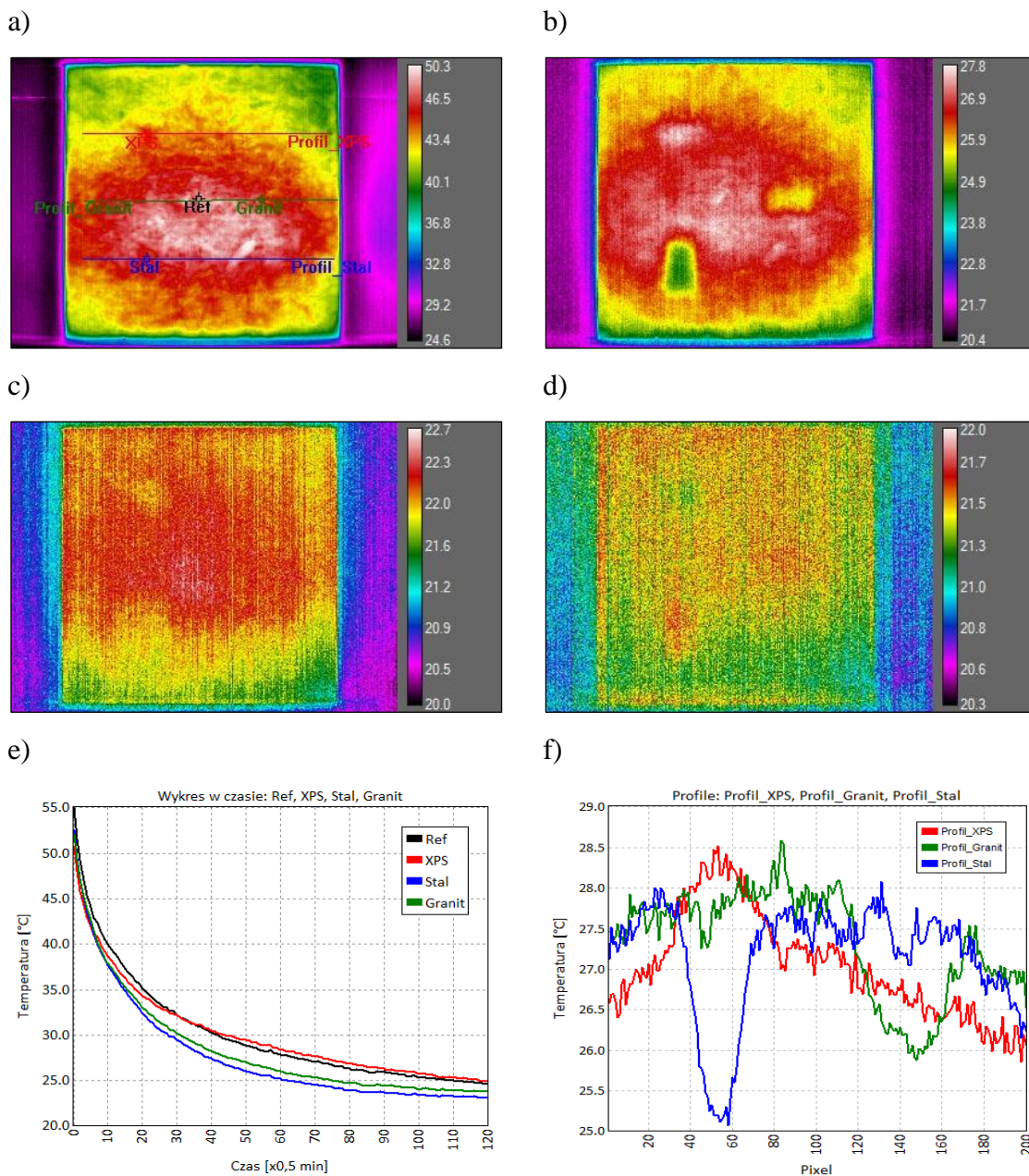
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.34. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IIIb; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni oraz wewnątrz elementu)

STANOWISKO NR 1: WARIANT III (c)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzewczych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*



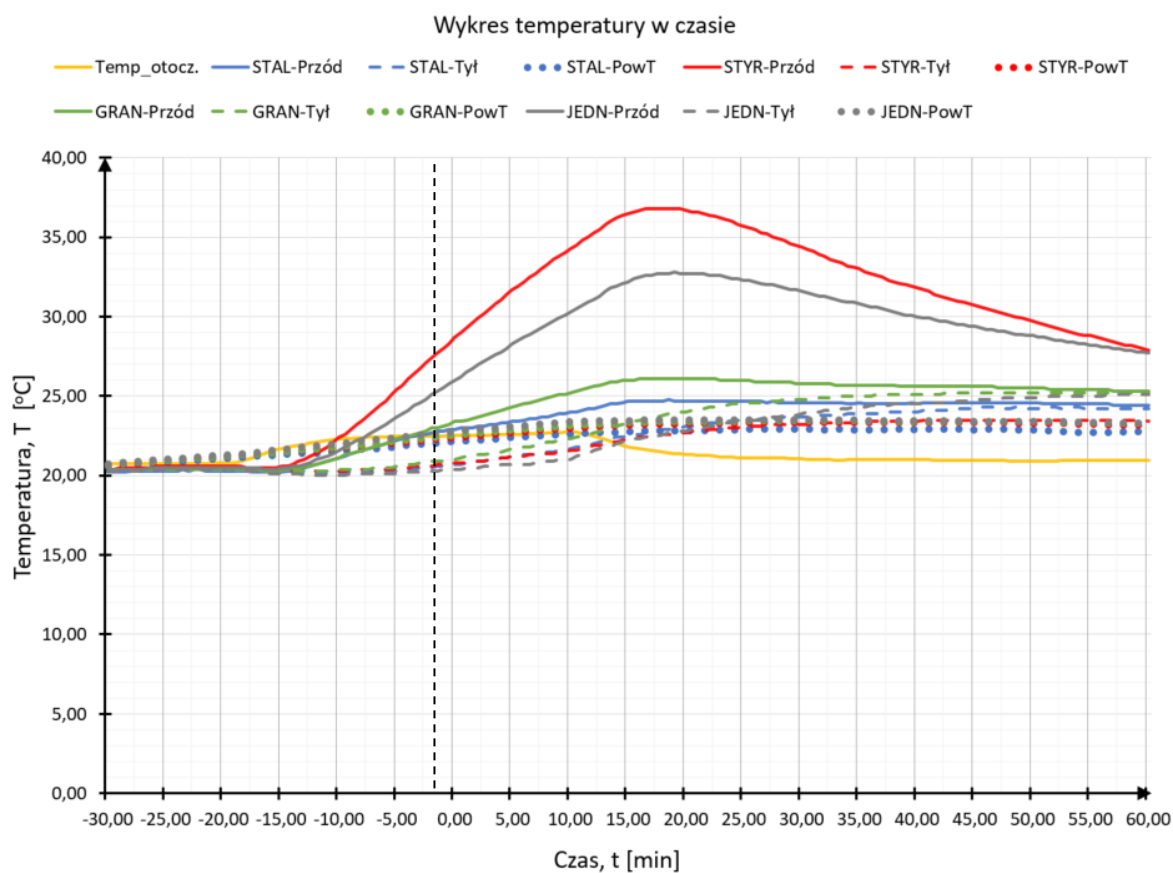
Rys. 6.35. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariancie IIIc przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m i poziomym układzie lamp grzewczych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzony od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -30 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min

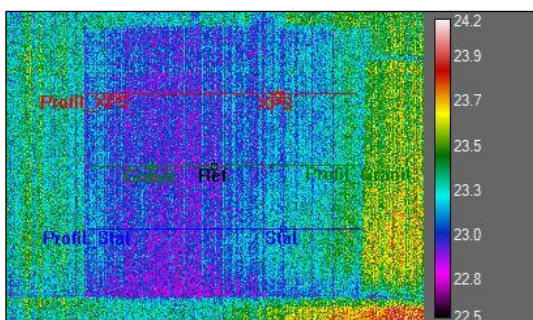


Rys. 6.36. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IIIc; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni oraz wewnątrz elementu)

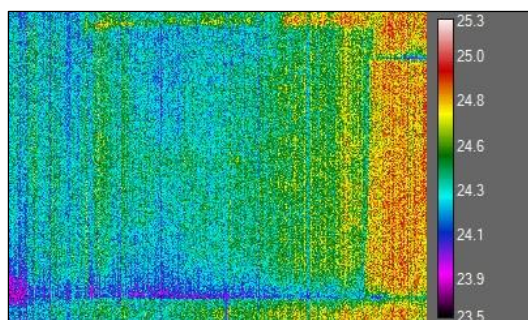
STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (a)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *10 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *transmisyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*

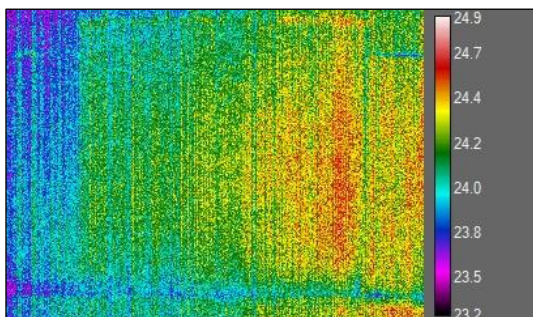
a)



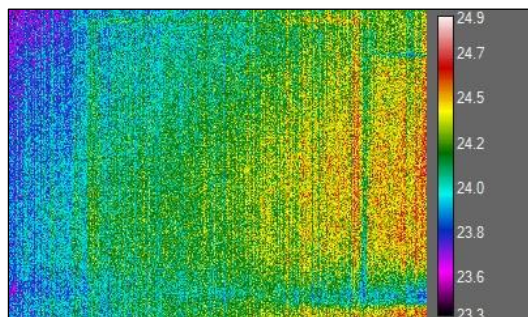
b)



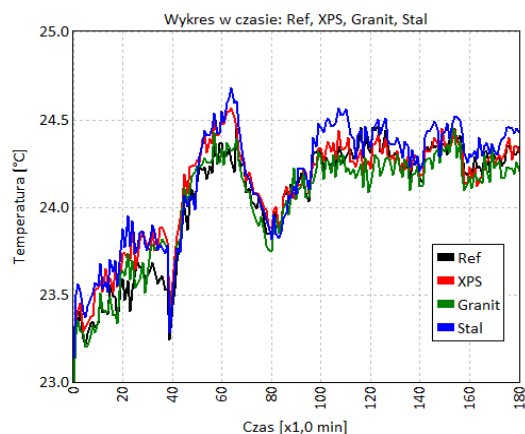
c)



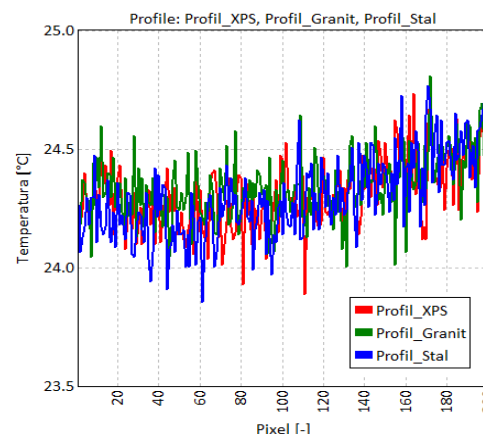
d)



e)



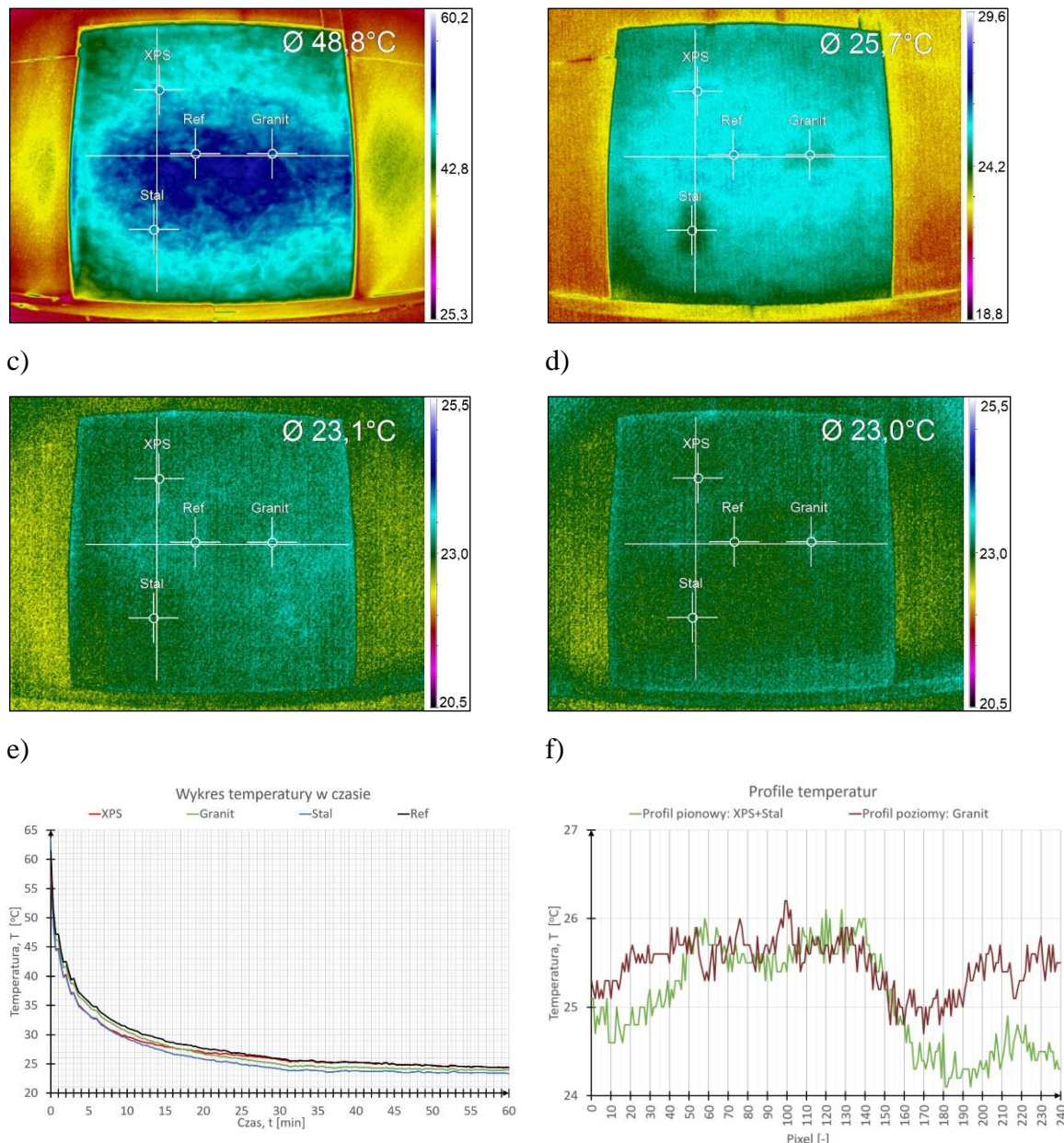
f)



Rys. 6.37. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IVa przy nagrzewie trwającym 10 min z odległości 1,5 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 60 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 60 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (a)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *10 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,0 m*



Rys. 6.38. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie IVa przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m w trybie refleksyjnym i poziomy układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

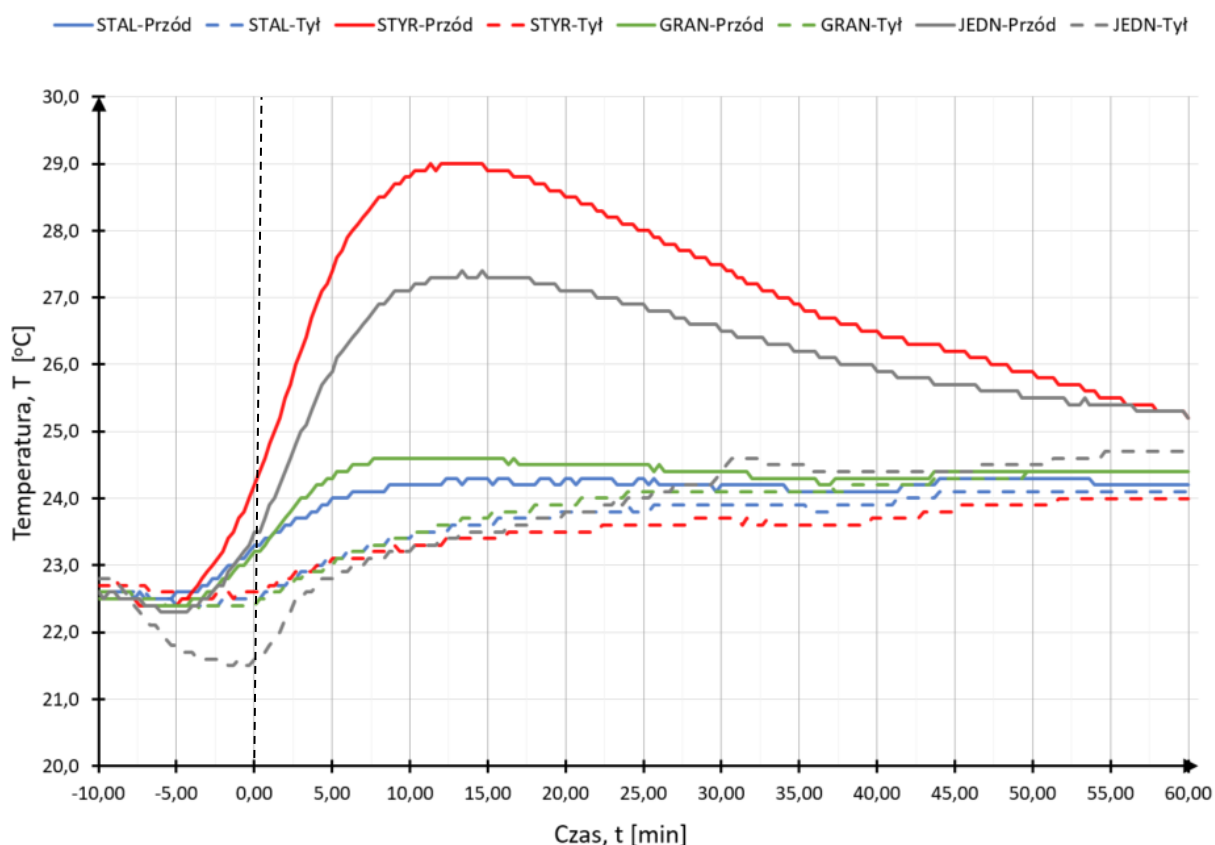
Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -10 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min

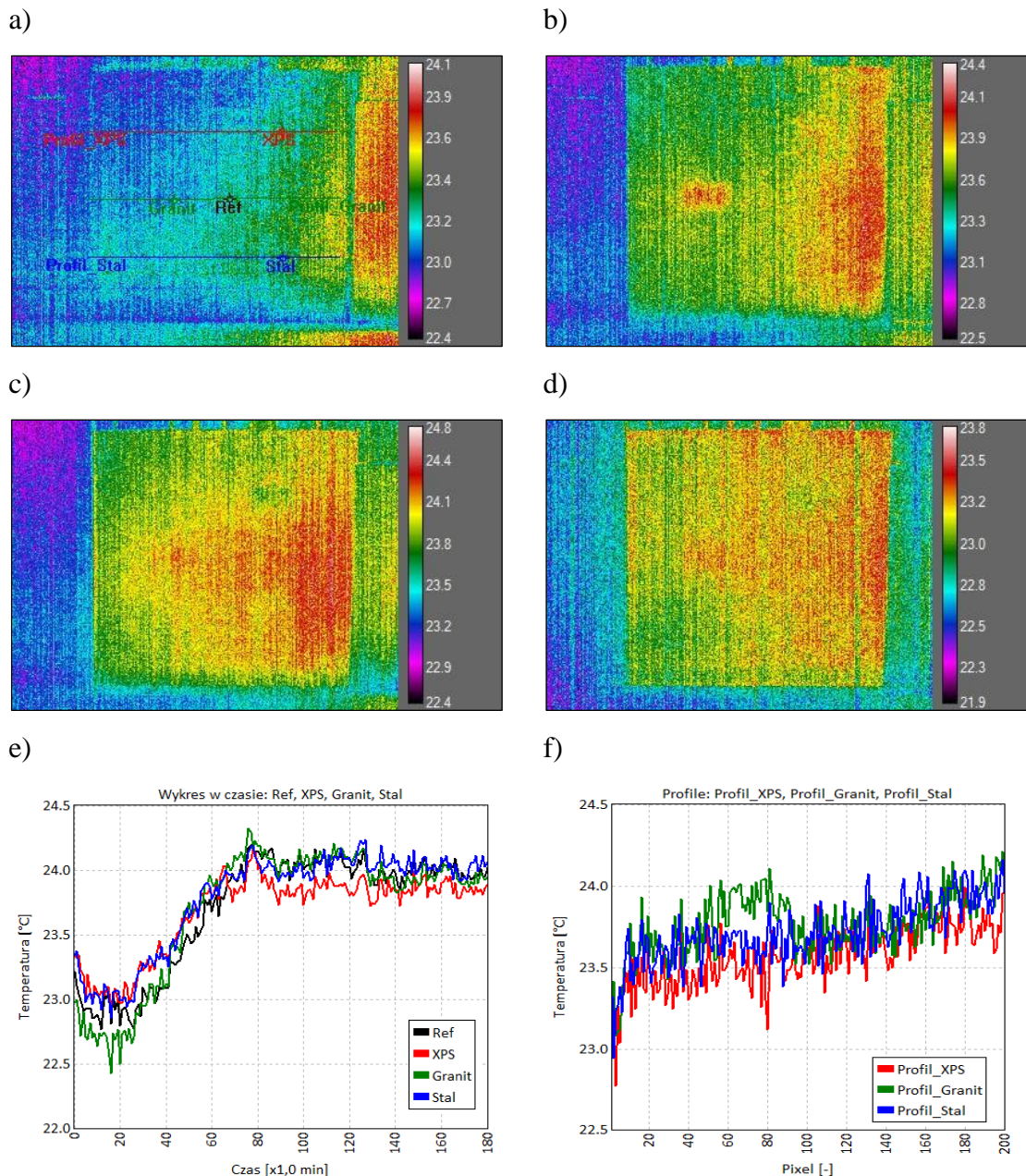
Wykres temperatury w czasie



Rys. 6.39. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IVa; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (wewnątrz elementu)

STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (b)

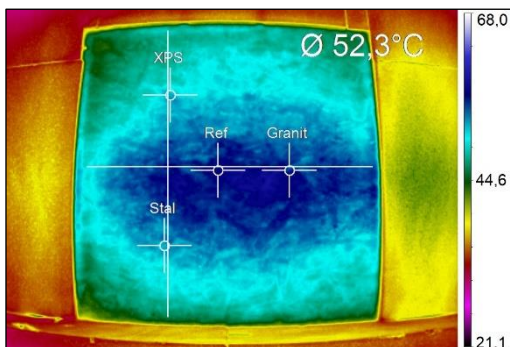
Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *20 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *transmisyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*



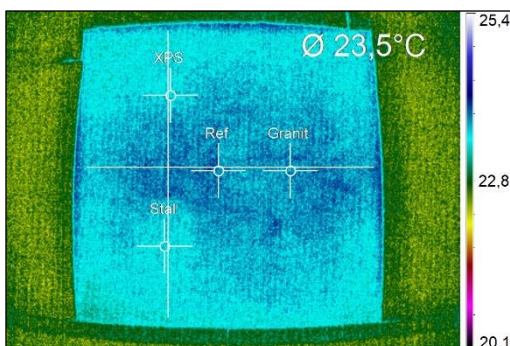
Rys. 6.40. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IVb przy nagrzewie trwającym 20 min z odległości 1,5 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 60 min, c) termogram dla czasu 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 60 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (b)

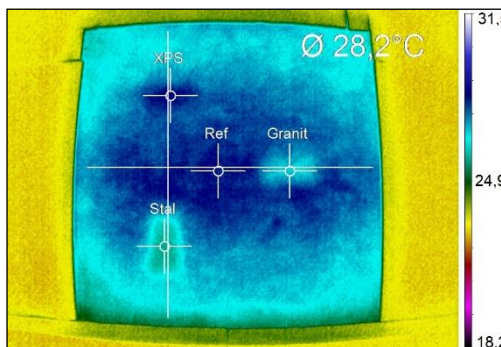
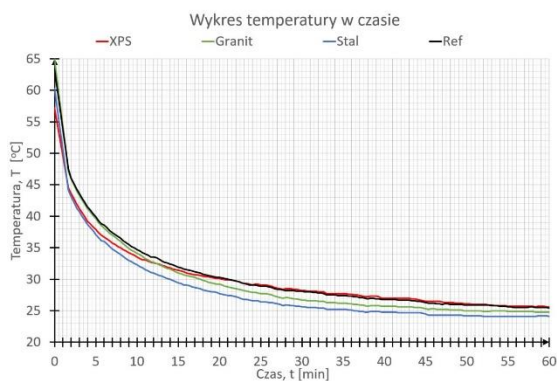
Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *20 min*
 Układ lamp grzewczych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,0 m*
 a) b)



c)



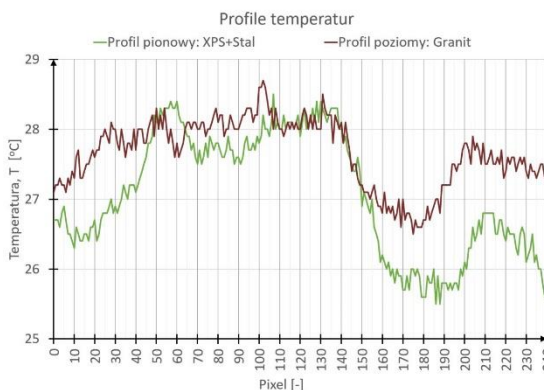
e)



d)



f)



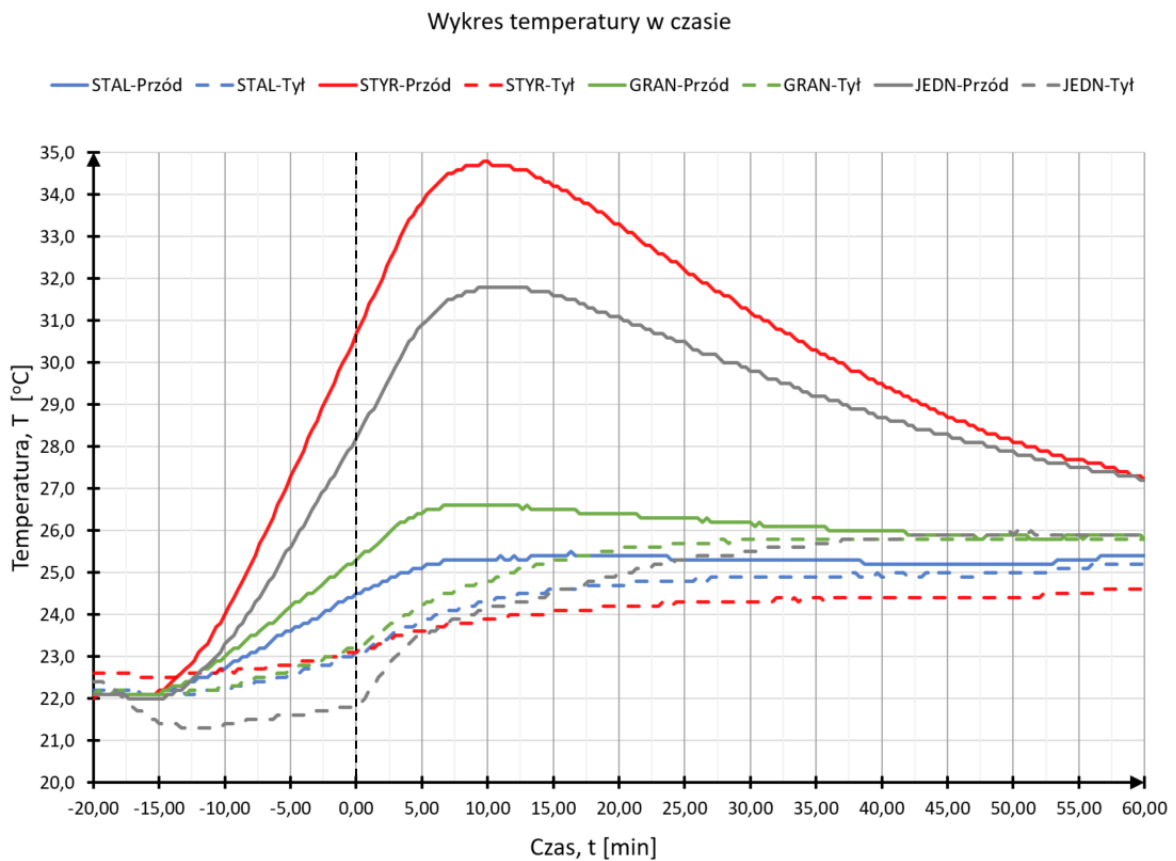
Rys. 6.41. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IVb przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m w trybie refleksyjnym i poziomym układzie lamp grzewczych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -20 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min

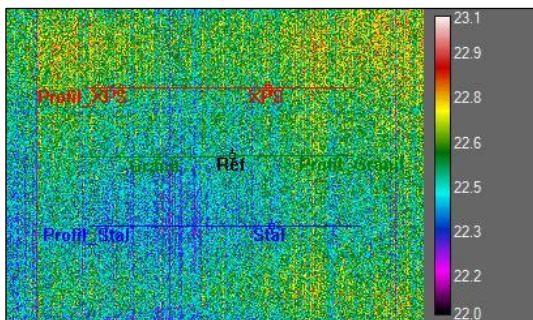


Rys. 6.42. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariancie IVb; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (wewnątrz elementu)

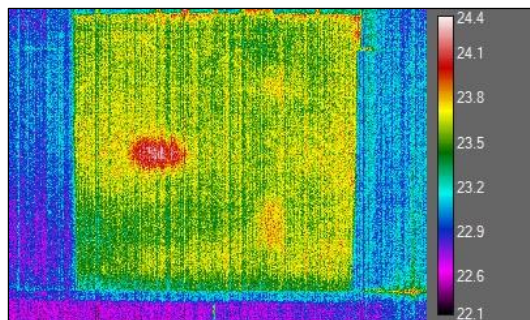
STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (c)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *transmisyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*

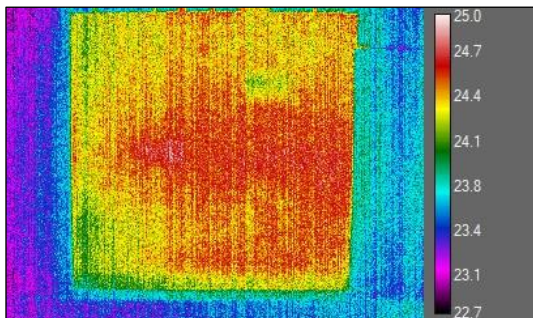
a)



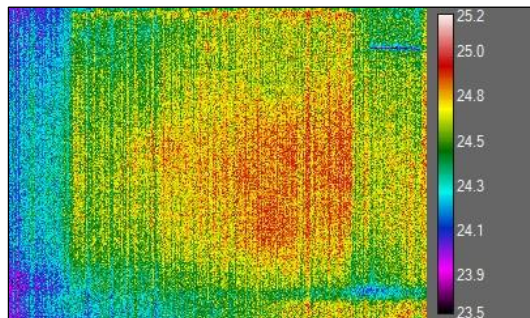
b)



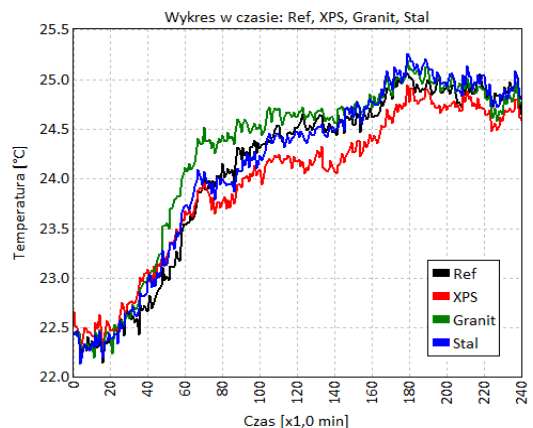
c)



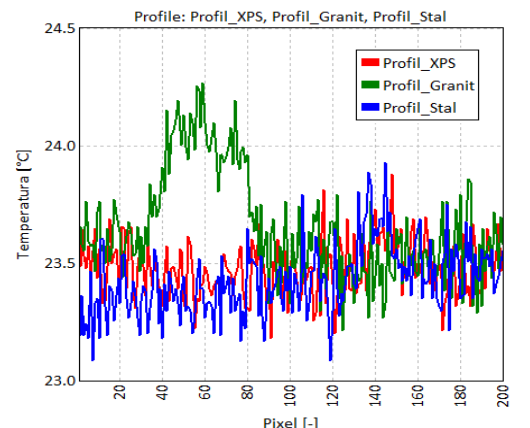
d)



e)



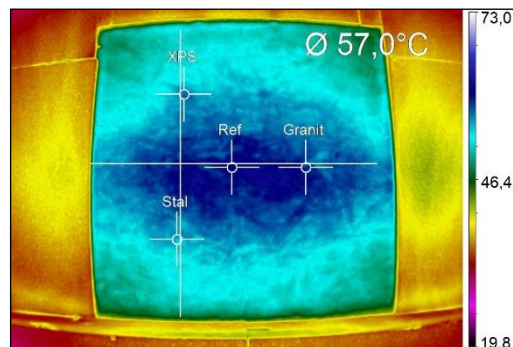
f)



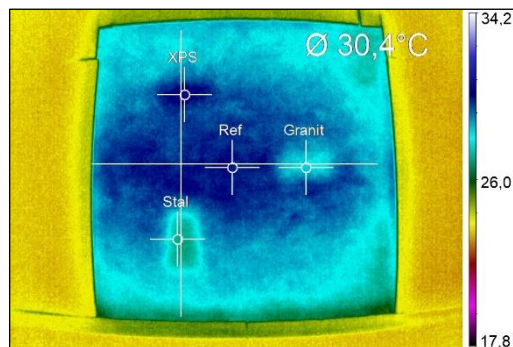
Rys. 6.43. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie IVc przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 60 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 60 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (c)

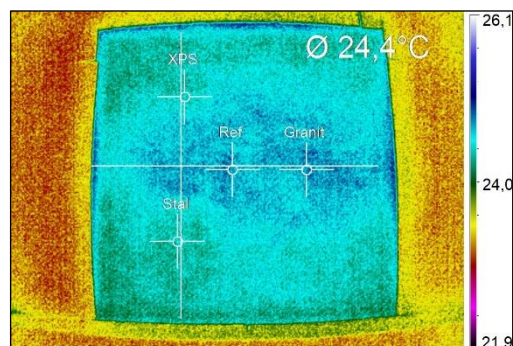
Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,0 m*



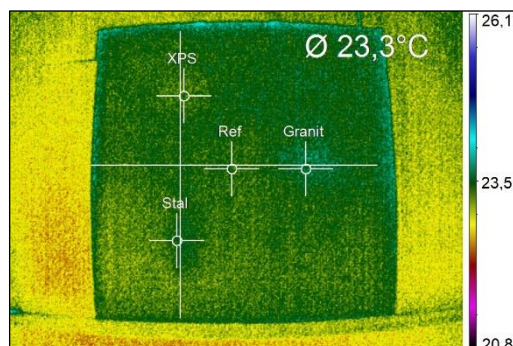
a)



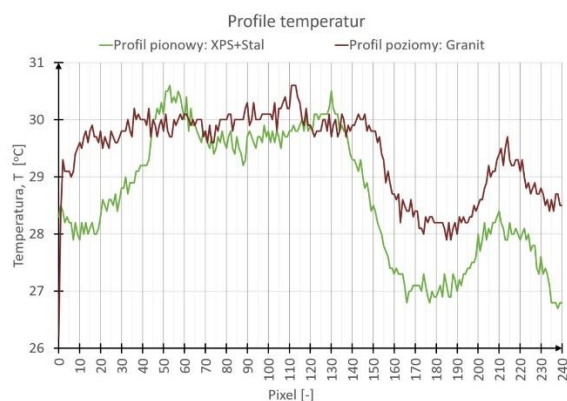
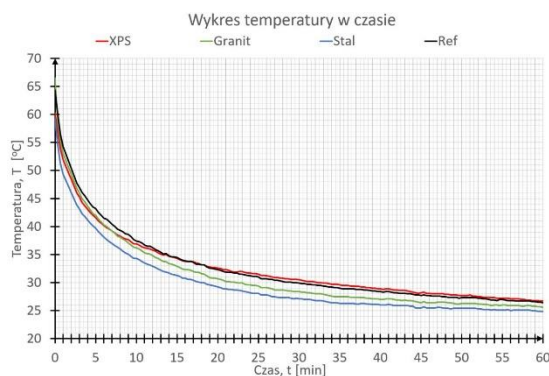
b)



c)



d)



Rys. 6.44. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie IVc przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m w trybie refleksyjnym i poziomy układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

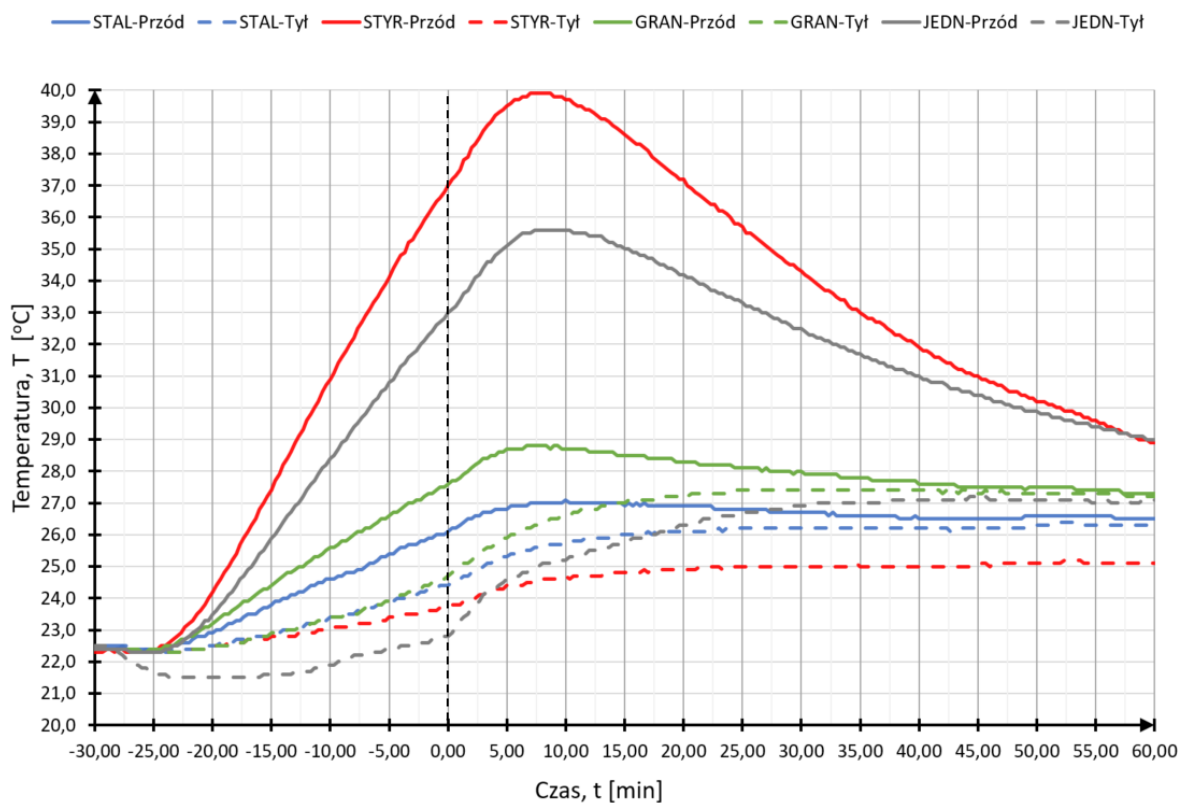
Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -30 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min

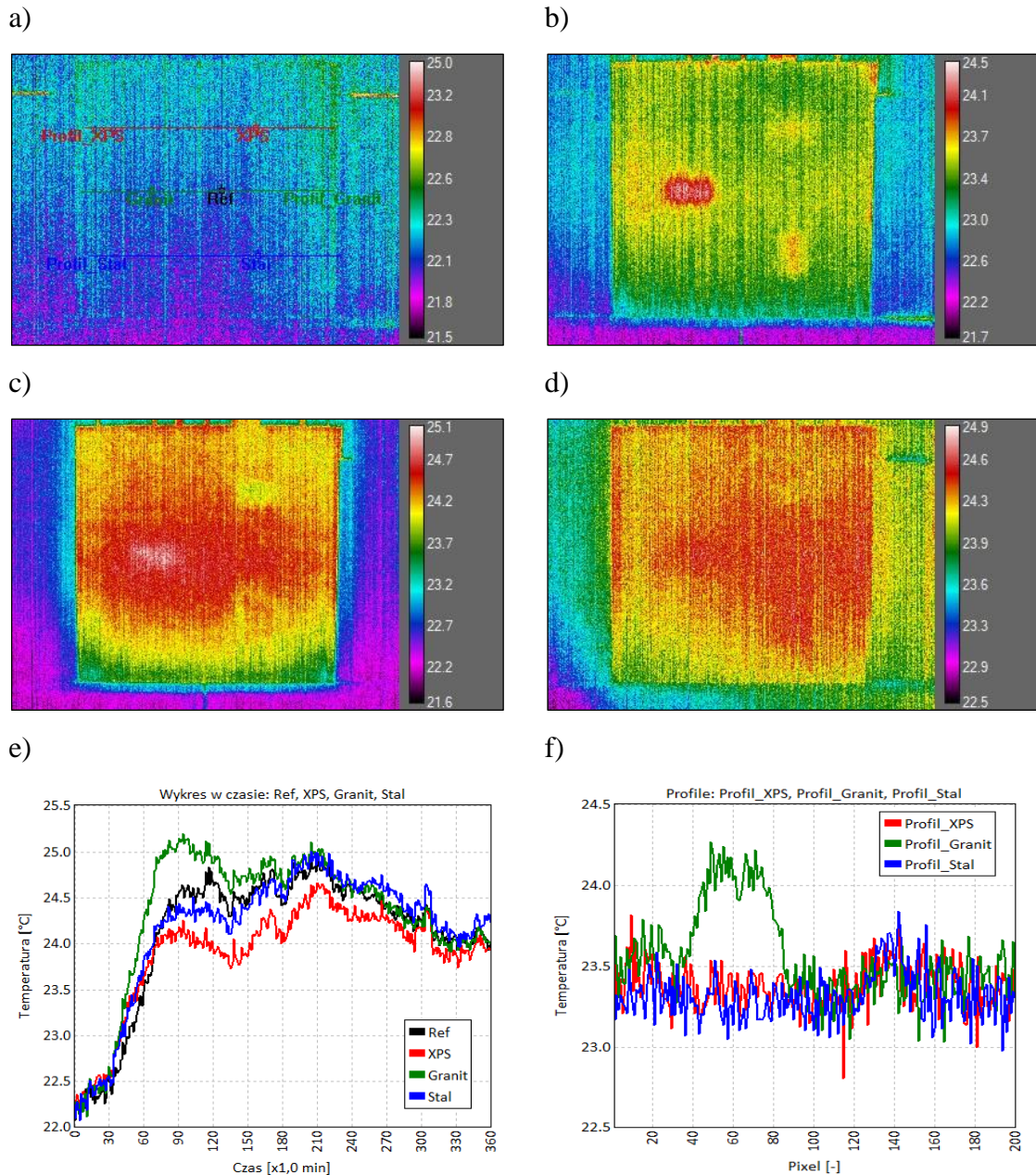
Wykres temperatury w czasie



Rys. 6.45. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IVc; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (wewnątrz elementu)

STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (d)

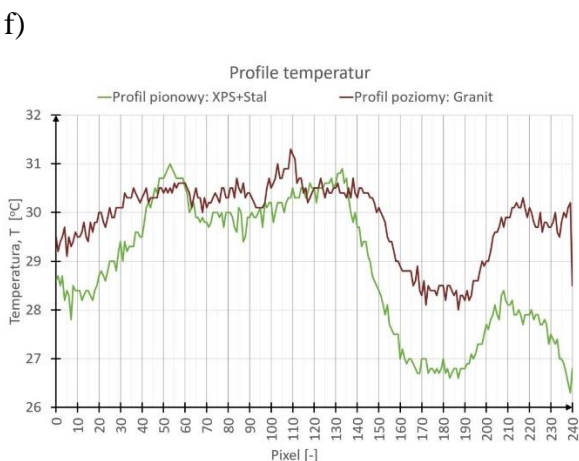
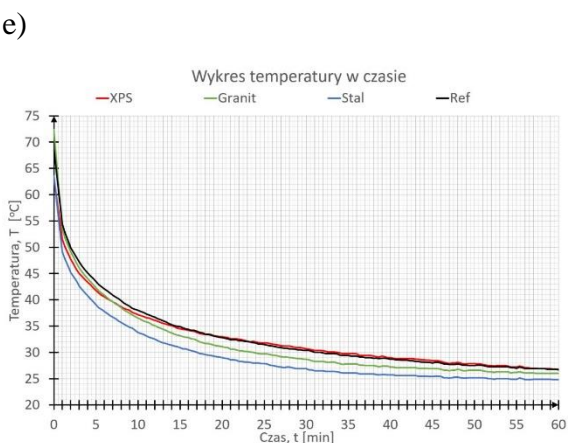
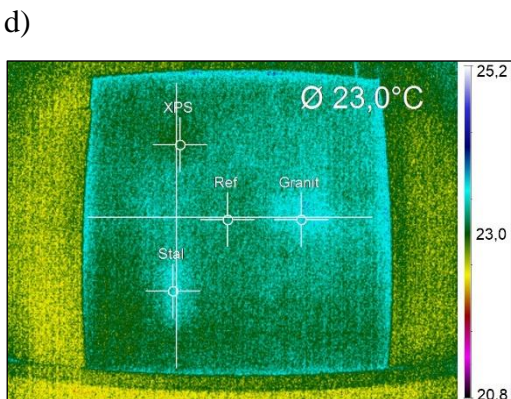
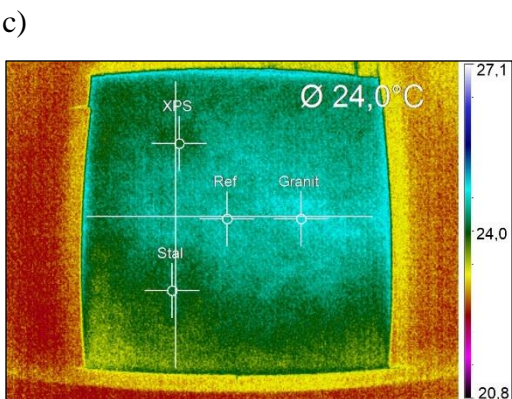
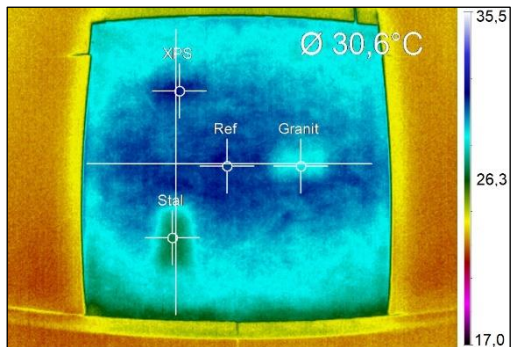
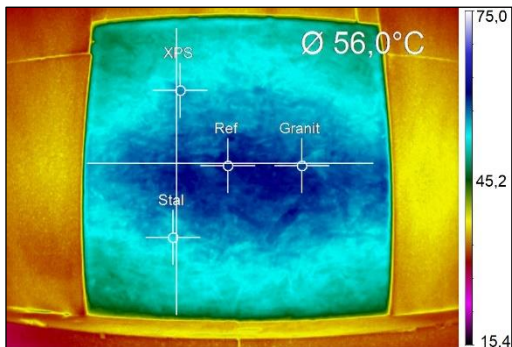
Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *40 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *transmisyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*



