

INSTYTUT KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN  
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Raport Serii PREPRINTY Nr 006/06

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Damian Derlukiewicz

**METODA MODELOWANIA  
ZJAWISK TERMOSPREŻYSTYCH  
W WARSTWOWYCH  
POWŁOKACH CERAMICZNYCH**

Promotor:

*Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Rusiński*

Wrocław 2006

## SPIS TREŚCI

<b>1. WPROWADZENIE.....</b>	<b>4</b>
1.1. ZARYS PROBLEMATYKI .....	4
1.2. OBSZAR KONCENTRACJI BADAŃ.....	8
<b>2. MATERIAŁY CERAMICZNE.....</b>	<b>9</b>
2.1. POWŁOKI STANOWIĄCE BARIERY TERMICZNE .....	13
2.2. TLENEK CYRKONU .....	23
2.3. NATRYSKIWANIE CIEPLNE.....	27
2.3.1. <i>Natryskiwanie plazmowe</i> .....	29
<b>3. ANALIZA POWŁOKI CERAMICZNEJ STANOWIĄCEJ BARIERĘ TERMICZNĄ.....</b>	<b>31</b>
3.1. MECHANIZMY ZUŻYCIA POWŁOK CERAMICZNYCH STANOWIĄCYCH BARIERĘ TERMICZNE ....	39
<b>4. PRZEGLĄD ISTNIEJĄCYCH METOD WYZNACZANIA TEMPERATURY.....</b>	<b>46</b>
4.1. METODY ANALITYCZNE .....	49
4.2. METODY DOŚWIADCZALNE .....	60
4.2.1. <i>Pomiary za pomocą termoelementów</i> .....	61
4.2.2. <i>Pomiary temperatury za pomocą termowizji</i> .....	61
4.3. METODY NUMERYCZNE.....	66
4.3.1. <i>Metoda bilansów elementarnych</i> .....	66
4.3.2. <i>Metoda elementów skończonych</i> .....	67
4.3.3. <i>Metoda elementów brzegowych</i> .....	67
4.3.4. <i>Metoda Monte Carlo</i> .....	68
4.3.5. <i>Postulaty metod numerycznych</i> .....	69
<b>5. PRZEGLĄD METOD OCENY STANU WYŁĘŻENIA POWŁOK CERAMICZNYCH PODDANYCH OBCIĄŻENIOM CIEPLNYM.....</b>	<b>72</b>
5.1. KRYTERIA ZNISZCZENIA MATERIAŁU.....	73
5.2. OCENA STANU WYŁĘŻENIA MATERIAŁU .....	74
5.3. WYBRANE METODY OCENY STANU WYŁĘŻENIA POWŁOK TBC PODDANYCH OBCIĄŻENIOM CIEPLNYM .....	82
5.3.1. <i>Ocena stanu wyłężenia na podstawie zmian własności wytrzymałościowych materiałów</i> .....	82
5.3.2. <i>Doświadczalne metody oceny stanu wyłężenia</i> .....	83
5.3.3. <i>Pomiary odkształceń za pomocą tensometrii</i> .....	91
5.4. OCENA POWŁOK CERAMICZNYCH PODDANYCH OBCIĄŻENIOM CIEPLNYM.....	95
<b>6. PODSTAWY MODELOWANIA OBCIĄŻEŃ CIEPLNYCH W TEORII SPRĘŻYSTOŚCI.....</b>	<b>97</b>
6.1. PRZEWODNICTWO CIEPŁA W UJĘCIU MES .....	98
6.2. WYŁĘŻENIE OBIEKTU W POLU TEMPERATURY .....	104
6.3. WPLYW ZALEŻNOŚCI PARAMETRÓW MATERIAŁOWYCH OD TEMPERATURY NA WYNIKI ROZWIĄZANIA ZAGADNIENIA NAPRĘŻEŃ CIEPLNYCH .....	109
<b>7. PRZEGLĄD NUMERYCZNYCH METOD MODELOWANIA WARSTW TBC.....</b>	<b>111</b>
7.1. MODELOWANIE MIKROSTRUKTURY CERAMIKI .....	111
7.1.1. <i>Modele dwuwymiarowe</i> .....	112
7.1.2. <i>Modele trójwymiarowe</i> .....	113
7.2. MODELOWANIE POWŁOK CERAMICZNYCH STANOWIĄCYCH BARIERĘ TERMICZNE.....	118
7.2.1. <i>Modelowanie warstwowych powłok ceramicznych typu „duplex”</i> .....	120
7.2.2. <i>Modelowanie warstwowych powłok ceramicznych – stopniowe (gradientowe)</i> .....	129
7.3. SYMULACJA NUMERYCZNA BADANIA ODPORNOŚCI NA SZOK TERMICZNY .....	131

<b>8. CEL, ZAKRES I TEZA PRACY .....</b>	<b>134</b>
<b>9. NUMERYCZNO – DOŚWIADCZALNA METODYKA MODELOWANIA WARSTWOWYCH POWŁOK CERAMICZNYCH PODDANYCH OBCIĄŻENIOM CIEPLNYM.....</b>	<b>136</b>
9.1. ANALIZA TERMICZNA .....	141
9.2. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA.....	147
<b>10. NUMERYCZNE MODELOWANIE POWŁOK CERAMICZNYCH PODDANYCH OBCIĄŻENIOM CIEPLNYM.....</b>	<b>154</b>
10.1. MODELE DYSKRETNE POWŁOKI TBC .....	154
10.2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW POWŁOKI TBC.....	172
10.2.1. Charakterystyka podłoża – Stopu Aluminium AA 1100.....	172
10.2.2. Charakterystyki warstw – BC i TBC.....	172
10.3. WYZNACZANIE PRZESTRZENNEGO POLA TEMPERATURY – ANALIZA TERMICZNA .....	175
10.3.1. Warunki brzegowe.....	176
10.3.2. Wyniki analizy termicznej.....	177
10.4. ANALIZA WYTRZYMAŁOŚCIOWA.....	181
10.4.1. Wyniki analizy wytrzymałościowej.....	182
10.5. OCENA WPLYWU MIKROPEKNIĘĆ NA ROZKŁAD TEMPERATURY .....	191
<b>11. BADANIA EKSPERYMENTALNE POWŁOK CERAMICZNYCH PODDANYCH OBCIĄŻENIOM CIEPLNYM.....</b>	<b>194</b>
11.1. PRÓBKI PRZEZNACZONE DO BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH.....	195
11.1.1. Dane producenta proszku – firmy H.C. Starck.....	196
11.2. BADANIA METALOGRAFICZNE PRÓBEK Z POWŁOKAMI TBC .....	197
11.2.1. Próbka nr 1.....	199
11.2.2. Próbka nr 2.....	200
11.2.3. Próbka nr 3.....	201
11.2.4. Próbka nr 4.....	202
11.3. STANOWISKO BADAWCZE.....	203
11.4. BADANIA EKSPERYMENTALNE – PRÓBY NA WYBRANYCH PRÓBKACH .....	209
11.4.1. Próba 1 – proces nagrzewania – czas 180s, chłodzenie 90s.....	211
11.4.2. Próba 2 – proces nagrzewania – czas 30s, chłodzenie 60s.....	214
11.4.3. Próba 3 – proces nagrzewania – czas 30s, chłodzenie 30s.....	217
11.4.4. Próba 4 – proces nagrzewania do temperatury 673K, chłodzenie do temperatury 323K.....	220
11.4.5. Próba 5 – proces nagrzewania – czas 30s, chłodzenie 30s bez chłodzenia z tyłu próbki .....	223
11.4.6. Próba 6 – nagrzewania do temperatury 673K bez chłodzenia, chłodzenie do temperatury 323K dla próbki 4 .....	224
11.4.7. Próba 7 – temperatura płomienia dla warstwy wierzchniej.....	225
11.4.8. Porównanie temperatur wybranych prób podczas nieustannego chłodzenia powietrzem lub wodą dla próbki 4 .....	226
11.5. BŁĄD POMIARÓW TEMPERATURY.....	227
<b>12. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE .....</b>	<b>228</b>
<b>13. KIERUNKI DAJSZYCH BADAŃ .....</b>	<b>230</b>
<b>14. LITERATURA.....</b>	<b>231</b>

## **1. Wprowadzenie**

Podczas projektowania wielu urządzeń i maszyn projektanci starają się szukać wielu rozwiązań pozwalających na polepszenie jakości, trwałości oraz sprawności zarówno istniejących obiektów, jak i tych w fazie projektowania. Przykładem może tu być problem zużycia powierzchni roboczej części maszyn i urządzeń, który wiąże się z pogorszeniem się jego własności użytkowych. Zużycie to spowodowane może być wieloma różnymi procesami fizycznymi i chemicznymi występującymi w czasie eksploatacji. Jednym z najczęstszych przypadków, w wyniku którego powierzchnie robocze ulegają zużyciu bądź uszkodzeniu jest zużycie pod wpływem wysokich temperatur. Jednym z rozwiązań w celu ochrony powierzchni elementów przed działaniem wysokich temperatur jest zastosowanie powłok ceramicznych uzyskanych poprzez naniesienie ich procesem cieplnym na powierzchnie robocze elementów maszyn i urządzeń. Powłokami ochronnymi w przypadku działania stałych i zmiennych pól temperatur mogą być powłoki stanowiące bariery termiczne.