Rys. 6.46. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie IVd przy nagrzewie trwającym 40 min z odległości 1,5 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 60 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 60 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (d)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *40 min*
 Układ lamp grzewczych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,0 m*



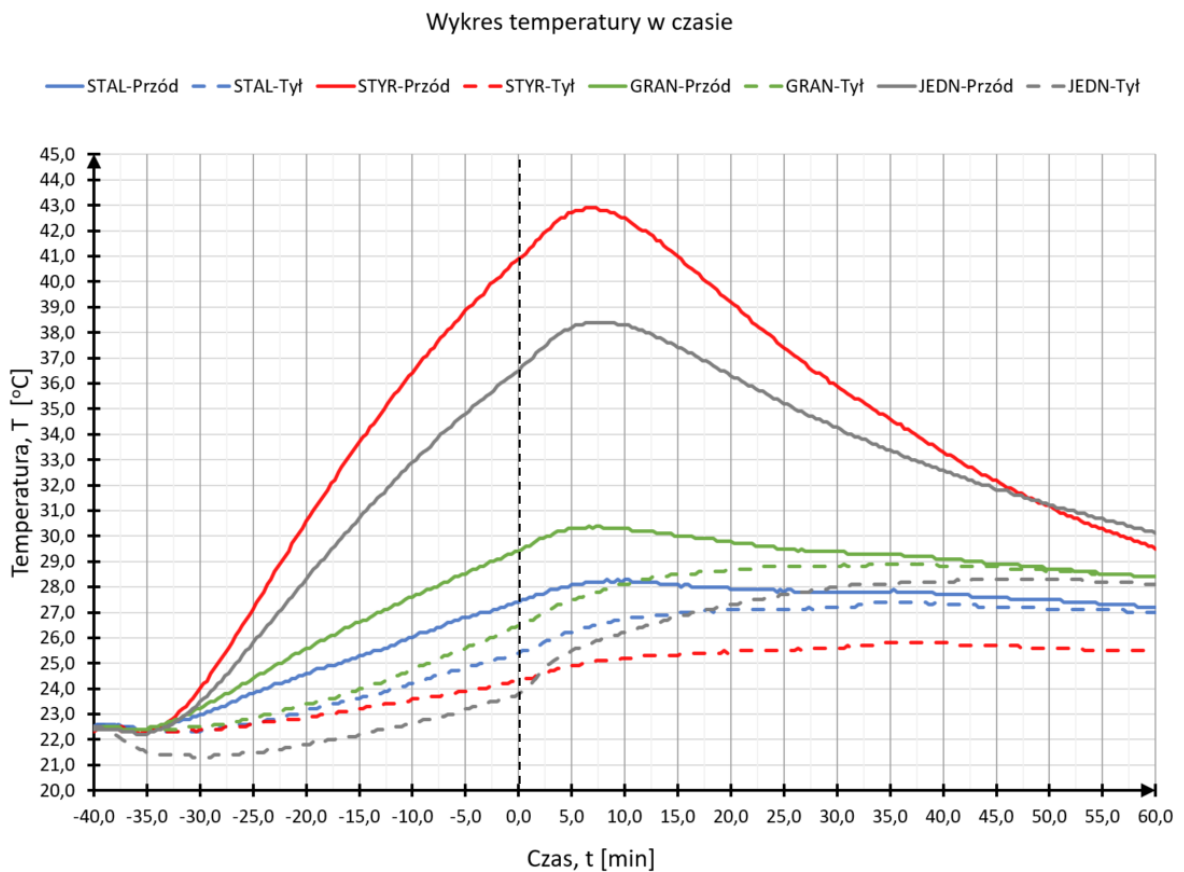
Rys. 6.47. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie IVd przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m w trybie refleksyjnym i poziomym układzie lamp grzewczych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -40 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min

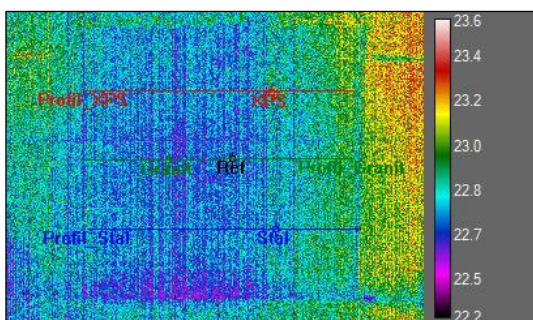


Rys. 6.48. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariancie IVd; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (wewnątrz elementu)

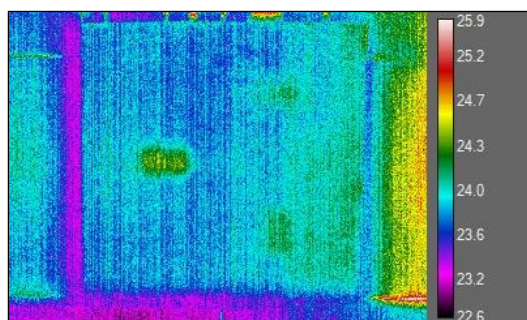
STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (e)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *50 min*
 Układ lamp grzewczych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *transmisyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*

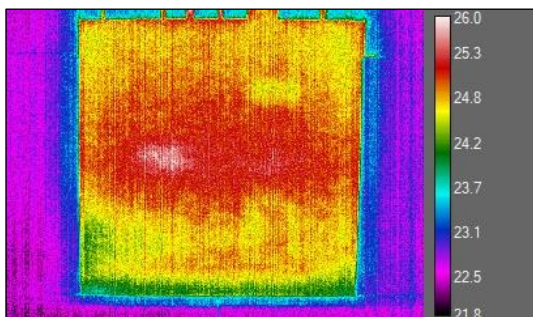
a)



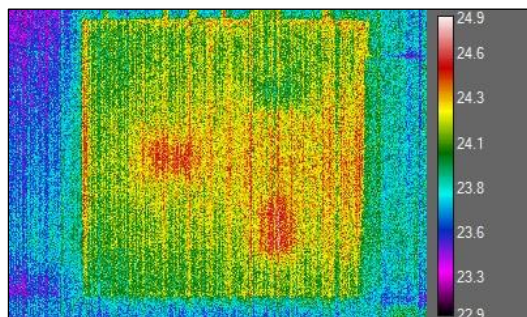
b)



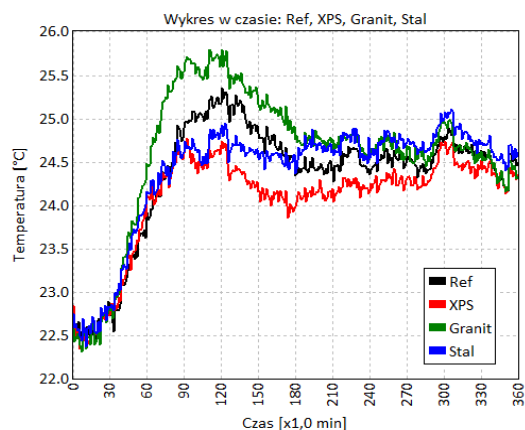
c)



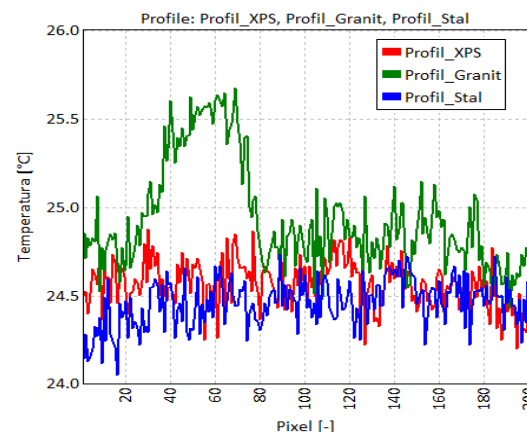
d)



e)



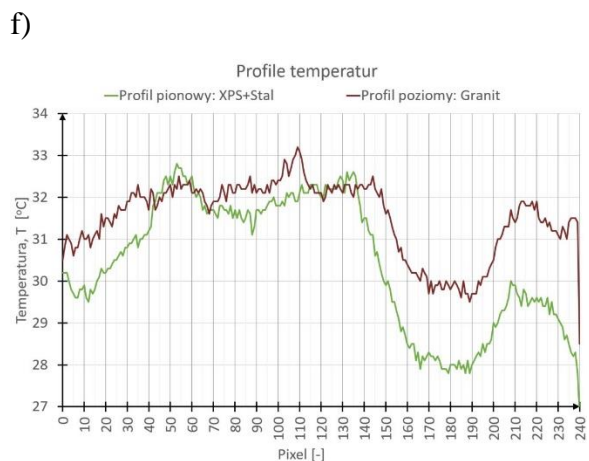
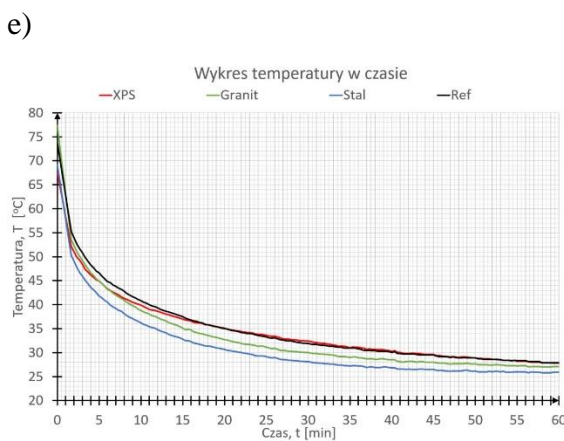
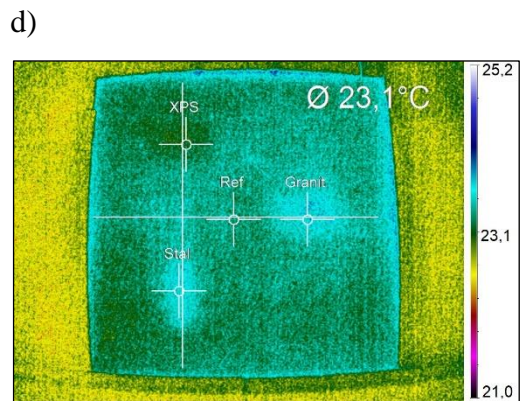
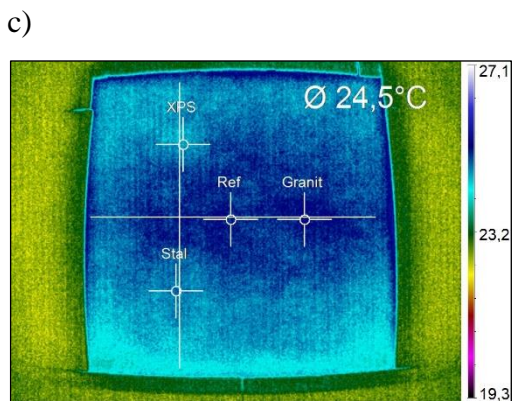
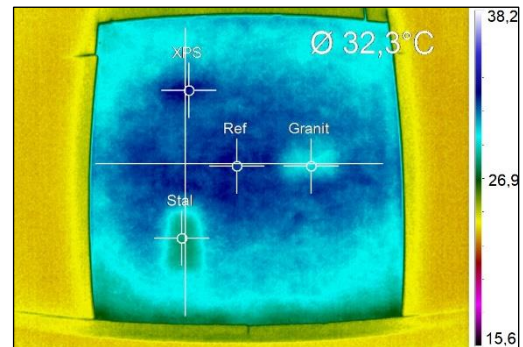
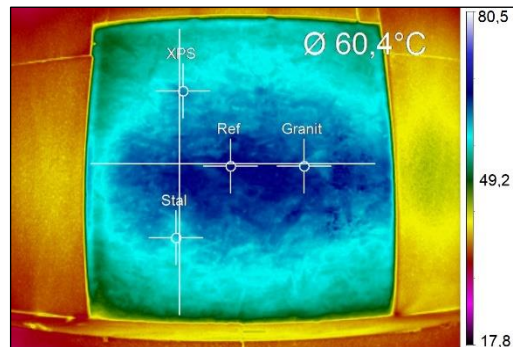
f)



Rys. 6.49. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie IVd przy nagrzewie trwającym 50 min z odległości 1,5 m i poziomym układzie lamp grzewczych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 60 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 90 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (e)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *50 min*
 Układ lamp grzewczych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,0 m*



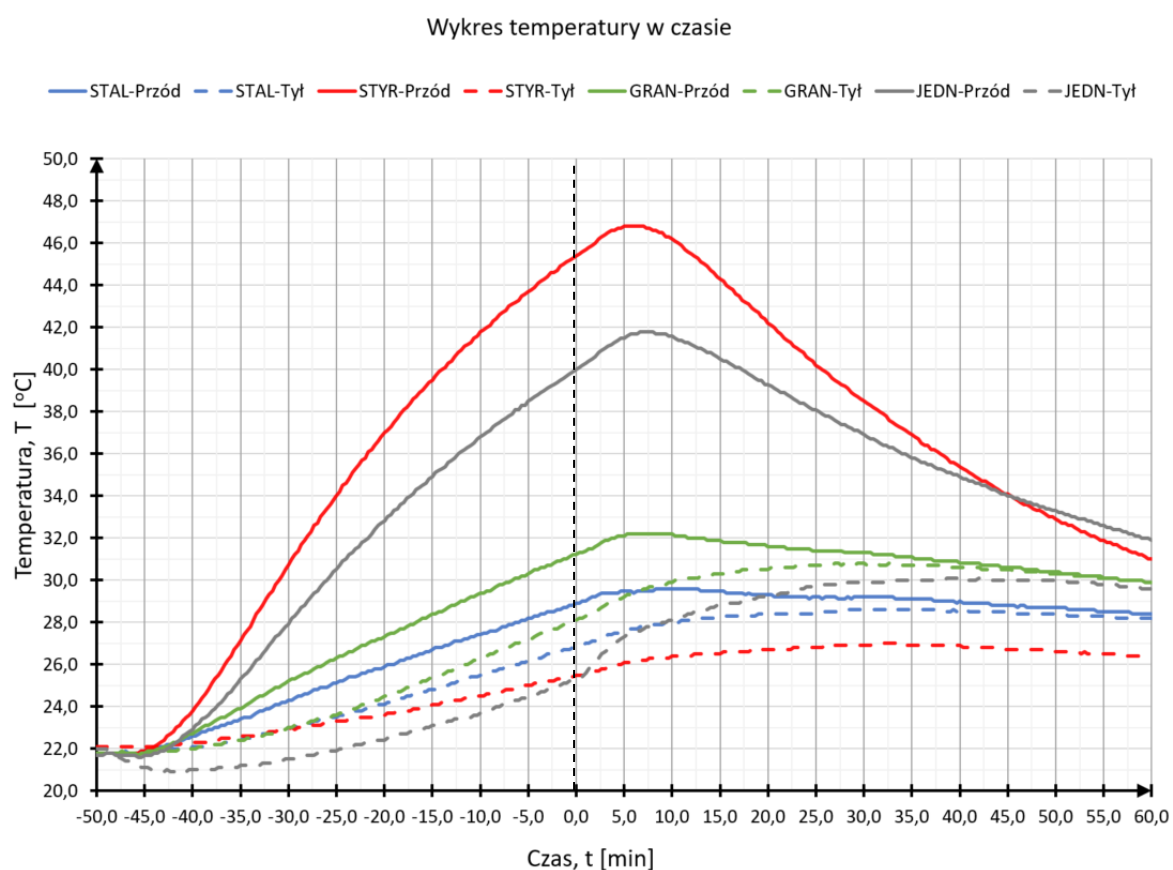
Rys. 6.50. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IVe przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m w trybie refleksyjnym i poziomym układzie lamp grzewczych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -50 min do 0 min

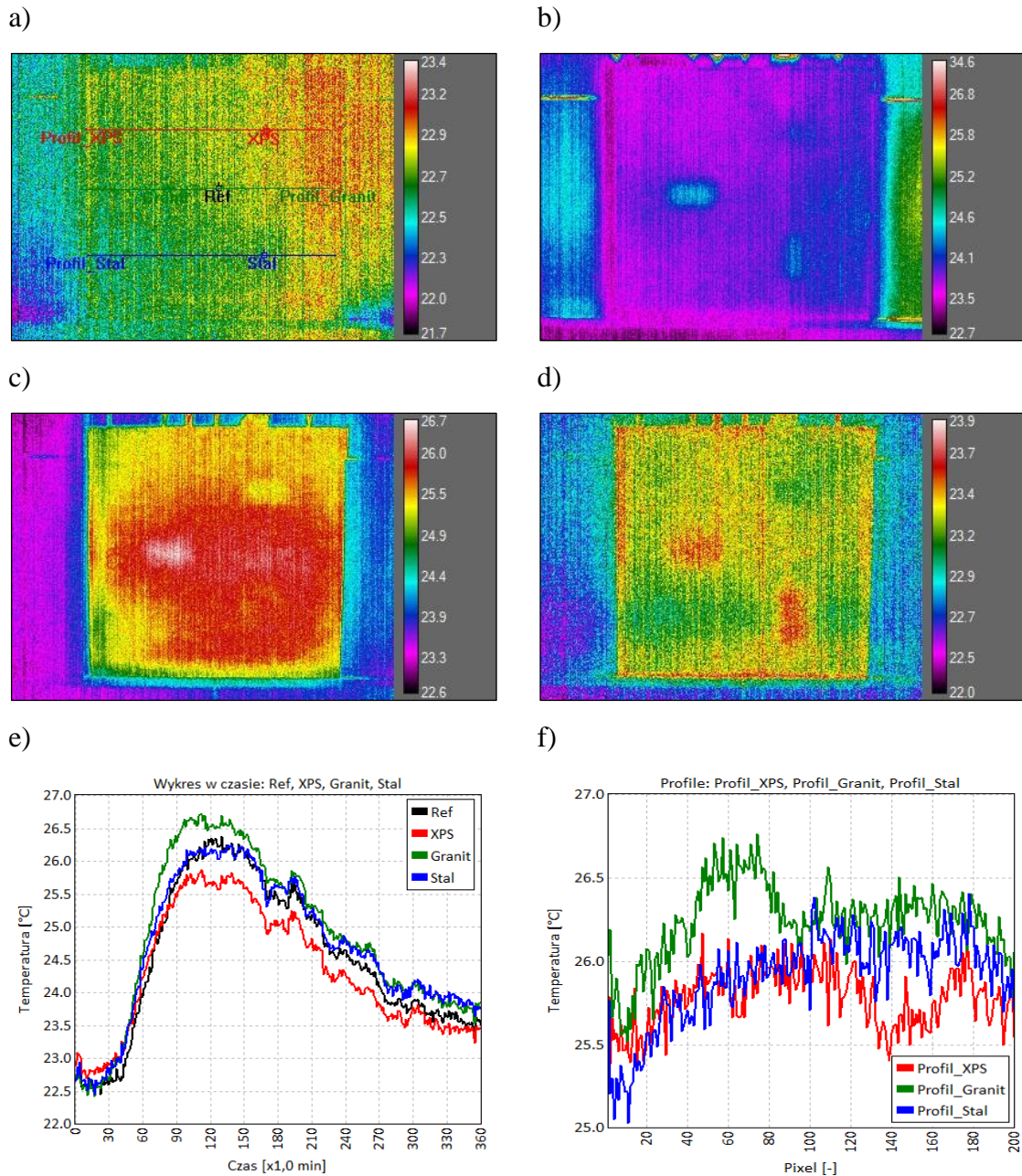
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.51. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariantcie IVe; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (wewnątrz elementu)

STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (f)

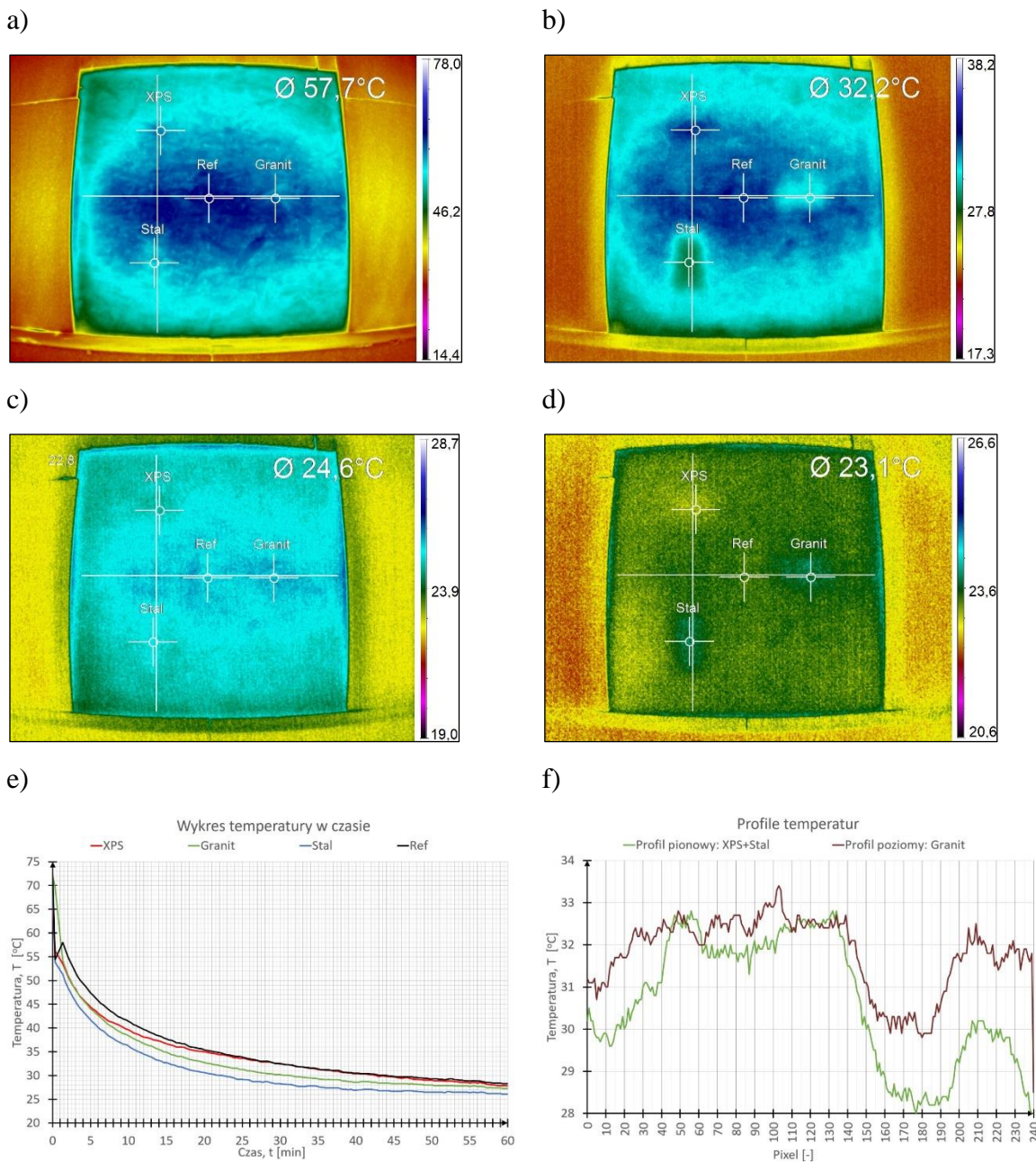
Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *60 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *transmisyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *4,0 m*



Rys. 6.52. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie IVd przy nagrzewie trwającym 60 min z odległości 1,5 m i poziomym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 60 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 360 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 120 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

STANOWISKO NR 1: WARIANT IV (f)

Materiał bazowy: *plyta OSB*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *22 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *60 min*
 Układ lamp grzewczych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,0 m*



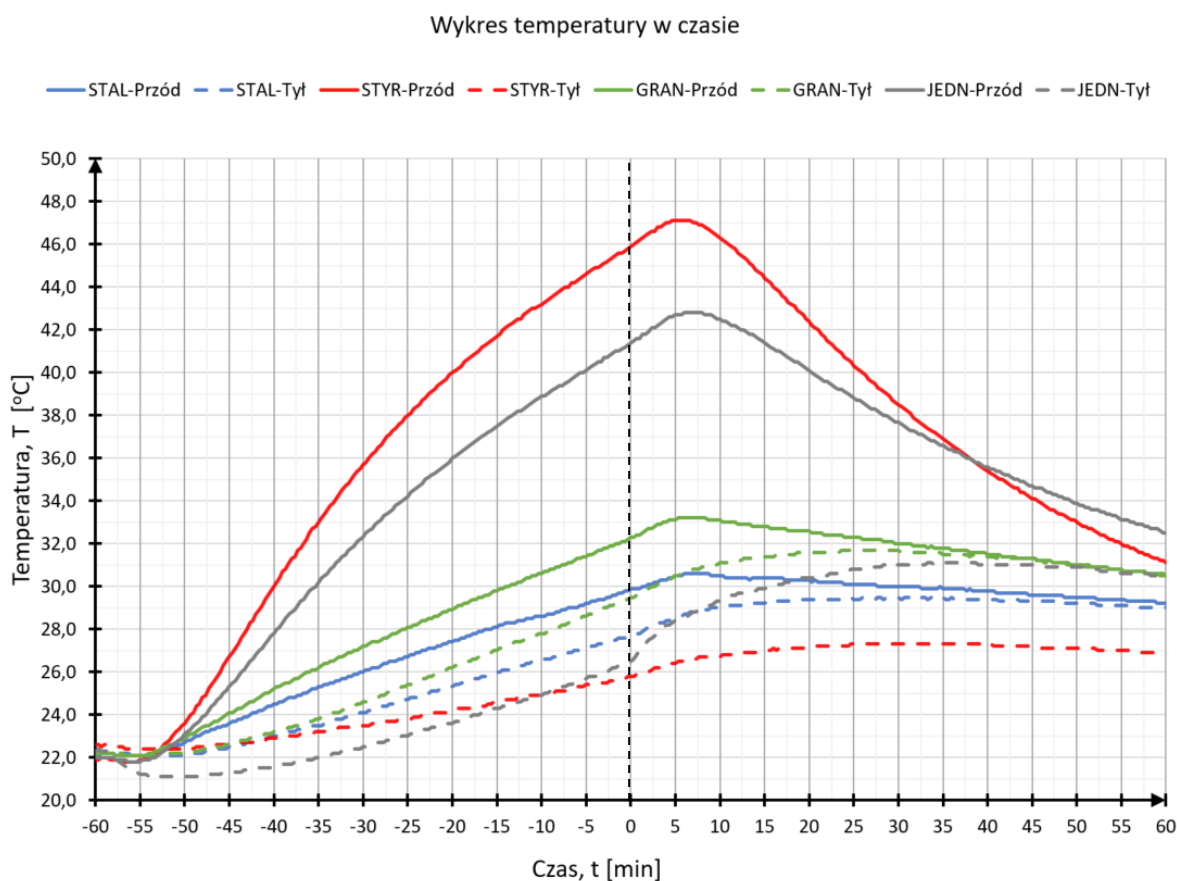
Rys. 6.53. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 1 w wariacie IVf przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m w trybie refleksyjnym i poziomym układzie lamp grzewczych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 30 min, c) termogram dla 120 min, d) termogram dla 240 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 30 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu,
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego,
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia cieplnego,
 - PowT – pomiar termoparą umieszczoną na tylnej powierzchni badanego elementu,
 - JEDN – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia.

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -60 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min

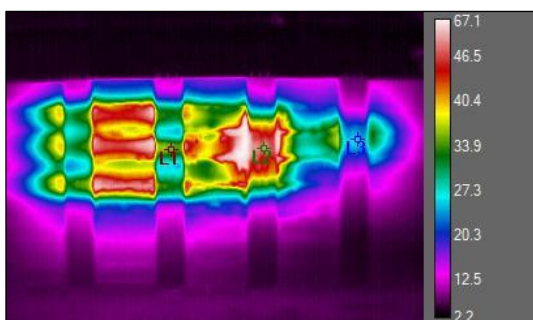


Rys. 6.54. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 1 w wariancie IVf; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (wewnątrz elementu)

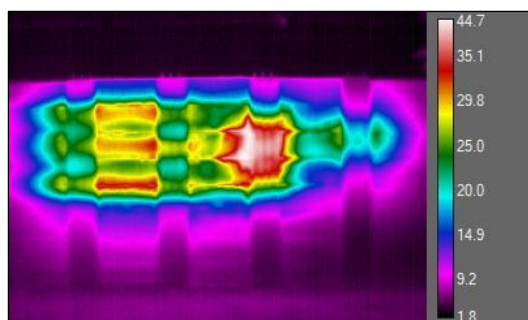
STANOWISKO NR 2: WARIANT I (a) - 3 pręty na boku

Materiał bazowy: *beton*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *26 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *0,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *9,7 m*

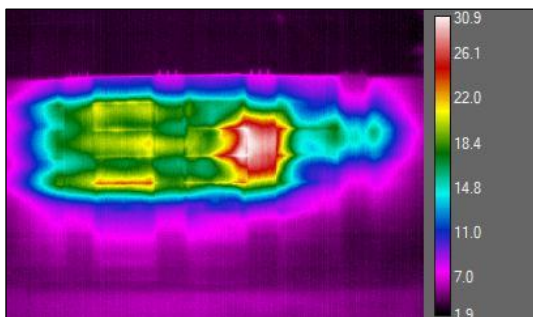
a)



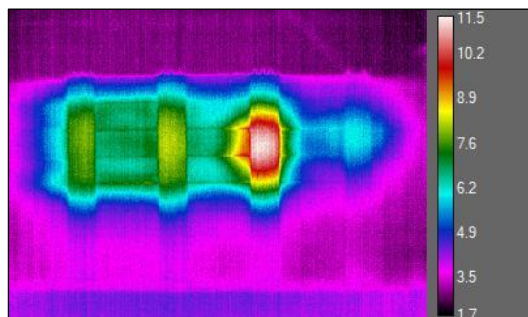
b)



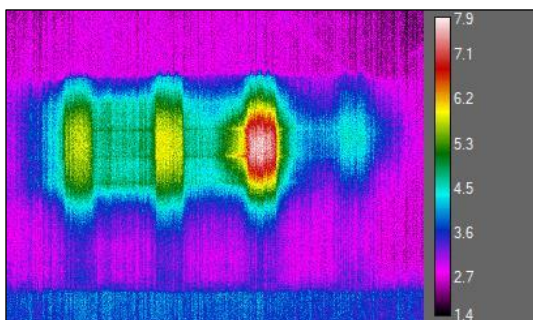
c)



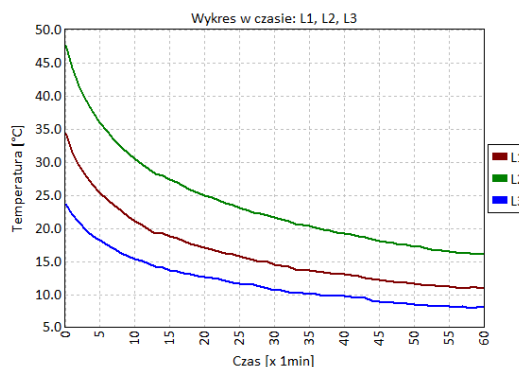
d)



e)



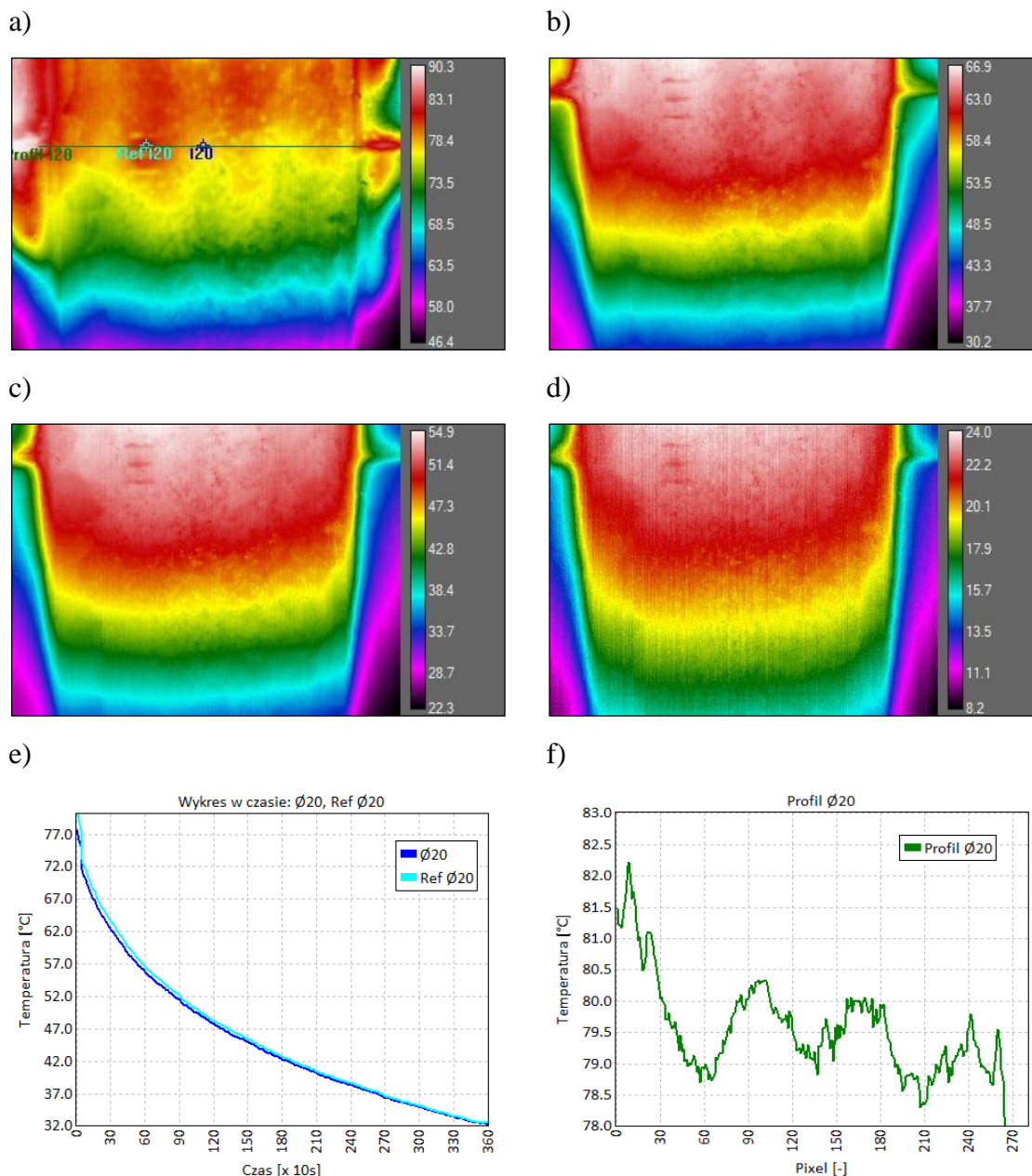
f)



Rys. 6.55. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie Ia dla boku z 3 prętami przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 0,5 m: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 5 min, c) termogram dla 15 min, d) termogram dla 120 min, e) termogram dla 240 min, f) wykres zmienności temperatury w czasie; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

STANOWISKO NR 2: WARIANT II (a) - 3 pręty Ø20

Materiał bazowy: *beton*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *26 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *0,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *120 min*
 Układ lamp grzejnych: *nie dotyczy*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *0,5 m*



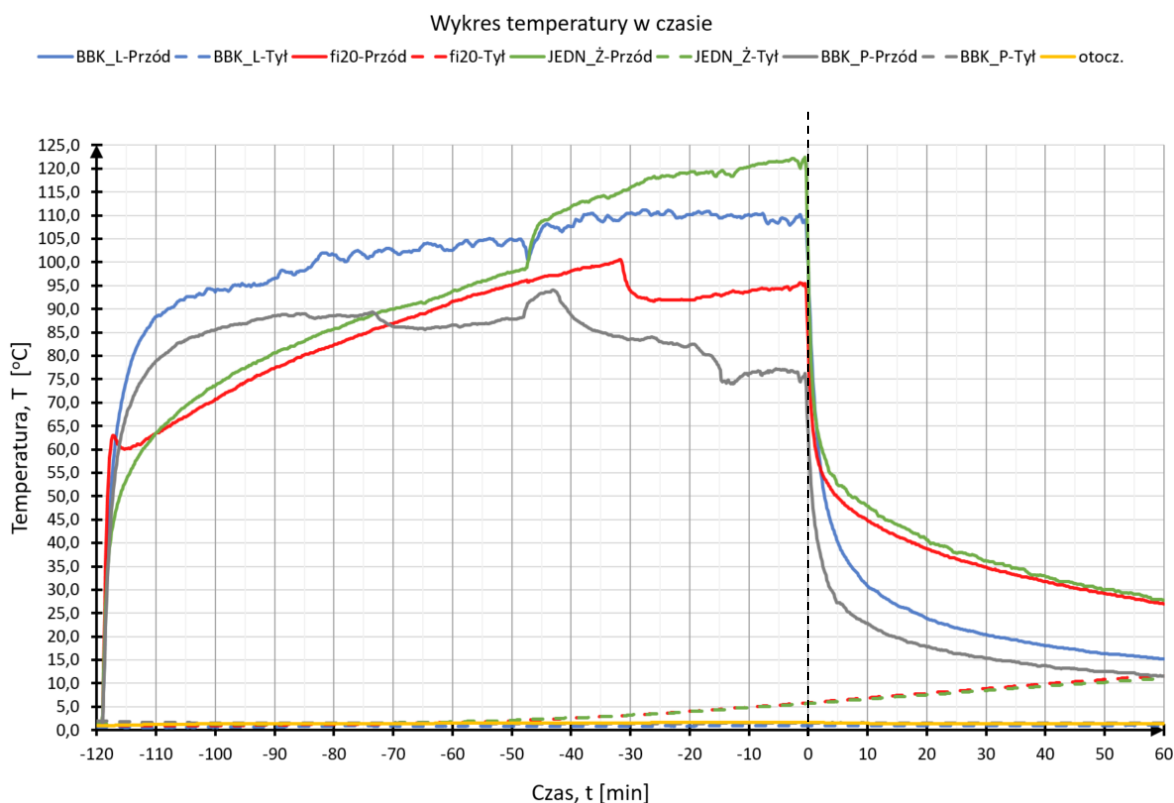
Rys. 6.56. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIa dla boku z 3 prętami o średnicy 20 mm przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 0,5 m: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 5 min, c) termogram dla 15 min, d) termogram dla 120 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 0 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia
 - BBK_L – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po lewej stronie słupa
 - BBK_P – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po prawej stronie słupa
 - JEDN_Ż – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia (żelbet)
 - fi20 – przekrój niejednorodny materiałowo z wtrąceniem w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -120 min do 0 min

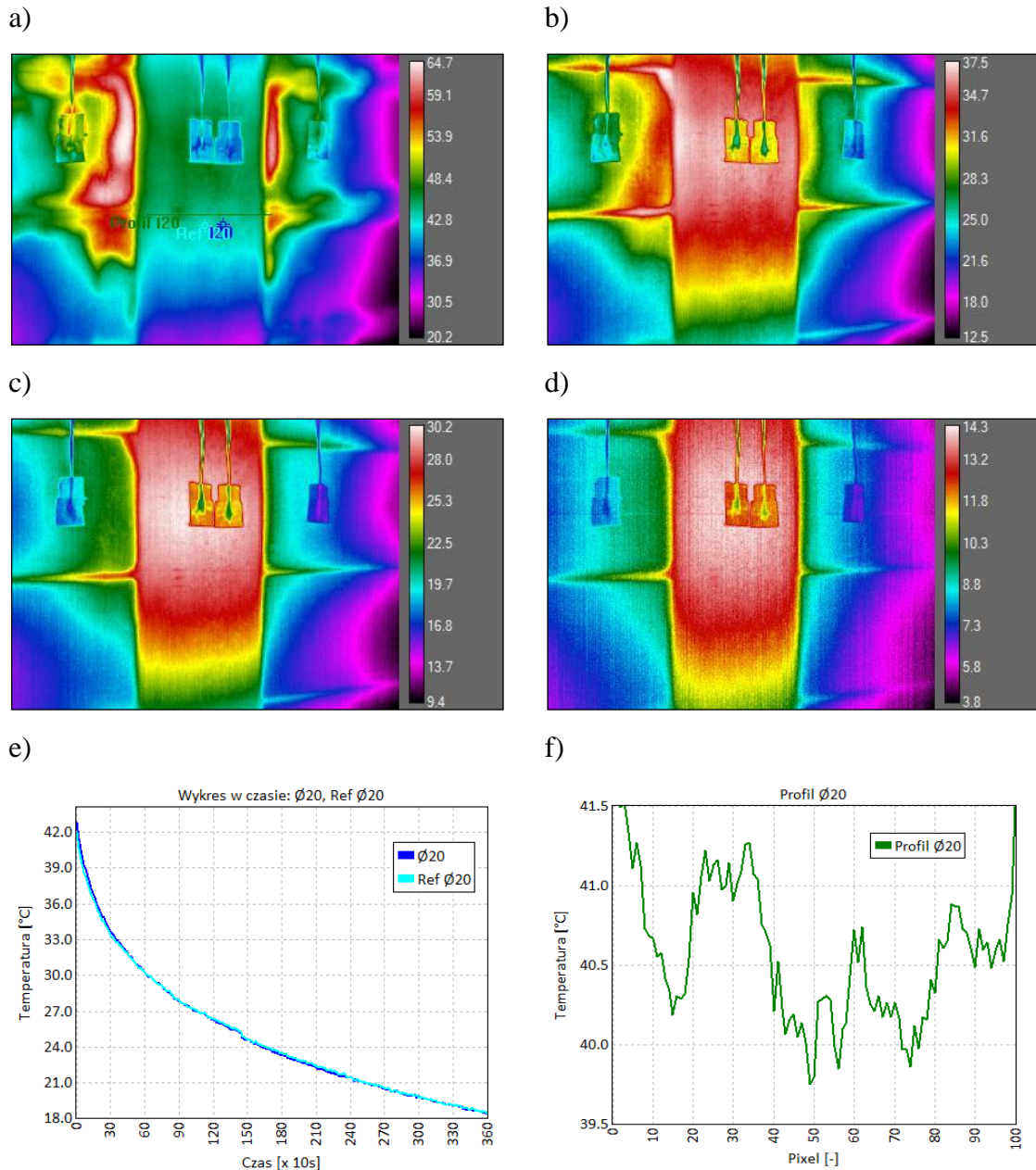
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.57. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 3 w wariacie IIa; temperatury mierzone za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni przedniej i tylnej elementu)

STANOWISKO NR 2: WARIANT II (b) - 3 pręty Ø20

Materiał bazowy: *beton*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *26 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,0 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *120 min*
 Układ lamp grzejnych: *nie dotyczy*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,7 m*



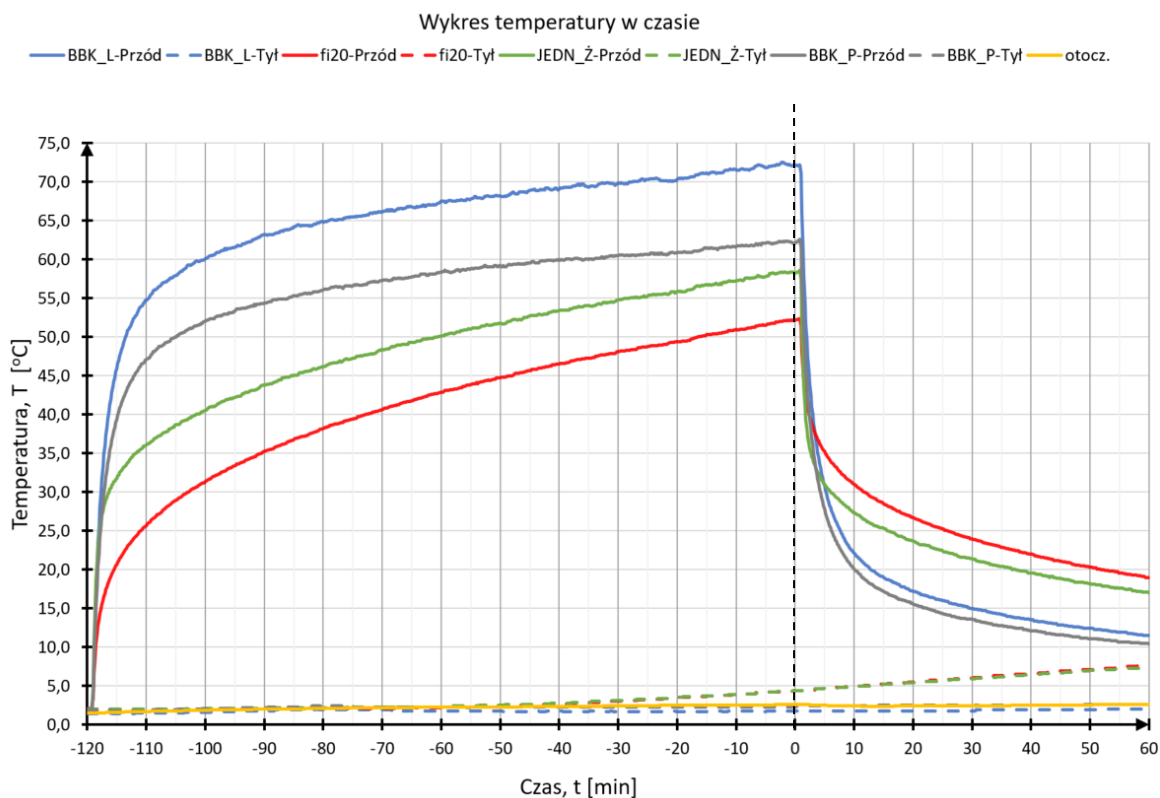
Rys. 6.58. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIb dla boku z 3 prętami o średnicy 20 mm przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,0 m: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 5 min, c) termogram dla 15 min, d) termogram dla 120 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 0 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia
 - BBK_L – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po lewej stronie słupa
 - BBK_P – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po prawej stronie słupa
 - JEDN_Ż – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia (żelbet)
 - fi20 – przekrój niejednorodny materiałowo z wtrąceniem w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -120 min do 0 min

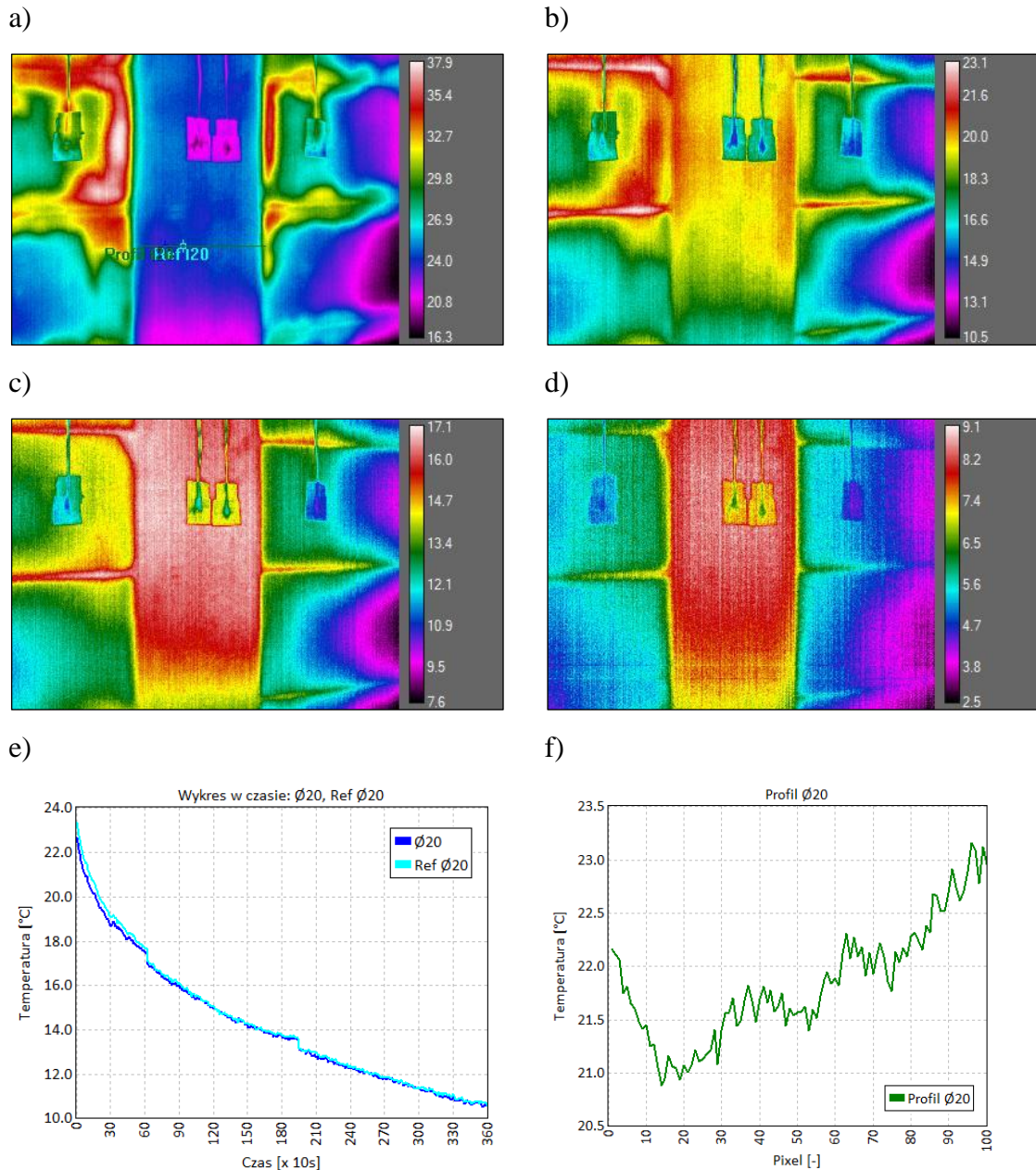
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.59. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIb; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni przedniej i tylnej elementu)

STANOWISKO NR 2: WARIANT II (c) - 3 pręty Ø20

Materiał bazowy: *beton*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *26 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *120 min*
 Układ lamp grzejnych: *nie dotyczy*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,7 m*



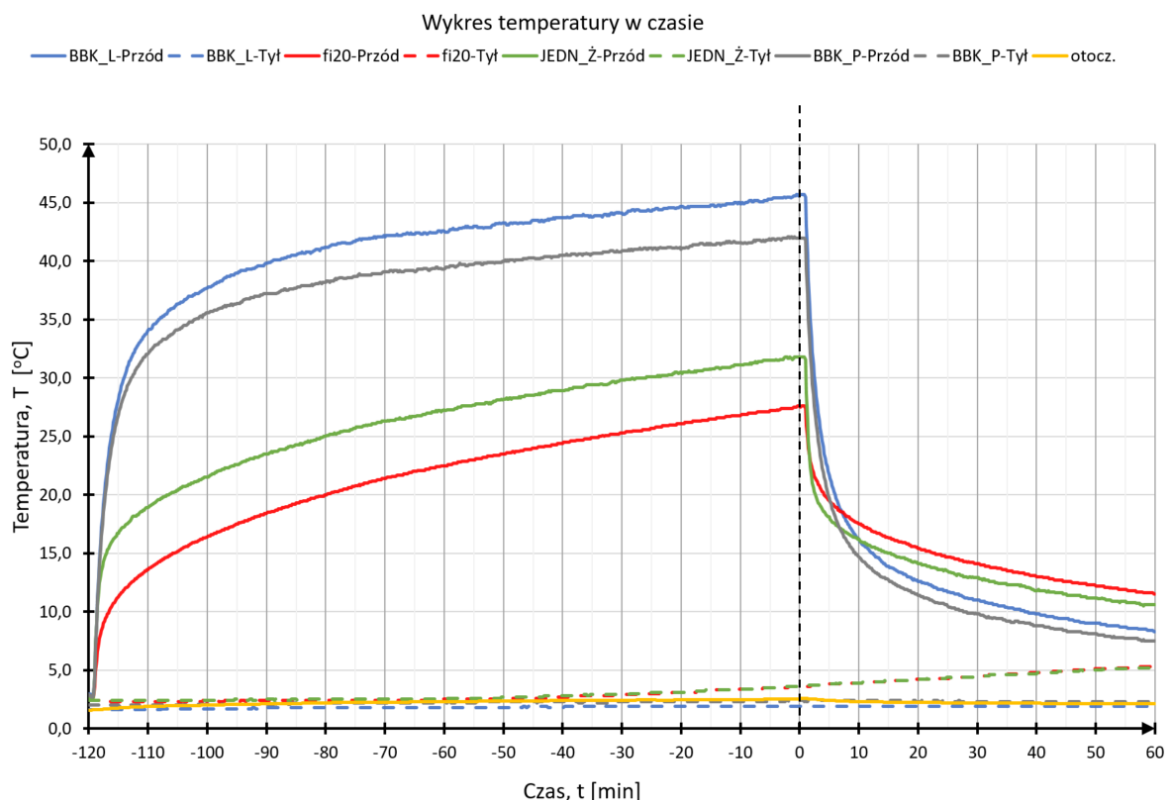
Rys. 6.60. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIc dla boku z 3 prętami o średnicy 20 mm przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 5 min, c) termogram dla 15 min, d) termogram dla 120 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 0 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia
 - BBK_L – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po lewej stronie słupa
 - BBK_P – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po prawej stronie słupa
 - JEDN_Ż – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia (żelbet)
 - fi20 – przekrój niejednorodny materiałowo z wtrąceniem w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm

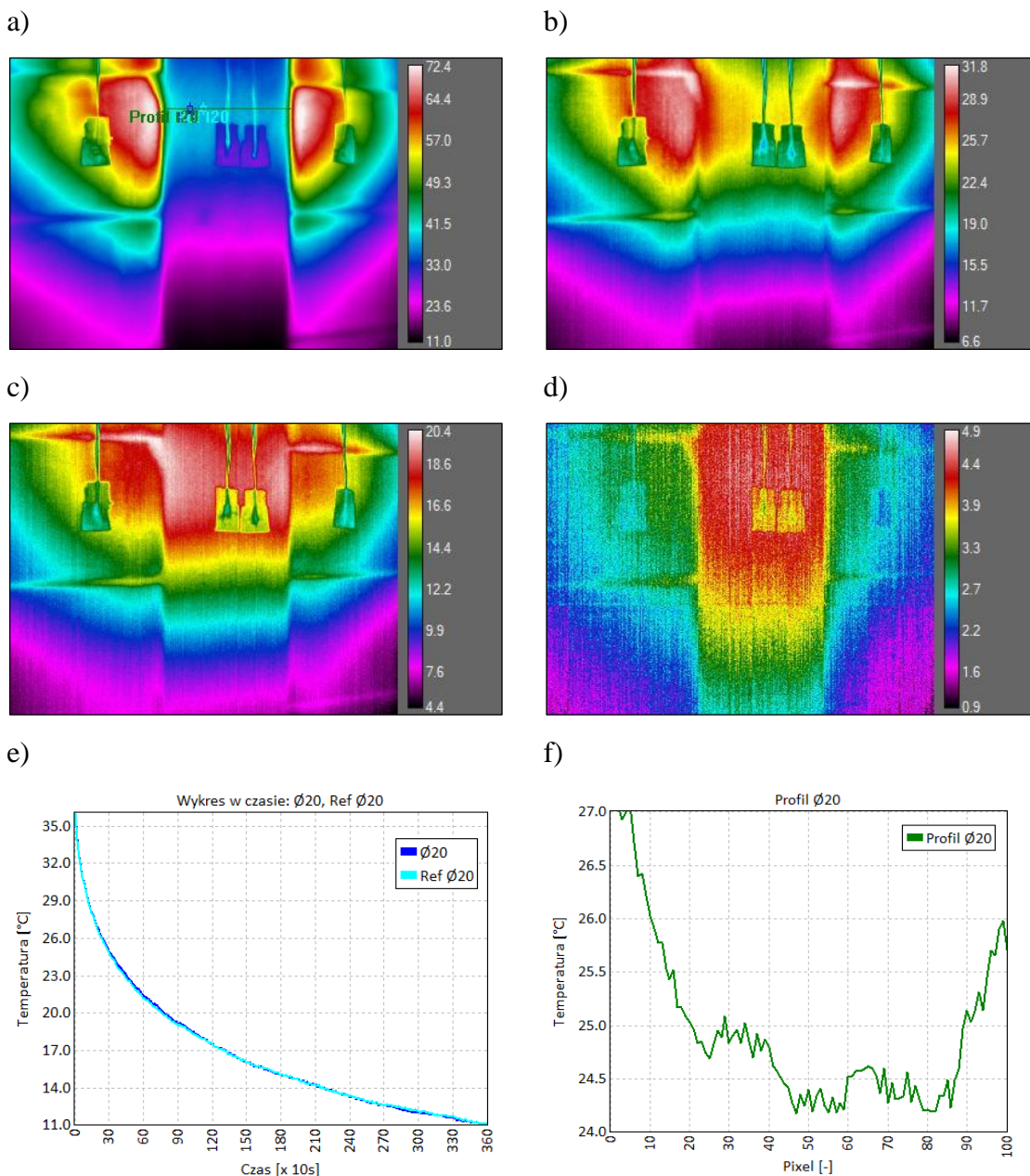
Okres ogrzewania: czas dla wartości od -120 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.61. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 3 w wariacie IIc; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni przedniej i tylnej elementu)

STANOWISKO NR 2: WARIANT III (a) - 3 pręty Ø20
 Materiał bazowy: *beton* (*lampa IR 2x1kW*)
 Otulina/głębokość położenia defektu: *26 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *0,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *60 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,7 m*



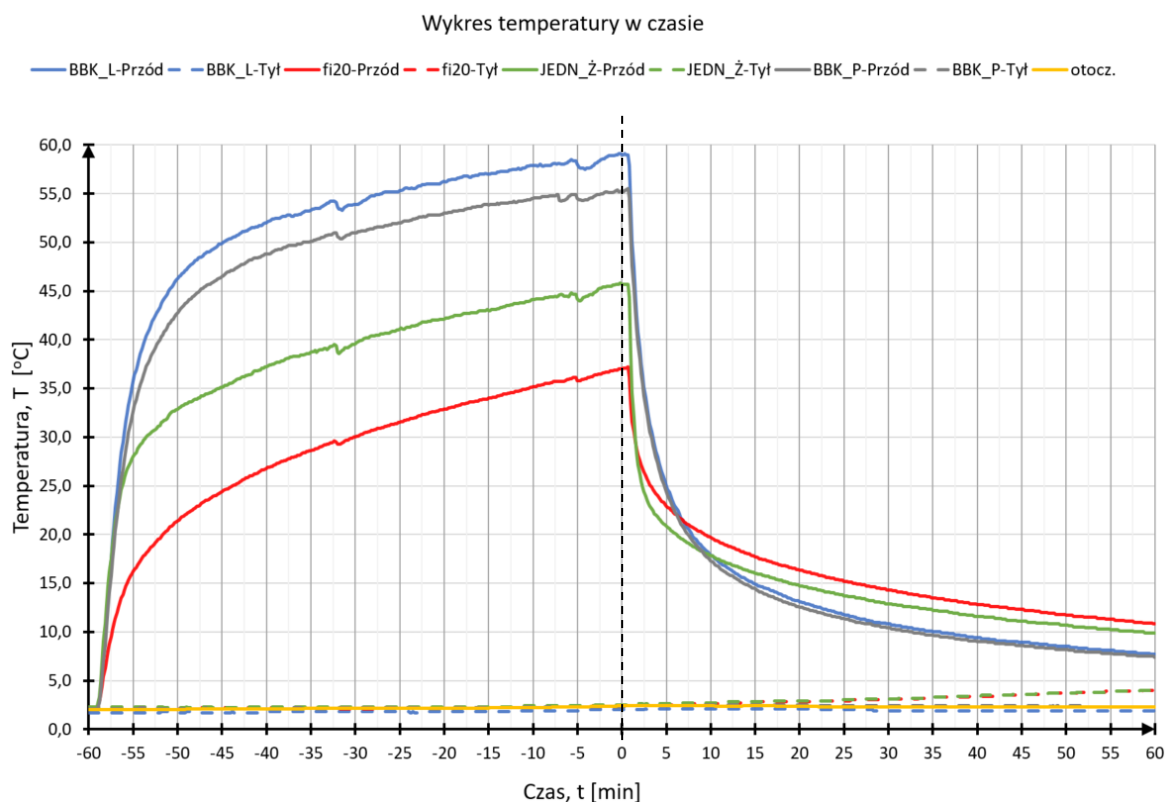
Rys. 6.62. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIIa dla boku z 3 prętami o średnicy 20 mm przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 0,5 m: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 5 min, c) termogram dla 15 min, d) termogram dla 120 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 0 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia
 - BBK_L – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po lewej stronie słupa
 - BBK_P – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po prawej stronie słupa
 - JEDN_Ż – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia (żelbet)
 - fi20 – przekrój niejednorodny materiałowo z wtrąceniem w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm

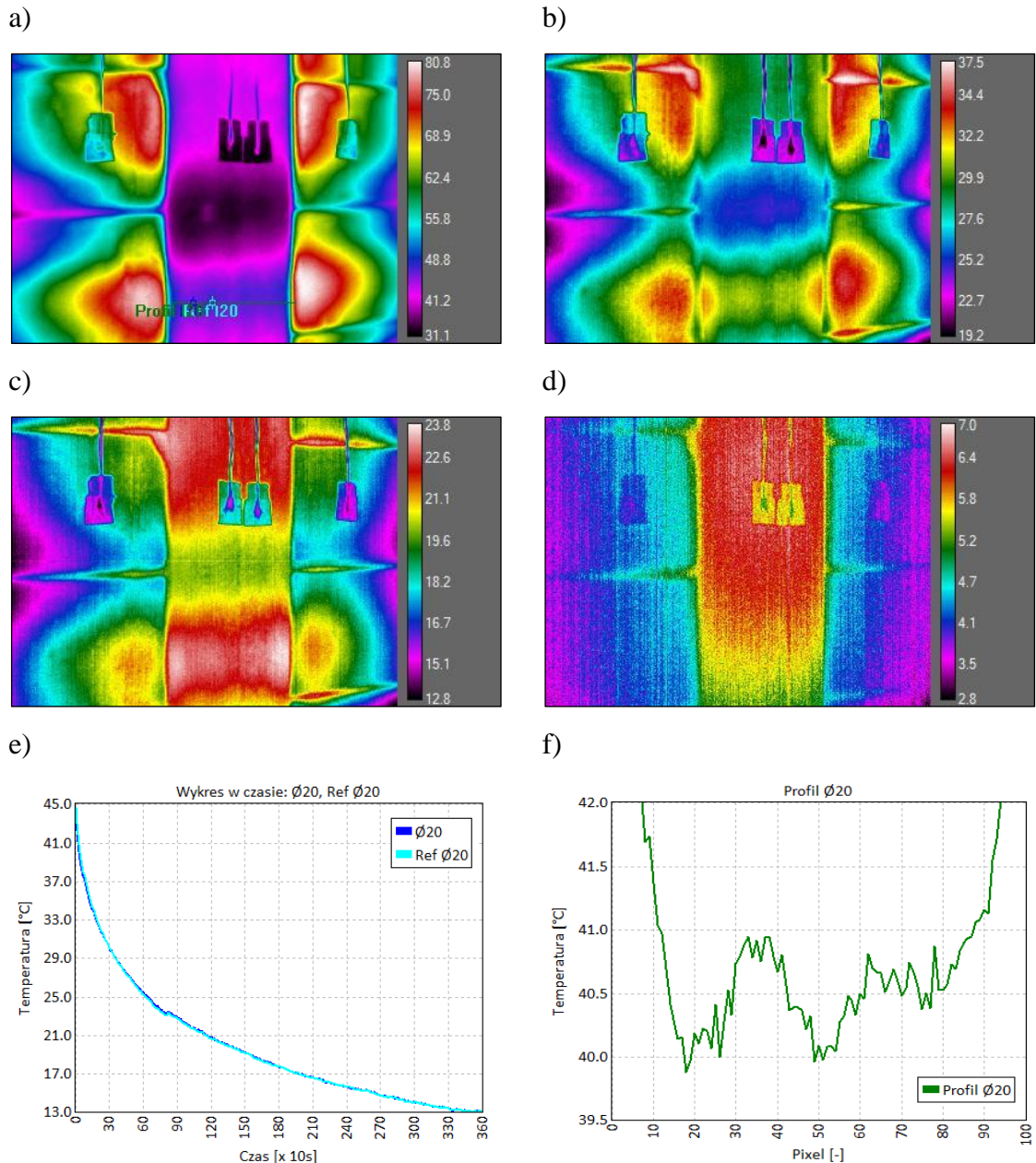
Okres ogrzewania: czas dla wartości od -60 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.63. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIIa; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni przedniej i tylnej elementu); nagrzew lampą IR o mocy 2x1kW

STANOWISKO NR 2: WARIANT III (a) - 3 pręty Ø20
 Materiał bazowy: *beton* *(lampa IR 6x1,2kW)*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *26 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *0,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *60 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,7 m*



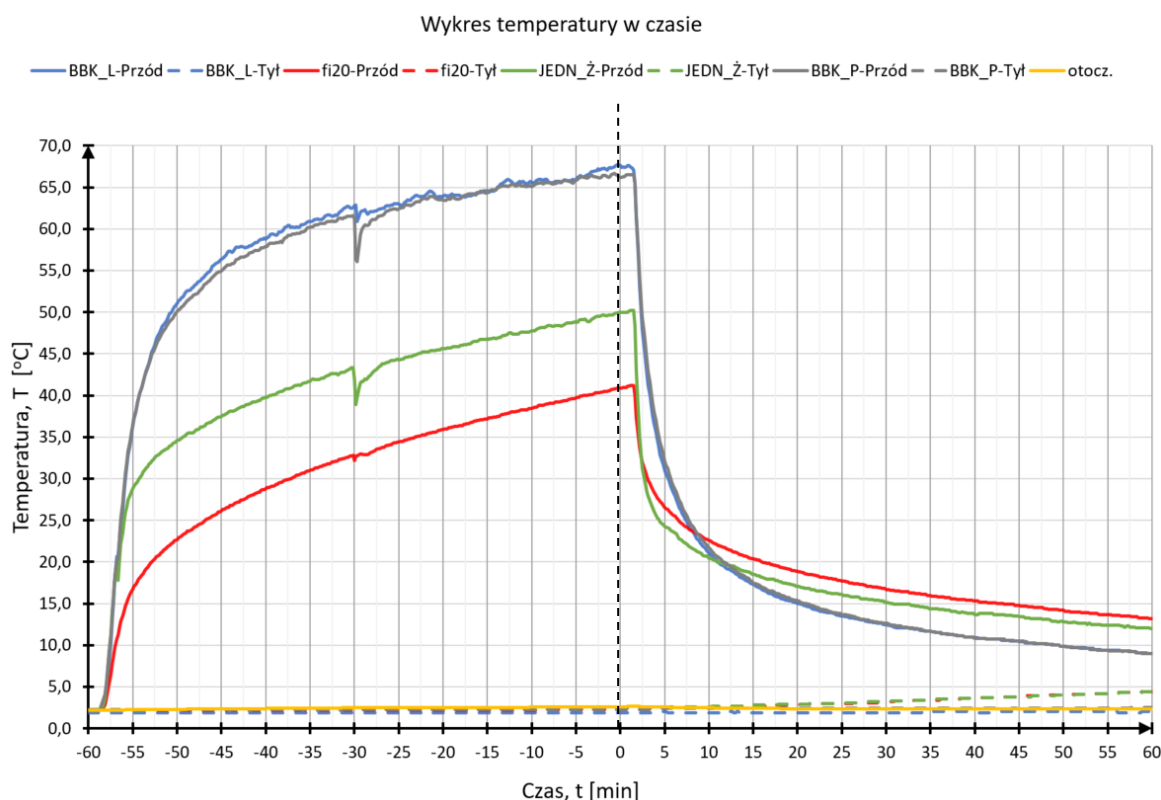
Rys. 6.64. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIIa dla boku z 3 prętami o średnicy 20 mm przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 0,5 m: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 5 min, c) termogram dla 15 min, d) termogram dla 120 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 0 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia
 - BBK_L – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po lewej stronie słupa
 - BBK_P – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po prawej stronie słupa
 - JEDN_Ż – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia (żelbet)
 - fi20 – przekrój niejednorodny materiałowo z wtrąceniem w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm

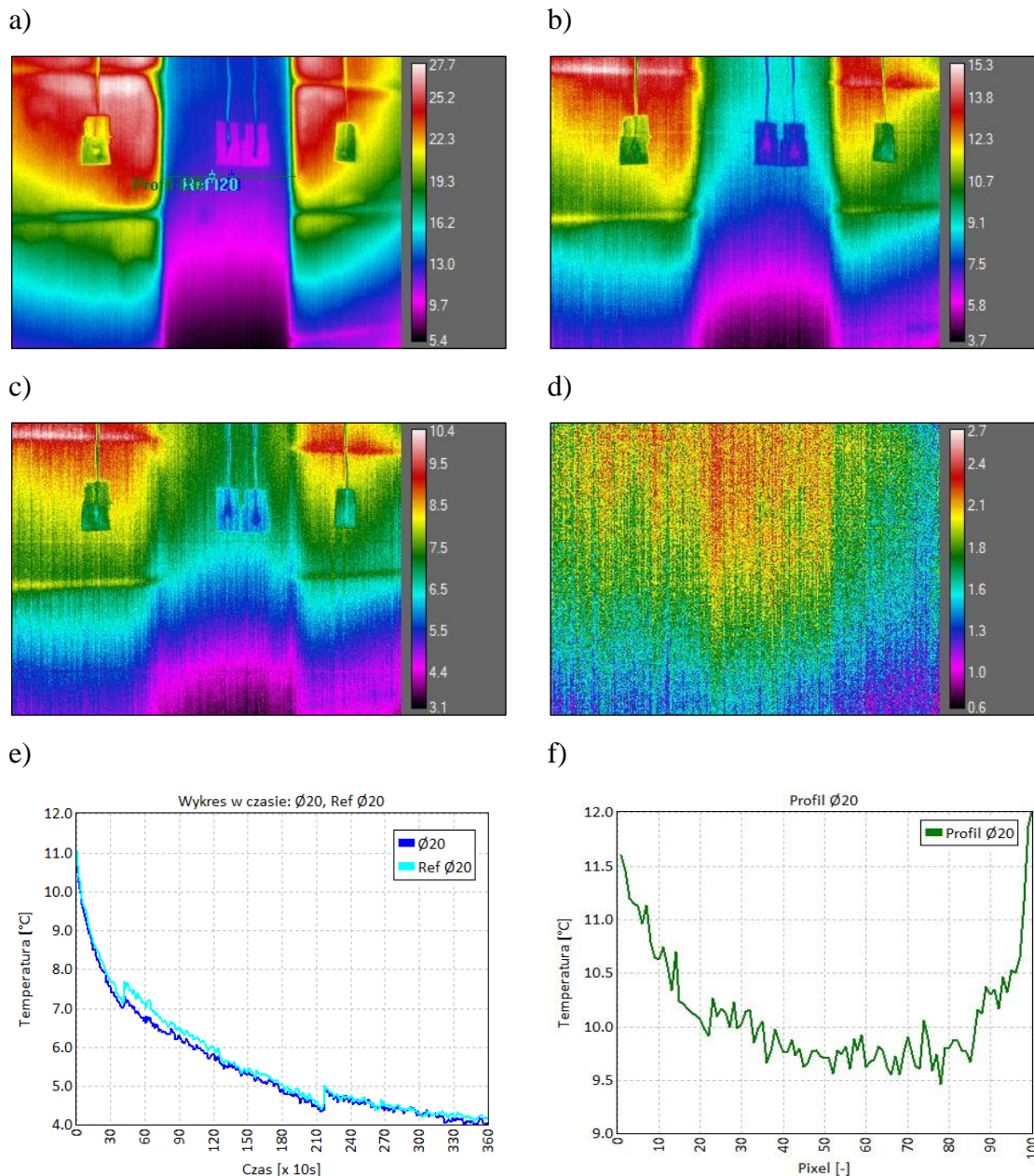
Okres ogrzewania: czas dla wartości od -60 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



Rys. 6.65. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIIa; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni przedniej i tylnej elementu); nagrzew lampą IR o mocy 6x1,2kW

STANOWISKO NR 2: WARIANT III (b) - 3 pręty $\varnothing 20$
 Materiał bazowy: *beton* (*lampa IR 2x1kW*)
 Otulina/głębokość położenia defektu: *26 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,0 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *60 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *1,7 m*



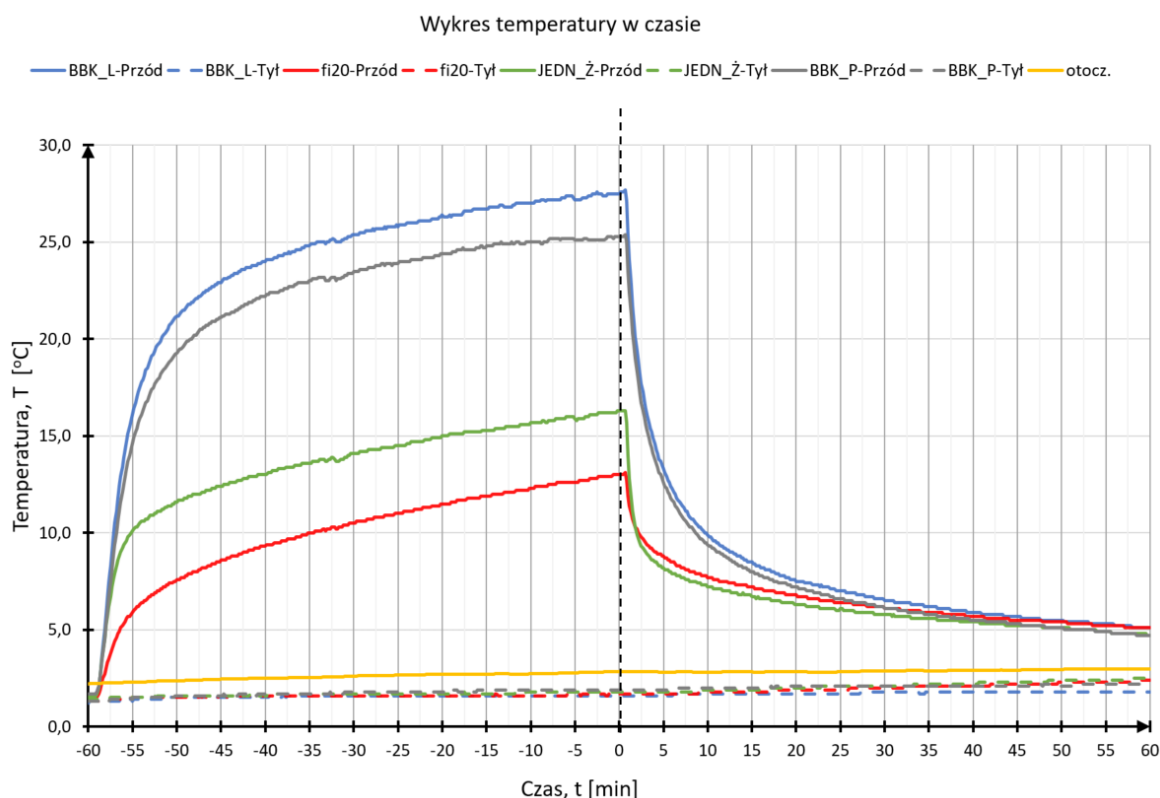
Rys. 6.66. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIIb dla boku z 3 prętami o średnicy 20 mm przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,0 m: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 5 min, c) termogram dla 15 min, d) termogram dla 120 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 1 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia
 - BBK_L – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po lewej stronie słupa
 - BBK_P – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po prawej stronie słupa
 - JEDN_Ż – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia (żelbet)
 - fi20 – przekrój niejednorodny materiałowo z wtrąceniem w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -60 min do 0 min

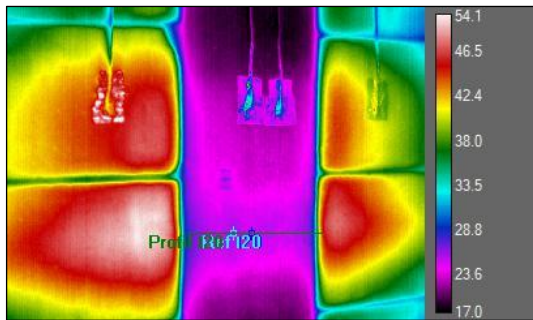
Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



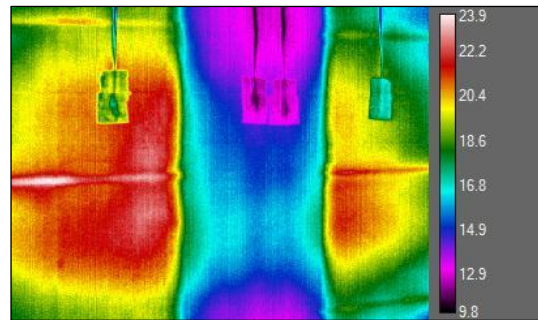
Rys. 6.67. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIIb; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni przedniej i tylnej elementu); nagrzew lampą IR o mocy 2x1 kW

STANOWISKO NR 2:	WARIANT III (b)	-	3 pręty $\varnothing 20$
Materiał bazowy:	<i>beton</i>		<i>(lampa IR 6x1,2kW)</i>
Otulina/głębokość położenia defektu:	<i>26 mm</i>		
Odległość promiennika od elementu:	<i>1,0 m</i>		
Czas nagrzewu powierzchni:	<i>60 min</i>		
Układ lamp grzejnych:	<i>poziomo</i>		
Tryb pomiaru:	<i>refleksyjny</i>		
Odległość kamery IR od elementu:	<i>1,7 m</i>		

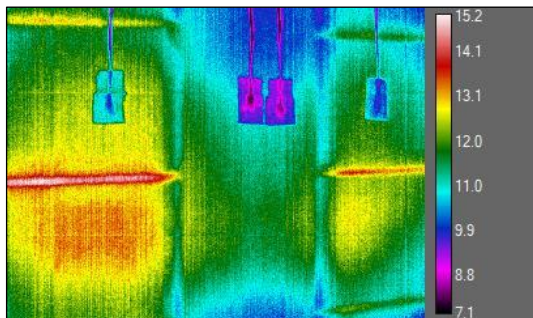
a)



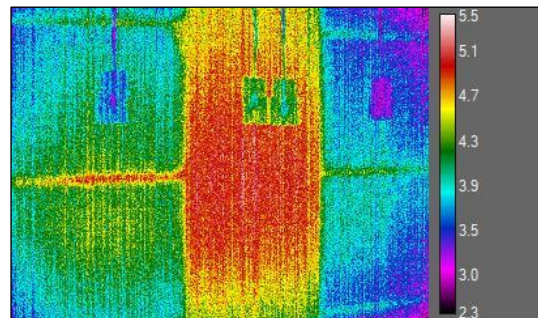
b)



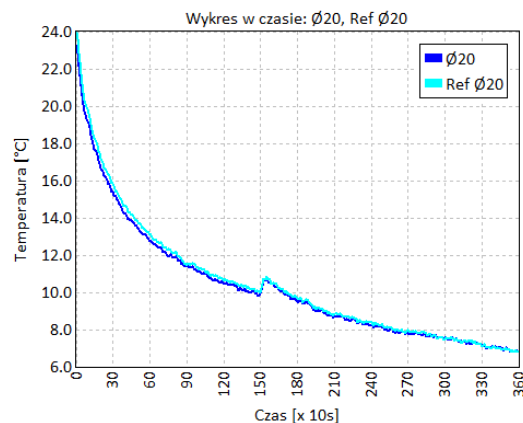
c)



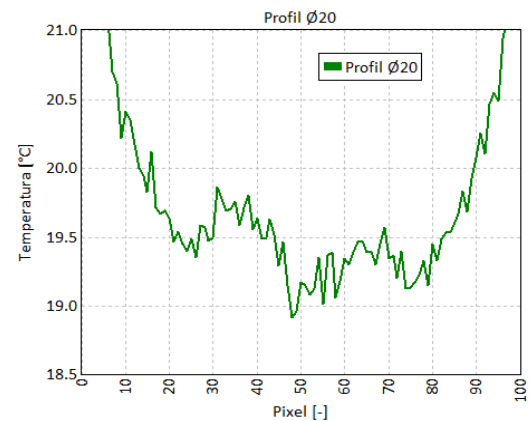
d)



e)



f)



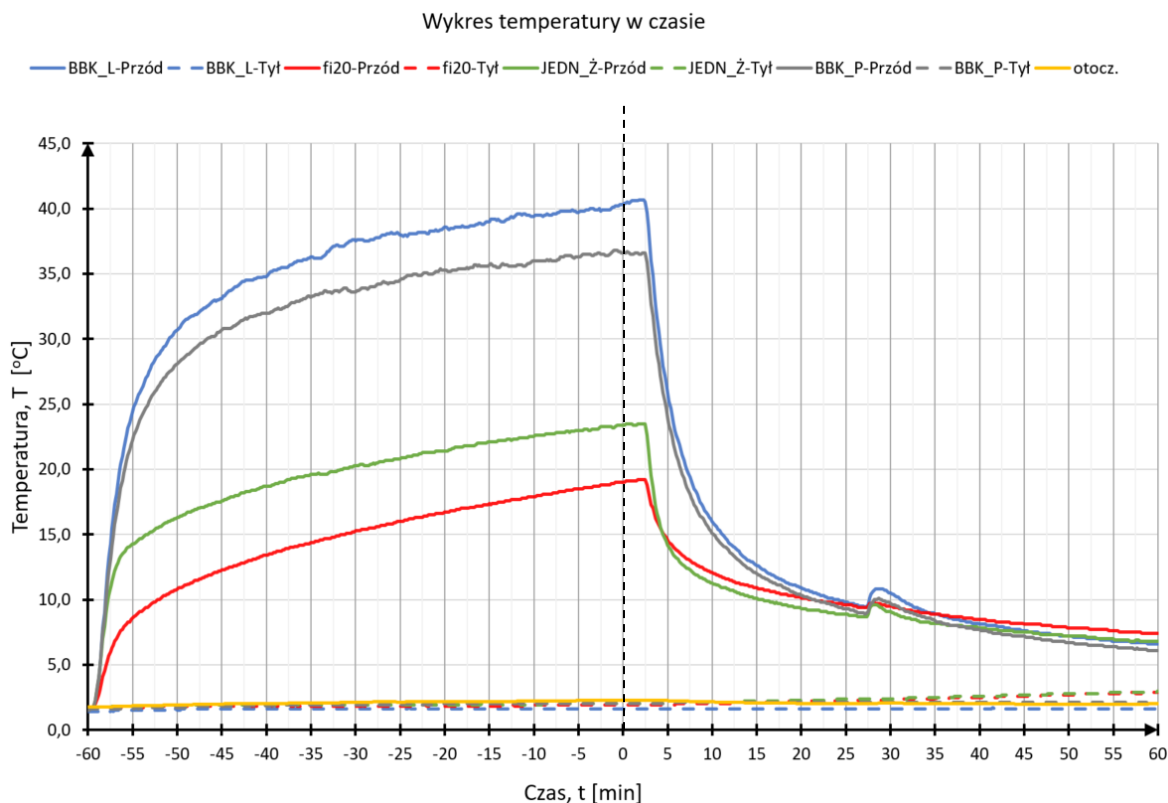
Rys. 6.68. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIIb dla boku z 3 prętami o średnicy 20 mm przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,0 m: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla 0 min, b) termogram dla 5 min, c) termogram dla 15 min, d) termogram dla 120 min, e) wykres zmienności temperatury w czasie, f) profile temperatury dla 2 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

Dane pomiarowe z termopar

- Oznaczenia:
- otocz. – temperatura powietrza wokół badanego elementu
 - przód – pomiar termoparą umieszczoną na powierzchni wtrącenia od strony pobudzenia cieplnego
 - tył – pomiar termoparą umieszczoną na przeciwnej powierzchni wtrącenia w stosunku do pobudzenia
 - BBK_L – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po lewej stronie słupa
 - BBK_P – pomiar termoparą umieszczoną na bloczku z betonu komórkowego po prawej stronie słupa
 - JEDN_Ż – przekrój jednorodny materiałowo bez wtrącenia (żelbet)
 - fi20 – przekrój niejednorodny materiałowo z wtrąceniem w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm

Okres ogrzewania: czas dla wartości od -60 min do 0 min

Okres stygnięcia: czas dla wartości od 0 min



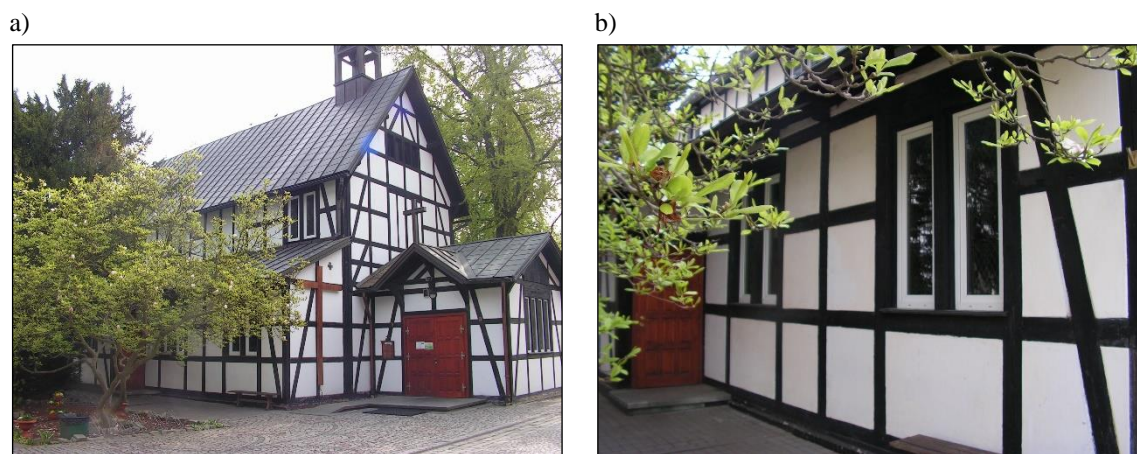
Rys. 6.69. Wyniki dla pomiaru na stanowisku badawczym nr 3 w wariantcie IIIb; temperatury mierzono za pomocą termopar w charakterystycznych punktach badanego elementu (na powierzchni przedniej i tylnej elementu); nagrzew lampą IR o mocy 6x1,2kW

6.2. Badania terenowe

6.2.1. Terenowe stanowisko badań

W ramach realizacji głównych celów pracy przeprowadzono również badania terenowe w budynku istniejącym. Doświadczenie zdobyte przy wykonywaniu badań laboratoryjnych zostało wykorzystane przy lokalizacji wtrąceń materiałowych w obiekcie rzeczywistym. Do badań wytypowano budynek ze ścianami o znanej strukturze materiałowej. Badana ściana zawierała wtrącenia materiałowe, których lokalizacja była znana. Dzięki temu można było porównać otrzymane wyniki ze stanem rzeczywistym, bez wykonywania odkrywek. Zdecydowano, że obiektem spełniającym powyższe wymagania będzie budynek wykonany w technologii szachulcowej.

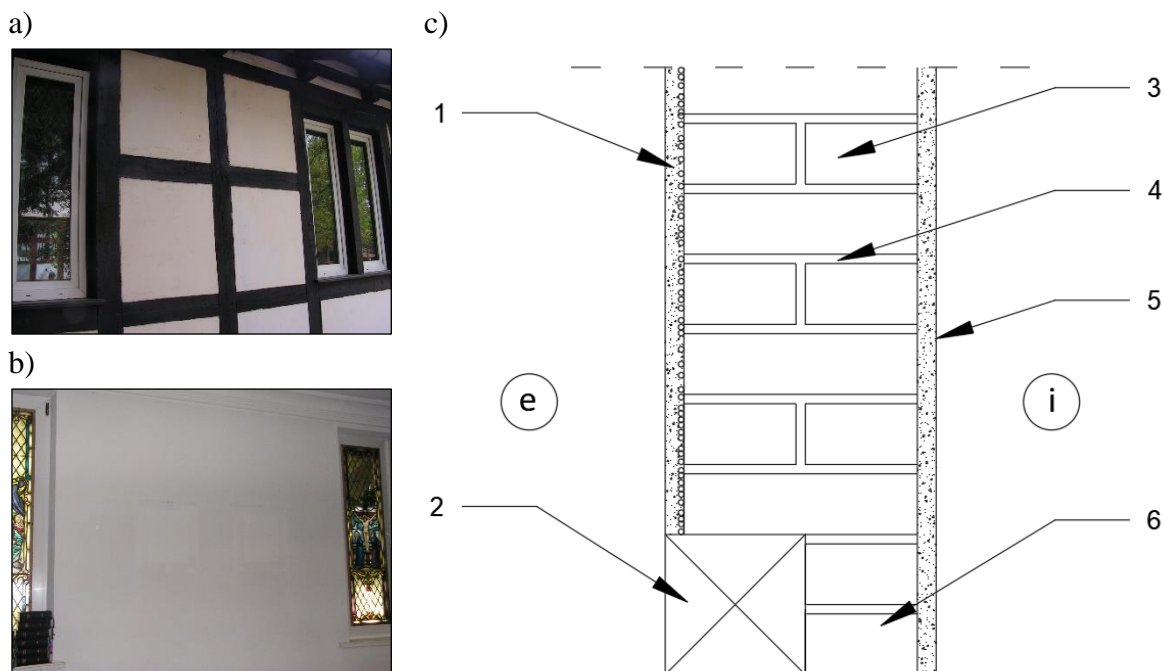
Badania terenowe przeprowadzono w zabytkowym Kościele pw. Najświętszej Maryi Panny Matki Pocieszenia⁵² we Wrocławiu przy ulicy Edwarda Wittiga 10 w okresie letnim 2018 roku. Badaniu metodą termowizji aktywnej poddano ścianę zewnętrzną nawy bocznej kościoła (rys. 6.70.).



Rys. 6.70. Zdjęcia obiektu, na którym przeprowadzono badania terenowe, a) widok ogólny zabytkowego kościoła, b) zdjęcie (od zewnątrz obiektu) badanego fragmentu przegrody (opracowanie własne)

Badana ściana została wykonana w technologii muru pruskiego. Część nośną obiektu stanowi drewniany szkielet. Pola szachulca (przestrzeń pomiędzy elementami drewnianymi) została wypełniona cegłą ceramiczną pełną (lub dziurawką) oraz tynkiem wapienno-cementowym na trzcinie od strony zewnętrznej. Od strony wewnętrznej cała powierzchnia ściany (również elementy konstrukcyjne drewniane) jest wykonana z cegły otynkowanej tynkiem wapienno-cementowym [62]. Dla tak przyjętej konstrukcji przegrody podczas wykonywania badań z zastosowaniem termografii aktywnej, materiałem bazowym była cegła ceramiczna, a lokalizowanym wtrąceniem materiałowym elementy drewnianej konstrukcji. Lokalizowane od strony wewnętrznej przegrody wtrącenia materiałowe znajdowały się pod dwiema warstwami różnych materiałów (od powierzchni wewnętrznej) tj. 2 cm tynku wapienno-cementowego oraz 12 cm cegły ceramicznej. Badaną przegrodę pokazano na rys. 6.71.

⁵² Obiekt wybudowany w roku 1919 znajduje się pod ścisłą ochroną konserwatorską. Od 1981 wpisany do rejestru zabytków (nr rej.: A/2652/411/Wm z 9.12.1981).



Rys. 6.71. Ściana zewnętrzna poddana badaniom metodą termografii aktywnej, a) zdjęcie badanej powierzchni od zewnątrz, b) zdjęcie badanej powierzchni od wewnątrz, c) widok ściany w przekroju; oznaczenia: 1 – tynk zewnętrzny wapienno-cementowy na siatce z trzciny (2 cm), 2 – drewniana belka (15 x 15 cm), 3 – cegła ceramiczna (25 cm), 4 – spoina, zaprawa cementowa (1 cm), 5 – tynk wewnętrzny wapienno – cementowy (2 cm), 6 – cegła ceramiczna (12 cm), e – oznaczenie środowiska zewnętrznego, i – oznaczenie środowiska wewnętrznego (opracowanie własne)

W badaniach terenowych, na otrzymane wyniki rozkładu pola temperatury podczas badań metodą termowizji aktywnej, oprócz geometrii przegrody wpływ miały również parametry cieplne materiałów budujących tę przegrodę. W tabeli 6.6. podano parametry fizyczno-cieplne materiałów bazowych (tynk wapienno – cementowy oraz cegła pełna) i materiału lokalizowanego wtrącenia materiałowego (drewna).