Jednym z ważniejszych etapów podczas projektowania powłok ceramicznych na pokrycia elementów maszyn i urządzeń jest ocena ich wyężenia podczas ich eksploatacji. Działanie stałych i zmiennych pól temperatur powoduje powstanie deformacji i naprężeń zwanych w literaturze jako naprężenia cieplne [13], [53], [63], [64] i [65]. Wywołane naprężenia cieplne w powłokach ceramicznych mogą wpłynąć na ich trwałość, jak również mają decydujące znaczenie w jakości pracy tych powłok. Stąd też, bardzo ważne jest poprawne określenie stanów ich wyężenia przy obciążeniach cieplnych [16], [63] i [65]. Proces ten jest bardziej skomplikowany ze względu na złożoną strukturę powłok w skali mikro oraz brak dokładnego doświadczalnego wyznaczenia temperatur w samej warstwie ceramicznej. Ponadto złożoność struktury powłoki komplikuje w znacznym stopniu to zagadnienie ze względu na wpływ jaki ma ona na pole temperatury.

### **1.1. Zarys problematyki**

Zagadnieniami związanymi ściśle z problematyką oceny stanu wyężenia elementów z naniesionymi powłokami ceramicznymi poddanych obciążeniom cieplnym jest:

- wymiana ciepła,
- przedstawienie przestrzennego pola temperatury badanych powłok ceramicznych poprzez zastosowanie numerycznych metod obliczeniowych,



- wytrzymałość materiałów, ze szczególnym uwzględnieniem obciążeń pochodzących od przestrzennego pola temperatury,
- doświadczalne metody pomiaru temperatury potrzebne do definicji przestrzennego pola temperatury,
- metody oceny odporności na szok termiczny elementów z powłokami ceramicznymi.

Warunkiem koniecznym prawidłowej oceny stanu odkształceń i naprężeń elementów pokrytych powłokami ceramicznymi obciążonych cieplnie jest określenie rzeczywistego, przestrzennego rozkładu temperatury w całej objętości obiektu. Wynika on bezpośrednio ze zjawisk związanych z wymianą ciepła. Większość monografii zajmujących się wymianą ciepła w ustrojach nośnych, przedstawia tę problematykę w ujęciu analitycznym. Analityczne metody obliczeniowe omawiają problematykę opisu pola temperatury w dowolnych układach fizycznych. Pozwalają one na rozwiązanie zagadnienia ustalonego i nieustalonego przepływu ciepła [37].

Wśród wielu prac naukowych podejmujących problematykę wymiany ciepła na szczególną uwagę zasługuje monografia J. Madejskiego [53], w której wnikliwie omówione zostały zasadnicze działy dotyczące całokształtu szeroko rozumianych zagadnień wymiany ciepła. Autor ograniczył się przede wszystkim do prezentacji podstawowych teorii i mechanizmów występujących podczas wymiany ciepła. Z punktu widzenia inżynierskiego, przedstawione są tu elementarne zagadnienia wymiany ciepła oraz mechanizmy wymiany ciepła w ustrojach nośnych. Opisane są również metody rozwiązywania zadań dla stacjonarnego i niestacjonarnego przepływu ciepła, co jest bardzo pomocne przy analizach rozkładu temperatury w dowolnych układach. Jednakże autor opiera się głównie na analitycznym ujęciu zagadnień, przez co nie podaje zastosowań praktycznych dla złożonych obiektów konstrukcyjnych.

Podobne ujęcie problematyki wymiany ciepła można zauważyć w pracy [93], która również porusza problematykę wymiany ciepła, jednakże w przeciwieństwie do opracowania [53], teoria dość szeroko poparta jest przykładami obliczeniowymi. Autorzy w praktyczny sposób przedstawiają podstawowe prawa przewodzenia ciepła w stanach ustalonych i nieustalonych. Oprócz analitycznych rozważań, przedstawiają numeryczne metody rozwiązywania zagadnień ustalonego i nieustalonego przepływu ciepła. Analizując proste przykłady fizyczne ilustrują możliwości opisu przestrzennego pola temperatury dla rzeczywistych obiektów. Praktyczne ujęcie zastosowania zarówno numerycznych, jak i analitycznych metod opisu pola temperatury można znaleźć w opracowaniach [13] i [47].

Oprócz wcześniej opisanych zagadnień, wiele uwagi autor poświęcił promieniowaniu cieplnemu oraz wymiennikom ciepła. Przedstawione metody obliczeniowe, między innymi zastosowanie metody elementów skończonych, poparte są tabelami i wykresami wielu współczynników niezbędnych przy obliczeniach inżynierskich. Zawarte przykłady obliczeniowe prostych geometrycznie obiektów fizycznych stanowią podstawę do rozwiązywania bardziej złożonych obiektów fizycznych.

Wiele prac naukowych podejmuje wybiórczo niektóre zjawiska wymiany ciepła. Najpowszechniejszy sposób wymiany ciepła jakim jest przewodzenie ciepła, zostało szerzej zaprezentowane w opracowaniach [11], [13], [65] i [72]. Podobnie w pracach [37], [47] i [53] przedstawiono metody wyznaczania temperatury w obiektach, w których transport ciepła odbywa się poprzez promieniowanie cieplne. W szczególności E. Kostowski w swojej monografii [47] rozpatruje metody wyznaczania stosunków konfiguracji mające decydujący wpływ na przepływ ciepła, podczas promieniowania pomiędzy dowolnie umieszczonymi powierzchniami w przestrzeni.

Bardzo szerokie ujęcie mechanizmów wymiany ciepła, w pewnym stopniu zawęża sposób ich przedstawienia do bardzo elementarnych przykładów obliczeniowych. W monografii S. Dobrocińskiego [13] opisane są podstawy wyznaczania pola temperatury nie tylko metodami analitycznymi, ale również poprzez zastosowanie komputerowych metod obliczeniowych. Wykorzystanie metody elementów skończonych, której podstawy przedstawione są w [7], [45], [60], [74], [75], [78], [78], [93] i [112] pozwoliło w niniejszej pracy określić rozkład przestrzennego pola temperatury w badanych obiektach o stosunkowo prostej budowie geometrycznej.

Mając na uwadze złożoność procedur obliczeniowych, została zaprezentowana metoda minimalizacji zadania poprzez zastosowanie płaskich lub osiowosymetrycznych modeli obliczeniowych. Przedstawiona została również problematyka naprężeń cieplnych w przypadku dużych gradientów temperatury. W pracy przedstawiono analizę porównawczą wpływu parametrów materiałowych zależnych od temperatury na wynik rozwiązania zagadnienia naprężeń cieplnych. Przytoczone przykłady liczbowe ograniczają się jednak do stosunkowo prostych geometrycznie obiektów.

Przedstawieniu przestrzennego pola temperatury obiektu oraz wynikających z tego naprężeń, poświęcona jest praca [65]. Podjęto w niej problematykę naprężeń cieplnych poprzez teoretyczne analizy stanu odkształcenia i naprężenia obiektów poddanych obciążeniom cieplnym. Omówiono także związki liniowej teorii sprężystości przy zastosowaniu metody elementów skończonych. Interesującą częścią opracowania

są rozdziały dotyczące badań doświadczalnych pola temperatury oraz analiz odkształceń i naprężeń cieplnych. Zbieżność przedstawionych wyników badań i obliczeń numerycznych dla prostych układów geometrycznych pozwalają sądzić, że możliwe jest opracowanie metodyki prowadzenia analiz wytrzymałościowych dla obiektów o złożonej postaci geometrycznej.

Metodyka i podstawy badań doświadczalnych niezbędne do weryfikacji obliczeń numerycznych występują w wielu opracowaniach. W zależności od typu obiektów przykładem może praca [109], w której podjęta została problematyka pomiarów temperatury w silnikach i urządzeniach cieplnych, jak również [4] i [18] w których zaprezentowano oprócz podstawowych metod pomiaru temperatury również sposoby pomiaru strumieni ciepła a także własności cieplnych materiału, jak przewodność.

W ostatnich latach nastąpił szybki rozwój technik komputerowych i równocześnie numerycznych metod obliczeniowych. Pozwoliło to na ich zastosowanie przy rozwiązywaniu zagadnień oceny wyężenia różnych konstrukcji rzeczywistych poddanych obciążeniom cieplnym. Stąd też pojawiło się wiele artykułów i prac naukowych, jak [14], [15], [25], [39], [45], [51], [61], [70], [74], [76] i [96], które potwierdzają przydatność zastosowania numerycznych metod obliczeniowych w zagadnieniach wyznaczania naprężeń cieplnych.

Największą grupę prac naukowych stanowią opracowania podejmujące tematykę oceny stanu wyężenia powłok ceramicznych stanowiących bariery termiczne, eksploatowanych w przemyśle lotniczym i samochodowym. Należy do nich zaliczyć publikacje [8], [10], [17], [27], [32], [33], [34], [42], [48], [51], [61], [98] i [102]. Głównymi elementami poddanymi weryfikacji są tu konstrukcje łopatek turbin gazowych oraz elementy silników spalinowych jak denka tłoków oraz zawory.