Tabela 6.6. Podstawowe parametry fizyczno-cieplne materiałów badanej ściany zewnętrznej; w kolumnie 2 kolory odpowiadają parametrom: przyjętym – kolor czerwony; obliczonym – kolor czarny (opracowanie własne na podstawie różnych źródeł)

LP	Parametr	Oznaczenie [Jednostka]	Wtrącenia materiałowe		Materiał bazowy (budulcowy)	
			Drewno	Cegła ceramiczna	Tynk wapienno-cementowy	
1	Gęstość objętościowa	ρ_o [kg · m ⁻³]	550,00	1 800,00	1 850,00	
2	Ciepło właściwe	c_p [J · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	2 510,00	880,00	840,00	

3	Objętościowa pojemność cieplna	C_V [J·m ⁻³ ·K ⁻¹]	1,280 · 10 ⁶	1,584 · 10 ⁶	1,554 · 10 ⁶
4	Współczynnik przewodzenia ciepła	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	0,160	0,770	0,820
5	Dyfuzyjność cieplna	a [m ² ·s ⁻¹]	0,11590 · 10 ⁻⁶	0,48611 · 10 ⁻⁶	0,52767 · 10 ⁻⁶
6	Efuzyjność cieplna	e [W·s ^{1/2} ·m ⁻² ·K ⁻¹]	469,98	1 104,39	1 128,84
7	Opór cieplny	R [m ² ·K·W ⁻¹]	6,2500	1,2987	1,2195
8	Współczynnik absorpcyjności	α [–]	0,900	0,930	0,910
9	Współczynnik refleksyjności	r [–]	0,100	0,070	0,090
10	Współczynnik emisyjności	ε [–]	0,900	0,930	0,910

Wartości cieplne (kolor czerwony) zostały przyjęte na podstawie polskich norm: PN-EN ISO 12524:2003 [202] oraz PN-EN ISO 6946:1999 [203]. Parametr emisyjności (absorpcyjności) przyjęto na podstawie tabel emisyjności firmy FLIR. Pozostałe wartości, obliczono wg wzorów podanych w rozdziale 4.

6.2.2. Opis badania

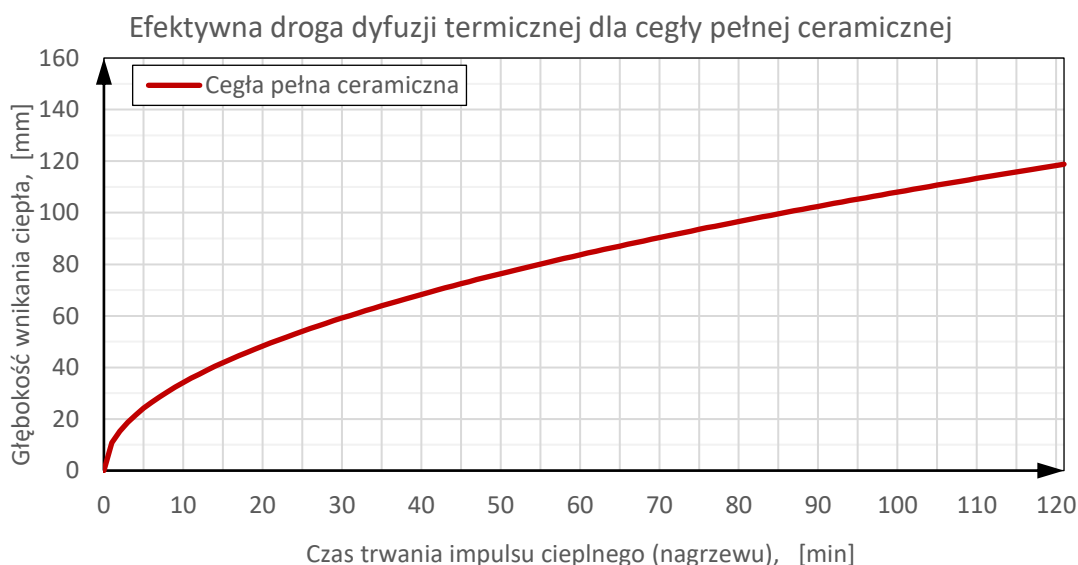
Dla przyjętej budowy geometryczno – materiałowej badanej przegrody, można wyznaczyć parametry opisujące wstępną możliwość detekcji wtrącenia materiałowego przy użyciu termografii aktywnej w tej przegrodzie. Oba parametry tj. *współczynnik niedopasowania termicznego* oraz *efektywnej drogi dyfuzji termicznej* zostały obliczone kolejno wg wzorów (4.16) oraz (6.1).

Tabela 6.7. Współczynnik niedopasowania termicznego dla materiału bazowego i materiału wtrącenia występujących w badaniach terenowych

LP	Materiał bazowy	Efuzyjność cieplna materiału bazowego e_{mat}	Materiał defektu	Efuzyjność cieplna materiału defektu e_{def}	Współczynnik niedopasowania termicznego* $\Gamma_{mat,def}$
[-]	[-]	$[W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	[-]	$[W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	[-]
1	Cegła pełna ceramiczna	1104,39	Drewno	469,98	-0,403

*Parametr ten przyjmuje wartości w zakresie od -1 do +1. Im jest bliższy wartości granicznych (-1 i +1) tym lepsze zróżnicowanie termiczne materiału bazowego i zawartego w nim defektu (łatwiej wykryć defekt).

Dla materiału bazowego jakim była cegła ceramiczna i lokalizowanego wtrącenia materiałowego z drewna, parametr niedopasowania termicznego przyjmuje wartość -0,403 (tabela 6.7.). Wynik świadczy o średnim niedopasowaniu termicznym obu materiałów, co może skutkować utrudnioną lokalizacją elementu drewnianego. Dodatkowym utrudnieniem była głębokość posadowienia szukanego elementu konstrukcji pod warstwami: 12 cm cegły pełnej oraz 2 cm tynku wapienno-cementowego. Wstępnym kryterium opisującym możliwości detekcji na tej głębokości był parametr efektywnej drogi dyfuzji termicznej przedstawiony na (rys. 6.72.). W przypadku cegły ceramicznej pełnej oraz tynku wapienno-cementowego dyfuzyjność cieplna obu materiałów była zbliżona, dlatego przyjęto, że energia cieplna musi wnikać w badaną strukturę przegrody na co najmniej 14 cm jednorodnej warstwy materiału (w obliczeniach przyjęto jedną warstwę materiału jak dla cegły ceramicznej pełnej). Na podstawie obliczonej efektywnej drogi dyfuzji termicznej, wymagany czas wnikania energii cieplnej na głębokość 140 mm, wynosi około 168 minut.



Rys. 6.72. Wykres efektywnej drogi dyfuzji termicznej w materiale bazowym (cegła ceramiczna pełna) użytym w badaniach terenowych (opracowanie własne)

Oba powyższe parametry wskazują na utrudnioną możliwość detekcji drewnianej konstrukcji nośnej (wtrącenia materiałowego) położonej pod warstwą 12 cm cegły pełnej ceramicznej i 2 cm tynku wapienno-cementowego, przy użyciu badań metodą termowizji aktywnej. Próbę detekcji wtrącenia materiałowego podjęto przy użyciu promiennika podczerwieni o mocy 2 x 1 kW oraz kamery termowizyjnej FLIR P65⁵³. Terenowe stanowisko badawcze przedstawiono na zdjęciach (rys. 6.73.) oraz na rysunkach poglądowych (rys. 6.74.).



Rys. 6.73. Miejsce wykonania badań terenowych: a) widok ogólny stanowiska, b) widok badanego obszaru przegrody zewnętrznej, c) zbliżenie na promiennik podczerwieni podczas nagrzewu, d) zbliżenie na kamerę termowizyjną podczas cyklicznej rejestracji termogramów

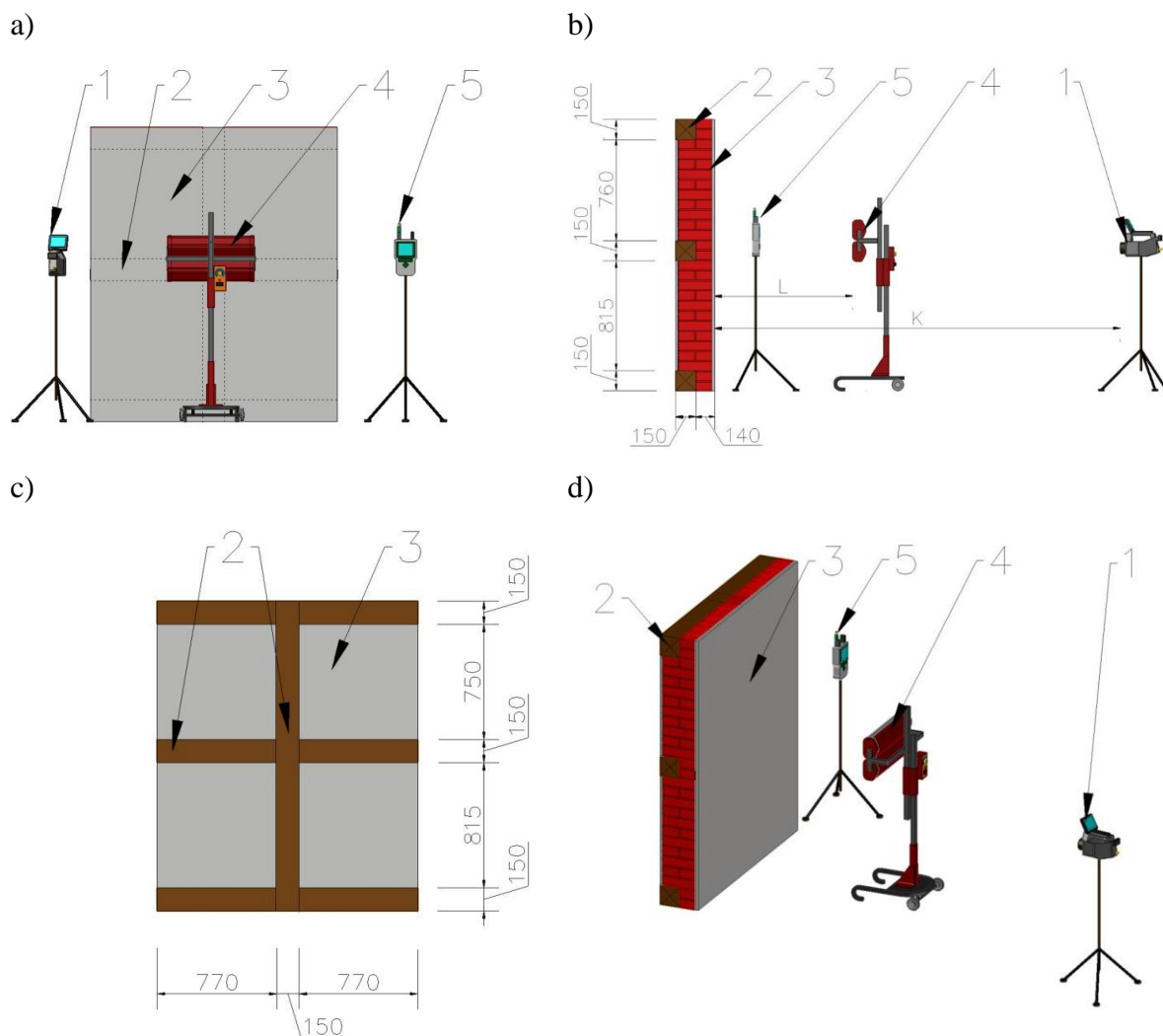
Badanie przebiegało zgodnie z procedurą badawczą opisaną w pkt.6.1.3. Różnica polegała jedynie na braku pomiaru temperatury za pomocą termopar. Badania na obiekcie rzeczywistym przeprowadzono w 2 wariantach:

Wariant I: odległość pomiędzy promiennikiem podczerwieni a badaną powierzchnią wynosiła 30 cm

⁵³ W badaniach terenowych na wybranym obiekcie niemożliwe było użycie promiennika o większej mocy z uwagi na brak odpowiedniego zasilania na obiekcie. Użyty promiennik ciepły wymagał jedynie podłączenia pod standardowe gniazdko o napięciu 230V.

Wariant II: odległość pomiędzy promiennikiem podczerwieni a badaną powierzchnią wynosiła 150 cm

W obu wariantach czas nagrzewu powierzchni wynosił 30 minut. Teoretyczny wymagany czas nagrzewu dla wtrącenia zlokalizowanego na tak dużej głębokości pod badaną powierzchnią (140 mm) powinien wynosić blisko 3h (rys. 6.72.), jednakże z uwagi na ograniczenia sprzętowe, czas pracy używanego promiennika nie mógł przekraczać 30 minut.



Rys. 6.74. Rysunki poglądowe terenowego stanowiska badawczego, a) widok od przodu przegrody od strony wewnętrznej, b) widok od boku, c) widok od przodu przegrody od strony zewnętrznej, d) widok ogólny w 3D; oznaczenia: 1 – kamera termowizyjna, 2 – konstrukcja drewniana (wtrącenie materiałowe), 3 – powierzchnia tynku, 4 – promiennik podczerwieni o mocy 2 x 1kW, 5 – czujnik temperatury i wilgotności względnej powietrza (opracowanie własne)

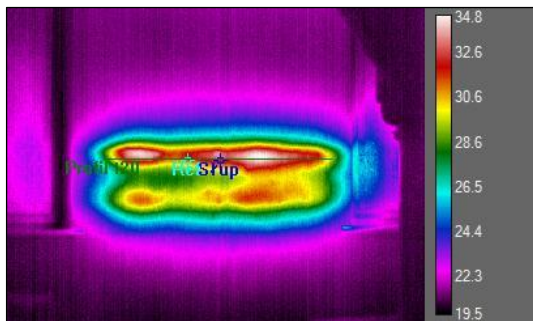
6.2.3. Wyniki badań terenowych

Metoda opracowania wyników była taka sama jak przedstawiona w punkcie 6.1.4.1.

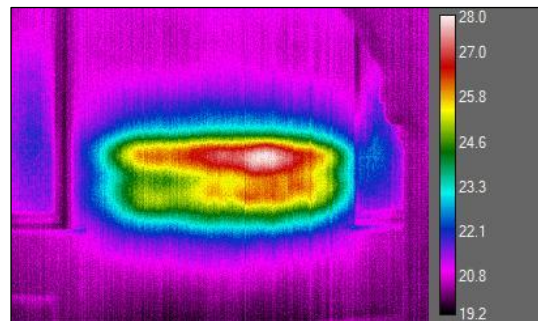
WARIANT I

Materiał bazowy:	<i>cegła ceramiczna pełna</i>
Otulina/głębokość położenia defektu:	<i>140 mm</i>
Odległość promiennika od elementu:	<i>0,3 m</i>
Czas nagrzewu powierzchni:	<i>30 min</i>
Układ lamp grzejnych:	<i>poziomo (przesuwnie)</i>
Tryb pomiaru:	<i>refleksyjny</i>
Odległość kamery IR od elementu:	<i>7,1 m</i>

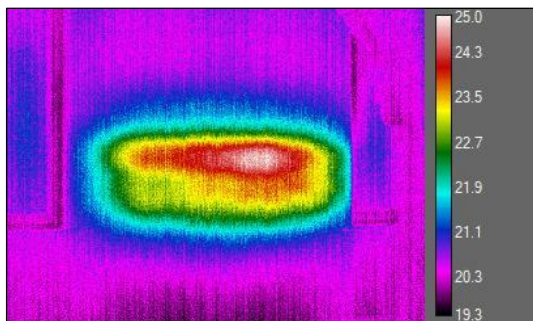
a)



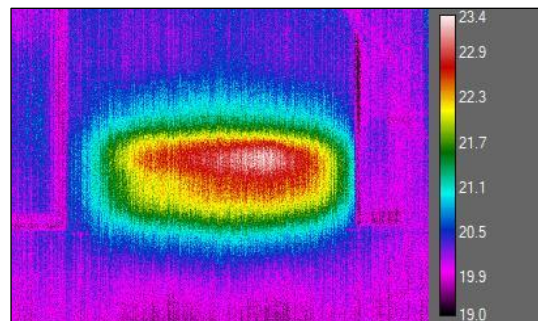
b)



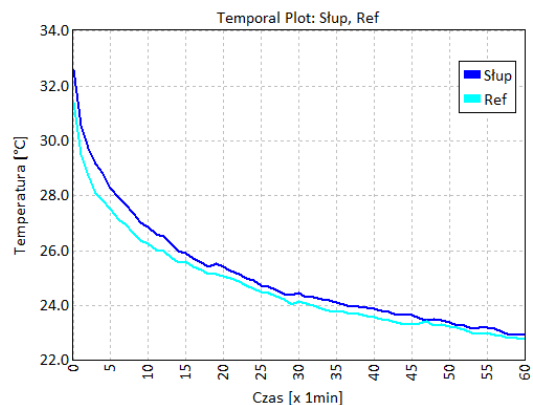
c)



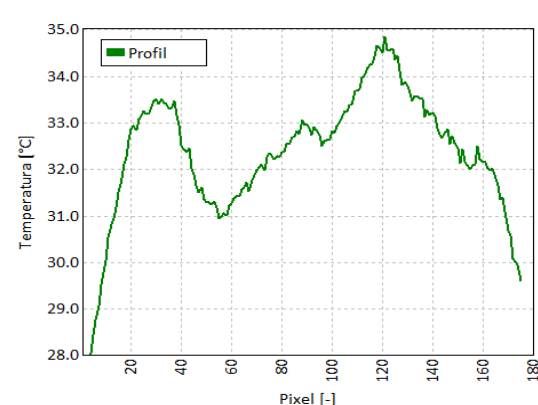
d)



e)



f)

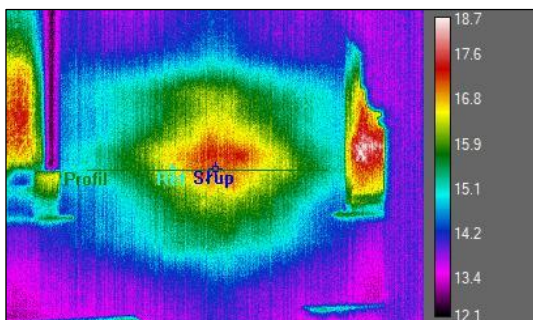


Rys. 6.75. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na terenowym stanowisku badawczym w wariantcie I przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 0,3 m w poziomym-przesuwnym układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla czasu 0 min, b) termogram dla czasu 10 min, c) termogram dla czasu 30 min, d) termogram dla czasu 60 min, e) wykres temperatury w czasie, f) profile temperatury dla czasu 10 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

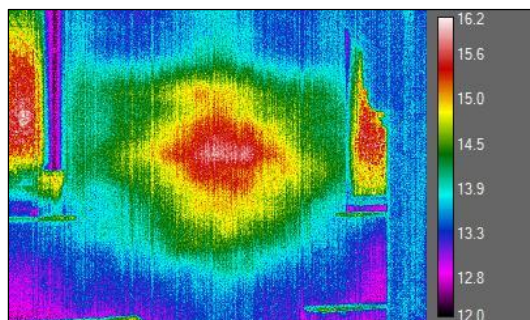
WARIANT II

Materiał bazowy: *cegła ceramiczna pełna*
 Otulina/głębokość położenia defektu: *140 mm*
 Odległość promiennika od elementu: *1,5 m*
 Czas nagrzewu powierzchni: *30 min*
 Układ lamp grzejnych: *poziomo (nieprzesuwnie)*
 Tryb pomiaru: *refleksyjny*
 Odległość kamery IR od elementu: *7,1 m*

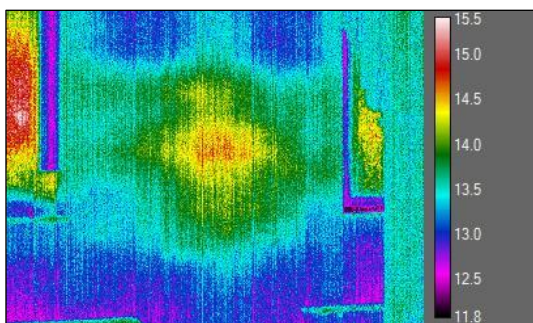
a)



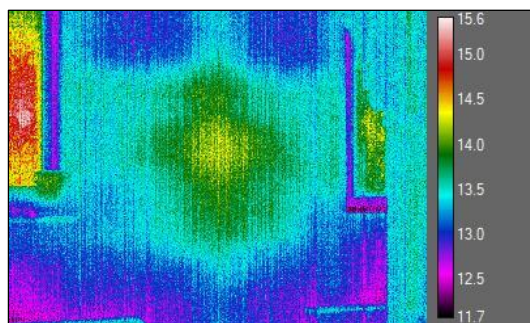
b)



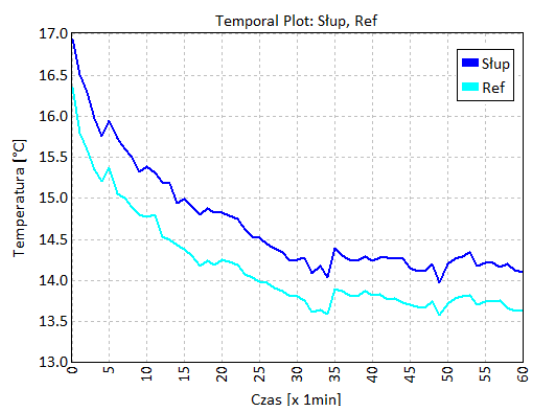
c)



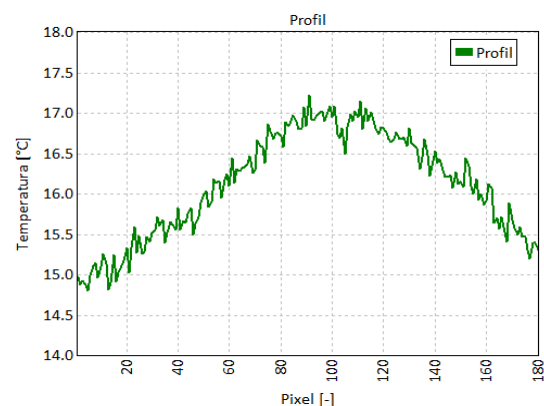
d)



e)



f)



Rys. 6.76. Wybrane wyniki pomiaru temperatury na terenowym stanowisku badawczym w wariantcie II przy nagrzewie trwającym 30 min z odległości 1,5 m w poziomym-nieprzesuwным układzie lamp grzejnych: a) miejsca pomiaru temperatur dla punktów i profili dla czasu 0 min, b) termogram dla czasu 10 min, c) termogram dla czasu 30 min, d) termogram dla czasu 60 min, e) wykres temperatury w czasie, f) profile temperatury dla czasu 10 min; czas mierzono od momentu wyłączenia źródła stymulacji cieplnej

ROZDZIAŁ 7

7. ROZWIĄZANIE PROBLEMU BADAWCZEGO

7.1. Lokalizacja wtrąceń w elementach budowlanych

7.1.1. Metodyka lokalizacji

Przeglądu zasad działania aktywnej termografii pulsacyjnej (stosowanej w badaniach własnych w niniejszej pracy), stosowanych metod analizy termogramów do lokalizacji defektów oraz podstaw teoretycznych tej metody badań, opisał Vavilov w pracy [180]. W publikacjach [93] oraz [142] opisana została ciekawa i relatywnie prosta metoda Echo Defect Shape (EDS), która używana była przez autorów tych publikacji do wyznaczania głębokości na jakiej znajdują się niewielkie defekty w postaci zwężenia materiału w próbce o grubości do 20 mm.

W niniejszej pracy lokalizacja wtrąceń w elementach budowlanych polegała na wyznaczeniu głębokości na jakiej znajdują się defekty w materiale jednorodnym oraz oszacowaniu ich szerokości i wysokości. Do szacowania powyższych parametrów geometrycznych zastosowano następujące metody badawcze:

- a) głębokość zalegania defektu: zmodyfikowana metoda Echo Defect Shape
- b) szerokość defektu: autorska metoda analizy profilu temperatury

Szacowanie głębokości zalegania defektu dokonano przy użyciu wzoru [142]:

$$d = \sqrt{-\frac{\lambda \cdot t}{\rho \cdot c_w} \cdot \ln(C_b(t))} \quad (7.1)$$

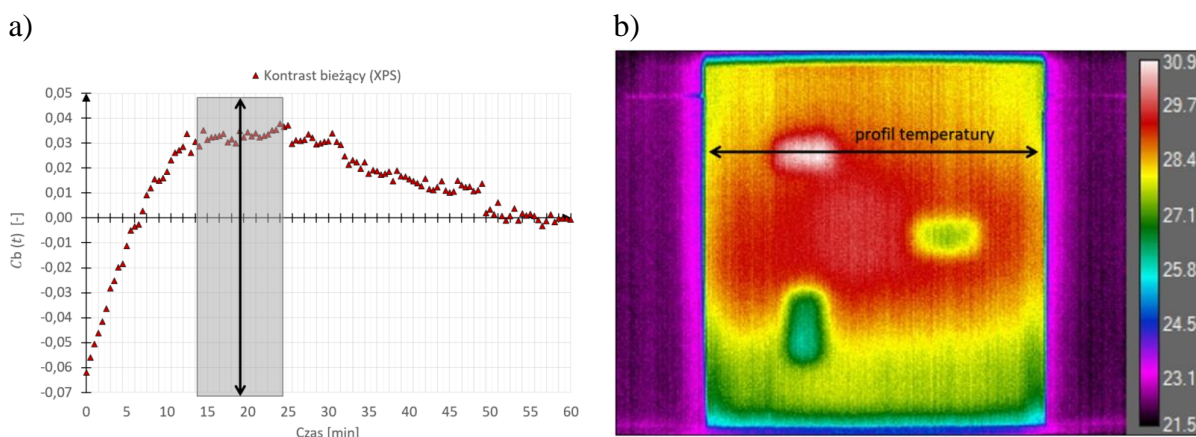
- gdzie: d – szacowana głębokość zalegania defektu, [m],
 λ – przewodność cieplna materiału bazowego (nad defektem), [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 t – czas, jaki upłynął od zakończenia ogrzewania, [s],
 ρ – gęstość materiału bazowego (nad defektem), [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 c_w – ciepło właściwe materiału bazowego (nad defektem), [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 $C_b(t)$ – kontrast bieżący, obliczany wg wzoru, (4.23) [-].

Podczas lokalizacji defektu materiał bazowy jest znany, zatem jego przewodność cieplną, ciepło właściwe i gęstość można dobrać na podstawie literatury lub wyznaczyć. Kontrast bieżący wyznacza się na podstawie już wcześniej przytoczonego wzoru (4.23). Kluczową kwestią przy liczeniu „d” wzór (7.2), jest dobranie odpowiedniego kontrastu bieżącego, który musi być dostatecznie duży, aby zredukować szum pomiarowy, ale wciąż poniżej wartości maksymalnych wg [142]. W pracy [93] zaleca się przyjęcie wartości $C_b(t)$ równej 0,025, jeśli szum cieplny mieści się w zakresie 0,01 – 0,015. Natomiast w artykule [142] wartość ta jest zoptymalizowana i zalecane jest wybranie jej na poziomie 0,07. Zdarza się jednak, że podczas testu kontrast bieżący nie osiąga wartości 0,07. Do badania elementów o dużej masie termicznej (stosowanych w budownictwie) za pomocą długiego impulsu termicznego, w niniejszej pracy zaproponowano zoptymalizowanie doboru kontrastu $C_b(t)$ dla bezwzględnej wartości maksymalnej.

Szacowanie szerokości/wysokości defektu

Do oszacowania szerokości/wysokości defektu zastosowano autorską metodę analizy profilu temperatury⁵⁴, kolejno:

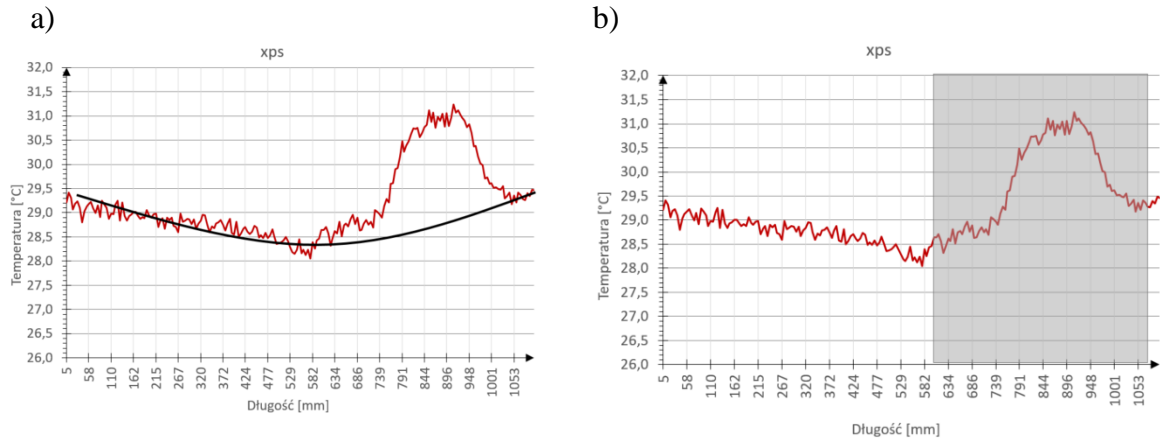
- 1) wyznaczenie profilu temperatury, który przechodzi przez zaburzone pole temperatury na termogramie, dla czasu o największym kontraście termicznym (rys. 7.1.),



Rys. 7.1. Przykładowy: a) wykres kontrastu bieżącego, b) termogram z zaznaczonym profilem temperatury; na wykresie kontrastu bieżącego oznaczono obszar z jego maksymalnymi wartościami (pole szare), termogram wybrany do dalszej analizy jest dla czasu z tego obszaru; na termogramie tym prowadzi się profil temperatury (czarna linia) w miejscu widocznego występowania zaburzenia pola temperatury

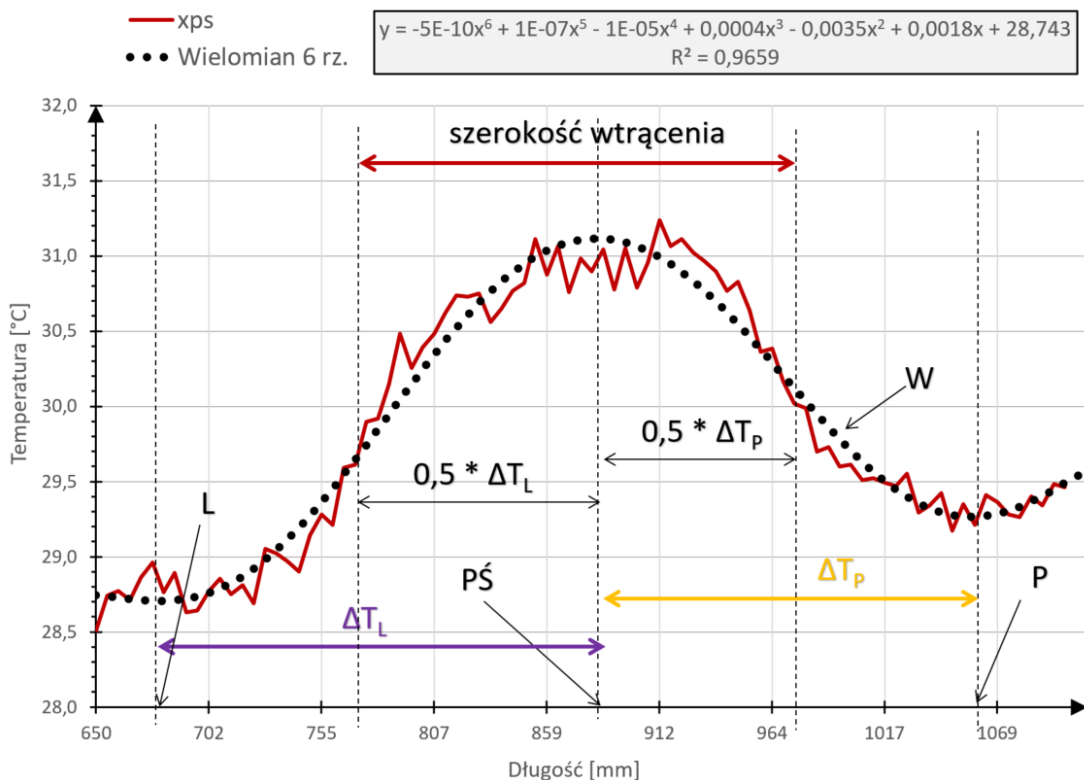
- 2) określenie przedziału profilu, w którym występują największe wychylenia temperatury w stosunku do przewidywanego wykresu profilu temperatury bez defektu,

⁵⁴ Podane oznaczenia w nawiasach, w kolejnych punktach procedury, odnoszą się do oznaczeń zawartych na rys. 7.3.



Rys. 7.2. Przykładowy: a) Przewidywany idealny rozkład profilu temperatury w elemencie bez defektu (czarna ciągła linia), b) zaznaczony obszarem szarym o największym wychyleniu temperatury gdzie przewiduje się występowanie wtrącenia materiałowego

- 3) wyznaczenie funkcji wielomianowej przybliżającej profil temperatury, funkcję tę w pracy wyznaczono programem Wolfram Mathematica 11.1 – funkcja wielomianowa 6 rzędu (W),
- 4) wyznaczenie maksimum lub minimum funkcji (teoretyczny punkt środkowy) w proponowanym przedziale (PŚ),
- 5) wyznaczenie lewego (L) i prawego (P), maksimum lub minimum funkcji wielomianowej od wskazanego wcześniej teoretycznego punktu środkowego i przedziału profilu,



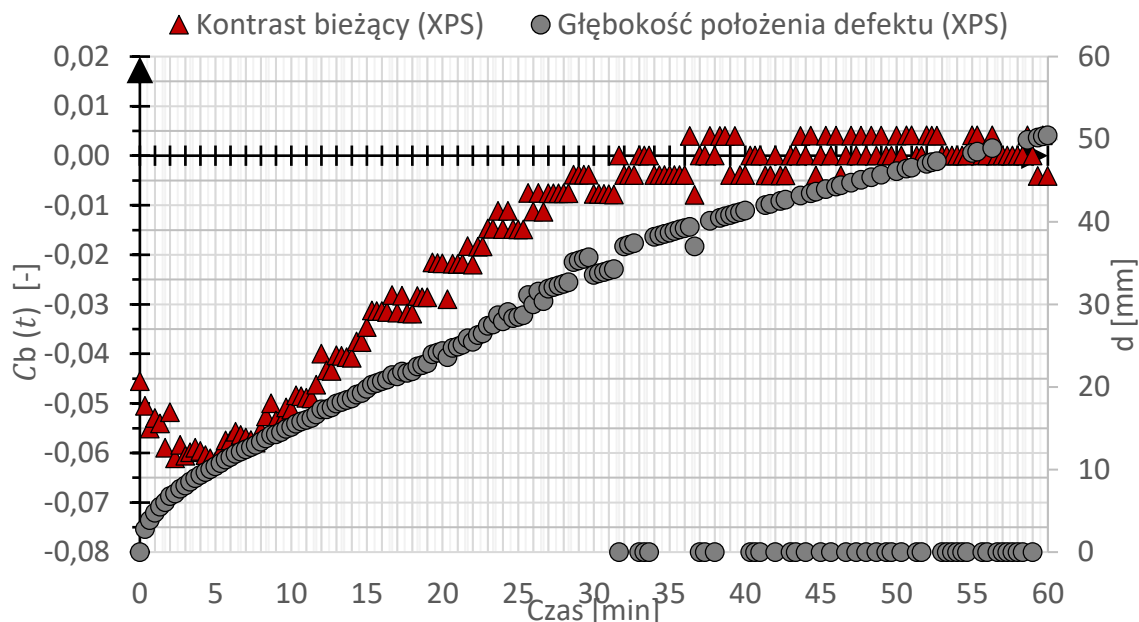
Rys. 7.3. Graficzne przedstawienie autorskiej procedury analizy profilu temperatury w celu oszacowania szerokości lokalizowanego wtrącenia materiałowego; os X została przeskalowana z wartości pikseli na długość wyrażoną w mm (dla odległości kamery termowizyjnej 4,0 m i parametru IFOV równego 1,31 mrad, jeden piksel to około 5,24 mm)

- 6) w przypadku braku punktu minimum lub maksimum (lewego lub prawego), należy znaleźć punkt przegięcia funkcji⁵⁵,
- 7) obliczenie wielkości jednego piksela (na podstawie parametru IFOV i odległości kamery od obserwowanej powierzchni)⁵⁶,
- 8) obliczenie lewej szerokości (ΔT_L) oraz prawej szerokości (ΔT_P) defektu ,
- 9) obliczenie szerokości defektu jako sumy połowy wartości ΔT_L i ΔT_P .

7.1.2. Wpływ warunków pobudzenia cieplnego na lokalizację wtrąceń

7.1.2.1. Wpływ czasu nagrzewu

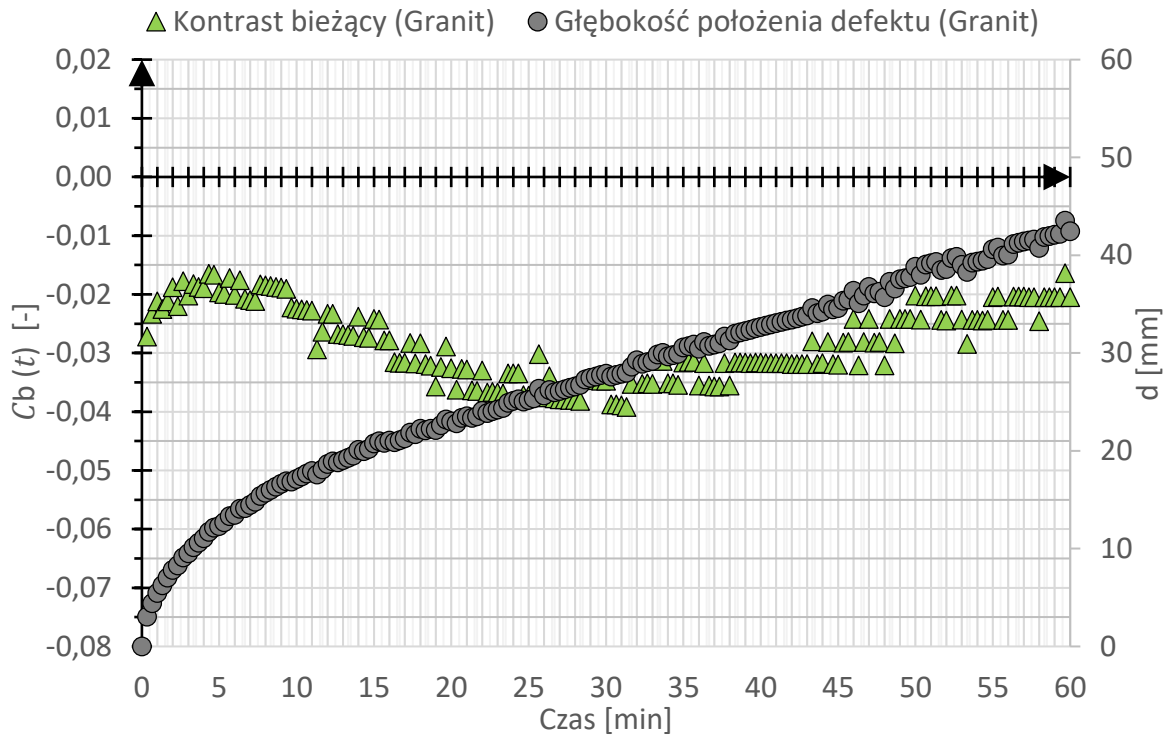
Do przeanalizowania wpływu **czasu nagrzewu** na możliwość lokalizacji wtrąceń materiałowych wykorzystano wyniki otrzymane z pomiarów na stanowisku nr 1 w wariancie IV. W doświadczeniu tym przeprowadzono pomiary na modelu przegrody wykonanym z płyty OSB, który ogrzewano z odległości 1,5 m. Łącznie przeprowadzono 6 doświadczeń, w każdym z nich zmieniając czas nagrzewu od 10 min do 60 min (zmiana co 10 min). Na wykresach przedstawiono otrzymane wyniki z obliczeń kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu dla poszczególnych czasów nagrzewu: **10 min** (od rys. 7.4 do rys. 7.6.), **20 min** (od rys. 7.7 do rys. 7.9.), **30 min** (od rys. 7.10 do rys. 7.12.), **40 min** (od rys. 7.13 do rys. 7.15), **50 min** (od rys. 7.16 do rys. 7.18.) oraz **60 min** (od rys. 7.19 do rys. 7.21.).



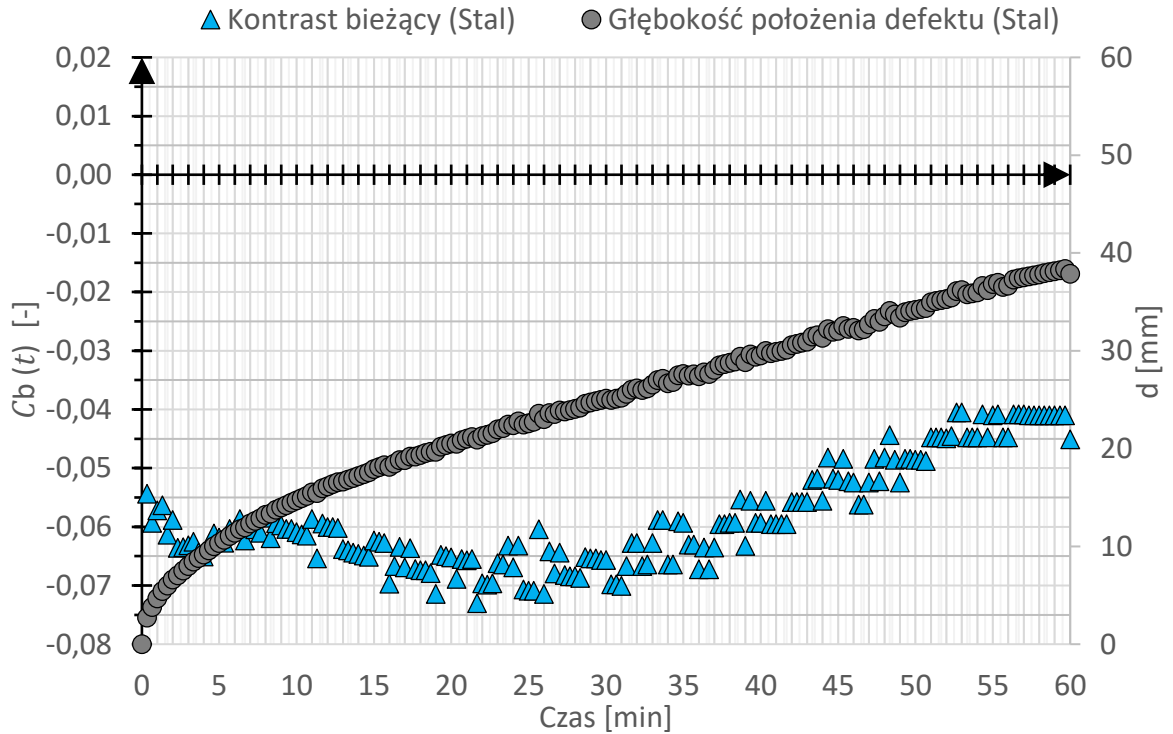
Rys. 7.4. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z XPS przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 10 min

⁵⁵ Wszystkie obliczenia szukanych wartości minimalnych, maksymalnych, punktów przegięcia oraz odpowiadające im argumenty funkcji zostały obliczone w programie Wolfram Mathematica 11.1 poprzez analizę pochodnych pierwszego i drugiego rzędu rozpatrywanych funkcji wielomianowych.

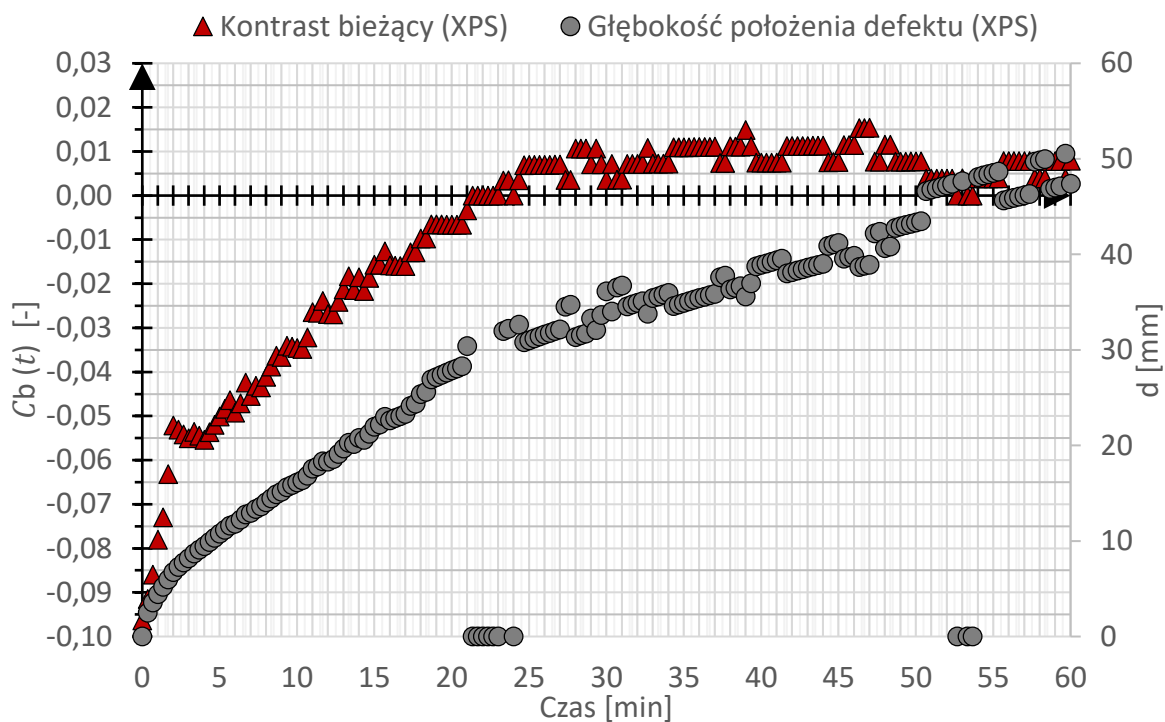
⁵⁶ Parametr IFOV przyjęty na podstawie tabeli 6.2., odległość kamery termowizyjnej od badanej powierzchni wg danych zawartych w rozdziale 6.



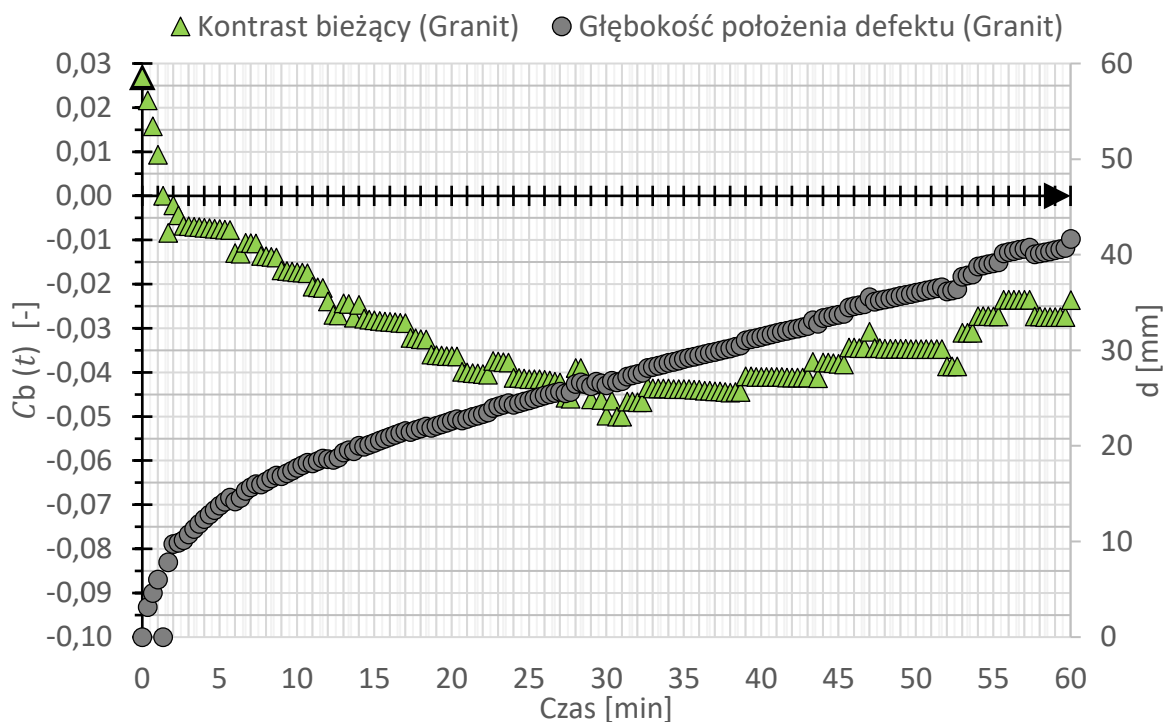
Rys. 7.5. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z **granitu** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 10 min



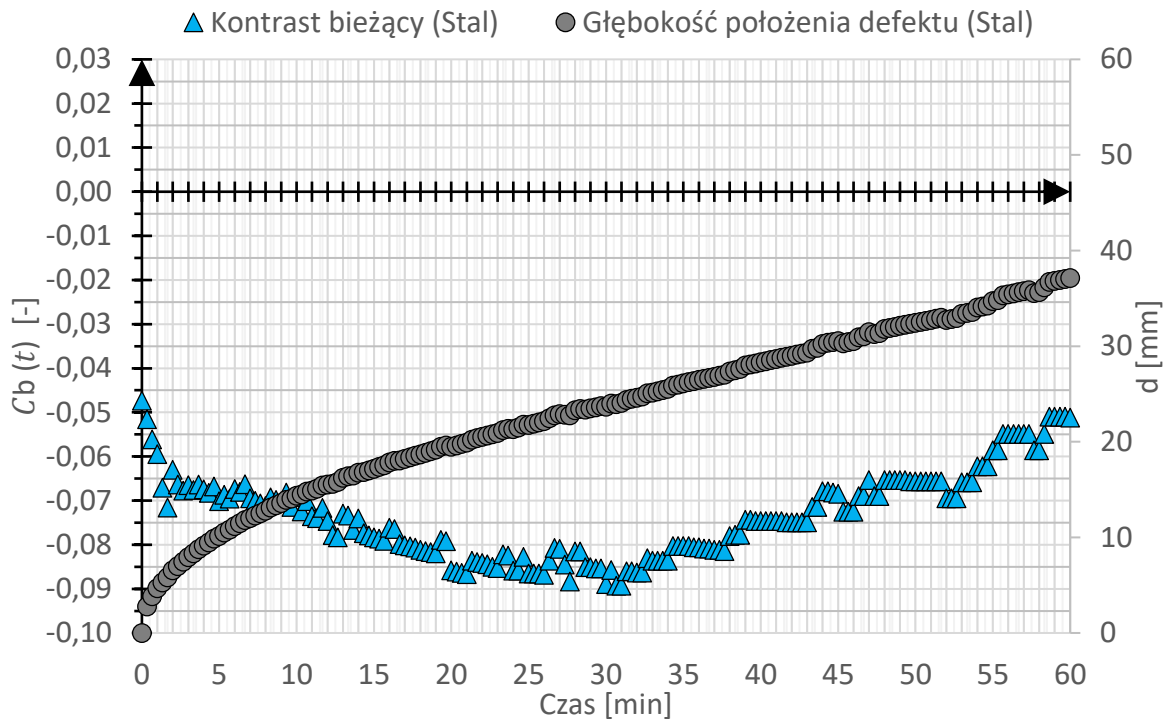
Rys. 7.6. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 10 min



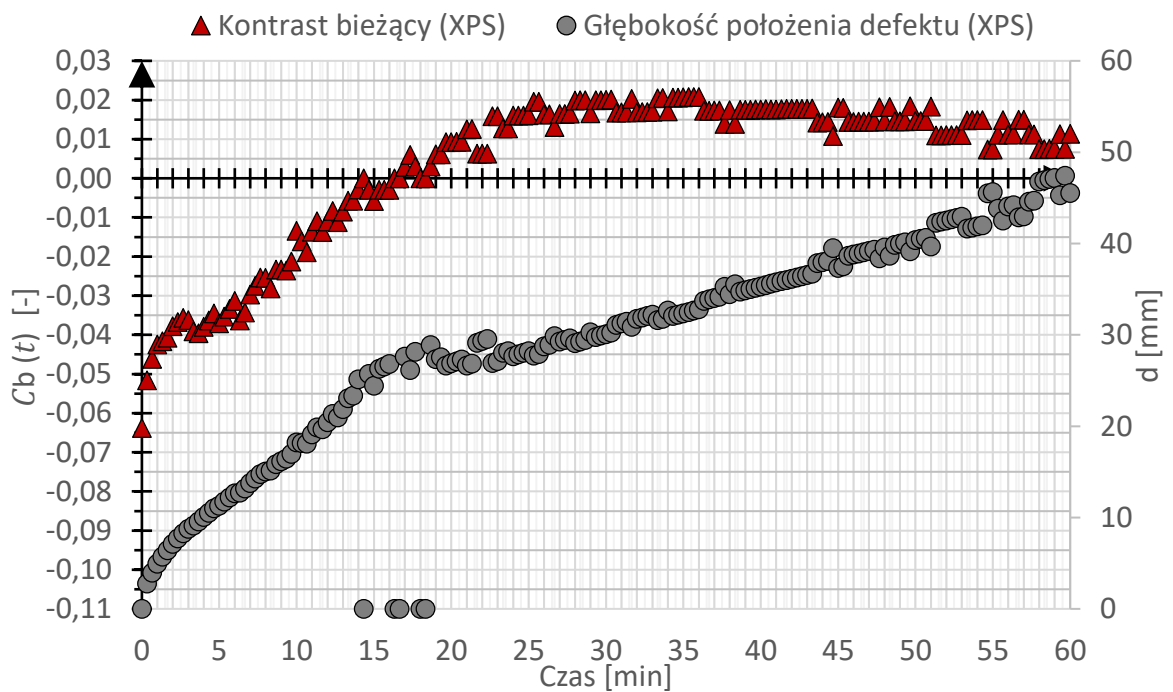
Rys. 7.7. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z XPS przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 20 min



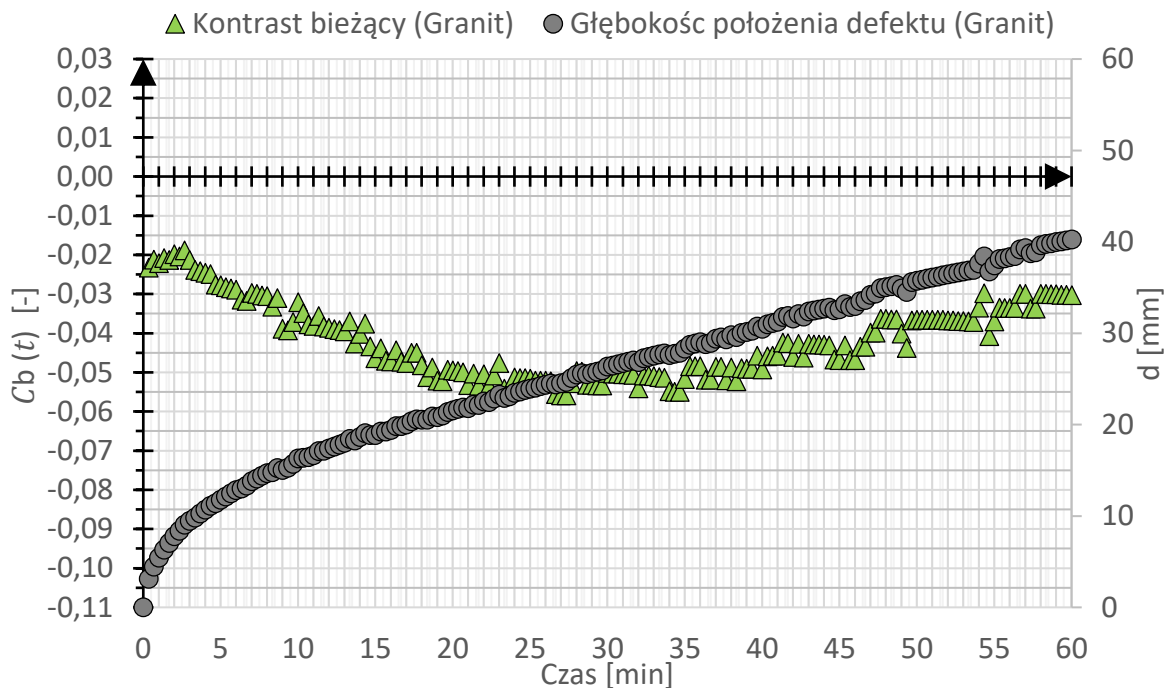
Rys. 7.8. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z granitu przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 20 min



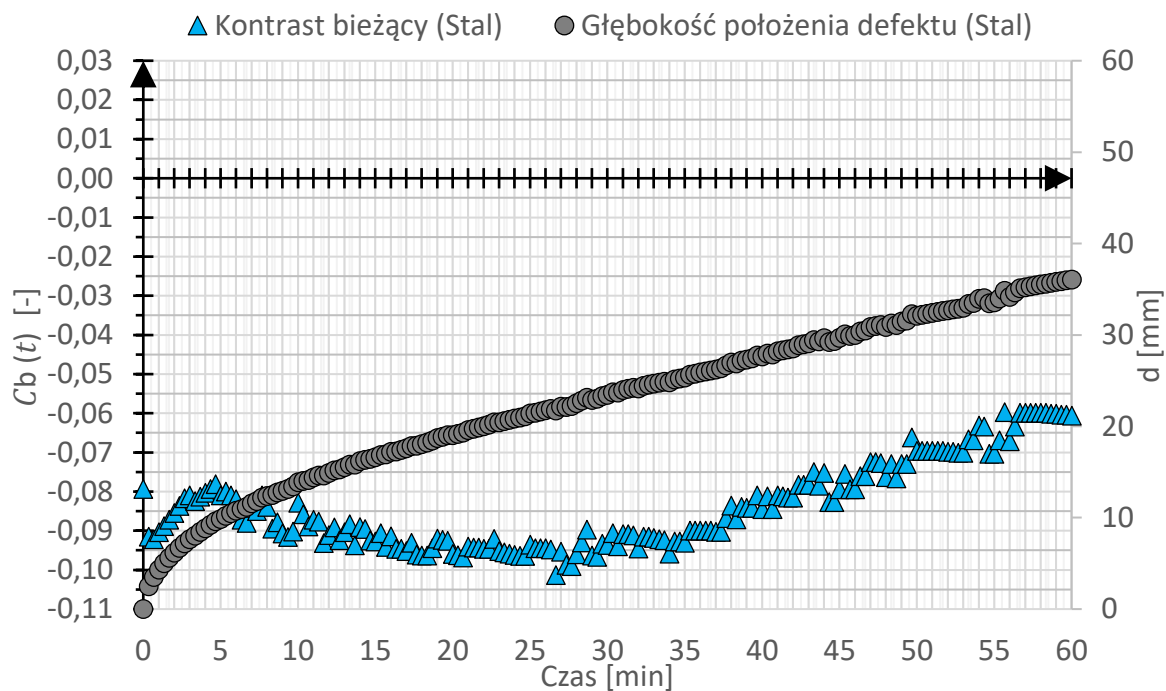
Rys. 7.9. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 20 min



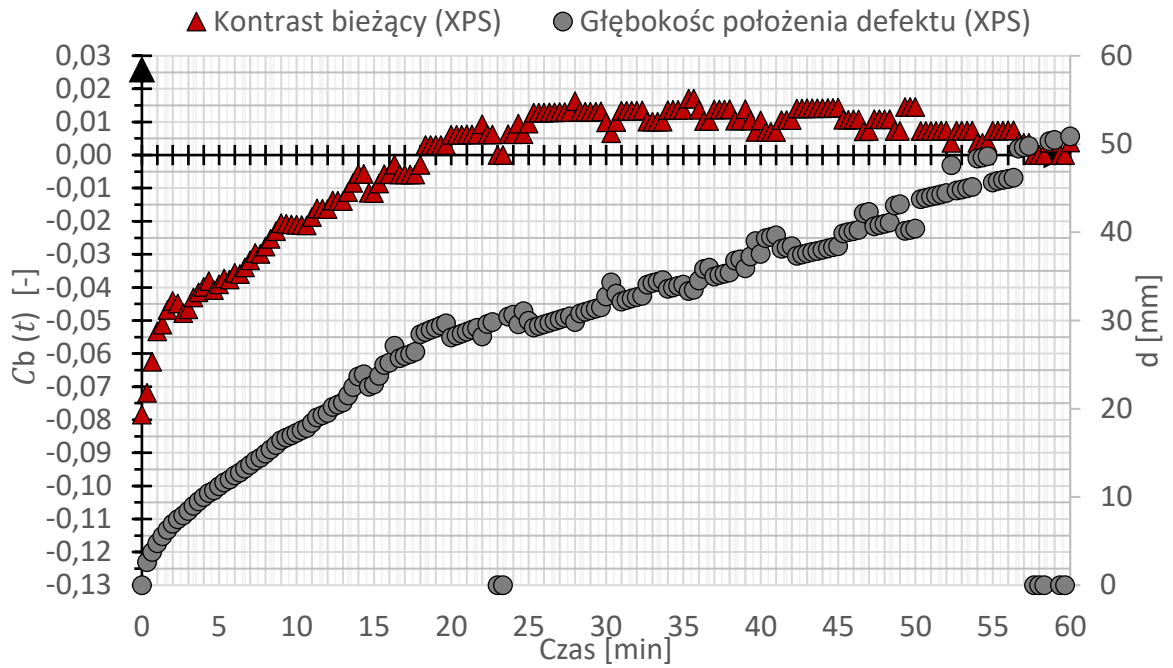
Rys. 7.10. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z **XPS** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 30 min



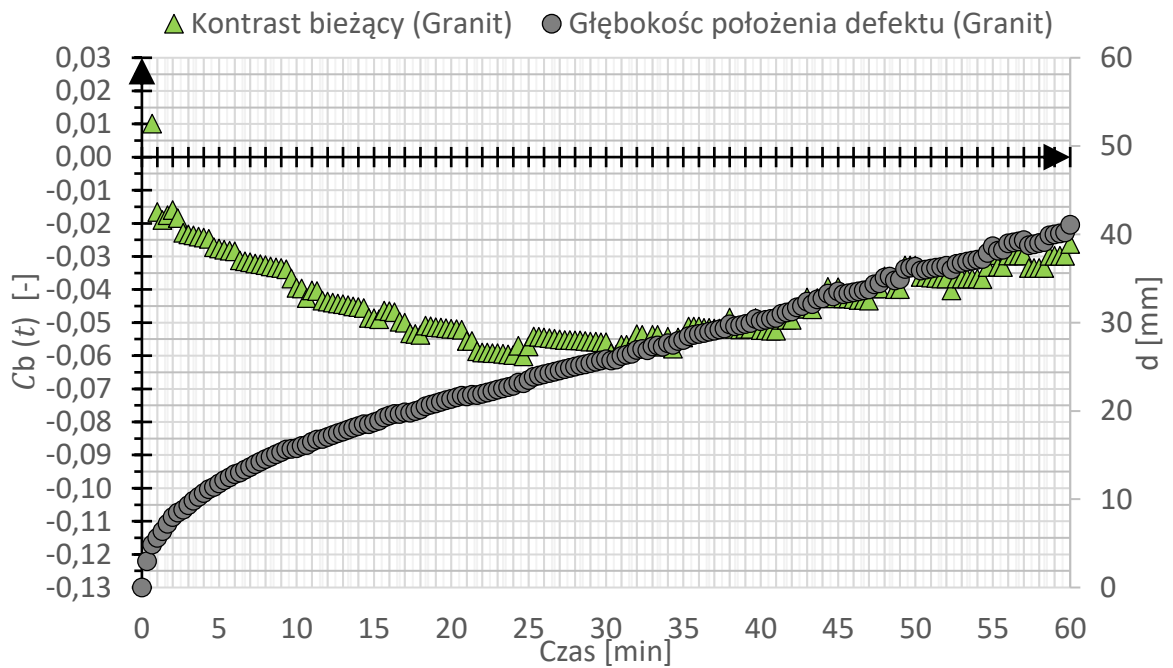
Rys. 7.11. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z **granitu** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 30 min



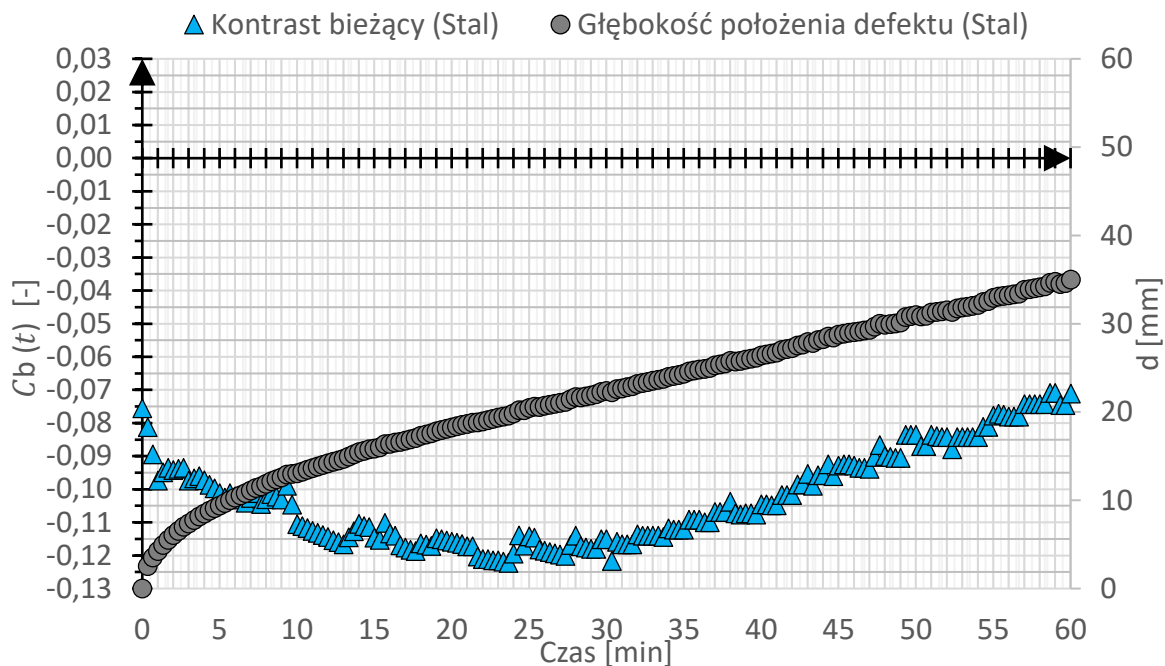
Rys. 7.12. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 30 min



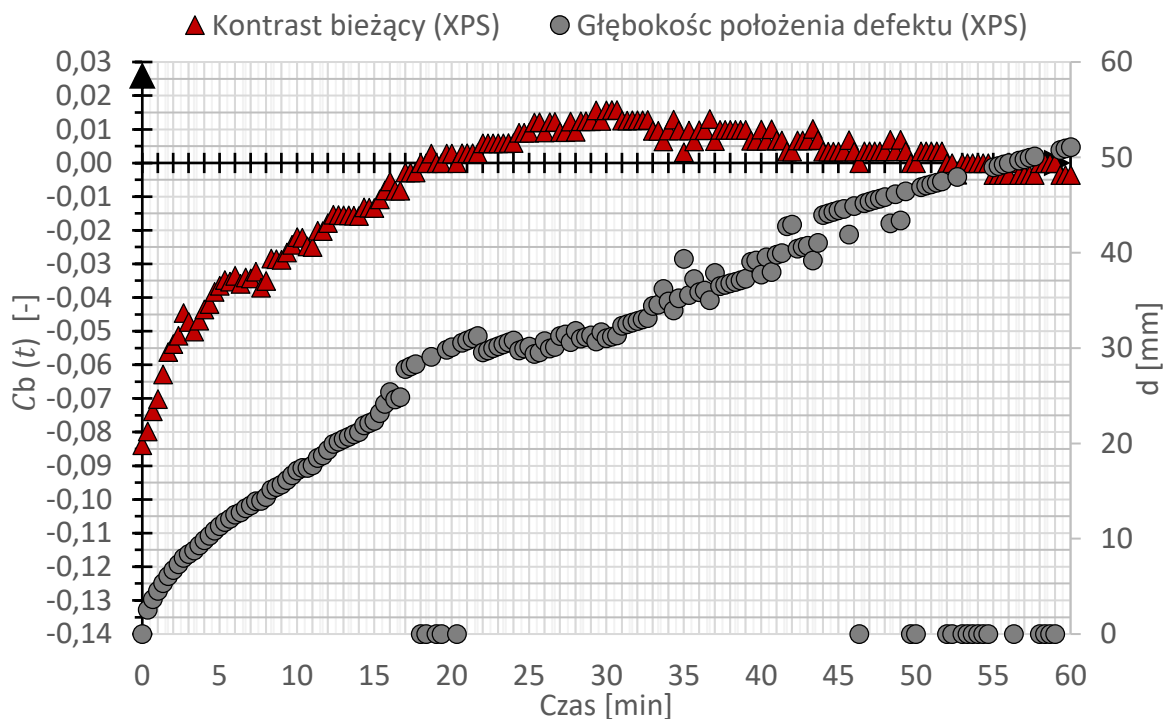
Rys. 7.13. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z XPS przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 40 min



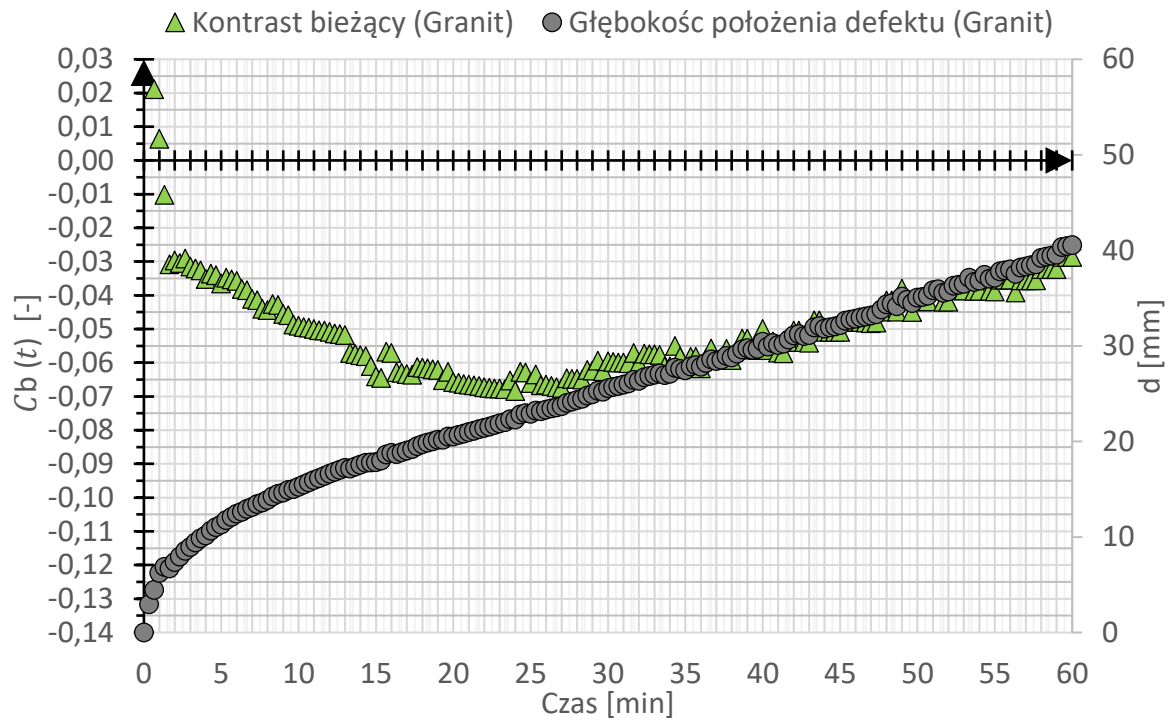
Rys. 7.14. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z granitu przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 40 min



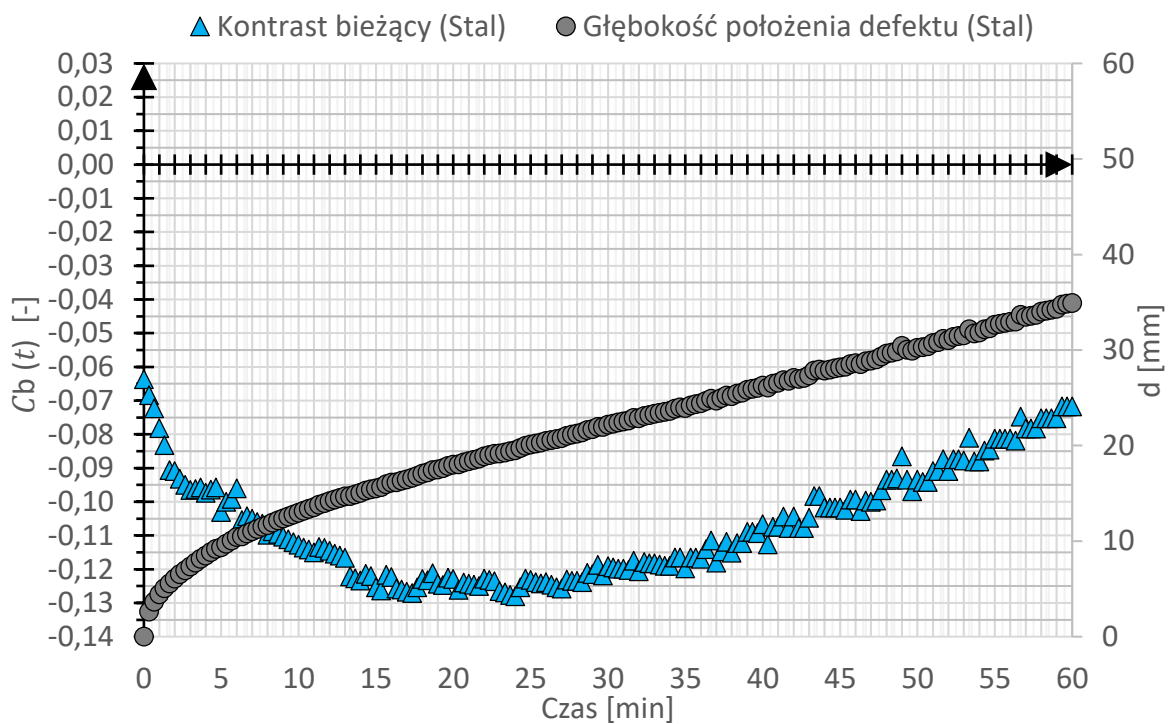
Rys. 7.15. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 40 min



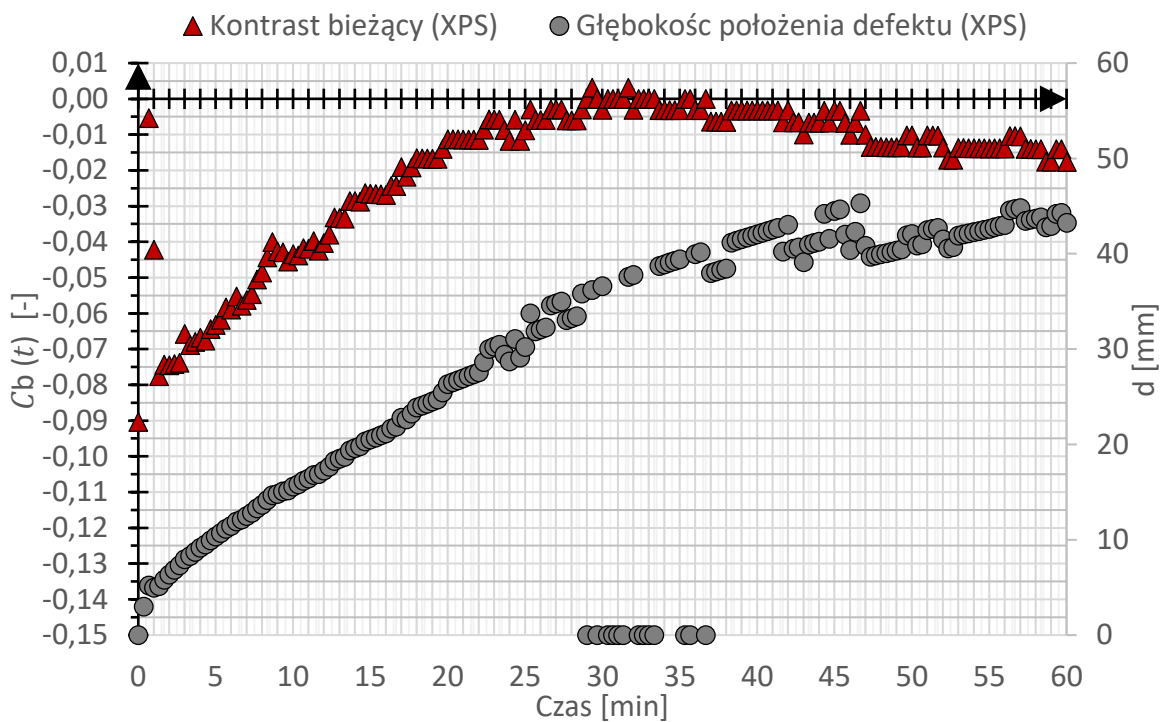
Rys. 7.16. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z **XPS** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 50 min



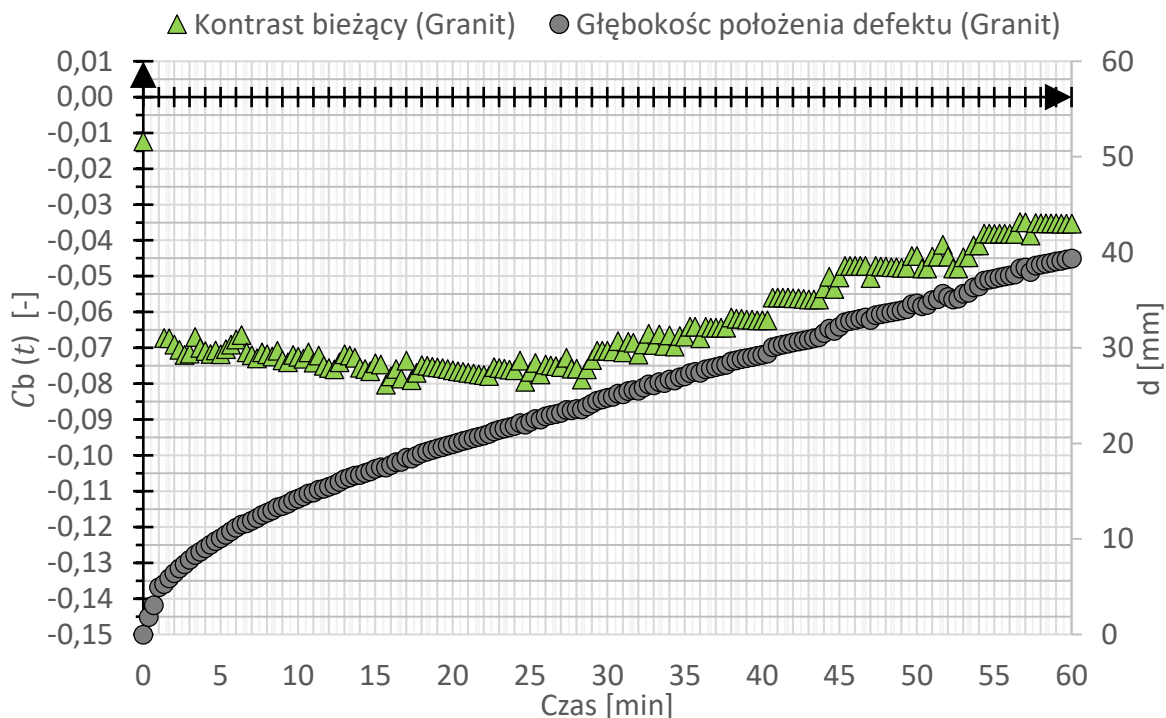
Rys. 7.17. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z **granitu** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 50 min



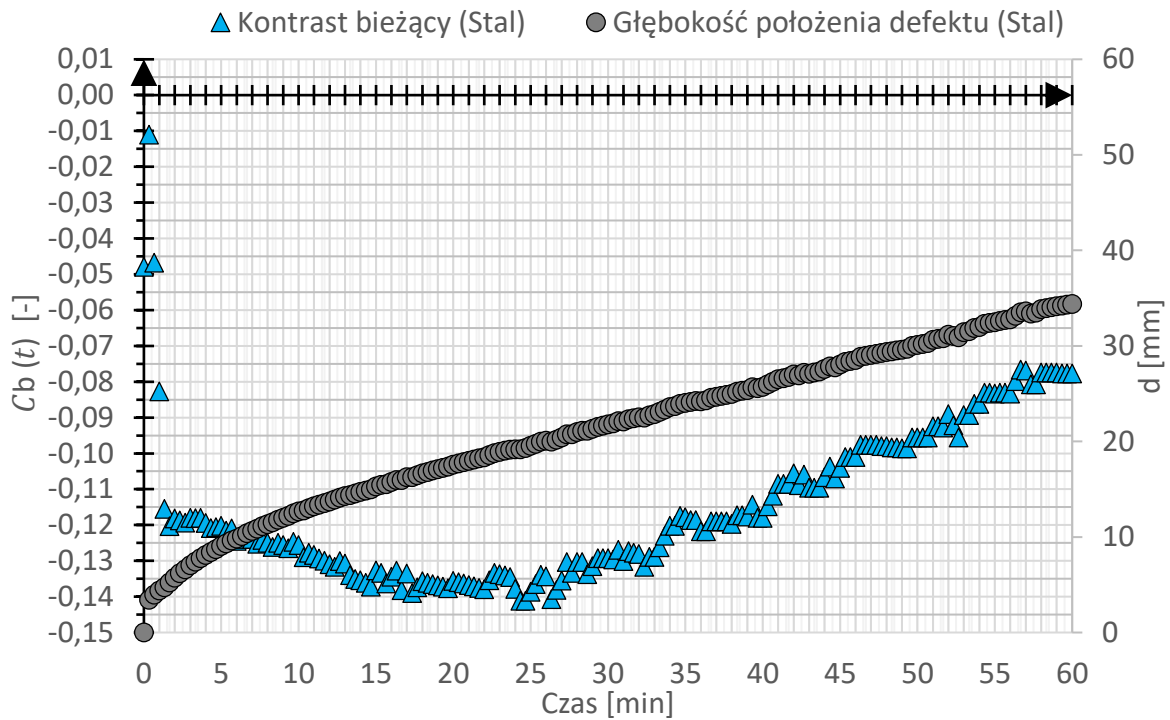
Rys. 7.18. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 50 min



Rys. 7.19. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z XPS przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 60 min



Rys. 7.20. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z granitu przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 60 min

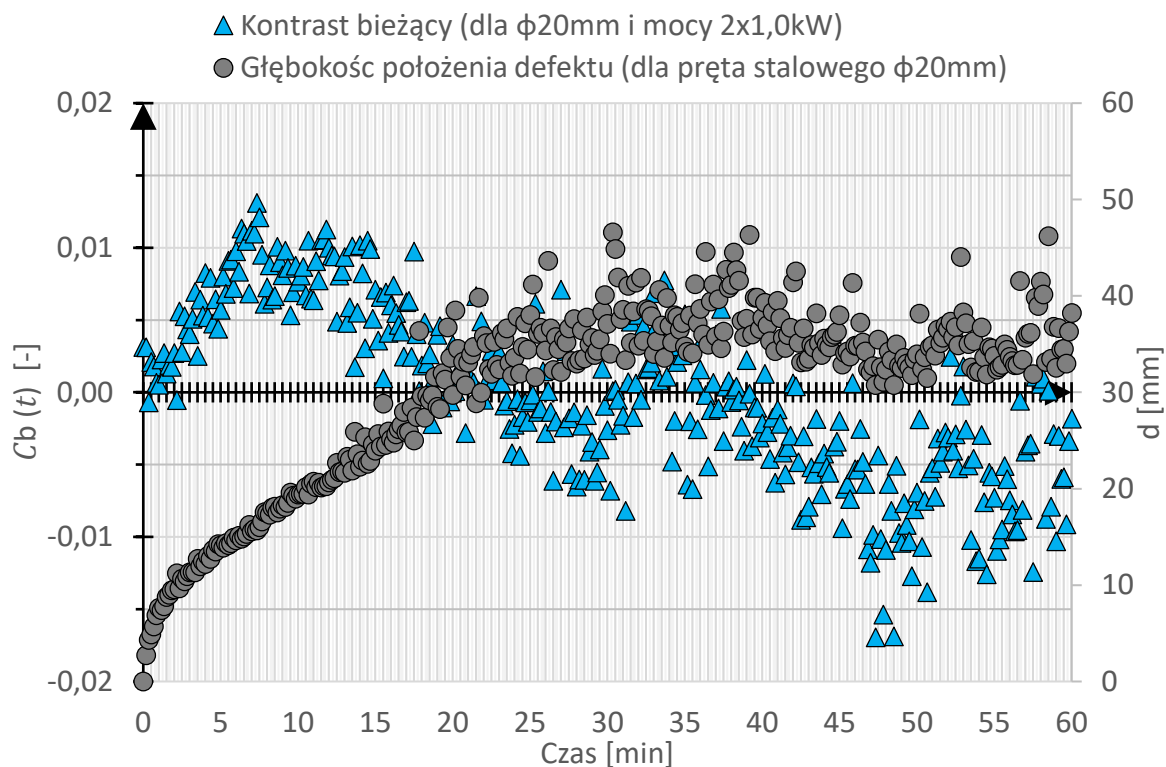


Rys. 7.21. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze stali przy użyciu metody EDS dla czasu nagrzewu 60 min

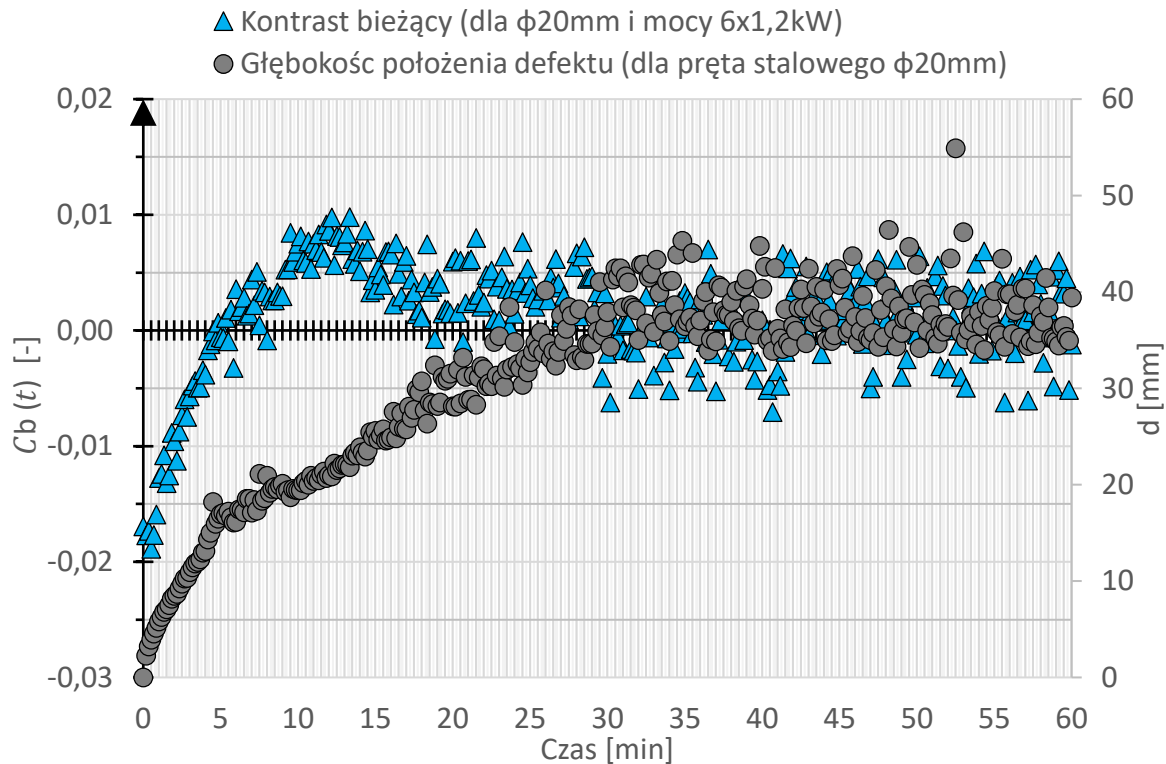
7.1.2.2. Wpływ mocy nagrzewu

Do przeanalizowania wpływu **mocy nagrzewu** na możliwość lokalizacji wtrąceń materiałowych wykorzystano wyniki otrzymane z pomiarów na stanowisku nr 3 w wariantcie III. W doświadczeniu tym przeprowadzono pomiary na modelu ściany murowanej zbudowanej z bloczków z betonu komórkowego ze słupami żelbetowymi. Model ogrzewano z odległości 0,5 m. Przeprowadzono 2 doświadczenia, w każdym z nich używając promiennika podczerwieni o różnej mocy tj. 2 x 1,0 kW oraz 6 x 1,2 kW i stałym czasie nagrzewu 60 min.

Na wykresach przedstawiono otrzymane wyniki z obliczeń wartości kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu dla poszczególnych mocy nagrzewu: **2 x 1,0 kW** (rys. 7.22.) oraz **6 x 1,2 kW** (rys. 7.23.).



Rys. 7.22. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm przy użyciu metody EDS dla mocy nagrzewu 2 x 1,0 kW

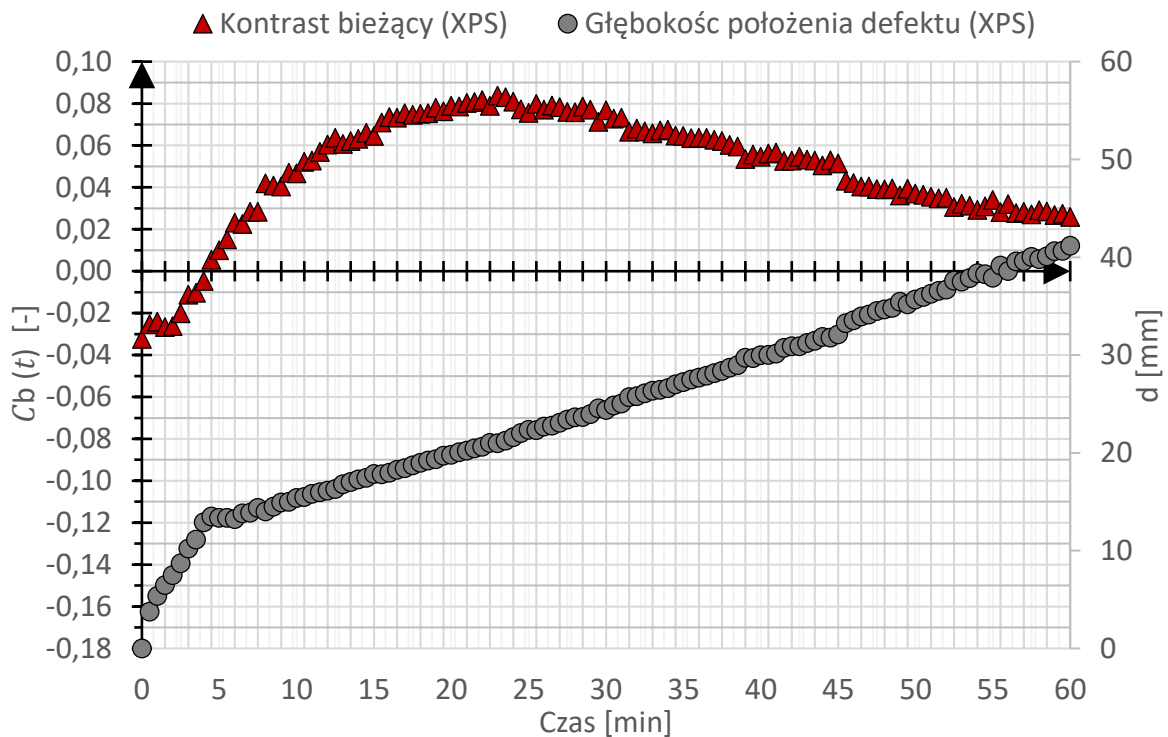


Rys. 7.23. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu w postaci pręta stalowego o średnicy 20 mm przy użyciu metody EDS dla mocy nagrzewu 6 x 1,2 kW

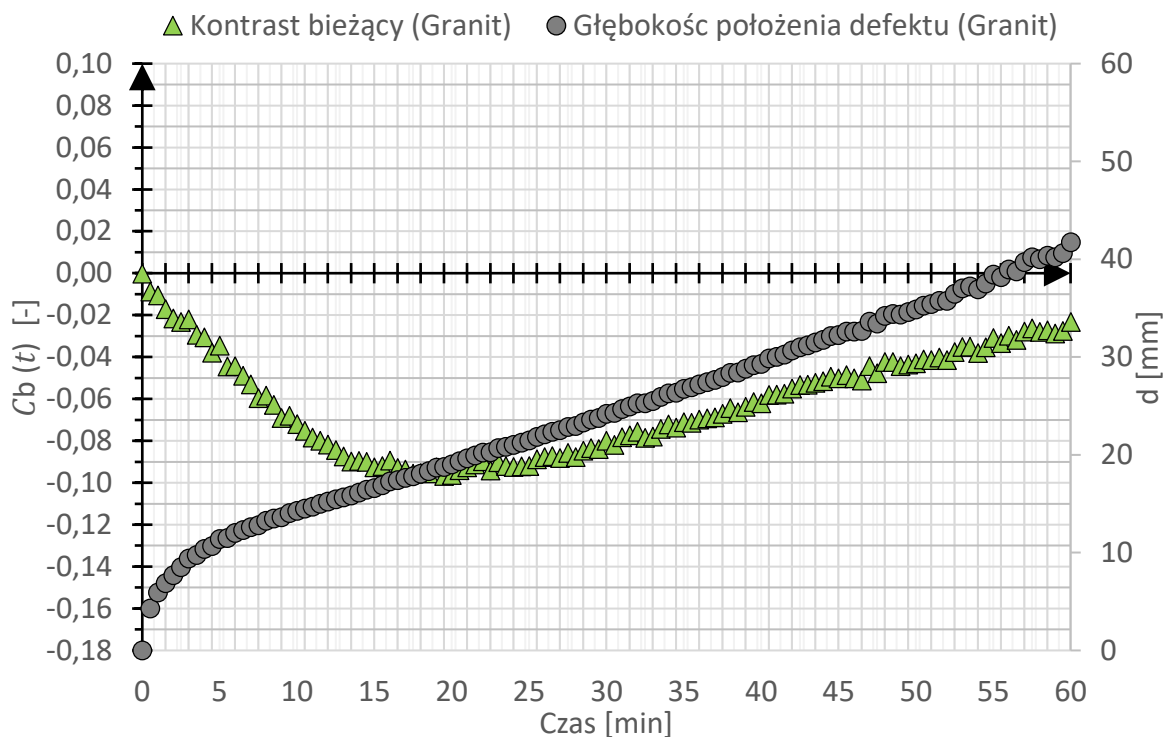
7.1.2.3. Wpływ odległości źródła ciepła od powierzchni

Analizując wpływ **odległości źródła nagrzewu** od badanej powierzchni na możliwość lokalizacji wtrąceń materiałowych użyto wyników otrzymanych z pomiarów na stanowisku nr 1 w wariantcie I. W doświadczeniu tym przeprowadzono pomiary na modelu przegrody wykonanym z płyty GK. Model ogrzewano przez okres 30 minut. Łącznie przeprowadzono 3 doświadczenia, ustawiając promiennik podczerwieni od badanego modelu w odległościach 0,5 m; 1,0 m oraz 1,5 m.