Analiza wytrzymałościowa badanych obiektów z powłokami ceramicznymi obciążonych cieplnie wymaga znajomości wszelkich własności analizowanego obiektu, w tym znajomości własności materiałów obiektu jak i powłoki. Stąd też obecność tego zagadnienia w literaturze jest również szeroko rozpatrywana. Począwszy od podstaw nauki o materiałach ceramicznych w opracowaniach [1], [9], [35], [44], [68], [72] i [89], aż do oceny własności mechanicznych w [1], [29], [44] i [72].

Analizując literaturę poświęconą tematyce wyężenia elementów pokrytych powłokami ceramicznymi poddanych obciążeniom cieplnym można zauważyć, że jest wiele prac podejmujących tę tematykę. Przedstawiają one analityczne podstawy obliczeń naprężeń cieplnych oraz przykłady obliczeń na elementarnych obiektach o niezłożonej

postaci geometrycznej w porównaniu do rzeczywistej złożoności obiektu, jakim jest powłoka ceramiczna. Uwzględnienia budowy struktury w wielu przypadkach są bardzo uproszczone, bądź nawet wyidealizowane. Opis stanu wyężenia opisany jest wyłącznie w układzie dwuwymiarowym.

*Dlatego nie można znaleźć metodyki opisu przestrzennego pola temperatury dla powłok ceramicznych o złożonej strukturze, szczególnie w przypadku nieustalonych warunków przepływu ciepła. Tym samym brak jest przykładów analizy wyężenia powłok ceramicznych obciążonych zmiennym przestrzennym polem temperatury.*

## 1.2. Obszar koncentracji badań

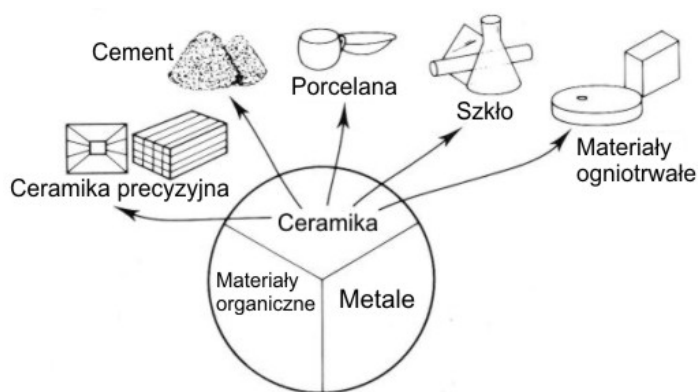
Powłoki ceramiczne w zależności od zastosowanego materiału cechują się różnymi parametrami decydującymi o ich zastosowaniu. W dalszej części pracy zostało dokładnie omówione ich zastosowanie związane szczególnie z ich składem materiałowym. Ze względu na charakter pracy badania koncentrują się głównie na powłokach ceramicznych stanowiących bariery termiczne w silnikach spalinowych i silnikach odrzutowych.

Należy podkreślić, iż jednym z najważniejszych elementów podczas weryfikacji wytrzymałościowej powłok ceramicznych jest poprawne przedstawienie rozkładu temperatury w całym badanym obiekcie zarówno w powłoce jak i w podłożu. Wyznaczenie rozkładu temperatury i stanu wyężenia można przeprowadzić różnymi metodami. Wybór metody stymuluje stopień złożoności obiektu. O ile w przypadku obiektów o nieskomplikowanej geometrii metody analityczne pozwalają na uzyskanie dokładnych wyników, to w przypadku powłok ceramicznych o złożonej strukturze, przedstawienie przestrzennego rozkładu temperatury, biorąc pod uwagę ilość czynników wpływających na określony stan cieplny tejże konstrukcji, staje się zadaniem bardzo trudnym.

Problematyka wpływu obciążeń cieplnych na stan wyężenia elementów pokrytych powłokami ceramicznymi stanowiącymi bariery termiczne w przemyśle samochodowym i lotniczym, ukazuje jak istotne jest opracowanie metodyki poprawnego wyznaczania przestrzennego pola temperatury oraz stanu ich wyężenia.

## 2. Materiały ceramiczne

Ceramika jest materiałem towarzyszącym rozwojowi cywilizacyjnemu praktycznie od jego początku, czyli okresu neolitu [62]. Na podstawie wykopalisk przyjmuje się, że najwcześniej ceramikę wytwarzano na Bliskim Wschodzie ok. 8300 lat przed naszą erą. Do Europy ceramika dotarła w końcu VII i na początku VI wieku p.n.e., a do terenu dzisiejszej Polski ok. 4500 lat p.n.e.. Do produkcji ceramiki wykorzystywano wówczas surowce występujące w przyrodzie, takie jak glina, kwarc, skalenie i kaolin. Zastosowanie ceramiki i jej udział w produkcji przedstawia rysunek 2.1.



Rys. 2.1. Ceramika jeden z trzech głównych produktów [35].

Materiały ceramiczne może nie są tak odporne na obciążenia dynamiczne jak metale [6], ale ich odporność na korozję, zużycie ściernie, rozpad i rozkład jest bezkonkurencyjna. Wiele zastosowań ceramiki bazuje na ich wyjątkowych właściwościach fizycznych i termicznych. Na przykład płytki chroniące statek kosmiczny wymagają ultralekkiej wagi, wysokiej wytrzymałości na temperaturę, wysokiej wytrzymałości na szok termiczny oraz niskiej przewodności cieplnej. Gęstość i temperatura topnienia są właściwościami również bardzo ważnymi. Przewodność ciepła jest właściwością termiczną a odporność na szok termiczny jest połączeniem właściwości termicznych i mechanicznych [1] i [60]. Właściwości fizyczne, które określają w większym stopniu zastosowanie i funkcjonalność materiałów ceramicznych są tymi właściwościami zależnymi bezpośrednio od zmian temperatury. Te właściwości są ważne dla wszystkich materiałów ceramicznych bez względu na ich użycie, np. dla zastosowań jako izolacja termiczna lub do pracy w warunkach gdzie odporność na naprężenia termiczne jest wymagana, są nawet krytyczne. W projektowaniu bardzo ważna jest wiedza na temat odpowiednich właściwości materiału zanim się go zastosuje. Należy być ostrożnym w doborze odpowiedniego materiału ze względu na to, że niektóre materiały mogą mieć dobre właściwości podczas podgrzewania a złe, gdy brana

pod uwagę jest korozja czy ciśnienie. Zawsze powinien być wybierany materiał, który spełnia odpowiednie warunki pracy przy rozsądnych kosztach. W ciągu ostatnich lat w dziedzinie inżynierii materiałów ceramicznych nastąpił niezwykle postęp.

Ceramika oraz kompozyty ceramiczne charakteryzują się szczególnymi właściwościami, takimi jak:

- żaroodporność,
- izolacja cieplna,
- izolacja elektryczna,
- odporność na erozję,
- odporność na tarcie,
- odporność na działanie środowisk agresywnych chemicznie,
- biotolerancja.

Własności te sprawiają, że następuje ciągła ekspansja tych materiałów w wielu dziedzinach techniki. Konstruktorzy coraz częściej wykorzystują ceramikę jako materiał w procesie projektowania nowoczesnych wyrobów. Ceramika oraz kompozyty z jej udziałem uważane są przez wielu naukowców jako materiały konstrukcyjne XXI wieku [1], [60] i [44]. Opracowano ceramiki o tak korzystnych właściwościach, że w wielu zastosowaniach mogą one zastąpić metale a nawet być od nich lepsze. Zastosowanie tych materiałów do produkcji narzędzi pozwala zwiększyć prędkość skrawania oraz poprzez swoją wysoką twardość umożliwić skrawanie tak trudnych materiałów do obróbki jak żeliwa i skały. Ceramika odgrywa ważną rolę w aspekcie potrzeb ochrony środowiska. Ceramika pomaga zredukować zanieczyszczenia, wychwytywać toksyczne materiały i hermetyzować odpady nuklearne. Stosuje się ją w produkcji elementów silników spalinowych współpracujących ze sobą ciernie, elementów pracujących w warunkach wysokiej temperatury (tłoki, cylindry, popychacze) oraz elementów katalizatora wspomagających przemianę szkodliwych węglowodorów i tlenku węgla w nieszkodliwy dwutlenek węgla i wodę.

Te wyjątkowe własności ceramiki skłoniły naukowców z Japonii do zbudowania prototypu silnika, w którym tłoki i cylindry wyprodukowano z ceramiki (azotek krzemu  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [60]). Z kolei amerykańska firma TACOM zbudowała prototyp silnika, w którym komora spalania została wykonana z ceramiki  $\text{ZrO}_2$ , dzięki czemu silnik nie musi być wyposażony w układ chłodzenia, co podnosi jego sprawność (tzw. silnik adiabatyczny).

Podobnie jak metale, ceramiki mają wiele odmian. Należy jednak pamiętać, że podstawy właściwości różnych materiałów ceramicznych są takie same. Cechą wspólną materiałów ceramicznych jest ich kruchość, która decyduje o sposobie ich wykorzystania.

Ceramika poprzez różnorodność kompozycji ma olbrzymie spektrum zastosowań.

Ze względu na zastosowanie ceramikę można podzielić na następujące grupy:

- ceramika gospodarcza (naczynia, porcelana stołowa, wazon, doniczki),
- ceramika sanitarna (miski, umywalki, blaty),
- ceramika budowlana (cegły, dachówki, płyty elewacyjne, ścienne i podłogowe),
- ceramiczne materiały ogniotrwałe (wykładziny pieców),
- ceramika funkcjonalna.

Ostatnia grupa obejmuje nową generację materiałów ceramicznych stosowanych we współczesnej technice. Można wyróżnić następujące obszary zastosowania:

- elektronika i energetyka (kondensatory, rezystory, nadprzewodniki, izolatory, świece samochodowe, rdzenie cewek, magnesy, paliwo jądrowe, osłony, pręty pochłaniające i inne),
- budowa maszyn (części maszyn i silników spalinowych)
- obróbka materiałów (narzędzia, narzędzia cierne, mielniki, pasty polerskie),
- inżynieria chemiczna (czujniki, elektrody, naczynia, pompy, filtry, podłoża katalizatorów),
- optyka (materiały do laserów, elementy optoelektroniczne),
- medycyna (endoprotezy).

Omówione powyżej materiały stanowią grupę zwaną „ceramiką konstrukcyjną”, która dotyczy materiałów przenoszących obciążenia mechaniczne. Ceramika stosowana w energetyce i elektronice jako element izolacji elektrycznej jest również narażona na naprężenia mechaniczne wynikające np. z połączenia z metalem. Obecnie występuje duże zainteresowanie ceramiką ponieważ:

- jest to materiał odporny na korozyjne działanie środowiska i wysokiej temperatury,
- ze względu na wysoką twardość charakteryzuje się niską ścieralnością,
- surowce, z których otrzymuje się materiały ceramiczne, są stosunkowo łatwo dostępne,
- istnieje możliwość otrzymywania materiałów ceramicznych o bardzo zróżnicowanych właściwościach.

Do podstawowych negatywnych cech ceramiki szeroko stosowanej zalicza się:

- kruchość i rozwój pęknięć podkrytycznych
- brak odporności na nagłe obciążenia mechaniczne ze względu na posiadane wyłącznie właściwości sprężyste.

Biorąc pod uwagę skład chemiczny materiały ceramiczne możemy podzielić na:

- ceramikę tlenkową – można tu wyróżnić pojedyncze tlenki jak  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{ThO}_2$ ,  $\text{BeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  czy wieloskładnikowe jak  $\text{PbFe}_{12}\text{O}_{19}$ ,  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{La}_2\text{ZrO}_7$ ,
- ceramikę nietlenkową – najbardziej popularne to azotki  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{AlN}$ , węgliki  $\text{B}_4\text{C}$  i  $\text{SiC}$ ,  $\text{TiC}$  i np.  $\text{TiB}_2$ ,
- kompozyty – gama tworzyw dwu lub wiele składnikowych.

Współcześnie materiały kompozytowe mają w sobie składniki celowo rozmieszczone w objętości, aby osiągnąć pożądaną mikrostrukturę i właściwości by spełniać zamierzone cele. Kompozyty ze względu na cechy mikrostruktury i tekstury dzielą się na kompozyty *dyspersyjne*, zawierające osnowę fazy rozproszone, *warstwowe* i *włókniste* [43] i [1]. Kompozyty w ostatnich czasach stanowią najsilniej rozwijającą się dziedzinę badań nad materiałami, o czym świadczy duża liczba publikacji. Poprzez dobranie odpowiednich składników kompozytu i metody technologicznej można uzyskać materiał o znakomitych własnościach. Biorąc pod uwagę skład chemiczny kompozyty można podzielić na:

- ceramiczno – ceramiczne,
- ceramiczno – metaliczne,
- ceramiczno – polimeryczne.

Spośród szerokiego zastosowania materiałów ceramicznych w pracy skupiono się na materiałach przeznaczonych do stosowania ich jako bariery termiczne w przemyśle samochodowym i lotniczym.



## 2.1. Powłoki stanowiące bariery termiczne

Zużycie powierzchni roboczej części maszyn i urządzeń wiąże się z pogorszeniem się ich własności użytkowych. Spowodowane to może być wieloma różnymi procesami fizycznymi i chemicznymi występującymi w czasie eksploatacji. Jednym z najczęstszych przypadków w wyniku którego powierzchnie robocze ulegają zużyciu bądź uszkodzeniu jest zużycie pod wpływem wysokich temperatur.

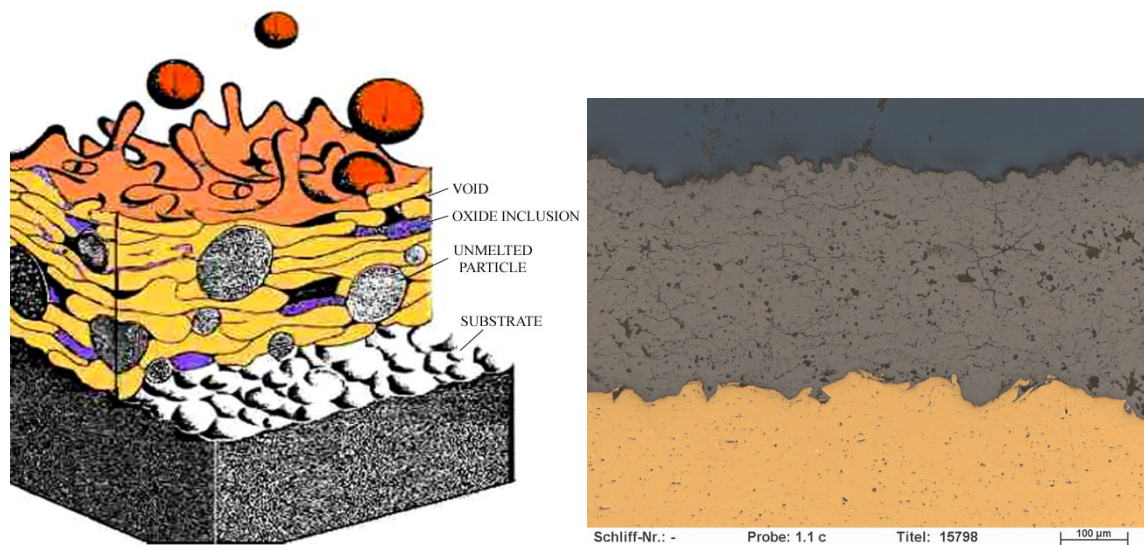
Zużycie tego typu jest procesem trwałego spadku własności użytkowych nie tylko powierzchni roboczej, lecz także całego przedmiotu. Dłuższe oddziaływanie wysokich temperatur powoduje, w zależności od warunków pracy konstrukcji, przyspieszoną korozję wysokotemperaturową i nieodwracalne przemiany strukturalne w całym nagrzanym przedmiocie lub na pewnej głębokości od powierzchni.

Szczególnym przypadkiem zużycia cieplnego jest zjawisko zmęczenia cieplnego, które pojawia się w wyniku cyklicznego nagrzewania i chłodzenia powierzchni roboczej przedmiotu [43]. Powoduje to zmienne rozszerzanie i kurczenie się warstwy wierzchniej, prowadzące po pewnym czasie do tworzenia się siatki drobnych pęknięć, rozszerzających się następnie w głąb metalu przedmiotu pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych.

W celu zapobiegania zużycia powierzchni roboczych oraz ochrony materiałów narażonych na działanie wysokiej temperatury lub zmniejszenia działania środowiska wysokiej temperatury na elementy maszyn i urządzeń stosuje się proces natryskiwania cieplnego materiałów konstrukcyjnych stanowiących tzw. „bariery termiczne”.

Postęp w rozwoju technologii natryskiwania cieplnego umożliwił wykonywanie powłok z praktycznie wszystkich znanych materiałów konstrukcyjnych, o dowolnych grubościach, na przedmiotach o dowolnych kształtach i wymiarach, wytworzonych z dowolnych materiałów konstrukcyjnych [43] i [68]. Ciągły rozwój inżynierii materiałowej i metalurgii umożliwia „zaprojektowanie” materiałów o nieosiągalnych dotychczas własnościach, jak np. nanostrukturalnych materiałów ceramicznych o dobrej plastyczności w niskich temperaturach, nadplastyczności, dobrej przewodności elektrycznej, odporności na udary cieplne i odporności na korozję [43] i [107].

Schemat powłoki ceramicznej powstałej przez natryskiwanie cieplne przedstawia rysunek 2.2 ilustrujący najczęściej występujący układ warstwy.



Rys.2.2. Schemat oraz zdjęcie metalograficzne powłoki ceramicznej natrykiwanej cieplnie [106] i [54].