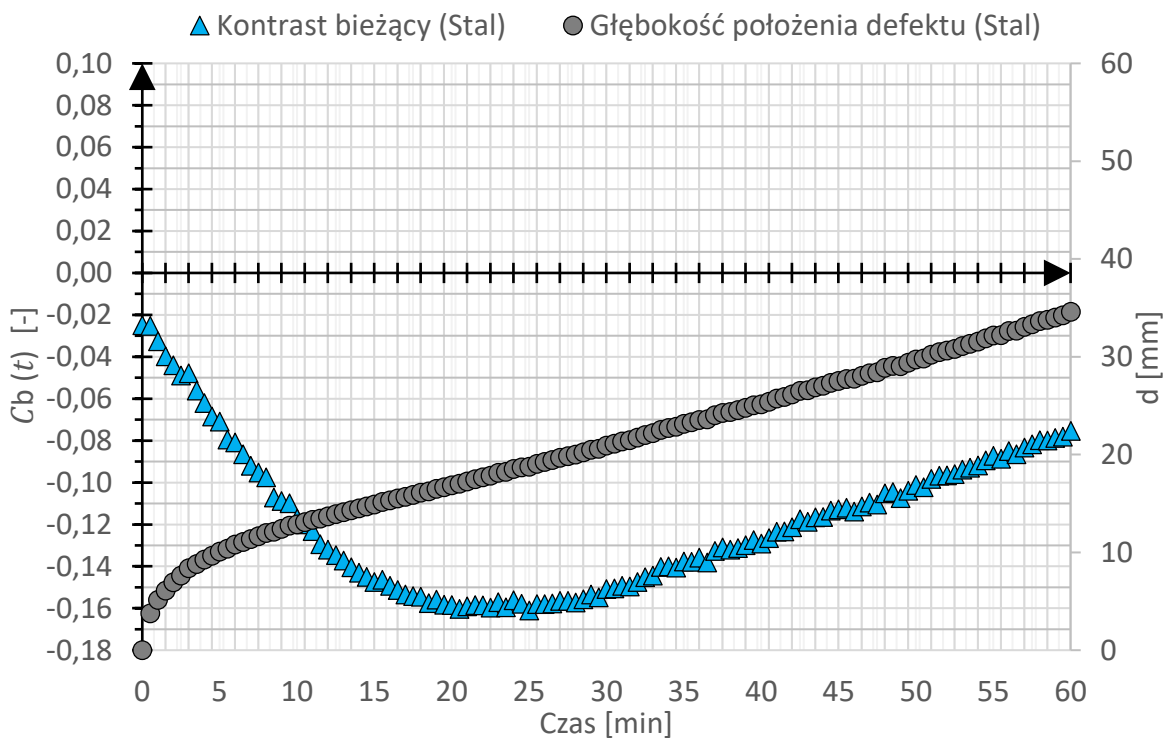
Na wykresach przedstawiono otrzymane wyniki z obliczeń wartości kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu dla poszczególnych odległości źródła nagrzewu od badanej powierzchni: **0,5 m** (od rys. 7.24. do rys. 7.26.), **1,0 m** (od rys. 7.27. do rys. 7.29.) oraz **1,5 m** (od rys. 7.30. do rys. 7.32.).



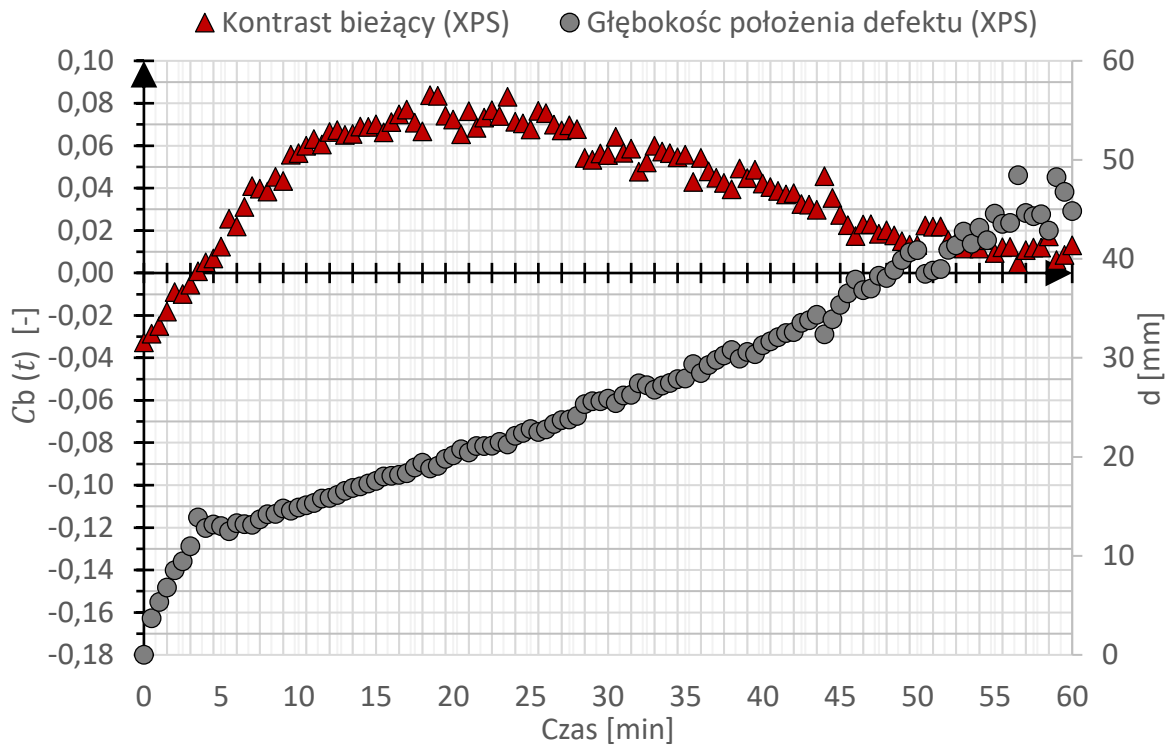
Rys. 7.24. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z XPS przy użyciu metody EDS dla odległości nagrzewu 0,5 m



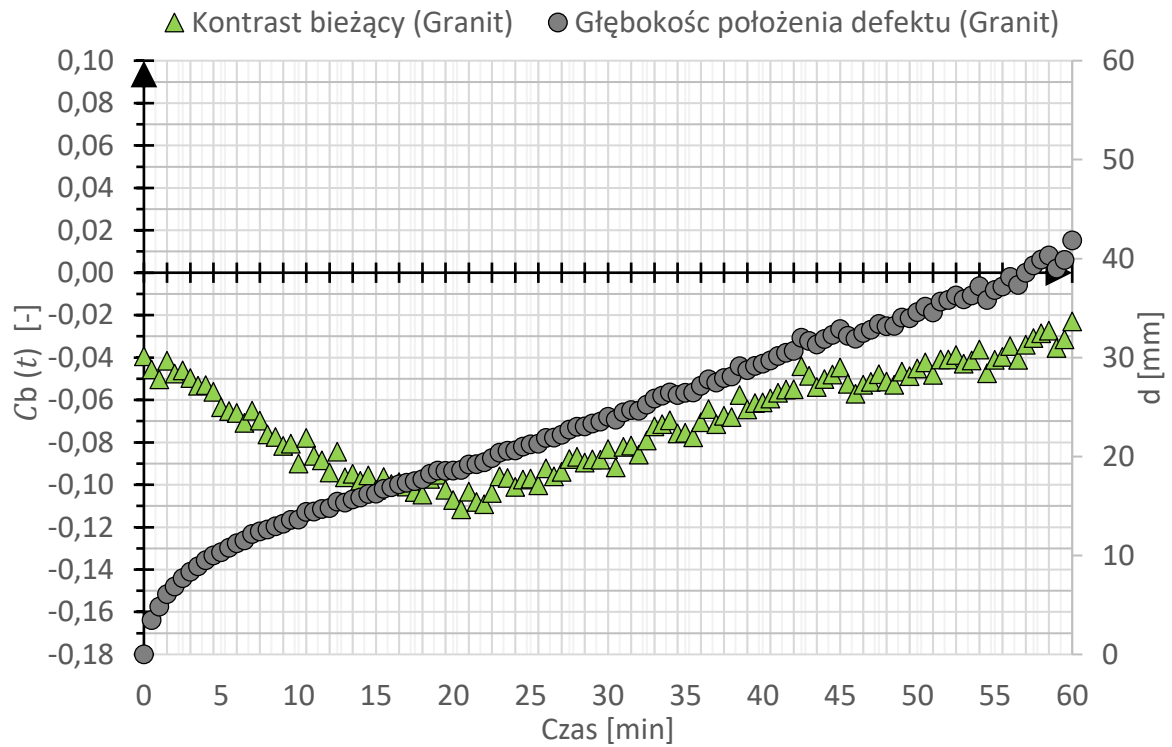
Rys. 7.25. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z **granitu** przy użyciu metody EDS dla odległości nagrzewu 0,5 m



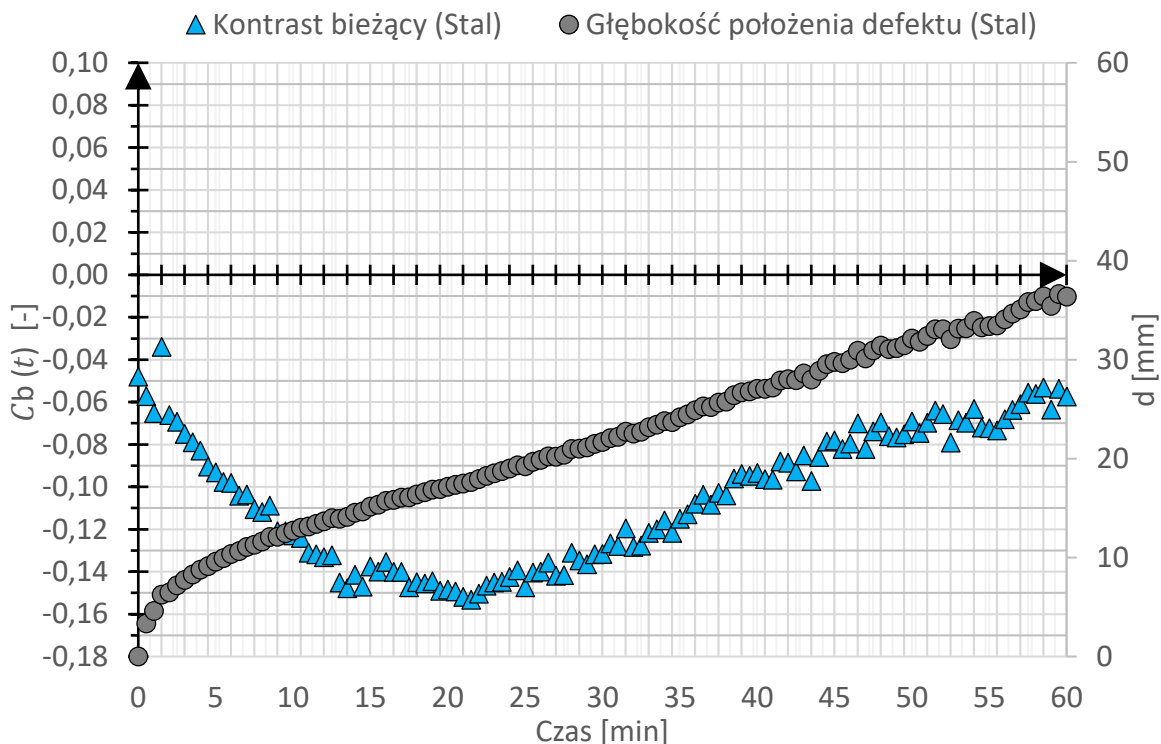
Rys. 7.26. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla odległości nagrzewu 0,5 m



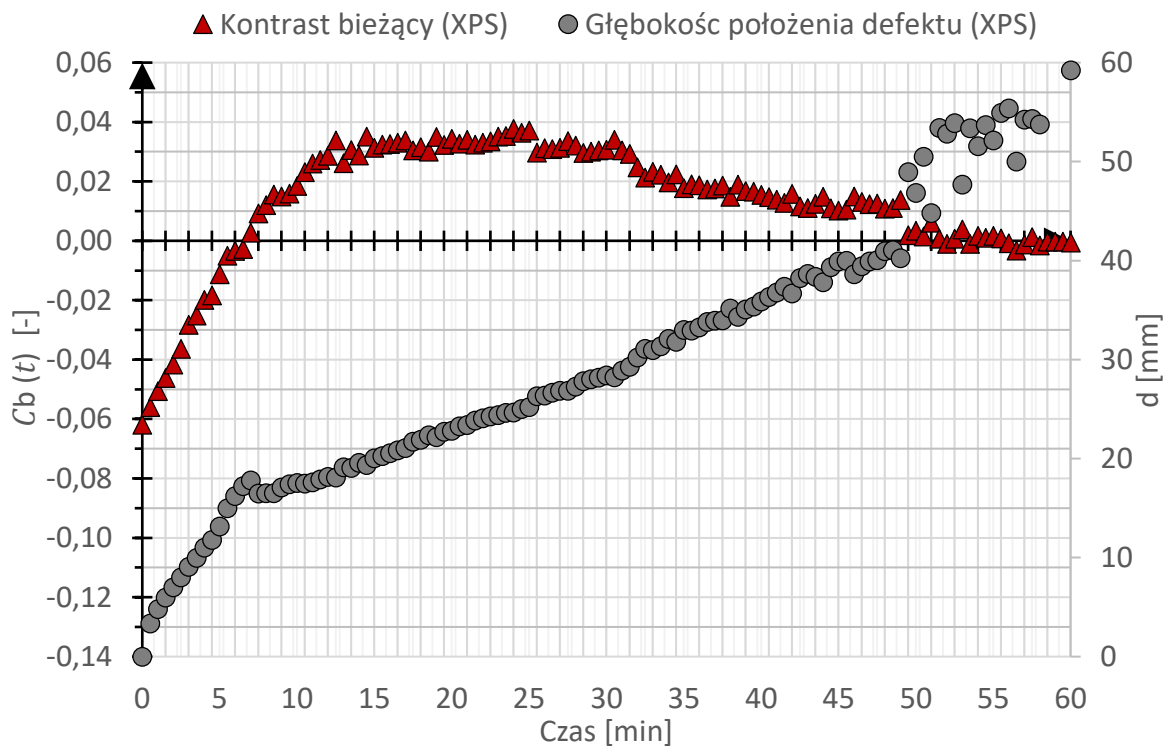
Rys. 7.27. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z XPS przy użyciu metody EDS dla odległości nagrzewu 1,0 m



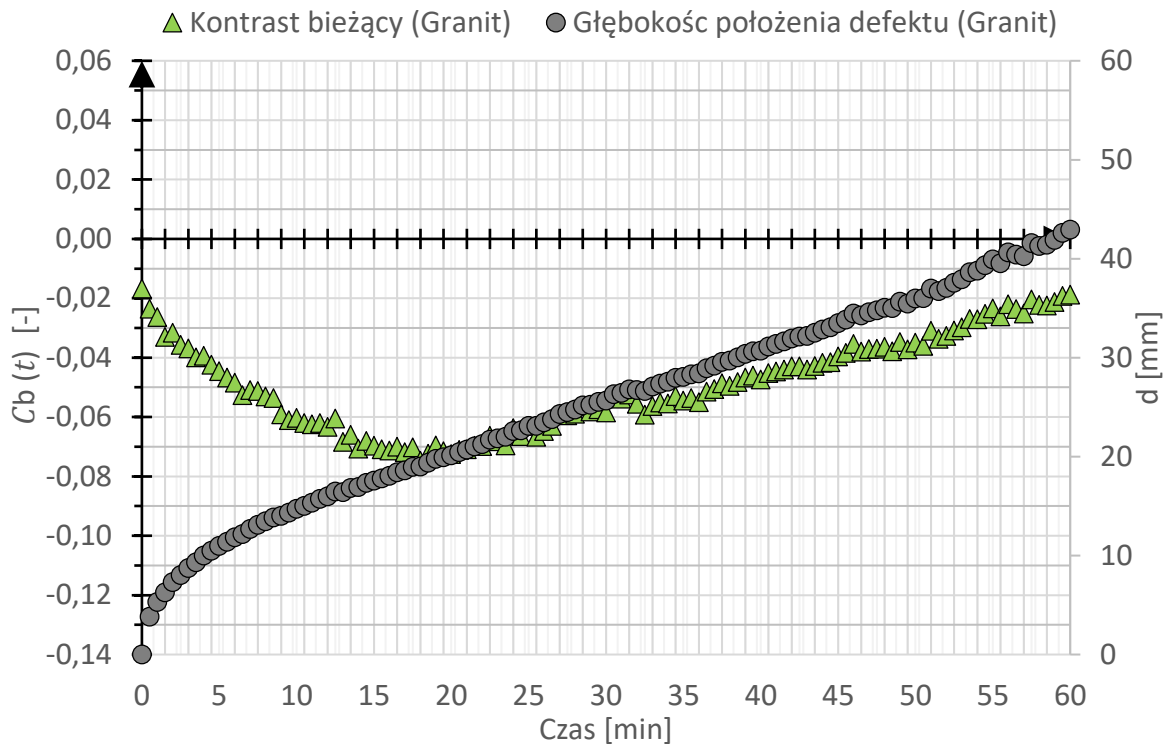
Rys. 7.28. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z granitu przy użyciu metody EDS dla odległości nagrzewu 1,0 m



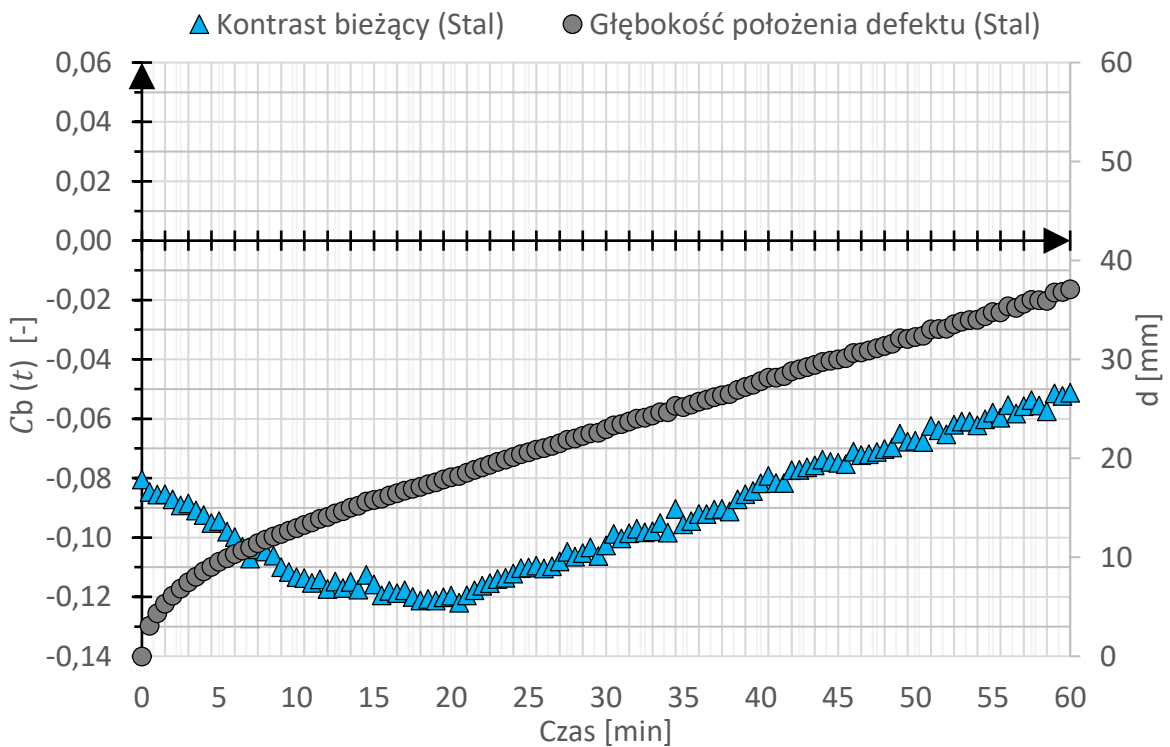
Rys. 7.29. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla odległości nagrzewu 1,0 m



Rys. 7.30. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z **XPS** przy użyciu metody EDS dla odległości nagrzewu 1,5 m



Rys. 7.31. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z **granitu** przy użyciu metody EDS dla odległości nagrzewu 1,5 m

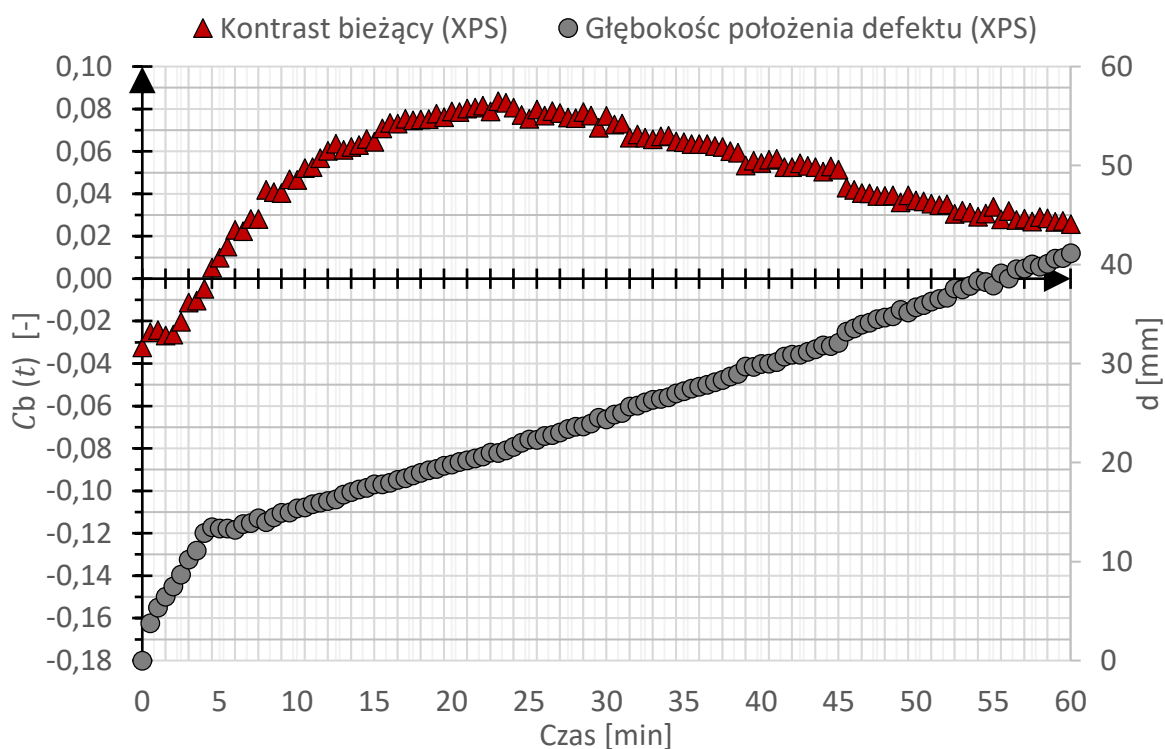


Rys. 7.32. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla odległości nagrzewu 1,5 m

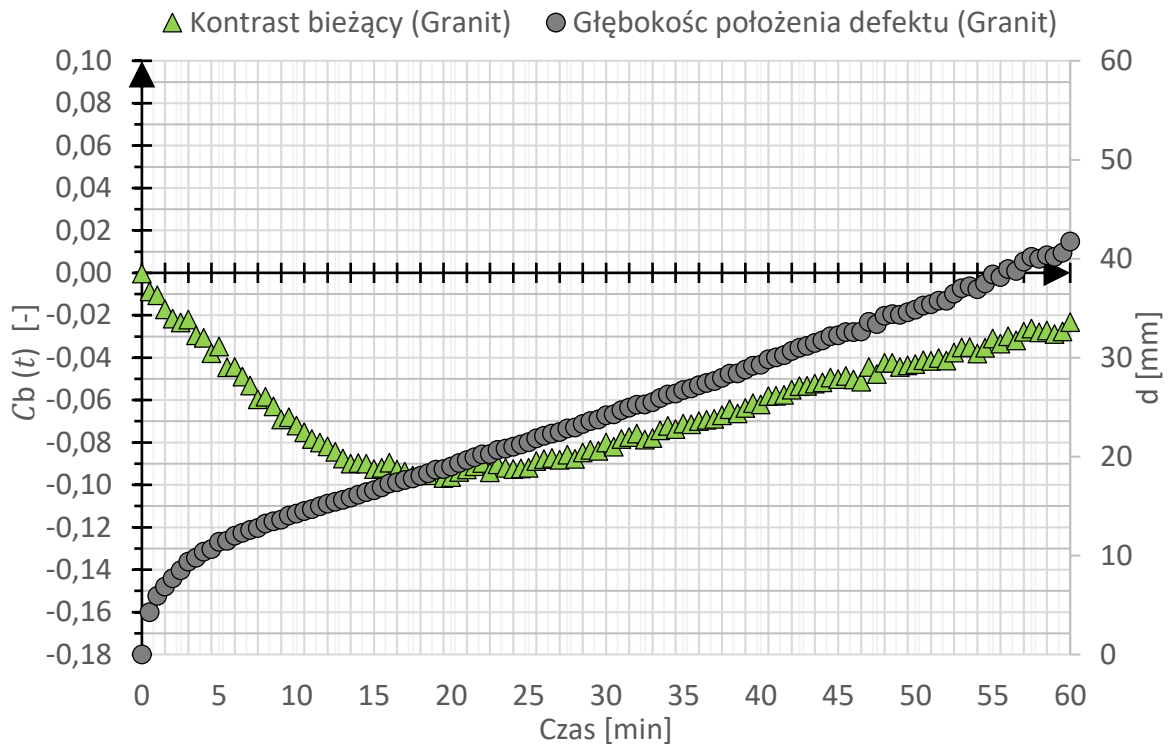
7.1.3. Wpływ rodzaju materiału bazowego na lokalizację wtrąceń

Do przeanalizowania wpływu **rodzaju materiału bazowego** na możliwość lokalizacji wtrąceń materiałowych wykorzystano wyniki otrzymane z pomiarów na stanowisku nr 1 w wariantcie Ia oraz wariantcie IIIa. W doświadczeniu tym przeprowadzono pomiary na modelach przegrody wykonanych z dwóch różnych materiałów bazowych: płyty GK i płyty OSB. Model ogrzewano przez okres 30 minut z odległości 0,5 m. Łącznie przeprowadzono 2 doświadczenia.

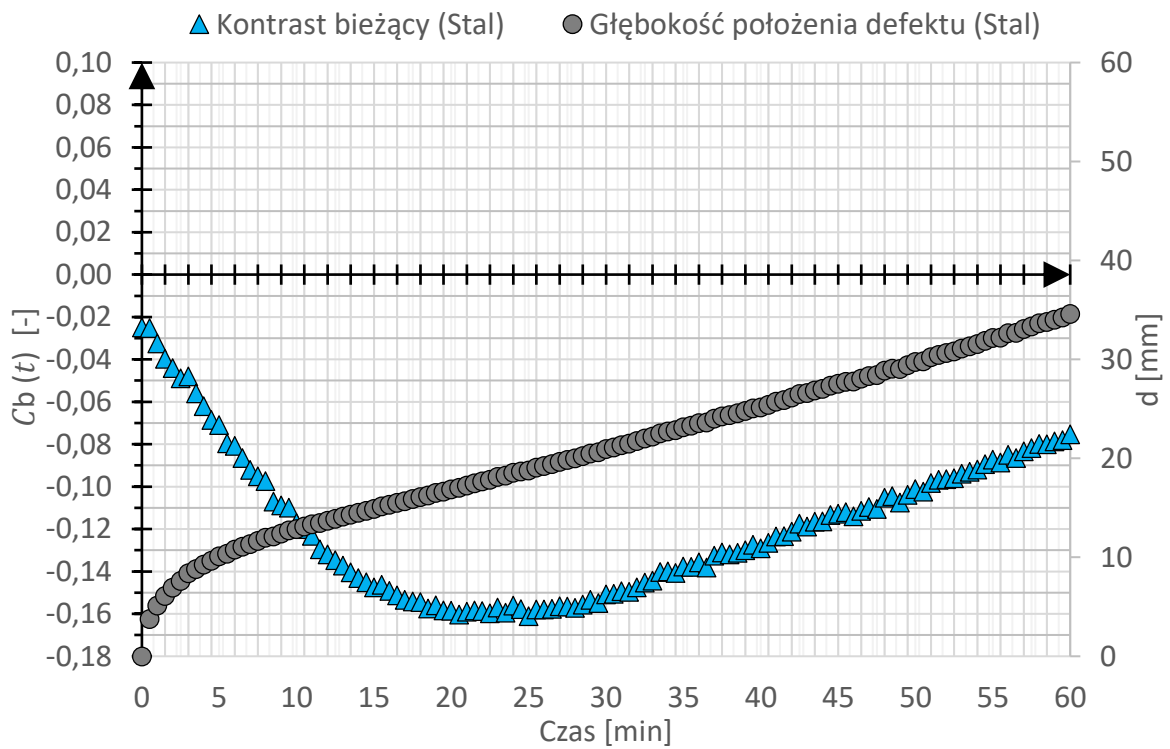
Na wykresach przedstawiono otrzymane wyniki z obliczeń kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu dla poszczególnych materiałów bazowych: **plyta GK** (od rys. 7.33. do rys. 7.35.), **plyta OSB** (od rys. 7.36. do rys. 7.38.).



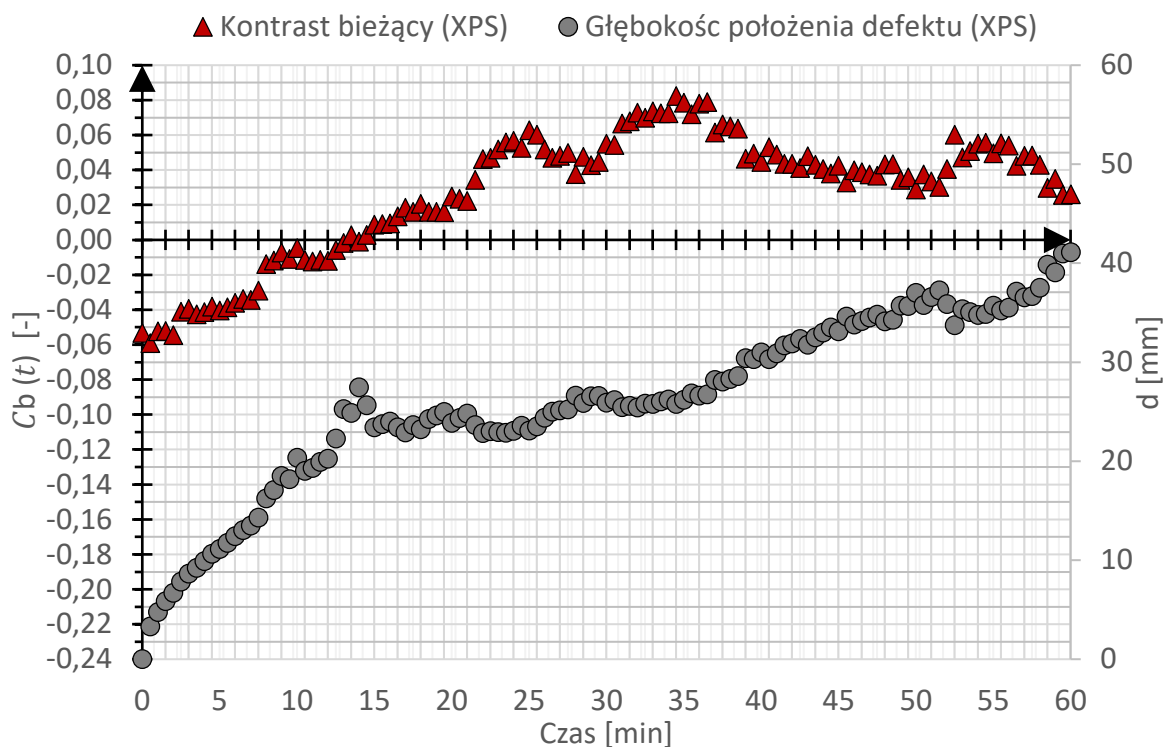
Rys. 7.33. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z XPS przy użyciu metody EDS dla materiału bazowego GK



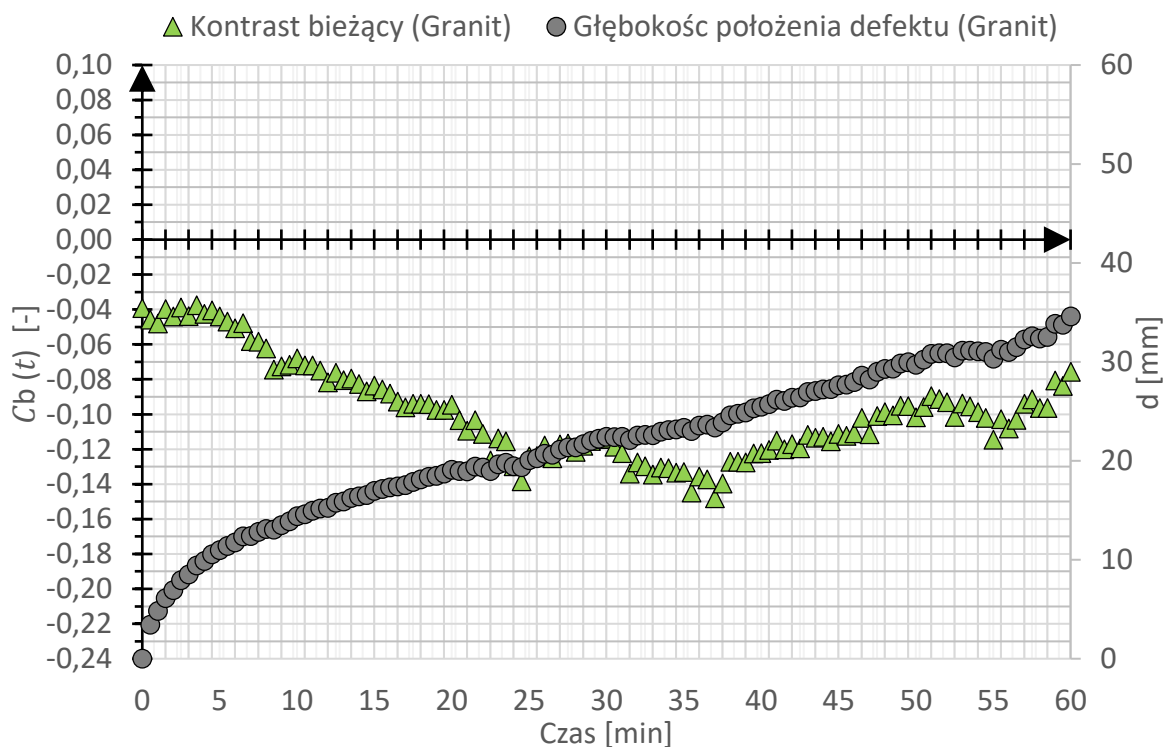
Rys. 7.34. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z **granitu** przy użyciu metody EDS dla materiału bazowego GK



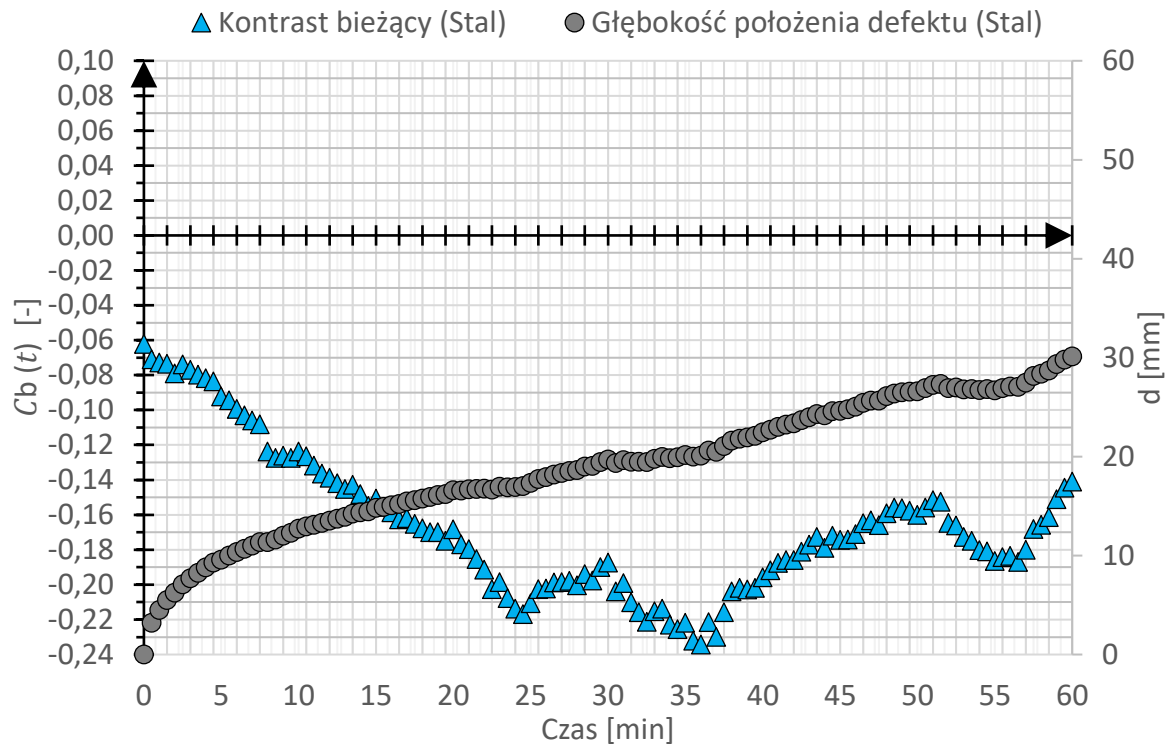
Rys. 7.35. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla materiału bazowego GK

a) Materiał bazowy **plyta OSB**:

Rys. 7.36. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z XPS przy użyciu metody EDS dla materiału bazowego OSB



Rys. 7.37. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu z granitu przy użyciu metody EDS dla materiału bazowego OSB



Rys. 7.38. Wykres obliczonego kontrastu bieżącego oraz szacowanej głębokości położenia defektu ze **stali** przy użyciu metody EDS dla materiału bazowego OSB

7.1.4. Rozwiązanie problemu lokalizacji wtrąceń materiałowych

Dla przyjętej w punkcie 7.1.1. metodyki lokalizacji wtrąceń materiałowych i otrzymanych wykresów w punkcie 7.1.2. i 7.1.3. w tabelach (od tabeli 7.1. do tabeli 7.4.) przedstawiono rozwiązanie problemu lokalizacji wtrąceń materiałowych. Szczegółowe wykresy ze wzorami funkcji wielomianowych i współczynnikami R^2 zostały zawarte w załączniku A. Wyniki przedstawiono w postaci wartości głębokości zalegania wtrącenia materiałowego oraz jego szerokości. Uwzględniono wpływ warunków pobudzenia cieplnego oraz rodzaju materiału bazowego na możliwość szacowania poszukiwanych parametrów geometrycznych wtrąceń materiałowych w elementach budowlanych.

Tabela 7.1. Oszacowane głębokości zalegania wtrącenia materiałowego oraz jego szerokości z uwzględnieniem wpływu **mocy nagrzewu**

1	2	3	4	5	6
LP	Moc nagrzewu	Rodzaj wtrącenia	Oszacowana głębokość zalegania	Oszacowana szerokość	Rzeczywista głębokość // szerokość
[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
1	2 x 1,0 kW	Pręt stalowy	15,66	35,58	26 // 20
2	6 x 1,2 kW	Pręt stalowy	20,85	35,97	26 // 20

Tabela 7.2. Oszacowane głębokości zalegania wtrącenia materiałowego oraz jego szerokości z uwzględnieniem wpływu **czasu nagrzewu**

1	2	3	4	5	6
LP	Czas nagrzewu	Rodzaj wtrącenia	Oszacowana głębokość zalegania	Oszacowana szerokość	Rzeczywista głębokość // szerokość (wysokość)
[-]	[min]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
1	10	XPS	35,67	106,48	22 // (100)
2	20	XPS	31,33	85,02	22 // (100)
3	30	XPS	27,74	103,10	22 // (100)
4	40	XPS	29,21	100,23	22 // (100)
5	50	XPS	31,02	80,91	22 // (100)
6	60	XPS	36,19	77,59	22 // (100)
7	10	Granit	27,99	188,98	22 // 200
8	20	Granit	26,36	170,25	22 // 200
9	30	Granit	24,39	167,06	22 // 200
10	40	Granit	23,14	179,38	22 // 200
11	50	Granit	22,29	174,99	22 // 200
12	60	Granit	21,96	176,85	22 // 200
13	10	Stal	20,92	203,18	22 // (200)
14	20	Stal	23,67	187,75	22 // (200)
15	30	Stal	20,83	190,60	22 // (200)
16	40	Stal	19,60	188,12	22 // (200)
17	50	Stal	19,51	192,71	22 // (200)
18	60	Stal	19,96	189,06	22 // (200)

Tabela 7.3. Oszacowane głębokości zalegania wtrącenia materiałowego oraz jego szerokości z uwzględnieniem wpływu **rodzaju materiału bazowego**

1	2	3	4	5	6
LP	Materiał bazowy	Rodzaj wtrącenia	Oszacowana głębokość zalegania	Oszacowana szerokość	Rzeczywista głębokość // szerokość
[-]	[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
1	Płyta GK	XPS	20,98	182,16	22 // 200
2	Płyta OSB	XPS	25,79	201,54	22 // 200
3	Płyta GK	Granit	18,75	204,00	22 // 200
4	Płyta OSB	Granit	23,35	185,02	22 // 200
5	Płyta GK	Stal	18,78	131,71	22 // 100
6	Płyta OSB	Stal	20,08	150,12	22 // 100

Tabela 7.4. Oszacowane głębokości zalegania wtrącenia materiałowego oraz jego szerokości z uwzględnieniem wpływu odległości źródła nagrzewu

1	2	3	4	5	6
LP	Odległość źródła nagrzewu	Rodzaj wtrącenia	Oszacowana głębokość zalegania	Oszacowana szerokość	Rzeczywista głębokość // szerokość
[-]	[m]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,5	XPS	20,98	182,16	22 // 200
2	1,0	XPS	18,82	179,16	22 // 200
3	1,5	XPS	19,37	188,67	22 // 200
4	0,5	Granit	18,75	204,00	22 // 200
5	1,0	Granit	18,63	210,02	22 // 200
6	1,5	Granit	18,59	201,09	22 // 200
7	0,5	Stal	18,78	131,71	22 // 100
8	1,0	Stal	17,64	129,06	22 // 100
9	1,5	Stal	18,25	130,22	22 // 100

7.2. Ocena rozwiązania

7.2.1. Porównanie wartości oszacowanych z rzeczywistymi

Wartości oszacowane na podstawie metodyki podanej w rozdziale 7.1.1. zostały zestawione w tabeli 7.5 z wartościami rzeczywistymi. Dla oszacowanej głębokości zalegania błąd względny wynosił od 0,18 % do 64,5 %. Z najmniejszą dokładnością oszacowano głębokość zalegania wtrącenia materiałowego (dla różnych czasów nagrzewu) z XPS w płycie OSB – błąd w granicach 26,09 % do 64,5 %; następnie wtrącenie z granitu – błąd od 0,18 % do 27,23 %; natomiast głębokość zalegania wtrącenia stalowego oszacowano z dokładnością w przedziale 4,91 % - 11,32 %. Otulinę pręta stalowego o średnicy 20 mm umieszczonego w betonowym słupie oszacowano z dokładnością 19,81 % dla nagrzewu promiennikiem podczerwieni o mocy 6 x 1,2 kW oraz 39,77 % dla promiennika o mocy 2 x 1,0 kW.

Dla oszacowanego wymiaru wtrącenia materiałowego błąd ten wynosił (dla różnych czasów nagrzewu) od 0,23 % do 50,12 %. W przypadku wtrąceń materiałowych w płycie OSB ich wymiar był szacowany z dokładnością: dla XPS (od 0,23 % do 22,41 %), dla granitu (od 5,51 % do 16,46 %), dla stali (od 1,59 % do 6,12 %). Średnica pręta stalowego w betonie została oszacowana z dokładnością 77,91 % i 79,83 %.