Bariery termiczne zwane w szerokim zastosowaniu jako “Thermal barrier coatings” (TBC) jak już wcześniej wspomniano używane są głównie w przemyśle samochodowym (tłoki, zawory itp.), lotniczym (w turbinach gazowych jako komponenty żaroodporne, łopatki turbin, w komorach spalania, dysze itp.) i chemicznym (reaktory wysokotemperaturowe, lance tlenowe itp.) [68], [56], [33] i [88].

Różnorodność aplikacji powłok stanowiących bariery termiczne wymaga od materiałów ceramicznych, aby ich własności spełniały określone warunki zastosowania. Bariery termiczne mogą przynosić określone korzyści zależące od wielu czynników, takich jak środowisko pracy, rodzaj podłoża czy kompozycja materiałowa składająca się na powłokę. Biorąc pod uwagę ogół zastosowania barier termicznych możemy wyróżnić następujące korzyści, wynikające z ich zastosowania:

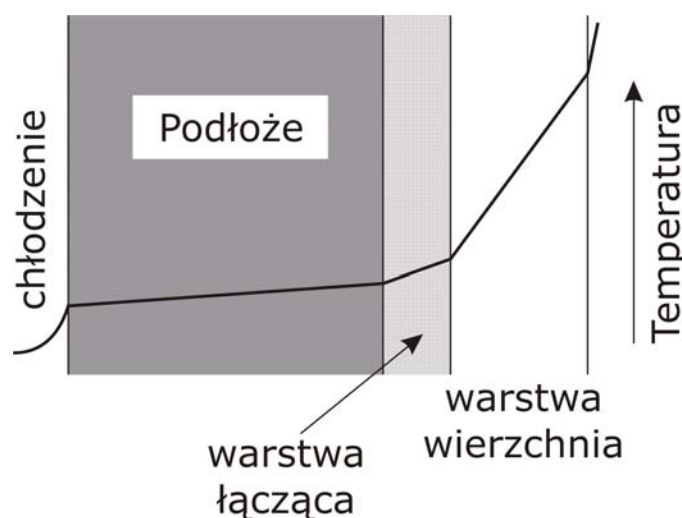
- wydłużony okres użytkowania części lub maszyny,
- zwiększona wydajność maszyny np. silnika poprzez wzrost temperatury w turbinie,
- zwiększona temperatura procesu spalania,
- zmniejszony przepływ czynnika chłodzącego,
- redukcja naprężeń nieustalonych w części.

Innymi korzyściami charakteryzującymi TBC w aspekcie nie technicznym, które poszerzają zakres ich stosowania są [91]:

- polepszenie osiągów maszyn poprzez wydłużenie czasu użytkowalności głównych części,

- zredukowanie kosztów wytworzenia poprzez używanie tańszych materiałów bazowych (podłoża warstwy) i poprzez miejscowe pokrycia powłokami w miejscach silnie narażonych na tarcie, temperaturę,
- eliminacja procesów wytwarzania takich jak: obróbka cieplna, chromowanie oraz obróbka skrawająca, szlifowanie.

Podstawową zasadą działania bariery termicznej jest zastosowanie powłoki ceramicznej o niskiej przewodności cieplnej lub dyfuzyjności, która przeciwstawi się dużemu gradientowi temperaturowemu powstałemu z przepływu ciepła [68], [53] i [107]. Rysunek 2.3 przedstawia schematycznie zasadę działania bariery termicznej, ilustrując spadek temperatury po dwóch stronach warstwy.



Rys. 2.3. Zasada działania bariery termicznej

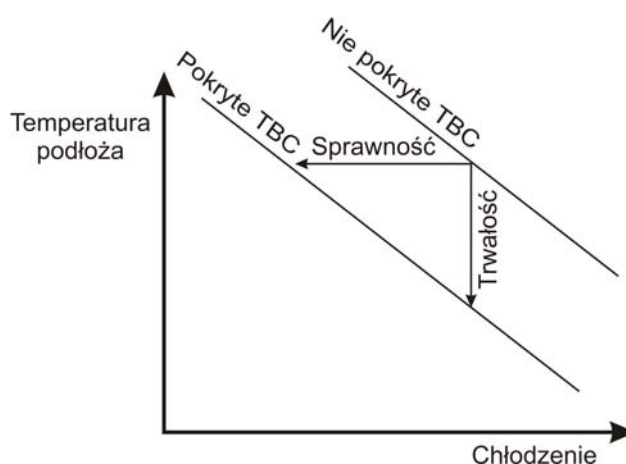
W większości przypadków na powłokę stanowiącą barierę termiczną składa się warstwa wierzchnia będąca w kontakcie z otoczeniem (np. wysoką temperaturą) oraz warstwa podkładowa tzw. relaksacyjna.

Zadaniem warstwy podkładowej jest zapewnienie dobrej przyczepności wytworzonej struktury do podłoża oraz zabezpieczenie przed korozją. Powierzchnia warstwy podkładowej powinna mieć wielkość i kształt nierówności zapewniający dobrą przyczepność ceramiki.

Powłoki TBC mogą się składać z jednej lub kilku warstw.. Do najczęściej stosowanych zalicza się powłokę typu „duplex” dwuwarstwową: warstwa wierzchnia i warstwa podkładowa naniesione na podłoże.

Rozróżniamy dwa typy powłok stanowiących bariery termiczne: cienkie (do 300  $\mu\text{m}$ ) i grube (od 1 do 10mm). Powłoki cienkie stosuje się głównie na łopatki turbin a powłoki grube na komory spalania, tłoki, zawory i reaktory chemiczne [2], [56] i [33].

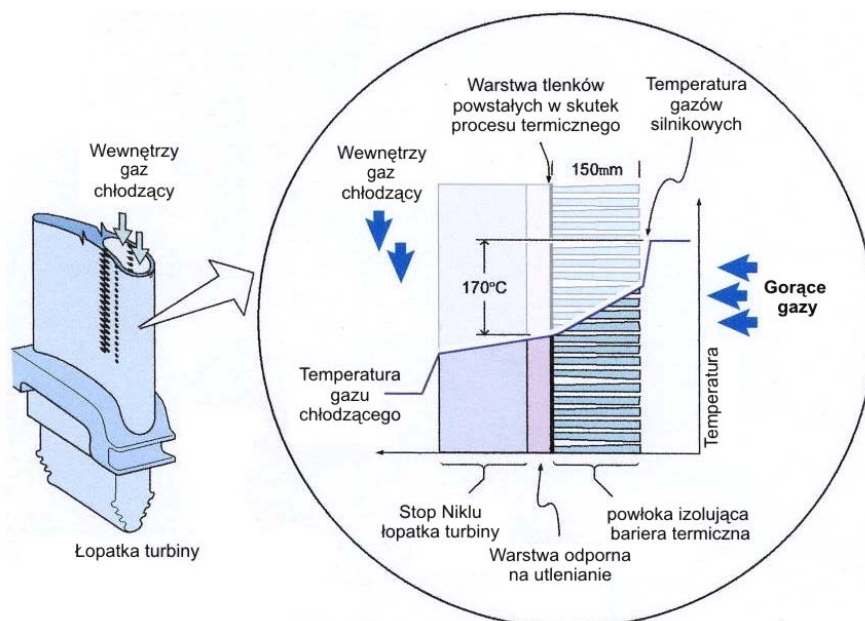
Jedną z korzyści zastosowania TBC na przykładzie turbiny gazowej przedstawia schematycznie rysunek 2.4, gdzie temperatura podłoża w funkcji natężenia przepływu czynnika chłodzącego przedstawiona jest dla łopatki turbiny bez pokrycia i z pokryciem TBC. Dla stałego przepływu czynnika chłodzącego, izolacja termiczna redukuje temperaturę podłoża, co przyczynia się do zwiększenia jego trwałości [84]. Innym dążeniem przez zastosowanie TBC jest zwiększenie temperatury gazów wlotowych co prowadzi do zwiększenia osiągnięć silnika, czyli siły ciągu lub zmniejszenia ilości spalanej paliwa [2] i [84]. Mówiąc ogólniej przez zastosowanie bariery termicznej możemy podnieść sprawność silnika poprzez wzrost temperatury gazu w porównaniu do temperatury otoczenia lub podwyższyć trwałość przy zmniejszonym chłodzeniu (rys 2.4).



Rys. 2.4. Wpływ bariery termicznej na stopień chłodzenia i trwałość w turbinie gazowej [2]

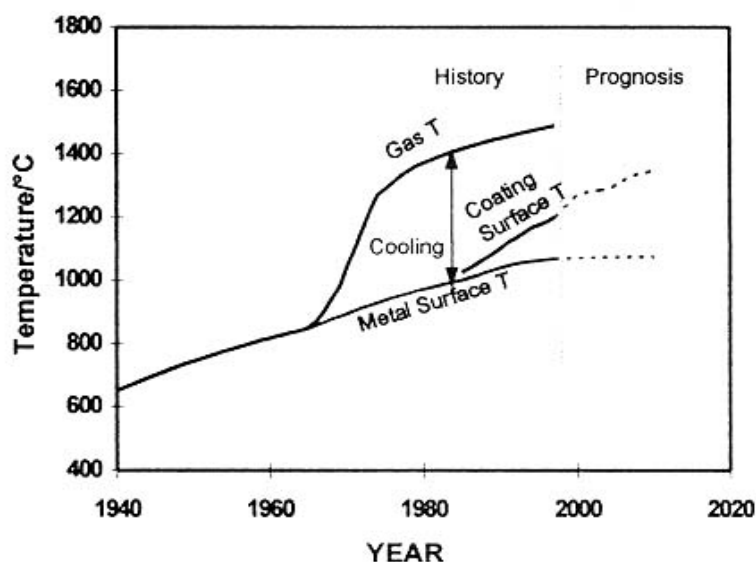
W powiązaniu z ulepszonymi metodami chłodzenia (systemami) i zdolnością chłodzenia przez TBC, bariery termiczne zrewolucjonowały turbiny gazowe pod względem wydajności temperaturowej.

Rysunek 2.5 przedstawia wpływ zastosowania powłoki typu „duplex” na obniżenie temperatury łopatki w turbinie gazowej. W tym przypadku zredukowanie temperatury podłoża łopatki przyczyniło się również do zmniejszenia naprężeń nieustalonych podłoża [107], [56] i [42].



Rys. 2.5. Wpływ TBC na obniżenie temperatury łopatką turbiny gazowej [56] i [86]

Korzyści jakie w tej dziedzinie przynoszą powłoki ceramiczne stanowiące bariery termiczne przyczyniły się do wzrostu użycia materiałów ceramicznych, o czym świadczy postęp temperaturowy w turbinach gazowych przedstawiony na rysunku 2.6 wraz z prognozami na dalsze ich zastosowanie.



Rys. 2.6. Temperaturowy postęp w turbinach gazowych [107]

Materiały ceramiczne łączą kilka cech użytkowych, z których najważniejsze to odporność na ścieranie, korozję i utlenianie. Spośród nich węgliki, azotki i borki są najczęściej stosowane na powłoki zapewniające odporność na zużycie ściernie adhezyjne oraz odporność na korozję, natomiast tlenki w celu zwiększenia odporności na korozję,

szybkie zmiany temperatury (udary termiczne), żaroodporności i żarowytrzymałości. Wiele materiałów ceramicznych cechuje się również dużą wytrzymałością w wysokich temperaturach, np. powłoka z węgliku krzemu SiC, w temp. 1500°C ma wytrzymałość ok. 200 MPa. Podobne własności wykazują powłoki z azotku krzemu Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> i azotku tytanu TiN [43], [52], [60] i [9].

Powłoki z azotku aluminium AlN zapewniają dobrą przewodność cieplną, bardzo małą rozszerzalność cieplną i dobre własności elektryczne. Z kolei powłoki z tlenku cyrkonu ZrO<sub>2</sub> są stosowane w przypadkach wymagających bardzo dobrej odporności na zużycie ściernie, odporności na korozję naprężeniową i żaroodporności. Dodatkowo, mała przewodność cieplna i duży współczynnik rozszerzalności cieplnej ZrO<sub>2</sub> sprawiają, że tlenek cyrkonu jest stosowany do natryskiwania powłok na różnych częściach silników spalinowych, pracujących w wysokich temperaturach, w warunkach udaru cieplnego, ścierania i korozji [43], [52] i [60].

Materiały ceramiczne są zwykle nakładane na podłoża metalowe za pomocą natryskiwania płomieniowego i natryskiwania plazmowego, tworząc powierzchnie robocze narzędzi tnących, matryc, uszczelnienia pomp, osłony termiczne zaworów i tłoków, izolacje elektryczne i powłoki żaroodporne i żarowytrzymałe części silników odrzutowych i turbin gazowych [43], [72] i [38].

Materiały te poprzez natryskiwanie cieplne nanosi się na wybranym podłożu najczęściej w postaci proszku. Własności jakie powinny zostać uzyskane w końcowym efekcie zależą również od sposobu przygotowania i jakości przygotowanego materiału – proszku do procesu natryskiwania. Kryteriami tymi są [72]:

- czystość - skład chemiczny, brak zanieczyszczeń,
- rozkład wielkości cząsteczek (różna wielkość ziaren proszku może spowodować niedostateczne przetopienie większych ziaren, co w końcowym efekcie może spowodować wady warstwy),
- odmiana polimorficzna.

Wysoko wytrzymała ceramika wymaga produkcji ziaren o wysokiej jakości i drobności (typowo <1µm) w celu uzyskania drobnoziarnistej mikrostruktury z minimalną ilością wad (wady bardzo małe)[72] i [44].

Spośród wielu materiałów ceramicznych, najczęściej stosowanymi na powłoki stanowiące bariery termiczne są tlenki takie jak: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, azotki jak: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> oraz węglik jak: SiC.

Typowy skład proszków oraz podstawowe cechy materiałów najczęściej stosowanych na powłoki stanowiące bariery termiczne w przemyśle samochodowym i lotniczym został przedstawiony w tabeli 2.1.

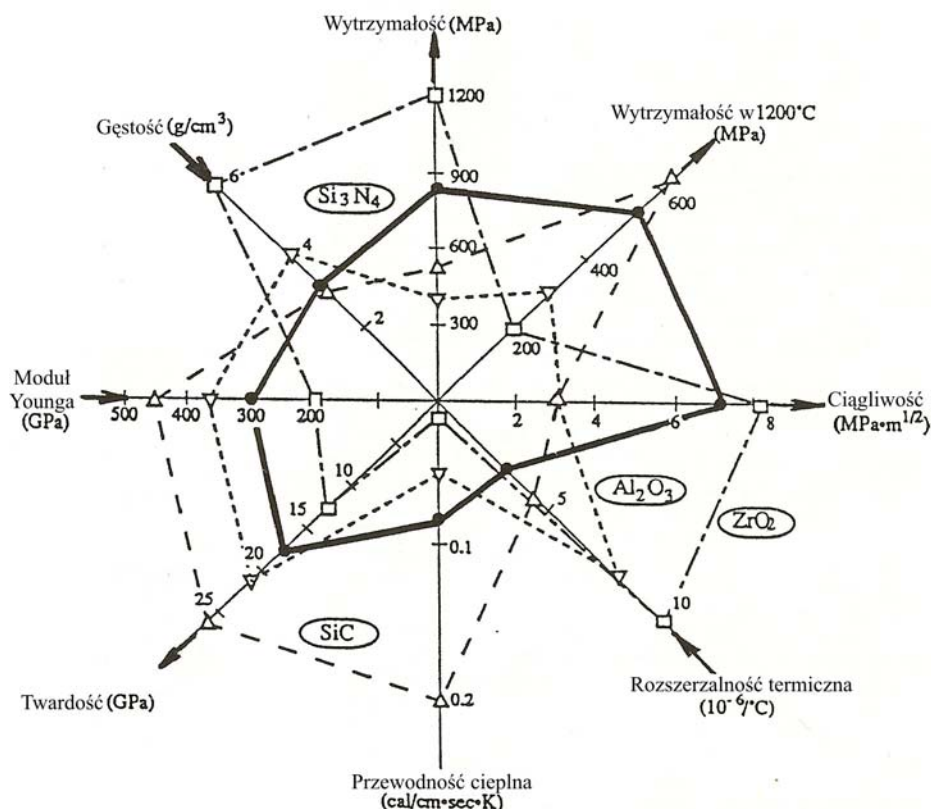
Tabela 2.1. Własności i skład proszku wybranych materiałów ceramicznych stosowanych do natryskiwania ciepłego barier termicznych [43], [52] i [60].

Rodzaj materiału	Skład proszku	Własności powłoki
$\text{Al}_2\text{O}_3$	99% $\text{Al}_2\text{O}_3$	izolacja elektryczna i cieplna; odporność na korozję, erozję i ścieranie do temp. 1000°C
$\text{ZrO}_2+\text{Y}_2\text{O}_3$	90÷92% $\text{ZrO}_2$ , 8÷10% $\text{Y}_2\text{O}_3$	izolacja i osłona cieplna; żaroodporność, odporność na erozję w wysokich temp. i udary termiczne
$\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2 (\text{Y}_2\text{O}_3)$	82% $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 15% $\text{ZrO}_2$ , 3% $\text{Y}_2\text{O}_3$	Duża odporność na pękanie, wysoka wytrzymałość na zginanie, nadplastyczność

Jedną z najważniejszych wad materiałów ceramicznych jest ich naturalna kruchość. Naukowcy przeprowadzając różne badania starają się wzbogacić strukturę materiału poprzez różne dodatki, zwiększyć odporność kompozytu na kruchość. Dzięki możliwości łączenia materiałów ceramicznych w różnego rodzaju kompozyty, możemy otrzymać materiały o różnych własnościach fizycznych, mechanicznych i termofizycznych. Poprzez dodanie innego składnika, nawet w ilościach śladowych, można podnieść odporność całego kompozytu w jednym kierunku najbardziej przez nas porządzanym. Przykładowe badania wykazują, że przez dodanie  $\text{Al}_2\text{O}_3$  do związku  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  polepsza się odporność na erozję całego kompozytu oraz na szok termiczny poprzez nanoszenie go metodami natryskiwania plazmowego próżniowego i natryskiwania gazowego wysokiej prędkości [24] i [71].