Tabela 7.5. Porównanie wartości oszacowanych z wartościami rzeczywistymi dla głębokości zalegania defektu i jego wymiaru oraz obliczenie błędu względnego oszacowania tych parametrów

LP [Nr Tab. -nr wiersza]	Głębokość zalegania				Wymiar			
	Rzeczyw. głębokość	Oszacow. głębokość	Różnica	Błąd względny	Rzeczyw. wymiar	Oszcow. wymiar	Różnica	Błąd względny
	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
Tab.7.1-01	22,00	35,67	13,67	62,14	100,00	106,48	6,48	6,48
Tab.7.1-02	22,00	31,33	9,33	42,41	100,00	85,02	-14,98	-14,98
Tab.7.1-03	22,00	27,74	5,74	26,09	100,00	103,10	3,10	3,10
Tab.7.1-04	22,00	29,21	7,21	32,77	100,00	100,23	0,23	0,23
Tab.7.1-05	22,00	31,02	9,02	41,00	100,00	80,91	-19,09	-19,09
Tab.7.1-06	22,00	36,19	14,19	64,50	100,00	77,59	-22,41	-22,41
Tab.7.1-07	22,00	27,99	5,99	27,23	200,00	188,98	-11,02	-5,51
Tab.7.1-08	22,00	26,36	4,36	19,82	200,00	170,25	-29,75	-14,87
Tab.7.1-09	22,00	24,39	2,39	10,86	200,00	167,06	-32,94	-16,47
Tab.7.1-10	22,00	23,14	1,14	5,18	200,00	179,38	-20,62	-10,31
Tab.7.1-11	22,00	22,29	0,29	1,32	200,00	174,99	-25,02	-12,51
Tab.7.1-12	22,00	21,96	-0,04	-0,18	200,00	176,85	-23,15	-11,57
Tab.7.1-13	22,00	20,92	-1,08	-4,91	200,00	203,18	3,18	1,59
Tab.7.1-14	22,00	23,67	1,67	7,59	200,00	187,75	-12,25	-6,12
Tab.7.1-15	22,00	20,83	-1,17	-5,32	200,00	190,60	-9,40	-4,70
Tab.7.1-16	22,00	19,6	-2,40	-10,91	200,00	188,12	-11,88	-5,94
Tab.7.1-17	22,00	19,51	-2,49	-11,32	200,00	192,71	-7,29	-3,65
Tab.7.1-18	22,00	19,96	-2,04	-9,27	200,00	189,06	-10,94	-5,47
Tab.7.2-01	26,00	15,66	-10,34	-39,77	20,00	35,58	15,58	77,91
Tab.7.2-02	26,00	20,85	-5,15	-19,81	20,00	35,97	15,97	79,83
Tab.7.3-01	22,00	20,98	-1,02	-4,64	200,00	182,16	-17,84	-8,92
Tab.7.3-02	22,00	18,82	-3,18	-14,45	200,00	179,16	-20,84	-10,42
Tab.7.3-03	22,00	19,37	-2,63	-11,95	200,00	188,67	-11,33	-5,66
Tab.7.3-04	22,00	18,75	-3,25	-14,77	200,00	204,00	4,00	2,00
Tab.7.3-05	22,00	18,63	-3,37	-15,32	200,00	210,02	10,02	5,01
Tab.7.3-06	22,00	18,59	-3,41	-15,50	200,00	201,09	1,09	0,55
Tab.7.3-07	22,00	18,78	-3,22	-14,64	100,00	131,71	31,71	31,71
Tab.7.3-08	22,00	17,64	-4,36	-19,82	100,00	129,06	29,06	29,06

Tab.7.3-09	22,00	18,25	-3,75	-17,05	100,00	130,22	30,22	30,22
Tab.7.4-01	22,00	20,98	-1,02	-4,64	200,00	182,16	-17,84	-8,92
Tab.7.4-02	22,00	25,79	3,79	17,23	200,00	201,54	1,54	0,77
Tab.7.4-03	22,00	18,75	-3,25	-14,77	200,00	204,00	4,00	2,00
Tab.7.4-04	22,00	23,35	1,35	6,14	200,00	185,02	-14,98	-7,49
Tab.7.4-05	22,00	18,78	-3,22	-14,64	100,00	131,71	31,71	31,71
Tab.7.4-06	22,00	20,08	-1,92	-8,73	100,00	150,12	50,12	50,12

W przypadku wpływu poszczególnych parametrów na lokalizację wtrąceń materiałowych można zauważyć, że:

Czas nagrzewu nie wpływał znacząco na otrzymane wyniki lokalizacji głębokości zalegania wtrącenia materiałowego dla XPS i stali (nie stwierdzono istotnych zależności). Dla wtrącenia z granitu stwierdzono zależność wzrostu dokładności wyznaczenia głębokości zalegania defektu proporcjonalnie do wydłużonego czasu nagrzewu (czas nagrzewu 10 minut – dokładność 27,23%, dla 60 minut – 0,18 %). W przypadku wyznaczania wymiaru wtrącenia materiałowego nie stwierdzono zależności pomiędzy czasem nagrzewu, a wzrostem dokładności szacowania tego wymiaru. Jednak wtrącenia były najlepiej widoczne na termogramach (co ułatwiało wyznaczenie miejsca prowadzenia profilu temperatury) dla czasu nagrzewu około 30 minut. Dłuższe czasy nagrzewu nie są wymagane w celu poprawienia widoczności wtrąceń na termogramach.

Moc nagrzewu może wpływać na szacowanie wyznaczania otuliny prętów stalowych w betonie. W przypadku promiennika o mocy 6 x 1,2 kW błąd względny był dwukrotnie mniejszy (19,81%) w stosunku do użytego promiennika o mocy 2 x 1,0 kW (39,77%). W przypadku szacowania średnicy tego pręta błąd względny był prawie taki sam dla obu mocy pobudzenia cieplnego.

Odległość źródła nagrzewu nie wpływa znacząco na lokalizację głębokości zalegania defektu oraz wymiaru defektu. Nie stwierdzono zależności pomiędzy odległością źródła pobudzenia cieplnego, a szacowaniem szukanych parametrów geometrycznych. Należy jednak zwrócić uwagę, że większa odległość promiennika podczerwieni pozwala uzyskać bardziej jednorodnie ogrzany obszar badanej powierzchni o niższej temperaturze. Bliska odległość promiennika podczerwieni znacznie podnosi temperaturę ogrzewanej powierzchni, nawet do ponad 100 °C co może oznaczać ograniczenia metody jako badań nieniszczących.

Rodzaj materiału bazowego ma znaczenie w przypadku lokalizacji zarówno głębokości zalegania defektu jak i jego wielkości. Wzajemne różnice parametrów cieplnych pomiędzy wtrąceniem materiałowym, a materiałem bazowym wpływają na rozkład pola temperatury podczas badania metodą termowizji aktywnej. Głębokość zalegania wtrącenia z XPS była lepiej oszacowana dla materiału bazowego z płyty GK (4,64 %) niż z płyty OSB (17,23 %), natomiast

wtrącenia z granitu i stali były lepiej lokalizowane w płycie OSB (6,14 % i 8,73 %) niż w płycie GK (14,77 % i 14,64 %). Odwrotna zależność jest obserwowana w przypadku szacowania szerokości wtrącenia, mniejszy błąd względny dla XPS w OSB (0,77%) w stosunku do GK (8,92 %), dla granitu i stali w GK błąd względny wynosi kolejno 2,0 % i 31,71 % (w OSB 7,49 % i 50,12 %).

7.2.2. Zakres stosowania otrzymanych wyników badań

Otrzymane wyniki badań doświadczalnych mogą być z powodzeniem stosowane przy poszukiwaniu defektów w postaci wtrąceń materiałowych w lekkich szkieletowych przegrodach budowlanych z okładziną wykonaną z płyt OSB i płyt GK. Wtrącenia o wymiarze ponad 100 mm szerokości mogą być lokalizowane zarówno pod względem głębokości zalegania jak i ich wielkości. Dla wtrąceń stalowych szacowane parametry geometryczne są z dokładnością do kilkunastu procent.

Termowizja aktywna z pobudzeniem promiennikiem podczerwieni może być również stosowana do lokalizacji zbrojenia w elementach żelbetowych. Przy grubości otuliny powyżej średnicy szukanego pręta, dokładność pomiaru tej średnicy nie jest zadowalająca dla proponowanej metodyki analizy termogramu (błąd względny ponad 70 %). Wyznaczenie grubości otuliny prętów zbrojeniowych w przypadku pobudzenia promiennikiem dużej mocy pozwala oszacować tę wartość z błędem do 20 %.

7.2.3. Ograniczenia zastosowanej metodyki badawczej

Zaproponowana w niniejszej pracy metodyka lokalizacji wtrąceń materiałowych przy wykorzystaniu termowizji aktywnej z pobudzeniem długim impulsem cieplnym posiada kilka ograniczeń w zastosowaniu. Do ograniczeń tych zalicza się:

- a) **wielkość wtrąceń materiałowych:** proponowana metodyka badawcza może nie mieć zastosowania w przypadku bardzo małych wtrąceń materiałowych (rzędu kilku mm) położonych głęboko (kilka cm),
- b) **wysokie temperatury powierzchni:** w przypadku ogrzewania długim impulsem cieplnym, powierzchnia ogrzewa się do co najmniej 50°C, a przy bliskim i długim czasie nagrzewu nawet do ponad 100°C, temperatury takie mogą być szkodliwe np. dla zabytkowych malowideł ściennych stosowanych w obiektach zabytkowych,
- c) **występowanie pustek powietrznych:** w pracy nie przeanalizowano wpływu pustek powietrznych pomiędzy lokalizowanym wtrąceniem, a materiałem bazowym, występowanie takich przestrzeni może znacznie zaburzyć rozkład pola temperatury i utrudnić lokalizację wtrąceń,
- d) **nieregularny kształt:** w dysertacji doświadczalnie analizowano lokalizację wtrąceń materiałowych o regularnych kształtach jak prostopadłościan lub walec. Nieregularny kształt wtrąceń utrudnia jego lokalizację, nieregularność kształtu może występować zarówno w płaszczyźnie badanej powierzchni jak i prostopadle do niej.

ROZDZIAŁ 8

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

8.1. Wnioski ogólne

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych laboratoryjnych i terenowych oraz przeprowadzonych analiz otrzymanych wyników, sformułowano 7 wniosków ogólnych.

1. Zastosowanie nieniszczących badań z wykorzystaniem termografii aktywnej pozwala na lokalizowanie wtrąceń materiałowych (w postaci styropianu, granitu lub stali) w przegrodach budowlanych typu szkieletowego, gdzie warstwa okładzinowa jest wykonana z płyt OSB lub płyt GK (patrz termogramy w rozdziale 6.1.4. np. rys. 6.22b.). Miejsca występowania wtrąceń materiałowych charakteryzują się zaburzonym polem temperatury widocznym na termogramie - potwierdzenie tezy 1.
2. Możliwe jest lokalizowanie prętów zbrojeniowych w słupach żelbetowych nieniszczącą metodą badań z użyciem termografii aktywnej (termogramy w rozdziale 6.1.4. np. rys. 6.64b.). Miejsca występowania prętów stalowych charakteryzują się zakrzywieniem (falowaniem) linii izoterm - potwierdzenie tezy 2.
3. Stosując autorską metodę analizy profilu temperatury opisaną w rozdziale 7.1.1. możliwe jest rozwiązanie odwrotnego zagadnienia przewodzenia ciepła, które ma na celu określenie wymiarów wtrącenia materiałowego jedynie na podstawie analizy cyklicznie rejestrowanych termogramów. Wymiary wtrąceń, w zależności od użytego sposobu pobudzenia cieplnego, mogą być lokalizowane w lekkich przegrodach budowlanych z dokładnością od 0,23% do 50,12% (tabela 7.5.) - potwierdzenie tezy 3.
4. Można szacować głębokość zalegania wtrąceń materiałowych w lekkich przegrodach budowlanych z dokładnością od 0,18 % do 64,5 % (wg tabeli 7.5., w zależności od użytego sposobu ogrzania badanej powierzchni), przy zastosowaniu termografii aktywnej, analizując termogramy za pomocą zmodyfikowanej metody Echo Defect Shape (EDS) - potwierdzenie tezy 4.

5. Czas prowadzonego pobudzenia cieplnego nie wpływa znacząco na lokalizację głębokości zalegania wtrącenia materiałowego ze styropianu, stali i granitu. Nie stwierdzono zależności wzrostu tej dokładności wraz z wydłużeniem czasu nagrzewu (tabela 7.5.) - brak potwierdzenia części tezy 5.
6. Moc pobudzenia cieplnego badanego elementu wpływa na szacowanie wyznaczania otuliny prętów stalowych w betonie. Dla mocniejszego źródła ciepła (tj. 6 x 1,2 kW) zaobserwowano dwa razy dokładniejsze oszacowanie grubości otuliny niż dla badania z użyciem promiennika podczerwieni o mocy 2 x 1,0 kW (tabela 7.5.) - potwierdzenie części tezy 5.
7. Odległość/usytuowanie źródła nagrzewu nie wpływa na lokalizację głębokości zalegania defektu oraz wymiaru defektu. Nie stwierdzono zależności pomiędzy odległością źródła pobudzenia cieplnego, a szacowaniem szukanych parametrów geometrycznych (tabela 7.5.). Należy jednak zwrócić uwagę, że większa odległość promiennika podczerwieni pozwala uzyskać bardziej jednorodnie ogrzany obszar badanej powierzchni o niższej temperaturze – co jest pożądane przy wykonywaniu badań nieniszczących - brak potwierdzenia części tezy 5.

8.2. Wnioski szczegółowe

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analiz wyników sformułowano 17 wniosków szczegółowych.

1. Potwierdzono możliwość stosowania termografii aktywnej z długim impulsem cieplnym, tj. o czasie trwania co najmniej kilka minut, jako źródła pobudzenia cieplnego promiennika podczerwieni, do lokalizowania niejednorodności objętościowych (wg normy EN 17119:2008 Aneks A Tablica A.1 str. 13 [201]) w badaniach elementów budowlanych takich jak lekkie przegrody szkieletowe i słupy żelbetowe.
2. Możliwe jest lokalizowanie w lekkich przegrodach budowlanych wtrąceń materiałowych położonych głębiej niż wynosi grubość tych wtrąceń (w niniejszej pracy grubość modelowanych wtrąceń wynosiła 20 mm, a ich głębokość zalegania 22 mm).
3. Stalowe pręty zbrojeniowe mogą być z powodzeniem lokalizowane w elementach żelbetowych, w których otulina jest większa niż średnica zbrojenia. W pracy lokalizowano pręty o średnicy 20 mm pod warstwą betonu o grubości 26 mm.
4. Zbyt bliskie usytuowanie promiennika podczerwieni w stosunku do badanej powierzchni powoduje jej nierównomierne ogrzanie (rys. 6.22a-c.), co przyczynia się do utrudnionego lokalizowania poszukiwanych defektów bezpośrednio na termogramach.
5. Wtrącenia materiałowe, takie jak np. styropian, charakteryzujące się dużo mniejszą pojemnością i przewodnością cieplną w stosunku do materiału bazowego typu płyta GK

- lub płyta OSB (patrz tabela 5.3.) w początkowej fazie stygnięcia elementu są widoczne jako obszary cieplejsze (np. rys. 6.22b.). Zjawisko to spowodowane jest szybkim wzrostem temperatury wtrącenia materiałowego (niska pojemność cieplna) i „nie przepuszczaniem” ciepła na jego drugą stronę (niska przewodność cieplna). Wprowadzona energia cieplna „utrzymuje się” przed wtrąceniem materiałowym powodując wzrost temperatury na powierzchni w stosunku do przekroju bez wtrącenia.
6. Wtrącenia materiałowe, takie jak np. granit i stal, charakteryzujące się dużo większą pojemnością i przewodnością cieplną w stosunku do materiału bazowego typu płyta GK lub płyta OSB (patrz tabela 5.3.) w początkowej fazie stygnięcia elementu są widoczne jako obszary chłodniejsze (np. rys. 6.22b.). Zjawisko to spowodowane jest wolnym wzrostem temperatury wtrącenia materiałowego (duża pojemność cieplna) i szybkim „przepuszczaniem” energii cieplnej przez strukturę wtrącenia materiałowego (wysoka przewodność cieplna). Wprowadzona energia cieplna jest szybciej „przepuszczana” na drugą stronę przegrody niż w przekroju bez wtrącenia co powoduje spadek temperatury na powierzchni w stosunku do przekroju jednorodnego.
 7. Wtrącenie materiałowe, takie jak np. styropian, charakteryzujące się dużo mniejszą pojemnością cieplną w stosunku do materiału bazowego typu płyta GK lub płyta OSB (patrz tabela 5.3.) w późnej fazie stygnięcia elementu (ponad 2 godziny od wyłączenia źródła ciepła) defekty styropianowe są lokalizowane jako obszary chłodniejsze (np. rys. 6.33d.). Spowodowane jest to tym, że wtrącenia materiałowe o małej pojemności cieplnej stygną szybciej niż przekrój jednorodny materiałowo o większej pojemności cieplnej.
 8. Wtrącenia materiałowe, takie jak np. granit i stal, charakteryzujące się dużo większą pojemnością cieplną w stosunku do materiału bazowego typu płyta GK lub płyta OSB (patrz tabela 5.3.) w późnej fazie stygnięcia elementu (ponad 2 godziny od wyłączenia źródła ciepła) defekty te są lokalizowane jako obszary cieplejsze (np. rys. 6.22d.). Spowodowane jest to tym, że wtrącenia materiałowe o dużej pojemności cieplnej stygną dłużej niż przekrój jednorodny materiałowo o mniejszej pojemności cieplnej.
 9. Takie same zależności (patrz wnioski szczegółowe nr od 5 do 8) temperatury przekrojów z wtrąceniem materiałowym jak i bez niego stwierdzono zarówno w badaniach w trybie refleksyjnym jak i trybie transmisyjnym (patrz np. rys. 6.28. – tryb transmisyjny i rys. 6.29. – tryb refleksyjny).
 10. Rodzaj układu lamp promiennika podczerwieni oraz ich moc wpływa na równomierność ogrzania badanej powierzchni oraz na temperaturę, do której ta powierzchnia zostanie nagrzana (rys. 6.55.).
 11. W elementach żelbetowych, pręty stalowe mogą być lokalizowane na termogramach jedynie dla kilku pierwszych minut od wyłączenia promiennika podczerwieni. Po około 15 minutach temperatura betonu wyrównuje się na całej badanej powierzchni (rys. 6.56.) i proponowanej metodyki lokalizacji zbrojenia nie można już zastosować.

12. Elementy konstrukcji drewnianej ukryte pod pojedynczą warstwą cegieł (12 cm) nie mogą być lokalizowane przy użyciu promiennika podczerwieni z długim impulsem nagrzewu. W takim przypadku konstrukcja drewniana będąca wtrąceniem materiałowym znajduje się zbyt głęboko i nie może być lokalizowana przedstawioną metodyką badawczą (punkt 6.2.3.).
13. Lokalizując materiał termoizolacyjny w ścianach jak np. płyta styropianowa w przegrodach lekkich szkieletowych, optymalny czas nagrzewu powinien wynosić około 30 minut. Dla tej długości trwania stymulacji cieplnej głębokość wtrącenia została określona z dokładnością 26,09 % a jego szerokość z dokładnością do 3,10 %.
14. Lokalizując materiał kamienny jak np. granit w lekkich przegrodach szkieletowych optymalny czas nagrzewu powinien wynosić co najmniej 40 minut. Zauważono wzrost dokładności szacowania geometrii wtrącenia wraz z wydłużeniem tego czasu (wniosek ogólny nr 5), ale ze względów praktycznych wystarczający jest nagrzew przez 40 minut. Dla tej długości trwania stymulacji cieplnej głębokość wtrącenia została określona z dokładnością 5,18 %, a jego szerokość z dokładnością do 10,31 %.
15. Lokalizując materiał stalowy jak np. stal budowlana w lekkich ścianach szkieletowych, wystarczający do lokalizacji wtrącenia jest już czas nagrzewu około 10 minut. Dla tego czasu nagrzewu głębokość wtrącenia została określona z dokładnością 4,91 %, a jego szerokość z dokładnością do 1,59 %.
16. Lokalizacja prętów zbrojenia głównego przy otulinie betonowej o grubości 26 mm była utrudniona w przypadku prętów o średnicy 12 mm i 25 mm. Powodem braku możliwości lokalizacji w przypadku prętów o średnicy 12 mm było ich położenie ponad dwa razy głębiej pod badaną powierzchnią elementu niż wynosiła ich średnica. Dla prętów o średnicy 25 mm wnioskuje się, że powodem ich utrudnionej lokalizacji był za mały odstęp pomiędzy prętami zbrojenia głównego co nie pozwoliło uzyskać odpowiednio dużego zaburzenia rozkładu pola temperatury wzdłuż profilu temperatury, który mógłby zostać zarejestrowany przez kamerę termowizyjną.
17. W przypadku elementów żelbetowych, trudniej lokalizuje się zbrojenie stalowe występujące przy krawędziach badanego elementu. Związane jest to ze zjawiskiem wychładzania krawędziowego. Przy narożach element szybciej stygnie na wskutek przewodzenia ciepła 2D przez dwie prostopadłe powierzchnie przy tym narożu. Powoduje to zaburzenie (spadek) rejestrowanego przez kamerę termowizyjną rozkładu pola temperatury w narożu badanego elementu.

8.3. Podsumowanie rozprawy

8.3.1. Ocena wkładu rozprawy do rozwoju wiedzy

W podsumowaniu aktualnego stanu wiedzy (rozdział 2.2) określono „białe plamy” w badaniach termowizją aktywną - punkty od a) do n). W ramach pracy doktorskiej uzupełniono aktualny stan wiedzy o:

- a) badania możliwości lokalizacji wtrąceń materiałowych z użyciem termowizji aktywnej w **elementach dużych** (grubości co najmniej kilku cm), które swoją konstrukcją przypominają modele **lekkich przegród** budowlanych,
- b) badania możliwości lokalizacji zbrojenia z użyciem termowizji aktywnej w elementach żelbetowych o **kształcie belki/słupa**, z różną średnicą zbrojenia,
- c) badania metodą termowizji aktywnej z **długim** (co najmniej 240 min) czasem rejestracji termogramów podczas stygnięcia badanego elementu budowlanego,
- d) zbadanie wpływu **czasu nagrzewu** na otrzymywane kontrasty termiczne w modelach lekkich przegród budowlanych,
- e) zbadanie wpływu **odległości** pobudzenia cieplnego od badanej powierzchni na występowanie kontrastów termicznych (możliwości detekcji wtrąceń materiałowych),
- f) zbadanie wpływu **mocy** źródła ciepła na możliwości lokalizacji defektów w badanych przekrojach,
- g) przeprowadzenie **jednoczesnych** badań termowizją aktywną dla wtrąceń o **różnych** parametrach cieplnych (XPS, granit oraz stal),
- h) przeprowadzenie badań z użyciem termowizji aktywnej z jednoczesną rejestracją temperatury **wewnątrz** badanego elementu,
- i) wykonanie analiz **ilościowych** mających na celu określenie **głębokości i szerokości** wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych,
- j) wykonanie badań doświadczalnych z **jednoczesną** rejestracją termogramów w trybie **refleksyjnym** i trybie **transmisyjnym**.

8.3.2. Dalsze kierunki badań

Autor niniejszej pracy doktorskiej zdaje sobie sprawę, że rozwiązał tylko część problemów naukowych związanych z użyciem termografii aktywnej w badaniach przegród budowlanych. Ze względu na interdyscyplinarność poruszanego zagadnienia, istnieje wiele możliwości rozwoju tematyki nieniszczących badań z zastosowaniem termowizji aktywnej w dziedzinie budownictwa. Do najważniejszych dalszych kierunków badań można zaliczyć:

- a) identyfikację właściwości cieplnych lokalizowanych wtrąceń materiałowych,
- b) przeprowadzenie badań doświadczalnych przegród budowlanych w kontrolowanych warunkach klimatycznych tj. w komorze klimatycznej,
- c) lokalizacja pustek powietrznych w elementach budowlanych (np. pustki powietrzne w betonie),
- d) lokalizacja wtrąceń materiałowych o skomplikowanej geometrii,
- e) lokalizacja zbrojenia w elementach żelbetowych ze skomplikowaną geometrią zbrojenia (np. pręty w dwóch rzędach na boku słupa lub zbrojenie krzyżowe w płytach),
- f) badania elementów budowlanych z użyciem innego rodzaju pobudzenia cieplnego jak np. laser, mikrofałe lub strumień gorącego powietrza,
- g) badania terenowe z wykorzystaniem energii pobudzenia cieplnego promieniowania słonecznego,
- h) lokalizacja w elementach budowlanych defektów typu rozwarstwienia i spękania.

Można przewidywać, że technika termowizji aktywnej wraz z rozwojem urządzeń pomiarowych może w przyszłości z powodzeniem zostać alternatywną metodą badawczą dla obecnych dobrze już rozpoznanych nieniszczących badań wykorzystywanych w budownictwie.

LITERATURA

- [1] Aggelis D, Kordatos E, Soulioti D, Matikas T. Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. *Constr. Build. Mater.* 2010.
- [2] Aggelis D, Kordatos E, Strantza M, Soulioti D, Matikas TE. NDT approach for characterization of subsurface cracks in concrete. *Constr. Build. Mater.* 2011.
- [3] Almond DP, Angioni SL, Pickering SG. Long pulse excitation thermographic non-destructive evaluation. *NDT E Int.* 2017.
- [4] Altenburg SJ, Weber H, Krankenhagen R. Thickness determination of semitransparent isolated solids using the flash method and an analytical model [Internet]. Gdańsk: QIRT Council; 2016.
- [5] Arndt R, Maierhofer Ch, Röllig M, Weritz F, Wiggenhauser H. Structural Investigation of Concrete and Masonry Structures behind Plaster by means of Pulse Phase Thermography. Bruksela: 2004.
- [6] Arndt RW. Square pulse thermography in frequency domain as adaptation of pulsed phase thermography for qualitative and quantitative applications in cultural heritage and civil engineering. *Infrared Phys. Technol.* 2010.
- [7] Azenha M, Faria R, Figueiras H. Thermography as a technique for monitoring early age temperatures of hardening concrete. *Constr. Build. Mater.* 2011.
- [8] Bajorek M, Nowakowski A. Analysis of the possibility of defect determination using cold excitation in thermal tomography. Québec: 2010.
- [9] Balageas D, Maldague X, Burleigh D, Vavilov VP, Oswald-Tranta B, Roche J-M, i in. Thermal (IR) and Other NDT Techniques for Improved Material Inspection. *J. Nondestruct. Eval.* 2016.
- [10] Balageas DL. A brief history of QIRT concept, structures and community. *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 2016.
- [11] Balageas DL. Personal thoughts on the occasion of the Xth QIRT Conference. Québec: 2010.
- [12] Balageas DL, Roche J-M, Leroy F-H. Comparison and ranking procedure for an objective assessment of thermographic NDE methods [Internet]. QIRT Council; 2016.
- [13] Barreira E, Almeida RMSF, Delgado JMPQ. Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components. *Constr. Build. Mater.* 2016.
- [14] Barreira E, de Freitas VP. Evaluation of building materials using infrared thermography. *Constr. Build. Mater.* 2007.
- [15] Bendada A, Sfarra S, Ambrosini D, Paoletti D, Ibarra-Castanedo C, Maldague XPV. Active thermography data processing for the NDT&E of frescoes. Québec: 2010.
- [16] Bison P, Ceseri M, Fasino D, Inglese G. Domain derivative approach to active infrared thermography. *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2010.

-
- [17] Brachelet F, Keo S, Defer D, Breaban F. Detection of reinforcement bars in concrete slabs by infrared thermography and microwaves excitation. Bordeaux: 2014.
- [18] Breitenstein O, Warta W, Langenkamp M. Lock-in Thermography: Basics and Use for Evaluating Electronic Devices and Materials. Springer Science & Business Media. 2010.
- [19] Brink A, Maierhofer C, Röllig M, Wiggenhauser H. Application of quantitative impulse thermography for structural evaluation in civil engineering – Comparison of experimental results and numerical simulations. 2002.
- [20] Brown JR, Hamilton HR. Quantitative infrared thermography inspection for FRP applied to concrete using single pixel analysis. Constr. Build. Mater. 2013.
- [21] Candore JC, Bodnar JL, Szeflinski A, Ibos L, Dacu S, Candau Y, i in. Helps with the thermal diagnosis of the building : Detection of defects of insulation by stimulated infrared thermography. Kraków: 2008.
- [22] Cannard H, Mahrez M, Perrin T, Muzet V, Prybyla D, Brachelet F. The use of infrared thermography for defects detection on reinforced concrete bridges. Bordeaux: 2014.
- [23] Cantini L, Cucchi M, Fava G, Poggi C. Fourier analysis applied to Infrared Thermography of Fiber Composites used for the Strengthening of Structural Elements. Neapol: 2012.
- [24] Cengel Y. Introduction To Thermodynamics and Heat Transfer. New York: 1997.
- [25] Chaffar K. Thermographie active appliquée à la caractérisation in situ de parois de bâtiment, Active thermal applied in situ characterization of building walls. 2012.
- [26] Chatterjee K, Roy D, Tuli S. A novel pulse compression algorithm for frequency modulated active thermography using band-pass filter. Infrared Phys. Technol. 2017.
- [27] Choi M, Kang K, Park J, Kim W, Kim K. Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography. NDT E Int. 2008.
- [28] Christiane Maierhofer Red, Hans-Wolf Reinhardt Red, Gerd Dobmann Red. Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. Vol. 2, Non-destructive testing methods. Oxford : Boca Raton: Woodhead ; CRC Press; 2010.
- [29] Chudzik S, Minkina W. Koncepcja wykorzystania metody termofalowej oraz pomiarów termowizyjnych do wyznaczania parametrów cieplnych materiałów termoizolacyjnych. Pomiary Autom. Kontrola [Internet]. 2013.
- [30] Chulkov AO, Gaverina L, Pradere C, Batsale J-C, Vavilov VP. Water detection in honeycomb composite structures using terahertz thermography. Russ. J. Nondestruct. Test. 2015.
- [31] Corvaglia P, Galietti U, Largo A, Nenna S, Spagnolo L. Feasibility of different thermal analysis of FRP – reinforced concrete. Padwa: 2006.
- [32] Corvaglia P, Largo A. IRT survey for the quality control of FRP reinforced r.c. structures. Kraków: 2008.
- [33] Cotič P, Kolarič D, Bosiljkov VB, Bosiljkov V, Jagličić Z. Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structures using infrared thermography. NDT E Int. 2015.

-
- [34] Crinière A, Dumoulin J, Ibarra-Castanedo C, Maldague X. Inverse model for defect characterisation of externally glued CFRP on reinforced concrete structures: comparative study of square pulsed and pulsed thermography. *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 2014.
- [35] Darabi A. Detection and Estimation of Defect Depth in Infrared Thermography Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic. 2000.
- [36] Darabi A, Maldague X. Neural network based defect detection and depth estimation in TNDE. *NDT E Int.* 2002.
- [37] Delanthabetu S, Menaka M, Venkatraman B, Raj B. Defect depth quantification using lock-in thermography. *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 2015.
- [38] D’huys K, Saeys W, De Ketelaere B. Active Infrared Thermography for Seal Contamination Detection in Heat-Sealed Food Packaging. *J. Imaging.* 2016.
- [39] Dillenz A, Wu D, Breitrück K, Busse G. Lock-in thermography for depth resolved defect characterisation [Internet]. Roma: 2010.
- [40] Donatelli A, Aversa P, Luprano VAM. Set-up of an experimental procedure for the measurement of thermal transmittances via infrared thermography on lab-made prototype walls. *Infrared Phys. Technol.* 2016.
- [41] Dudzik S. Ocena wpływu błędu określania emisyjności powierzchni na błąd wyznaczania głębokości defektu z zastosowaniem termografii aktywnej i sztucznej sieci neuronowej. *Pomiary Autom. Kontrola* [Internet]. 2013.
- [42] Dudzik S. Analysis of the accuracy of a neural algorithm for defect depth estimation using PCA processing from active thermography data. *Infrared Phys. Technol.* 2013.
- [43] Dudzik S. Two-stage neural algorithm for defect detection and characterization uses an active thermography. *Infrared Phys. Technol.* 2015.
- [44] Dudzik S. Wyznaczanie głębokości defektów materiałowych z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej i sztucznych sieci neuronowych. Częstochowa: Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej; 2013.
- [45] Dudzik S, Minkina W. Dwuetapowy algorytm wyznaczania głębokości defektów z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej. *Pomiary Autom. Kontrola* [Internet]. 2013.
- [46] Elliott Cramer K. *NASA Thermographic Inspection of Advanced Composite Materials.* Bruksela: 2004.
- [47] Escobar-Wolf R, Oommen T, Brooks CN, Dobson RJ, Ahlborn TM. Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Assessment of Concrete Bridge Deck Delamination Using Thermal and Visible Camera Sensors: A Preliminary Analysis. *Res. Nondestruct. Eval.* 2017.
- [48] Florez-Ospina JF, Benitez HD. From local to global analysis of defect detectability in infrared non-destructive testing. *Infrared Phys. Technol.* 2014.
- [49] Grinzato E. *IR Thermography Applied to Historical Buildings.* Dubrownik: 2002.
- [50] Grinzato E, Luprano VAM, Marinetti S, Bison P, Trentin R, Tundo A, i in. Thermal NdE of FRP applied to civil structures. Padwa: 2006.

-
- [51] Gryś S, Vokorokos L, Borowik L. Size determination of subsurface defect by active thermography – Simulation research. *Infrared Phys. Technol.* 2014.
- [52] Gryś S. Analysis of Temperature-rise of the Material Surface over Hidden Defect Thermally Stimulated in Active Thermography. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2012.
- [53] Gryś S, Minkina W. Kontrast filtrowany w charakteryzacji wad materiałowych metodą aktywnej termografii. *Pomiary Autom. Kontrola.* 2010.
- [54] Gryś S, Minkina W. Wyznaczanie granic defektów podpowierzchniowych metodą aktywnej termografii - badania modelowe. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2013.
- [55] Gryś S, Minkina W. Filtered thermal contrast – error analysis. Québec: 2010.
- [56] Halabe UB, Vasudevan A, Klinkhachorn P, GangaRao HVS. Detection of subsurface defects in fiber reinforced polymer composite bridge decks using digital infrared thermography. *Nondestruct. Test. Eval.* 2007.
- [57] Halloua H, Elhassnaoui A, Saifi A, Obbadi A, Errami Y, Sahnoun S. An intelligent method using neural networks for Depth detection by standard thermal contrast in active thermography [Internet]. QIRT Council; 2016.
- [58] He Y, Yang R. Eddy Current Volume Heating Thermography and Phase Analysis for Imaging Characterization of Interface Delamination in CFRP. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2015.
- [59] Hedayati Vahid P, Hesabi S, Lauredndeau D, Maldague X. A Defect Detection Approach in Thermal Images. Bordeaux: 2014.
- [60] Hiasa S. Investigation of infrared thermography for subsurface damage detection of concrete structures. 2016.
- [61] Hola J, Bien J, Sadowski L, Schabowicz K. Non-destructive and semi-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability. *Pol. Akad. Nauk Bull. Pol. Acad. Sci.* 2015.
- [62] Hoła A, Czarnota M. Poprawa izolacyjności termicznej ścian zabytkowego budynku o konstrukcji szachulcowej. *Mater. Bud.* [Internet]. 2016.
- [63] Hudson RD. *Infrared System Engineering.* Wiley-Interscience; 1969.
- [64] Ibarra Castanedo C. Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase. 2005.
- [65] Ibarra-Castanedo C, Maldague X. Pulsed phase thermography reviewed. *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 2004.
- [66] Ibarra-Castanedo C, Maldague XPV. Interactive Methodology for Optimized Defect Characterization by Quantitative Pulsed Phase Thermography. *Res. Nondestruct. Eval.* 2005.
- [67] Ibarra-Castanedo C, Piau J-M, Guilbert S, Avdelidis NP, Genest M, Bendada A, i in. Comparative Study of Active Thermography Techniques for the Nondestructive Evaluation of Honeycomb Structures. *Res. Nondestruct. Eval.* 2009.
- [68] Ibarra-Castanedo C, Sfarra S, Ambrosini D, Paoletti D, Bendada bdelhakim, Maldague X. Subsurface defect characterization in artworks by quantitative pulsed phase thermography and holographic interferometry. *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 2008.

-
- [69] Ibarra-Castanedo C, Sfarra S, Klein M, Maldague X. Solar loading thermography: Time-lapsed thermographic survey and advanced thermographic signal processing for the inspection of civil engineering and cultural heritage structures. *Infrared Phys. Technol.* 2017.
- [70] Ibos L, Larbi Youcef M, Mazioud A, Datcu S, Candau Y. Non-destructive testing of building walls using active infrared thermography. *Padwa*: 2006.
- [71] Inagaki T, Ishii T, Iwamoto T. On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography. *NDT E Int.* 1999.
- [72] Jan Taler. Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne; 2003.
- [73] Jinlong G, Junyan L, Fei W, Yang W. Inverse heat transfer approach for nondestructive estimation the size and depth of subsurface defects of CFRP composite using lock-in thermography. *Infrared Phys. Technol.* 2015.
- [74] Junyan L, Qingju T, Xun L, Yang W. Research on the quantitative analysis of subsurface defects for non-destructive testing by lock-in thermography. *NDT E Int.* 2012.
- [75] Kashif Ur Rehman S, Ibrahim Z, Memon SA, Jameel M. Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Constr. Build. Mater.* 2016.
- [76] Keo SA, Brachelet F, Breaban F, Defer D. Steel detection in reinforced concrete wall by microwave infrared thermography. *NDT E Int.* 2014.
- [77] Khan F, Bolhassani M, Kotsos A, Hamid A, Bartoli I. Modeling and experimental implementation of infrared thermography on concrete masonry structures. *Infrared Phys. Technol.* 2015.
- [78] Khodayar F, Sojasi S, Maldague X. Infrared thermography and NDT: 2050 horizon. *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 2016.
- [79] Kisilewicz T, Wróbel A, Wróbel A. Inwentaryzacja rzeczywistych strat ciepła przez przegrody budynków z wykorzystaniem termografii. *Arch. Fotogram. Kartogr. Teledetekcji.* 2008.
- [80] Knupp DC, Naveira-Cotta CP, Orlande HRB, Cotta RM. Experimental Identification of Thermophysical Properties in Heterogeneous Materials with Integral Transformation of Temperature Measurements from Infrared Thermography. *Exp. Heat Transf.* 2013.
- [81] Kordatos EZ, Exarchos DA, Stavrakos C, Moropoulou A, Matikas TE. Infrared thermographic inspection of murals and characterization of degradation in historic monuments. *Constr. Build. Mater.* 2013.
- [82] Krankenhagen R, Kervalishvili GN, Maierhofer C. Influence of air gaps on the thermal behavior of plaster-concretebonds. *Québec*: 2010.
- [83] Krankenhagen R, Maierhofer C. Pulse phase thermography for characterising large historical building façades after solar heating and shadow cast – a case study. *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 2014.
- [84] Kurita K, Oyado M, Tanaka H, Tottori S. Active infrared thermographic inspection technique for elevated concrete structures using remote heating system. *Infrared Phys. Technol.* 2009.

-
- [85] Kurpiński M, Fidali M. Application of active thermography methods to defect detection of bounded joints [Internet]. QIRT Council; 2016.
- [86] Lahiri BB, Bagavathiappan S, Reshmi PR, Philip J, Jayakumar T, Raj B. Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography. *Infrared Phys. Technol.* 2012.
- [87] Lahiri BB, Bagavathiappan S, Shunmugasundaram R, Philip J, Jayakumar T. Measurement of annular air-gap using active infrared thermography. *Infrared Phys. Technol.* 2013.
- [88] Lai WL, Kou SC, Poon CS, Tsang WF, Lai CC. Characterization of the deterioration of externally bonded CFRP-concrete composites using quantitative infrared thermography. *Cem. Concr. Compos.* 2010.
- [89] Lai WL, Poon C-S. Boundary and size estimation of debonds in external wall finishes of high-rise buildings using Infrared thermography. Neapol: 2012.
- [90] Lai WW-L, Lee K-K, Poon C-S. Validation of size estimation of debonds in external wall's composite finishes via passive Infrared thermography and a gradient algorithm. *Constr. Build. Mater.* 2015.
- [91] Li B, Ye L, Li E, Shou D, Li Z, Chang L. Gapped smoothing algorithm applied to defect identification using pulsed thermography. *Nondestruct. Test. Eval.* 2015.
- [92] Liu B, Zhang H, Fernandes H, Maldague X. Experimental evaluation of pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography on foreign object defect (FOD) in CFRP. [Internet]. 2016.
- [93] Lugin S, Netzelmann U. A defect shape reconstruction algorithm for pulsed thermography. *NDT E Int.* 2007.
- [94] Lüthi T. *Non-Destructive Evaluation Methods*. Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Empa): 2013.
- [95] Madruga FJ, Ibarra-Castanedo C, Conde OM, López-Higuera JM, Maldague X. Infrared thermography processing based on higher-order statistics. *NDT E Int.* 2010.
- [96] Maierhofer C, Arndt R, Röllig M, Rieck C, Walther A, Scheel H, i in. Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures. *Cem. Concr. Compos.* 2006.
- [97] Maierhofer C, Brink A, Röllig M, Wiggenhauser H. Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the near surface region. *Infrared Phys. Technol.* 2002.
- [98] Maierhofer C, Brink A, Röllig M, Wiggenhauser H. Detection of shallow voids in concrete structures with impulse thermography and radar. *NDT E Int.* 2003.
- [99] Maierhofer C, Myrach P, Krankenhagen R, Röllig M, Steinfurth H. Detection and Characterization of Defects in Isotropic and Anisotropic Structures Using Lockin Thermography. *J. Imaging.* 2015.
- [100] Maierhofer C, Reischel M, Steinfurth H, Röllig M, Myrach P, Ziegler M. Development of reference test specimens for the standardisation of active thermography with flash excitation. Neapol: 2012.

-
- [101] Maierhofer C, Rothbart N, Goldammer M, Hohlstein F, Koch J, Kryukov I, i in. A round robin test of flash thermography – detectability and quantification of artificial and natural defects in CFRP and metal structures [Internet]. QIRT Council; 2016.
- [102] Maierhofer Ch, Arndt R, Röllig M, Helmerich R, Walther A, Hillemeier B, i in. Quantification of Voids and Delaminations in Real Concrete and Masonry Structures with Active Thermography: Case Studies. Padwa: 2006.
- [103] Maierhofer Ch, Brink A, Röllig M, Wiggenhauser H. Quantitative impulse-thermography as non-destructive testing method in civil engineering – Experimental results and numerical simulations. Constr. Build. Mater. 2005.
- [104] Maierhofer Ch, Myrach P, Steinfurth H, Reischel M, Röllig M. Development of standards for flash thermography and lock-in thermography [Internet]. Bordeaux: QIRT Council; 2014.
- [105] Maierhofer Ch, Wiggenhauser H, Brink A, Röllig M. Quantitative numerical analysis of transient IR-experiments on buildings. Infrared Phys. Technol. 2004.
- [106] Maio RD, Mancini C, Meola C, Piegari E. Numerical modelling of architectonic structures' thermal response. Laboratory and in-situ data analysis. Neapol: 2012.
- [107] Maj M, Oliferuk W, Wysocka O. Relation between defect depth and standard thermal contrast on the steel surface in pulsed thermography. Kraków: 2008.
- [108] Maldague X. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. 2001.
- [109] Maldague X, Galmiche F, Ziadi A. Advances in pulsed phase thermography. Infrared Phys. Technol. 2002.
- [110] Maldague X, Marinetti S. Pulse phase infrared thermography. J. Appl. Phys. 1996.
- [111] Maldague X, Ziadi A, Klein M. Double pulse infrared thermography. NDT E Int. 2004.
- [112] Manohar A, di Scalea FL. Modeling 3D heat flow interaction with defects in composite materials for infrared thermography. NDT E Int. 2014.
- [113] Marynowicz A. Determination of thermal properties of porous building material by infrared thermography [Internet]. Gdańsk: QIRT Council; 2016.
- [114] Marynowicz A. Wyznaczanie cieplnych właściwości materiałów budowlanych przy wykorzystaniu techniki termowizyjnej [Internet]. Politechnika Opolska; 2019.
- [115] Marynowicz A. Transient Infrared Measurement of Laser Absorption Properties of Porous Materials. Meas. Sci. Rev. [Internet]. 2016.
- [116] Mercuri F, Zammit U, Orazi N, Paoloni S, Marinelli M, Scudieri F. Active infrared thermography applied to the investigation of art and historic artefacts. J. Therm. Anal. Calorim. 2011.
- [117] Mihai A, Stefanescu F, Dumitrache-Rujinski A, Neagu G. Composite Materials Flaws Detection and Measurement by Infrared Thermography [Internet]. Bordeaux: QIRT Council; 2014.
- [118] Milovanović B. Karakterizacija oštećenja Armiranog betona primjenom Metode infracrvene Termografije. 2013.

-
- [119] Milovanović B, Banjad Pečur I. Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete. *J. Imaging*. 2016.
- [120] Minkina W. Wybrane problemy współczesnej termografii i termometrii w podczerwieni. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. 2001.
- [121] Minkina W. Pomiary termowizyjne: przyrządy i metody. Częstochowa: Wydaw. Politechniki Częstochowskiej; 2004.
- [122] Minkina W, Dudzik S. Termografia w podczerwieni - błędy i niepewności. *Pomiary Autom. Kontrola*. 2009.
- [123] Minkina W, Dudzik S. *Infrared Thermography Errors and Uncertainties*. John Wiley & Sons; 2009.
- [124] Moropoulou A, Labropoulos KC, Delegou ET, Karoglou M, Bakolas A. Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Constr. Build. Mater*. 2013.
- [125] Nahant M, Paez S, Leeuwen JV. Detection by infrared thermography of the heat signature of diseases and defects in concrete structures of civil engineering. Québec: 2010.
- [126] Naveira-Cotta CP, Cotta RM, Orlande HRB. Inverse analysis with integral transformed temperature fields: Identification of thermophysical properties in heterogeneous media. *Int. J. Heat Mass Transf*. 2011.
- [127] Noszczyk P, Nowak H. *Inverse Contrast in Non-Destructive Materials Research by Using Active Thermography*. Materials. 2019.
- [128] Noszczyk P, Nowak H. Termografia aktywna jako nowoczesna metoda badań elementów żelbetowych. *Czas. Inż. Lądowej Śr. Archit.* [Internet]. 2016.
- [129] Nowak H., Stępniewski W. Termografia obiektów budowlanych w aspekcie jakości budownictwa ogólnego. *Problemy jakości budownictwa. II Sympozjum naukowo-techniczne*. Wrocław 1979.
- [130] Nowak H. *Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; 2012.
- [131] Nowak H, Kucypera M. *Application of Active Thermography for Detecting Material Defects in the Building Envelope*. 2010.
- [132] Nowak H, Noszczyk P. Lokalizacja wtrąceń materiałowych w przegrodach budowlanych za pomocą termografii aktywnej. *Mater. Bud*. 2014.
- [133] Nowak H, Noszczyk P. *Applying Active Thermography in the Non-Destructive Investigation of Historical Objects/ Zastosowanie Termowizji Aktywnej Do Badań Nieniszczących Obiektów Zabytkowych*. *Civ. Environ. Eng. Rep*. 2015.
- [134] Nowak H, Noszczyk P. Application of the active IR thermography for the detection of non-uniformity of materials in building partitions. *Tech. Trans*. 2015.
- [135] Oliferuk W. *Termografia podczerwieni w nieniszczących badaniach materiałowych*. Gamma; 2008.
- [136] Oliferuk W, Kosiński W, Kochanowski K, Adamowicz A. Inverse problem in determining the thermal diffusivity of materials by means of pulsed IR thermography [Internet]. Bordeaux: QIRT Council; 2014.