Na rysunku 2.7 przedstawiono podstawowe własności wybranych materiałów ceramicznych głównie stosowanych na bariery termiczne w turbinach gazowych i silnikach spalinowych. Strzałki wskazują kierunek ulepszania materiałów w aspekcie budowy silników spalinowych.



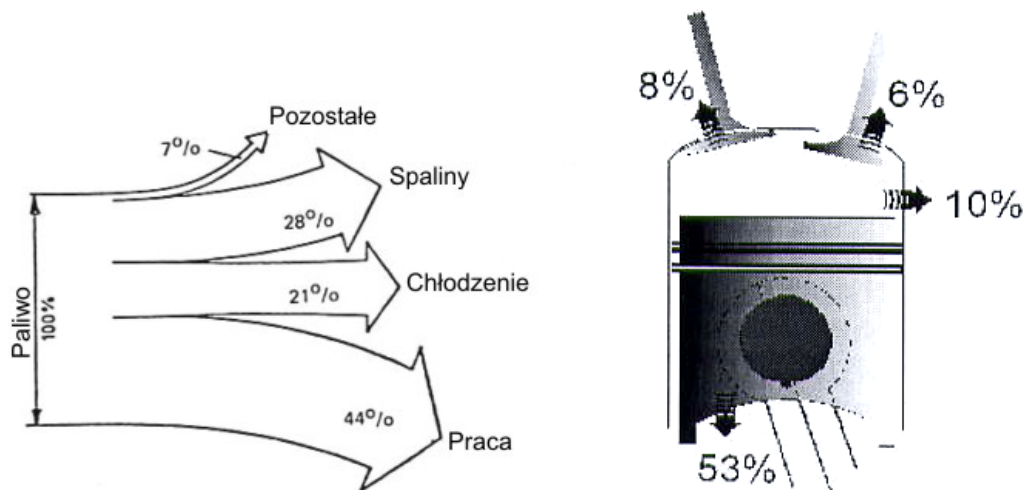


Rys. 2.7. Porównanie podstawowych własności materiałów ceramicznych - strzałki wskazują kierunki w zastosowaniu w budowie silników spalinowych [27]

Możliwości stosowania materiałów ceramicznych w silnikach spalinowych i wynikające stąd korzyści są różne w zależności od rodzaju silnika. Współczesny silnik spalinowy zamienia w pracę użyteczną jedynie 30-40% ciepła spalania paliwa [104]. Jeśli obciążenie jest bliskie nominalnemu, to ciepło unoszone przez strumień gorących gazów wylotowych jest w przybliżeniu równe energii odprowadzanej do mediów chłodzących. Głowica silnika i tuleja są narażone na wysokie temperatury i dlatego muszą być chłodzone. Aluminium i jego stopy, ze względu na małą gęstość i dobrą przewodność ciepła są zalecane do szerokiego zastosowania w pojazdach samochodowych. Rysunek 2.8 przedstawia potrzebę zastosowania bariery termicznej w silniku spalinowym.

Zastosowanie skutecznej izolacji termicznej na powierzchni komory spalania pozwoliłoby praktycznie wyeliminować układ chłodzenia. Wyższe temperatury w cylindrze silnika zwiększają dodatkowo sprawność.





Rys. 2.8. Potrzeba zastosowania bariery termicznej oraz straty ciepła w silniku spalinowym [49]

Pokrycia ceramiczne zastosowane w silnikach spalinowych charakteryzują dwie istotne zalety [17], [34], [31] i [102]:

- elementy pokryte ceramiką mogą pracować w warunkach tarcia suchego,
- ceramika ma dużą odporność na korozję powodowaną przez produkty spalania ciężkich paliw.

Zastosowanie powłok ceramicznych w silnikach spalinowych w zależności od rodzaju silnika może przynieść oczekiwane korzyści, jak również niekorzyści np. zmniejszenie sprawności poprzez nieodpowiednie zastosowanie TBC w danym silniku [34], [31], [17], [105] i [27]. Tabela 2.2 przedstawia podział silników spalinowych wraz z zaletami i wadami zastosowania materiałów ceramicznych.

W niedalekiej przyszłości należy spodziewać się wprowadzenia do powłok typu barier ciepłych dodatków działających jako katalizatory spalania, gdyż prowadzone są w tym zakresie intensywne prace.

Tabela 2.2 Zalety i wady zastosowania materiałów ceramicznych w silnikach spalinowych różnego typu [34], [31], [17], [105] i [27].

Rodzaj silnika	Zalety i wady
<b>Silniki benzynowe lekko wysilone</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☺ zastosowaniu ceramicznych popychaczy można uzyskać zmniejszenie zużycia paliwa o 3%.</li> <li>☺ Wykonanie izolacji kolektora dolotowego silnika winno spowodować wzrost sprawności wolumetrycznej.</li> </ul>
<b>Silniki wysokoprężne z wtryskiem pośrednim</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☺ osiąga się skrócony okres rozruchu, mniejsze zadymienie i hałas</li> <li>☺ Zastosowanie materiałów izolacyjnych w silnikach z wtryskiem pośrednim turbodoładowanych może polepszyć sprawność wolumetryczną w większym stopniu niż w silnikach z wtryskiem bezpośrednim</li> </ul>
<b>Silniki bez turbodoładowania.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☺ zmniejszenie wymiarów układu chłodzenia (lub jego całkowita eliminacja) oraz poprawa sprawności silnika.</li> <li>☹ przyrost sprawności jest dość mały, gdyż nie przekazana do chłodziwa energia cieplna pojawia się w postaci zwiększonej energii cieplnej spalin</li> <li>☹ Zwiększona temperatura powierzchni komory spalania przyczynia się także do ogrzania powietrza, które napływa do silnika podczas suwu ssania, co powoduje spadek sprawności wolumetrycznej silnika,</li> <li>☹ zmniejszenia maksymalnego momentu i mocy nominalnej.</li> </ul>
<b>Silniki turbodoładowane</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☺ możliwość zmniejszenia wymiarów układu chłodzenia lub nawet jego całkowitej eliminacji</li> <li>☹ przy 60 - 70% izolacji silnika należy spodziewać się problemów ze smarowaniem na powierzchniach tłoka i tulei cylindrowej.</li> <li>☺ ograniczenie ilości wydzielonych tlenków azotu NO<sub>x</sub></li> <li>☺ możliwość spalania różnych paliw</li> </ul>
<b>Mocno wysilone silniki wysokoprężne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☺ stosowanie 40% izolacji komory spalania winno podnieść ogólną sprawność silnika o około 9%</li> <li>☺ przy izolowaniu silnika w 60% ocenia się, że sprawność może być większa o około 11 %</li> </ul>

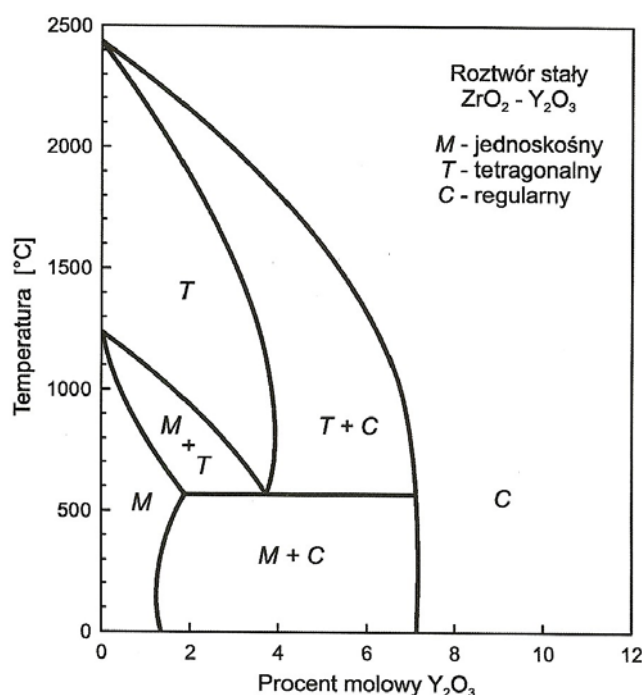
## 2.2. Tlenek Cyrkonu

Spośród szerokiej gamy materiałów w aspekcie stosowania ich jako materiały na warstwy stanowiące bariery termiczne w pracy skupiono się nad kompozytem ceramiczno – ceramicznym na bazie tlenku cyrkonu  $ZrO_2$  stabilizowanym przez tlenek Itru  $Y_2O_3$ .

Tlenek cyrkonu jest obecnie najpopularniejszym obok tlenku glinu  $Al_2O_3$  związkem chemicznym wykorzystywanym do produkcji ceramiki konstrukcyjnej.