-
- [137] Owczarek G, Gralewicz G. Lokalizacja defektów materiałowych z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego. Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państw. Instytut Badawczy; 2003.
- [138] Panella F, Pirinu A, Dattoma V. A Brief Review and Advances of Thermographic Image - Processing Methods for IRT Inspection: a Case of Study on GFRP Plate. *Exp. Tech.* Vol. 2021.
- [139] Pickering S, Almond D. Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques. *NDT E Int.* 2008.
- [140] Pilla M, Klein M, Maldague X, Salerno A. New Absolute Contrast for pulsed thermography. *Dubrownik*: 2002.
- [141] Qiu P, Zhang S, Wu S, Chen Z, Zhang Z, Shui X. Characterisation of thermal property of materials by infrared thermography. *Nondestruct. Test. Eval.* 2010.
- [142] Richter R, Maierhofer C, Kreutzbruck M. Numerical method of active thermography for the reconstruction of back wall geometry. *NDT E Int.* 2013.
- [143] Richter R, Maierhofer C, Kreutzbruck M. Numerical method of active thermography for the reconstruction of back wall geometry. *Neapol*: 2012.
- [144] Roche J-M, Leroy F-H, Balageas DL. Information condensation in defect detection using TSR coefficients images [Internet]. Bordeaux: QIRT Council; 2014.
- [145] Rodríguez-Liñán C, Morales-Conde MJ, Hita PR, Pérez-Gálvez F. Analysis of the influence of density on infrared thermography and of the scope of this technique in the detection of internal defects in wood. *Mater. Constr.* 2012.
- [146] Rothbart N, Maierhofer C, Goldammer M, Hohlstein F, Koch J, Kryukov I, i in. *A Round Robin Test on Flash Thermography.* 2016.
- [147] Rózański L, Ziopaja K. Detection of material defects in reinforced concrete slab using active thermography. *Meas. Autom. Monit.* 2017.
- [148] Rumbayan R, Washer GA. Modeling of Environmental Effects on Thermal Detection of Subsurface Damage in Concrete. *Res. Nondestruct. Eval.* 2014.
- [149] Saintey MB, Almond DP. An artificial neural network interpreter for transient thermography image data. *NDT E Int.* 1997.
- [150] Sala A. *Radiacyjna wymiana ciepła.* Warszawa: Wydaw. Nauk.-Techn.; 1982.
- [151] Schmidt T, Dutta S, Ullmann T. Production integrated NDT by means of automated Thermography. *Neapol*: 2012.
- [152] Scott M, Kruger D. *IRT as Diagnostic Tool for Concrete Structures.* 2014.
- [153] Scott M, Kruger D. Effects of Solar Loading on the Limits of Predictability of Internal Delamination Defects in Concrete Using Infrared Thermography. 2013.
- [154] Scudieri F, Mercuri F, Volterri R. Non-invasive Analysis of Artistic Heritage and Archaeological Findings by Time Resolved IR Thermography. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2001.
- [155] Sfarra S, Marcucci E, Ambrosini D, Paoletti D. Infrared exploration of the architectural heritage: from passive infrared thermography to hybrid infrared thermography (HIRT) approach. *Mater. Constr.* 2016.

-
- [156] Shepard SM. Recent Advances in Pulsed Thermography. 2004.
- [157] Shrestha R, Park J, Kim W. Application of thermal wave imaging and phase shifting method for defect detection in Stainless steel. *Infrared Phys. Technol.* 2016.
- [158] Štarman S, Matz V. Automated System for Crack Detection Using Infrared Thermographic Testing. Shanghai, China: 2008.
- [159] Suszyński Z. Termografia aktywna: modele, metody pomiaru i przetwarzanie obrazów termograficznych [Internet]. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej; 2013.
- [160] Suszyński Z. Termografia aktywna: modele, metody pomiaru i przetwarzanie obrazów termograficznych [Internet]. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej; 2013.
- [161] Suszyński Z, Bednarek M. Zastosowanie funkcji korelacji do detekcji niejednorodności cieplnych struktur warstwowych metodą aktywnej termografii impulsowej. *Elektron. Konstr. Technol. Zastos.* 2011.
- [162] Suszyński Z, Kosikowski M. Termografia aktywna w trybie pobudzenia optycznego i konwekcyjnego. *Przegląd Elektrotechniczny.* 2011.
- [163] Swiderski W, Hlosta P, Chuda-Kowalska M. Non-destructive evaluation of sandwich plates by an ultrasonic IR thermographic method [Internet]. Gdańsk: QIRT Council; 2016.
- [164] Szymanik B. Zastosowanie aktywnej termografii podczerwonej ze wzbudzeniem mikrofalowym do wykrywania niemetalicznych min lądowych. 2013.
- [165] Szymanik B, Frankowski PK, Chady T, John Chelliah CRA. Detection and Inspection of Steel Bars in Reinforced Concrete Structures Using Active Infrared Thermography with Microwave Excitation and Eddy Current Sensors. *Sensors.* 2016.
- [166] Szymanik B, Lopato P, Psuj G. Coupled Active Thermography and Terahertz Technique in Composite Materials Defects' Evaluation [Internet]. QIRT Council; 2016.
- [167] Tang Q, Bu C, Liu Y, Qi L, Yu Z. A new signal processing algorithm of pulsed infrared thermography. *Infrared Phys. Technol.* 2015.
- [168] Tarin M, Rotolante R. NDT in Composite Materials with Flash, Transient, and Lock-In Thermography. ITC; 2010.
- [169] Tejedor B, Barreira E, de Freitas VP, Kisilewicz T, Nowak-Dzieszko K, Berardi U. Impact of stationary and dynamic conditions on the U-value measurements of heavy-multi leaf walls by quantitative IRT. 2020.
- [170] Thanh NT, Sahli H, Hao DN. Infrared Thermography for Buried Landmine Detection: Inverse Problem Setting. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2008.
- [171] Theodorakeas P, Avdelidis NP, Cheilakou E, Kouli M. Quantitative analysis of plastered mosaics by means of active infrared thermography. *Constr. Build. Mater.* 2014.
- [172] Thiemann C, Zaeh MF, Srajbr C, Boehm S. Automated defect detection in large-scale bonded parts by active thermography. Québec: 2010.
- [173] Ullmann T, Aoki R, Schmidt T. Lock-in Thermography for Process Integrated Non-Destructive Evaluation of Carbon Fibre Reinforced Aircraft Structures. Québec: 2010.

-
- [174] Umar MZ, Vavilov V, Abdullah H, Ariffin AK. Ultrasonic infrared thermography in non-destructive testing: A review. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2016.
- [175] Usamentiaga R, Venegas P, Guerediaga J, Vega L, López I. Non-destructive inspection of drilled holes in reinforced honeycomb sandwich panels using active thermography. *Infrared Phys. Technol.* 2012.
- [176] Vageswar A, Balasubramaniam K, Krishnamurthy CV. Wall thinning defect estimation using pulsed IR thermography in transmission mode. *Nondestruct. Test. Eval.* 2010.
- [177] Vavilov V. Noise-limited thermal/infrared nondestructive testing. *NDT E Int.* 2014.
- [178] Vavilov V. Thermal NDT: historical milestones, state-of-the-art and trends. *Quant. InfraRed Thermogr. J.* 2014.
- [179] Vavilov V, Bison P, Bressan C, Grinzato E, Marinetti S. Some new ideas in dynamic thermal tomography. Paryż: 1992.
- [180] Vavilov VP. Pulsed thermal NDT of materials: back to the basics. *Nondestruct. Test. Eval.* 2007.
- [181] Vavilov VP, Burleigh DD. Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing. *NDT E Int.* 2015.
- [182] Vavilov VP, Nesteruk DA. Active thermal inspection of composite materials with the use of neural networks. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2011.
- [183] Vavilov VP, Pan Y, Moskovchenko AI, Čapka A. Modeling, detecting and evaluating water ingress in aviation honeycomb panels [Internet]. QIRT Council; 2016.
- [184] Vavilov VP, Tukhtamishev S. Thermal nondestructive testing of corrosion in thick-wall steel products. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2012.
- [185] Waugh RC, Dulieu-Barton JM, Quinn S. Modelling and evaluation of pulsed and pulse phase thermography through application of composite and metallic case studies. *NDT E Int.* 2014.
- [186] Wawrzynek A, Nowak AJ, Bartoszek M, Delpak R, Hu CW. Theoretical analysis of applying thermography and inverse solutions to determine thermal properties of cementitious materials. *Inverse Probl. Sci. Eng.* 2005.
- [187] Weiser M, Röllig M, Arndt R, Erdmann B. Development and test of a numerical model for pulse thermography in civil engineering. *Heat Mass Transf.* 2010.
- [188] Więcek B. Termografia i spektrometria w podczerwieni. Zastosowania przemysłowe. Wydawnictwo Naukowe PWN; 2017.
- [189] Więcek B, Gilbert De Mey. Termowizja w podczerwieni - podstawy i zastosowania. PAK; 2011.
- [190] Więcek B, Gralewicz G, Owczarek G. Wykrywanie korozji - metoda badań nieniszczących w podczerwieni. *Ochr. Przed Korozją.* 2004.
- [191] Więcek B, Poksińska M. Passive and active thermography application for architectural monuments. Padwa: 2006.
- [192] Wiggenhauser H. Active IR-applications in civil engineering. *Infrared Phys. Technol.* 2002.

-
- [193] Wróbel A, Wróbel A, Kisilewicz T. Zastosowanie termografii do ilościowej oceny parametrów cieplnych budynków. 2011.
- [194] Wu D, Karpen W, Busse G. Lockin thermography for multiplex photothermal nondestructive evaluation. Paryż: 1992.
- [195] Wysocka-Fotek O. Szacowanie wielkości i położenia defektów podpowierzchniowych za pomocą impulsowej termografii podczerwieni. 2011.
- [196] Wysocka-Fotek O, Oliferuk W, Maj M. Use of pulse ir thermography for detection and quantitative description of subsurface defects in austenitic steel. Rudy Met. Niezelazne. 2009.
- [197] Wysocka-Fotek O, Oliferuk W, Maj M. Reconstruction of size and depth of simulated defects in austenitic steel plate using pulsed infrared thermography. Infrared Phys. Technol. 2012.
- [198] Xu C, Zhou N, Xie J, Gong X, Chen G, Song G. Investigation on eddy current pulsed thermography to detect hidden cracks on corroded metal surface. NDT E Int. 2016.
- [199] Youcef MHAL, Feuillet V, Ibos L, Candau Y, Balcon P, Filloux A. Quantitative diagnosis of insulated building walls of restored old constructions using active infrared thermography. Quant. InfraRed Thermogr. J. 2011.
- [200] Ziopaja K, Pozorski Z, Garstecki A. Damage detection using thermal experiments and wavelet transformation. Inverse Probl. Sci. Eng. 2011.
- [201] PN-EN 17119:2019 Badania nieniszczące - Badania termograficzne - Termografia aktywna. 2019.
- [202] PN-EN ISO 12524:2003 Materiały i wyroby budowlane -- Właściwości cieplno-wilgotnościowe -- Tabelaryczne wartości obliczeniowe. 2003.
- [203] PN-EN ISO 6946:1999 Komponenty budowlane i elementy budynku -- Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła -- Metody obliczania. 1999.

STRESZCZENIE

W praktyce inżynierskiej często zachodzi potrzeba analizy struktury materiałowej elementów istniejących. W budownictwie, za pomocą różnych technik pomiarowych określa się np. rozstaw i rodzaj zbrojenia w elementach żelbetowych, miejsca występowania pustek powietrznych, defektów i wtrąceń materiałowych. Uogólniając, określa się wewnętrzną strukturę badanych elementów. W rozprawie doktorskiej podjęto temat lokalizowania wtrąceń materiałowych w wybranych elementach budowlanych z zastosowaniem termowizji aktywnej, która należy do nieniszczących metod badawczych.

W pracy usystematyzowano aktualny stan wiedzy z podziałem na krajowe i zagraniczne źródła literaturowe. Krytyczną analizę literatury dokonano na podstawie ponad 200 opracowań naukowych i na jej podstawie określono 14 nierozwiązanych dotąd zagadnień w poruszanej tematyce badawczej i postawiono 5 tez naukowych.

Głównym celem wykonywanych badań była lokalizacja wtrąceń materiałowych w elementach i przegrodach budowlanych, których grubości wynosiły co najmniej kilka centymetrów. Lokalizacja wtrąceń polegała na wyznaczeniu ich głębokości zalegania pod badaną powierzchnią oraz szerokości tych wtrąceń jedynie na podstawie analizy cyklicznie rejestrowanych termogramów w fazie stygnięcia tych elementów po ich wcześniejszym ogrzaniu długim impulsem cieplnym. Dodatkowymi celami pracy była analiza wpływu odległości źródła ciepła od badanego elementu, jego mocy, czasu nagrzewu, rodzaju materiału jednorodnego oraz rodzaju materiału wtrącenia na możliwość lokalizacji tych wtrąceń.

Rozprawa zawiera opis teoretycznych aspektów prowadzenia badań metodą termowizji aktywnej. Przedstawiono w niej podstawy teoretyczne związane z przepływem ciepła (opis 20 wzorów), pomiarem termowizyjnym (metodyka pomiaru i jego rodzaje) oraz analizę przetwarzania obrazu termowizyjnego (opis 8 kontrastów termicznych).

Badania doświadczalne wykonano na modelach ściany szkieletowej z płyty OSB i płyty GK z zamodelowanymi wewnątrz jednocześnie 3 rodzajami prostopadłościennych wtrąceń materiałowych (styropian, granit oraz stal), dodatkowo w pracy przebadano słupy żelbetowe umieszczone w płaszczyźnie ściany murowanej z bloczków z betonu komórkowego, gdzie lokalizowanym wtrąceniem były pręty zbrojenia głównego wewnątrz słupów. Średnice prętów pod otuliną grubości 26 mm wynosiły 12, 16, 20 i 25 mm. W rozprawie doktorskiej przeprowadzono również badania terenowe lokalizacji konstrukcji drewnianej w ścianie szachulcowej zabytkowego kościoła. Łącznie wykonywano na 3 stanowiskach badawczych laboratoryjnych i jednym stanowisku terenowym 21 wariantów pomiarowych.

W pracy przedstawiono metodykę rozwiązania geometrycznych odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. Do obliczania głębokości zalegania wtrącenia materiałowego zaproponowano zmodyfikowaną metodę Echo Defect Shape, która polegała na analizie kontrastu bieżącego, natomiast do określania szerokości wtrącenia zastosowano autorską

metodę analizy profilu temperatury, która polegała na wyznaczeniu funkcji wielomianowej profilu temperatury zaburzonego wtrąceniem, wyznaczeniu ekstremów tej funkcji i na tej podstawie geometrycznym wyznaczeniu szerokości wtrącenia. W pracy przeanalizowano również wpływ warunków pobudzenia cieplnego (jego czas działania, moc i odległość od ogrzewanej powierzchni) i rodzaju użytych materiałów badanych elementów oraz wtrąceń na możliwości lokalizacji tych wtrąceń materiałowych. Wyznaczone parametry lokalizacyjne porównano z wartościami rzeczywistymi i oceniono otrzymane rozwiązanie obliczając błąd względny wyznaczenia głębokości zalegania i szerokości wtrąceń materiałowych.

Na podstawie wykonanych badań doświadczalnych stwierdzono, że dla przedstawionej metodyki badawczej czas nagrzewu i jego odległość od ogrzewanej powierzchni nie wpływały znacząco na otrzymywane wyniki lokalizacji defektów; w przypadku elementów żelbetowych o dużej masie termicznej moc nagrzewu wpływa na szacowane średnice zbrojenia głównego, podobnie jak rodzaj materiału bazowego i materiału wtrącenia wpływa na możliwość detekcji wtrąceń materiałowych w postaci styropianu, granitu i stali w lekkich ścianach szkieletowych.

Uogólniając nieniszczące badania z wykorzystaniem termowizji aktywnej umożliwiają one lokalizację defektów w postaci wtrąceń materiałowych w lekkich szkieletowych przegrodach budowlanych z okładziną wykonaną z płyt OSB i płyt GK. Wtrącenia o wymiarze ponad 100 mm szerokości mogą być lokalizowane zarówno pod względem głębokości zalegania jak i ich wielkości. Termowizja aktywna z długim pobudzeniem promiennikiem podczerwieni może być również z powodzeniem stosowana do lokalizacji zbrojenia w elementach żelbetowych.

W podsumowaniu rozprawy doktorskiej sformułowano 7 wniosków ogólnych i 17 wniosków szczegółowych potwierdzających w całości lub częściowo postawione tezy, określono zakres stosowania otrzymanych wyników badań, ograniczenia przedstawionej metodyki badawczej oraz wskazano możliwe dalsze kierunki badań nad poruszaną tematyką.

ABSTRACT

In engineering practice, there is often a need to analyze the material structure of existing elements. In construction, various measurement techniques are used to determine, for example, the spacing and type of reinforcement in reinforced concrete elements, the locations of air voids, defects, or material inclusions. Generally, the internal structure of the test elements is determined. In the doctoral dissertation, the topic of locating material inclusions in selected building elements with the use of active thermovision, which belongs to non-destructive research methods, was taken up.

The work systematizes the current state of knowledge with a breakdown into national ones and foreign literature sources. Critical analysis of the literature was carried out based on over 200 scientific studies, and on its basis, 14 unresolved issues in the research topic were identified and 5 scientific theses were formulated.

The main purpose of the research was the location of material inclusions in building elements and partitions, the thickness of which was at least a few centimeters. The location of inclusions consisted in determining the depth of their lying under the tested surface and the width of these inclusions only based on the analysis of cyclically recorded thermograms during the cooling phase of these elements after their previous heating with a long thermal pulse. Additional goals of the study were the analysis of the influence of the distance between the heat source and the tested element, its power, heating time, the type of homogeneous material, and the material type of inclusion material on the possibility of locating these inclusions.

The dissertation describes the theoretical aspects of conducting research using the active thermovision method. It presents the theoretical foundations related to heat flow (description of 20 formulas), thermal imaging measurement (measurement methodology and its types), and analysis of thermal image processing (description of 8 thermal contrasts).

The experimental tests were performed on models of the framed structure wall made of OSB board and drywall with 3 types of cuboidal material inclusions (polystyrene, granite, and steel) simultaneously modeled inside, additionally, the work investigated reinforced concrete columns placed in the plane of a brick wall made of cellular concrete blocks, where the main reinforcement bars inside the columns were the inclusion localized. The diameters of the bars under the 26 mm thick cover were 12, 16, 20, and 25 mm. The doctoral dissertation also included research on a real object of the location of the wooden structure in the half-timbered wall of the historic church. In total, they were performed on 3 laboratory test stands and one real test stand with 21 measurement variants.

The paper presents the methodology for solving inverse geometric problems of heat conduction. The modified Echo Defect Shape method was proposed to calculate the depth of the material inclusion, which consisted of the analysis of the current contrast, while the original method of temperature profile analysis was used to determine the width of the inclusion, which

consisted in determining the polynomial function of the temperature profile disturbed by the inclusion, determining the extremes of this function and on this basis the geometric determination of the inclusion width. The study also analyzed the influence of the conditions of thermal excitation (its operation time, power, and distance from the heated surface) and the type of materials used in the tested elements and inclusions on the possibility of locating these material inclusions. The determined location parameters were compared with the real values and the obtained solution was assessed by calculating the relative error of determining the depth and the width of material inclusions.

Based on the experimental tests performed, it was found that for the presented research methodology, the heating time and its distance from the heated surface did not significantly affect the obtained results of defect localization; in the case of reinforced concrete elements with high thermal mass, the heating power affects the estimated diameters of the main reinforcement, as does the type of base material and the material of the inclusions affects the possibility of detecting material inclusions in the form of polystyrene, granite, and steel in light-framed structure walls.

Generalizing non-destructive tests with the use of active thermovision, they enable the location of defects in the form of material inclusions in light-framed structure building partitions with cladding made of OSB boards and drywall. Inclusions over 100 mm wide can be located both in terms of depth and size. Active thermal imaging with long stimulation by an infrared radiator can also be successfully used to locate reinforcement in reinforced concrete elements.

In the summary of the doctoral dissertation, 7 general conclusions and 17 detailed conclusions confirming the theses put forward in whole or in part were formulated, the scope of application of the obtained research results, limitations of the research methodology presented, and possible further directions of research on this subject were indicated.

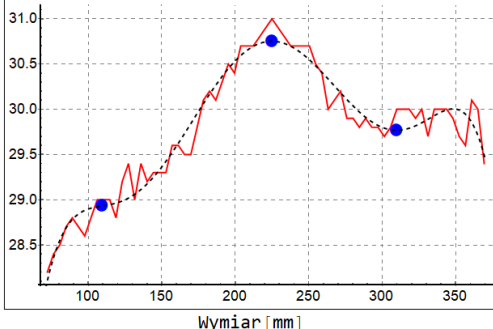
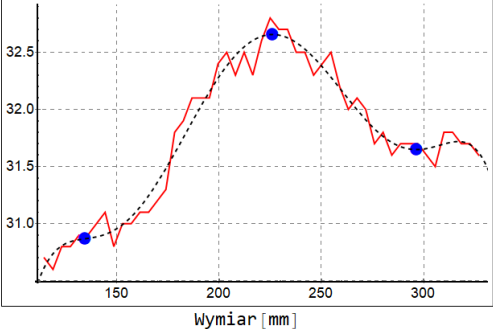
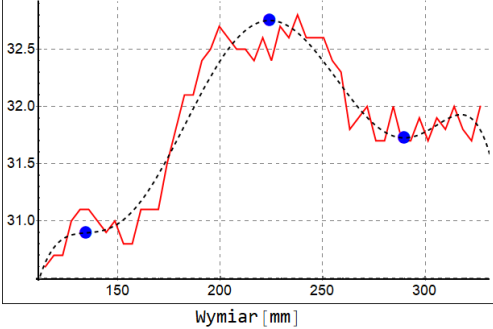
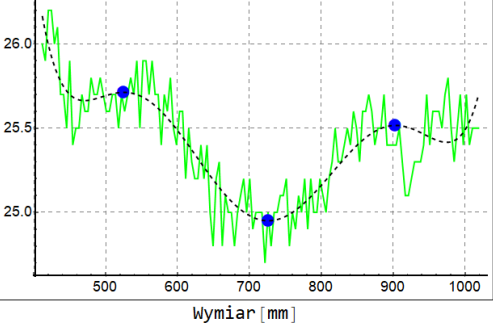
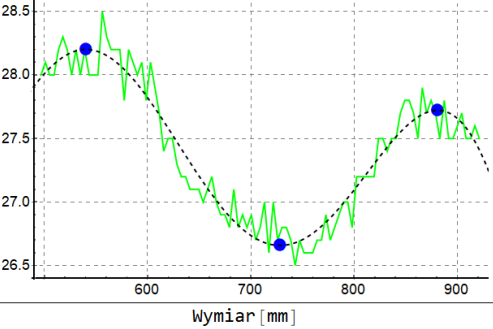
ZALĄCZNIKI

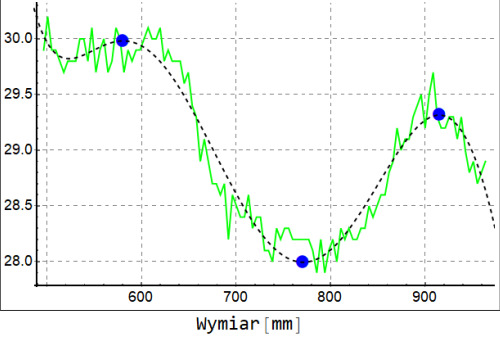
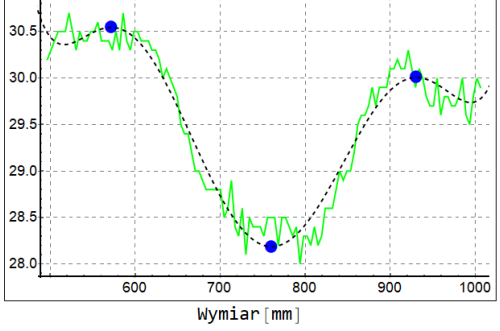
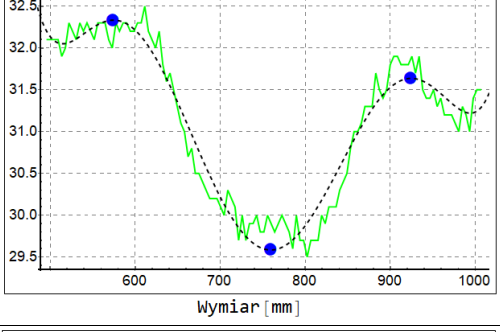
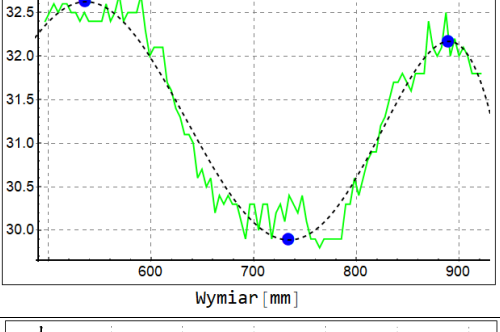
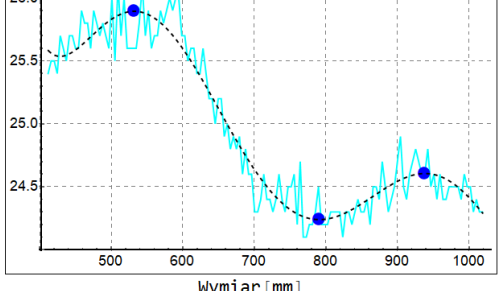
Załącznik A – wyniki analizy w programie Wolfram Mathematica 11

W tabeli przedstawiono szczegółowe wykresy z wzorem funkcji wielomianowych i współczynnikiem R^2 tych funkcji, dla obliczonych wartości głębokości zalegania i szerokości wtrąceń materiałowych zawartych w punkcie 7.1.4. Numeracja kolejnych wykresów odpowiada numeracji tabel z punktu 7.1.4. Przedstawiono jedynie wycinki wykresów całych profili (prowadzonych przez cały element), tj. obszary oznaczone szarym polem wg rys. 7.2b. W kolumnie drugiej niebieskimi punktami oznaczono charakterystyczne punkty maksymalne, minimalne lub punkty przegięcia funkcji.

1	2	3	4
Numeracja z punktu 7.1.4 (Tab.-LP)	Wykres wielomianu 6 rzędu (czarna linia przerywana)	Funkcja wielomianowa $f(x)$	Współczynnik dopasowania R^2
Tab.15-01		$f(x) = 5,666 + 0,353237 x - 0,00504754 x^2 + 0,000035007 x^3 - 1,24817 \cdot 10^{-7} x^4 + 2,20281 \cdot 10^{-10} x^5 - 1,52508 \cdot 10^{-13} x^6$	0.8198
Tab.15-02		$f(x) = -78,2165 + 3,22589 x - 0,0396389 x^2 + 0,000248316 x^3 - 8,32792 \cdot 10^{-7} x^4 + 1,41799 \cdot 10^{-9} x^5 - 9,58934 \cdot 10^{-13} x^6$	0,9669
Tab.15-03		$f(x) = -9,28299 + 1,35879 x - 0,0192664 x^2 + 0,000136957 x^3 - 5,12135 \cdot 10^{-7} x^4 + 9,6166 \cdot 10^{-10} x^5 - 7,14862 \cdot 10^{-13} x^6$	0,9539

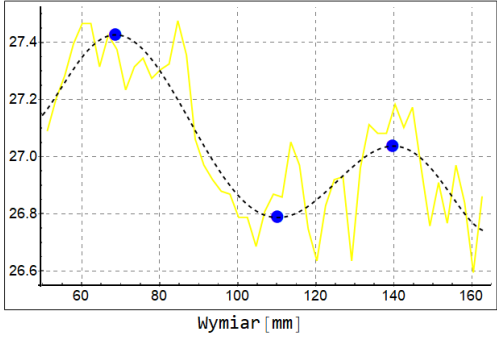
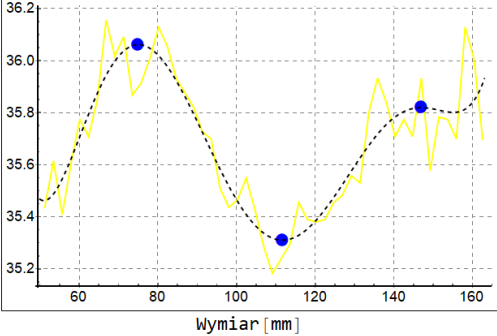
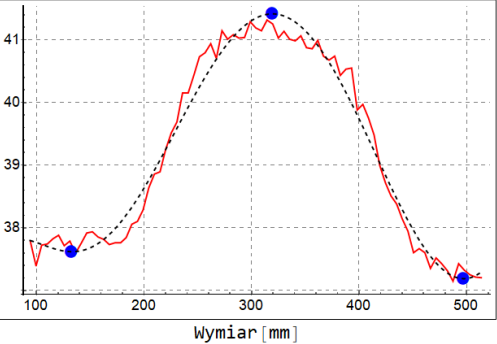
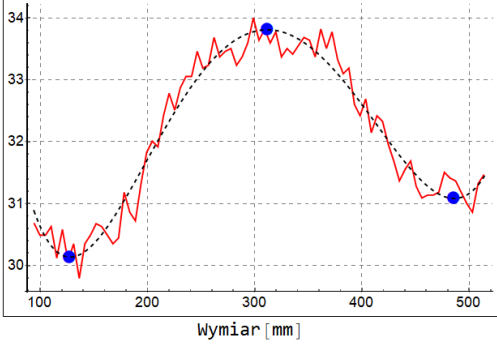
ZAŁĄCZNIKI

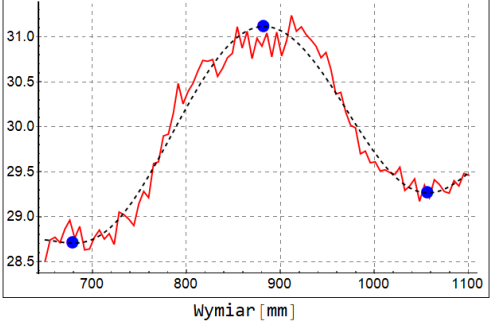
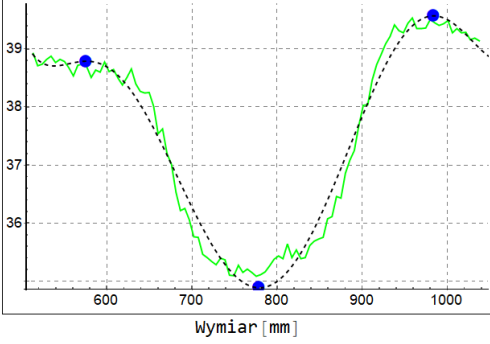
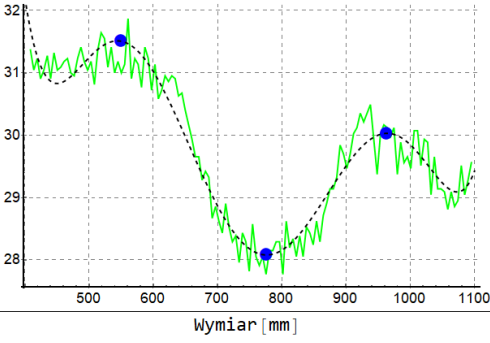
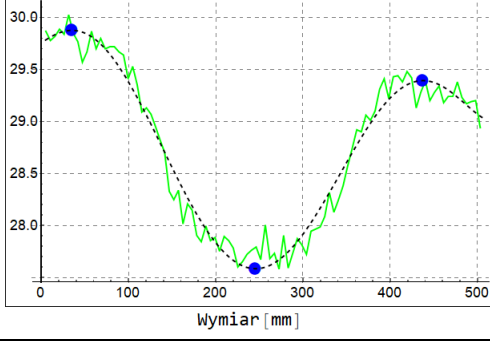
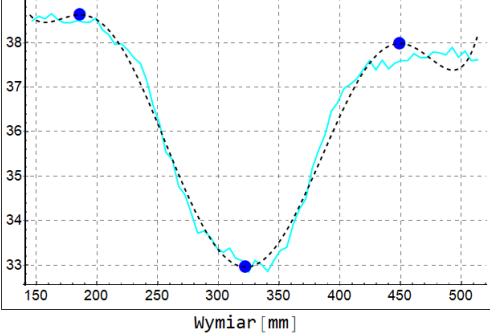
Tab.15-04		$f(x) = -10,0278 + 1,41369 x - 0,0203711 x^2 + 0,000147624 x^3 - 5,6329 \cdot 10^{-7} x^4 + 1,07889 \cdot 10^{-9} x^5 - 8,17266 \cdot 10^{-13} x^6$	0,9472
Tab.15-05		$f(x) = -213,816 + 7,818 x - 0,100947 x^2 + 0,000671914 x^3 - 2,42734 \cdot 10^{-6} x^4 + 4,52011 \cdot 10^{-9} x^5 - 3,40028 \cdot 10^{-12} x^6$	0,9649
Tab.15-06		$f(x) = -258,907 + 9,2932 x - 0,120468 x^2 + 0,000805545 x^3 - 2,92617 \cdot 10^{-6} x^4 + 5,48346 \cdot 10^{-9} x^5 - 4,15326 \cdot 10^{-12} x^6$	0,9309
Tab.15-07		$f(x) = 714,077 - 6,35469 x + 0,0239516 x^2 - 0,0000471447 x^3 + 5,11033 \cdot 10^{-8} x^4 - 2,89439 \cdot 10^{-11} x^5 + 6,69973 \cdot 10^{-15} x^6$	0,7468
Tab.15-08		$f(x) = 1106,32 - 10,1007 x + 0,0383118 x^2 - 0,0000753108 x^3 + 8,09361 \cdot 10^{-8} x^4 - 4,51196 \cdot 10^{-11} x^5 + 1,02013 \cdot 10^{-14} x^6$	0,9288

<p>Tab.15-09</p>		$f(x) = 3202,5 - 26,7725 x + 0,0924051 x^2 - 0,000166813 x^3 + 1,66008 \cdot 10^{-7} x^4 - 8,63296 \cdot 10^{-11} x^5 + 1,83267 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9428</p>
<p>Tab.15-10</p>		$f(x) = 4198,28 - 35,9943 x + 0,127399 x^2 - 0,000236435 x^3 + 2,42642 \cdot 10^{-7} x^4 - 1,3062 \cdot 10^{-10} x^5 + 2,88387 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9506</p>
<p>Tab.15-11</p>		$f(x) = 5185,76 - 44,5538 x + 0,157871 x^2 - 0,000293356 x^3 + 3,01492 \cdot 10^{-7} x^4 - 1,62564 \cdot 10^{-10} x^5 + 3,59561 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9487</p>
<p>Tab.15-12</p>		$f(x) = 1029,34 - 9,14045 x + 0,0334603 x^2 - 0,0000623722 x^3 + 6,21068 \cdot 10^{-8} x^4 - 3,1065 \cdot 10^{-11} x^5 + 6,0043 \cdot 10^{-15} x^6$	<p>0,9499</p>
<p>Tab.15-13</p>		$f(x) = 473,286 - 4,14204 x + 0,0154736 x^2 - 0,0000298583 x^3 + 3,14151 \cdot 10^{-8} x^4 - 1,71269 \cdot 10^{-11} x^5 + 3,78968 \cdot 10^{-15} x^6$	<p>0,9420</p>

ZAŁĄCZNIKI

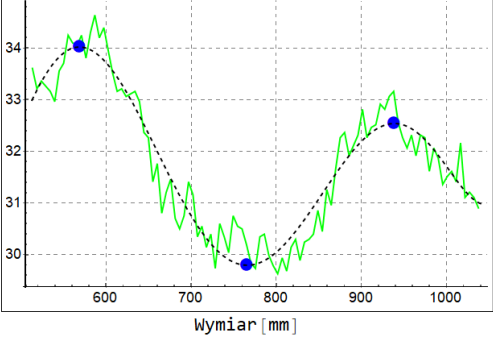
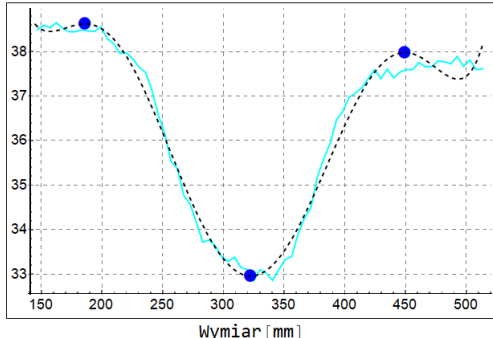
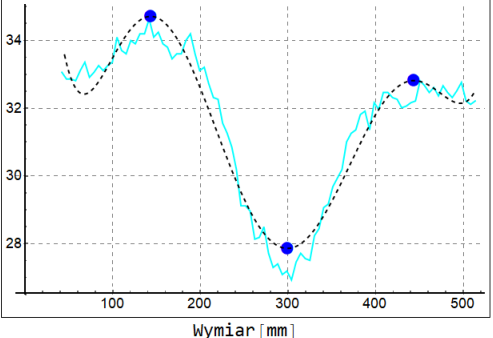
Tab.15-14		$f(x) = 1221,7 - 11,258 x + 0,0428513 x^2 - 0,0000843643 x^3 + 9,07623 \cdot 10^{-8} x^4 - 5,07123 \cdot 10^{-11} x^5 + 1,15254 \cdot 10^{-14} x^6$	0,9646
Tab.15-15		$f(x) = 1540,53 - 14,117 x + 0,0535281 x^2 - 0,00010535 x^3 + 1,1354 \cdot 10^{-7} x^4 - 6,36202 \cdot 10^{-11} x^5 + 1,45054 \cdot 10^{-14} x^6$	0,9828
Tab.15-16		$f(x) = 388,049 - 5,13478 x + 0,0248745 x^2 - 0,0000573912 x^3 + 6,90677 \cdot 10^{-8} x^4 - 4,19408 \cdot 10^{-11} x^5 + 1,01637 \cdot 10^{-14} x^6$	0,9827
Tab.15-17		$f(x) = 510,881 - 6,10749 x + 0,0278811 x^2 - 0,0000618044 x^3 + 7,20167 \cdot 10^{-8} x^4 - 4,24725 \cdot 10^{-11} x^5 + 1,00041 \cdot 10^{-14} x^6$	0,9810
Tab.15-18		$f(x) = -1998,5 + 16,1462 x - 0,0534872 x^2 + 0,000095272 x^3 - 9,68933 \cdot 10^{-8} x^4 + 5,34982 \cdot 10^{-11} x^5 - 1,25132 \cdot 10^{-14} x^6$	0,9821

<p>Tab.16-01</p>		$f(x) = 63,5793 - 2,72852 x + 0,0800109 x^2 - 0,00117467 x^3 + 9,15377 \cdot 10^{-6} x^4 - 3,61687 \cdot 10^{-8} x^5 + 5,70107 \cdot 10^{-11} x^6$	<p>0,7683</p>
<p>Tab.16-02</p>		$f(x) = 130,158 - 6,59347 x + 0,181748 x^2 - 0,0025379 x^3 + 0,0000190248 x^4 - 7,30101 \cdot 10^{-8} x^5 + 1,12695 \cdot 10^{-10} x^6$	<p>0,8130</p>
<p>Tab.17-01</p>		$f(x) = 30,1576 + 0,272143 x - 0,00356096 x^2 + 0,0000213363 x^3 - 6,1095 \cdot 10^{-8} x^4 + 8,18402 \cdot 10^{-11} x^5 - 4,12738 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9779</p>
<p>Tab.17-02</p>		$f(x) = 49,5911 - 0,421335 x + 0,0033051 x^2 - 0,0000119759 x^3 + 2,33013 \cdot 10^{-8} x^4 - 2,52828 \cdot 10^{-11} x^5 + 1,25891 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9589</p>

<p>Tab.17-03</p>		$f(x) = -9109,11 + 66,4057 x - 0,198597 x^2 + 0,000312734 x^3 - 2,73449 \cdot 10^{-7} x^4 + 1,25901 \cdot 10^{-10} x^5 - 2,38562 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9659</p>
<p>Tab.17-04</p>		$f(x) = 5542,66 - 45,9523 x + 0,157048 x^2 - 0,000280979 x^3 + 2,77444 \cdot 10^{-7} x^4 - 1,43394 \cdot 10^{-10} x^5 + 3,03298 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9777</p>
<p>Tab.17-05</p>		$f(x) = 1466,91 - 12,9633 x + 0,0474202 x^2 - 0,0000899033 x^3 + 9,32047 \cdot 10^{-8} x^4 - 5,01765 \cdot 10^{-11} x^5 + 1,09811 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9333</p>
<p>Tab.17-06</p>		$f(x) = 29,7558 + 0,00585809 x - 0,000030904 x^2 - 1,36286 \cdot 10^{-6} x^3 + 8,85047 \cdot 10^{-9} x^4 - 1,85572 \cdot 10^{-11} x^5 + 1,28785 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9677</p>
<p>Tab.17-07</p>		$f(x) = 314,659 - 6,6365 x + 0,0633328 x^2 - 0,000305605 x^3 + 7,84639 \cdot 10^{-7} x^4 - 1,02058 \cdot 10^{-9} x^5 + 5,28752 \cdot 10^{-13} x^6$	<p>0,9839</p>

Tab.17-08		$f(x) = 267,62 - 5,57341 x + 0,0521554 x^2 - 0,000247404 x^3 + 6,26491 \cdot 10^{-7} x^4 - 8,05892 \cdot 10^{-10} x^5 + 4,13773 \cdot 10^{-13} x^6$	0,9648
Tab.17-09		$f(x) = 173,723 - 3,47541 x + 0,0330251 x^2 - 0,000158777 x^3 + 4,06991 \cdot 10^{-7} x^4 - 5,29607 \cdot 10^{-10} x^5 + 2,75023 \cdot 10^{-13} x^6$	0,9779
Tab.18-01		$f(x) = 30,1576 + 0,272143 x - 0,00356096 x^2 + 0,0000213363 x^3 - 6,1095 \cdot 10^{-8} x^4 + 8,18402 \cdot 10^{-11} x^5 - 4,12738 \cdot 10^{-14} x^6$	0,9779
Tab.18-02		$f(x) = 31,3609 + 0,0393745 x - 0,000519253 x^2 + 4,00514 \cdot 10^{-6} x^3 - 1,30414 \cdot 10^{-8} x^4 + 1,75105 \cdot 10^{-11} x^5 - 7,74199 \cdot 10^{-15} x^6$	0,9379
Tab.18-03		$f(x) = 5542,66 - 45,9523 x + 0,157048 x^2 - 0,000280979 x^3 + 2,77444 \cdot 10^{-7} x^4 - 1,43394 \cdot 10^{-10} x^5 + 3,03298 \cdot 10^{-14} x^6$	0,9777

ZAŁĄCZNIKI

<p>Tab.18-04</p>		$f(x) = 3017,04 - 27,1726 x + 0,100144 x^2 - 0,000191399 x^3 + 2,00365 \cdot 10^{-7} x^4 - 1,09134 \cdot 10^{-10} x^5 + 2,42117 \cdot 10^{-14} x^6$	<p>0,9153</p>
<p>Tab.18-05</p>		$f(x) = 314,659 - 6,6365 x + 0,0633328 x^2 - 0,000305605 x^3 + 7,84639 \cdot 10^{-7} x^4 - 1,02058 \cdot 10^{-9} x^5 + 5,28752 \cdot 10^{-13} x^6$	<p>0,9839</p>
<p>Tab.18-06</p>		$f(x) = 50,9284 - 0,762246 x + 0,0112336 x^2 - 0,0000734455 x^3 + 2,31857 \cdot 10^{-7} x^4 - 3,48298 \cdot 10^{-10} x^5 + 2,00186 \cdot 10^{-13} x^6$	<p>0,9421</p>

Załącznik B – wartości ekstremów funkcji wg załącznika A

W tabeli przedstawiono wartości obliczonych argumentów charakterystycznych punktów funkcji zawartych w załączniku A (niebieskie punkty), dla których obliczono szerokości wtrąceń materiałowych zawartych w punkcie 7.1.4. Numeracja kolejnych wykresów odpowiada numeracji tabel z punktu 7.1.4.

LP	Lprzeięcie	Lmin/max	PŚ	Pmin/max	Pprzeięcie	Lwymiar	Pwymiar
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Tab.15-01	brak	132,056	254,335	345,020	brak	61,140	45,343
Tab.15-02	135,930	brak	239,183	305,979	brak	51,627	33,398
Tab.15-03	110,835	brak	232,565	317,035	brak	60,865	42,235
Tab.15-04	109,418	brak	224,915	309,881	brak	57,749	42,483
Tab.15-05	134,637	brak	226,173	296,457	brak	45,768	35,142
Tab.15-06	134,638	brak	224,137	289,816	brak	44,750	32,840
Tab.15-07	brak	525,427	726,126	903,386	brak	100,350	88,630
Tab.15-08	brak	540,281	728,250	880,788	brak	93,985	76,269
Tab.15-09	brak	580,738	770,979	914,863	brak	95,121	71,942
Tab.15-10	brak	571,956	760,430	930,724	brak	94,237	85,147
Tab.15-11	brak	574,592	759,557	924,562	brak	92,483	82,503
Tab.15-12	brak	536,335	734,342	890,039	brak	99,004	77,849
Tab.15-13	brak	532,078	790,872	938,433	brak	129,397	73,781
Tab.15-14	brak	544,233	762,195	919,739	brak	108,981	78,772
Tab.15-15	brak	524,815	749,889	906,008	brak	112,537	78,060
Tab.15-16	brak	533,513	747,314	909,750	brak	106,901	81,218
Tab.15-17	brak	535,405	753,554	920,821	brak	109,075	83,634
Tab.15-18	brak	531,318	754,520	909,434	brak	111,601	77,457
Tab.16-01	brak	68,693	110,253	139,856	brak	20,780	14,802
Tab.16-02	brak	75,051	111,711	146,983	brak	18,330	17,636
Tab.17-01	brak	133,056	319,360	497,376	brak	93,152	89,008
Tab.17-02	brak	127,750	311,767	486,070	brak	92,009	87,152
Tab.17-03	brak	679,702	882,585	1057,050	brak	101,442	87,233
Tab.17-04	brak	576,093	779,335	984,084	brak	101,621	102,375
Tab.17-05	brak	544,033	776,283	964,07	brak	116,125	93,894
Tab.17-06	brak	35,295	245,718	437,482	brak	105,212	95,882

ZAŁĄCZNIKI

Tab.17-07	brak	185,998	322,529	449,419	brak	68,266	63,445
Tab.17-08	brak	194,685	322,421	452,797	brak	63,868	65,188
Tab.17-09	brak	194,247	320,166	454,693	brak	62,960	67,264
Tab.18-01	brak	133,056	319,360	497,376	brak	93,152	89,008
Tab.18-02	71,748	brak	291,203	474,824	brak	109,728	91,811
Tab.18-03	brak	576,093	779,335	984,084	brak	101,621	102,375
Tab.18-04	brak	568,772	765,940	938,804	brak	98,584	86,432
Tab.18-05	brak	185,998	322,529	449,419	brak	68,266	63,445
Tab.18-06	brak	143,321	299,358	443,552	brak	78,019	72,097