Źródłem tlenku cyrkonu są głównie australijskie złoża cyrkonu ( $ZrSiO_4$ ) zawierające ok. 67% wagowo  $ZrO_2$  oraz południowoafrykańskie i brazylijskie złoża baddeleitu, zawierające 96÷99% jednoskośnego  $ZrO_2$  [89]. Najbardziej znaną metodą otrzymywania czystego tlenku cyrkonu jest działanie zasadą sodową na surowiec, gdzie otrzymany tą drogą związek  $Na_2ZrO_3$  poddaje się procesowi rozkładu termicznego w wyniku którego otrzymuje się czysty  $ZrO_2$  [89].

Występuje on w trzech odmianach polimorficznych: jednoskośnej, tetragonalnej i regularnej. Rysunek 2.9 przedstawia wykres fazowy tlenku cyrkonu wraz z molową zawartością tlenku itru.



Rys. 2.9. Wykres fazowy związku  $ZrO_2 - Y_2O_3$  [7], [60] i [83]

Temperatury przemian oznaczają, że dla  $T < 1223K$  istnieje tylko faza jednoskośna, w zakresie  $1423 \div 2643K$  ( $1200 \div 2370^{\circ}C$ ) faza tetragonalna, a powyżej  $2643K$  faza regularna. Temperatura przejścia fazowego zależy od kierunku zmiany temperatury oraz od wielkości

ziaren. Mniejsze ziarna transformują się w niższej temperaturze niż większe. Przejścia fazowe w  $ZrO_2$  są odwracalne [60].

Powyższej przemianie fazowej towarzyszy zmiana objętości (3 ~ 5%). Przy przejściu od fazy tetragonalnej do jednoskośnej w trakcie studzenia, jest to wzrost objętości. Powoduje to powstanie dużych naprężeń wewnętrznych o wartościach przekraczających wytrzymałość materiału, w wyniku czego w temperaturze pokojowej materiał jest spękany. W konsekwencji produkcja elementów konstrukcyjnych z czystego  $ZrO_2$  jest niemożliwa. Wyjściem z takiej sytuacji okazało się dodawanie do  $ZrO_2$  tlenków stabilizujących.

Spośród szerokiej gamy roztworów  $ZrO_2$  z dodatkiem tlenków stabilizujących możemy wyróżnić najczęściej stosowane w zależności od aplikacji kompozytu i zapotrzebowania na własności:

- $Y_2O_3 - ZrO_2$ ,
- $CeO_2 - ZrO_2$ ,
- $MgO - ZrO_2$ ,
- $ThO_2 - ZrO_2$ ,
- $La_2Zr_2O_7$ ,
- $BaZrO_3$ ,
- $SrZrO_3$ .

Tlenki te tworzą z  $ZrO_2$  roztwory stałe, w których w miejsce jonów cyrkonu wbudowują się kationy ww. tlenków. Blokują to całkowicie lub częściowo proces zachodzenia przemiany fazowej w trakcie studzenia materiału od temperatury spiekania.

Wcześniej stosowane materiały ceramiczne na bariery termiczne dla przemysłu lotniczego i samochodowego zawierały tlenek cyrkonu stabilizowany przez wapń lub magnez w celu zapobiegania transformacji  $ZrO_2$  z fazy regularnej w jednoskośną [2]. Znacznym ulepszeniem jakości TBC było stabilizowanie  $ZrO_2$  przez tlenek itru  $Y_2O_3$  i naniesienie go na warstwę podkładową MCrAlY (M: Ni, Co lub Fe) odporną na korozję wysokotemperaturową. Początkowo powłoki na bariery termiczne składające się z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru zawierały od 12% do 20%  $Y_2O_3$ , który był dodawany, by całkowicie stabilizować fazę regularną. Jednak dalsze badania pokazały, że lepsze osiągi otrzymuje się przez zmniejszenie poziomu tlenku itru do 6 ÷ 8 % [1], [2] i [84].

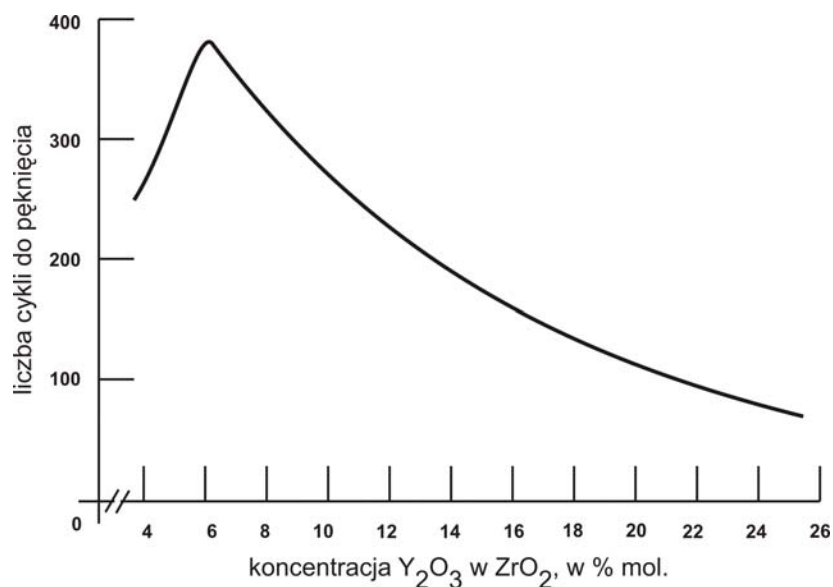
W zależności od ilości dodanego stabilizatora otrzymuje się całkowicie ustabilizowany tlenek cyrkonu w fazie regularnej, tzw. FSZ (ang. *Fully Stabilized Zirconia*), lub częściowo stabilizowany PSZ (ang. *Partially Stabilized Zirconia*), gdzie występuje mieszanina faz tetragonalnej i kubicznej. Dla określonej zawartości stabilizatora, np. 2÷4%

mol.  $Y_2O_3$  lub 12% mol.  $CeO_2$  oraz przy małym rozmiarze ziaren, można otrzymać ceramikę zawierającą prawie 100% fazy tetragonalnej.

W trakcie spiekania w temperaturze wyższej niż temperatura przemiany ziarno tetragonalne zostaje zamknięte w osnowie. Podczas ochładzania spieku do temperatury pokojowej wokół ziarna tetragonalnego pojawiają się naprężenia ściskające, wynikające z dążenia tego ziarna do przemiany w odmianę jednoskośną.

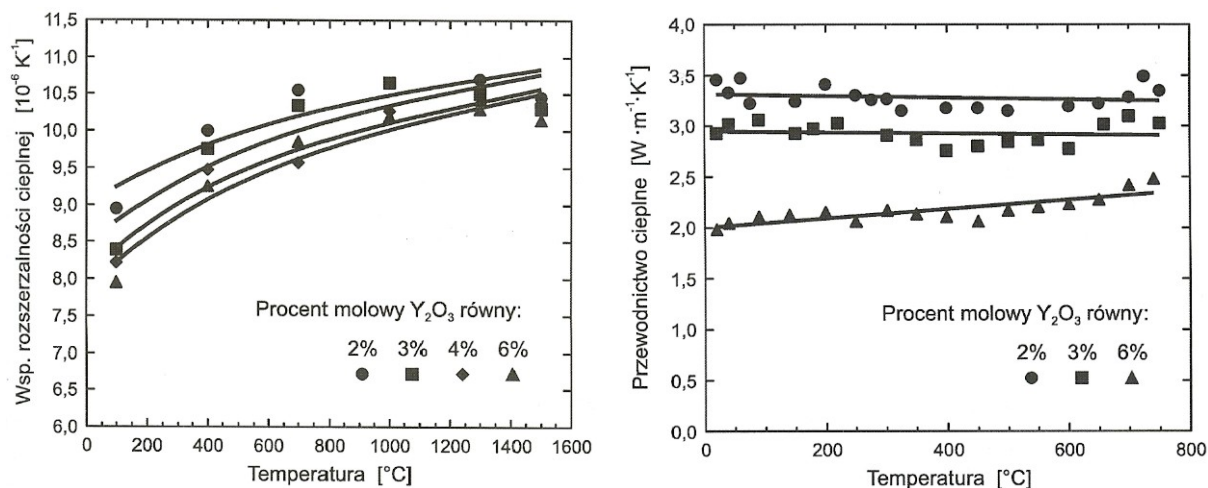
W zależności od wielkości ziarna  $ZrO_2$  i wytrzymałości osnowy, naprężenia te mogą być zrelaksowane przez mikropęknięcia osnowy powstające wokół ziarna, a samo ziarno przechodzi w fazę jednoskośną. W przypadku, gdy ziarno jest dostatecznie małe, a osnowa wystarczająco wytrzymała, następuje przechłodzenia ziarna tetragonalnego do temperatury pokojowej. Opisane przypadki prowadzą do wzrostu odporności na pęknięcie oraz wytrzymałości tworzyw ceramicznych [60].

Przykładowo na rysunku 2.10 przedstawiono krzywą reprezentującą ilość cykli termicznych do pierwszego pęknięcia powłoki w zależności od procentowej zawartości tlenku itru w kompozycie  $ZrO_2 - Y_2O_3$ . Wynik ten wyjaśnia rozkład naprężeń własnych powstałych w skutek kurczenia się natryskiwanych cząstek oraz transformacja fazowa powłoki.

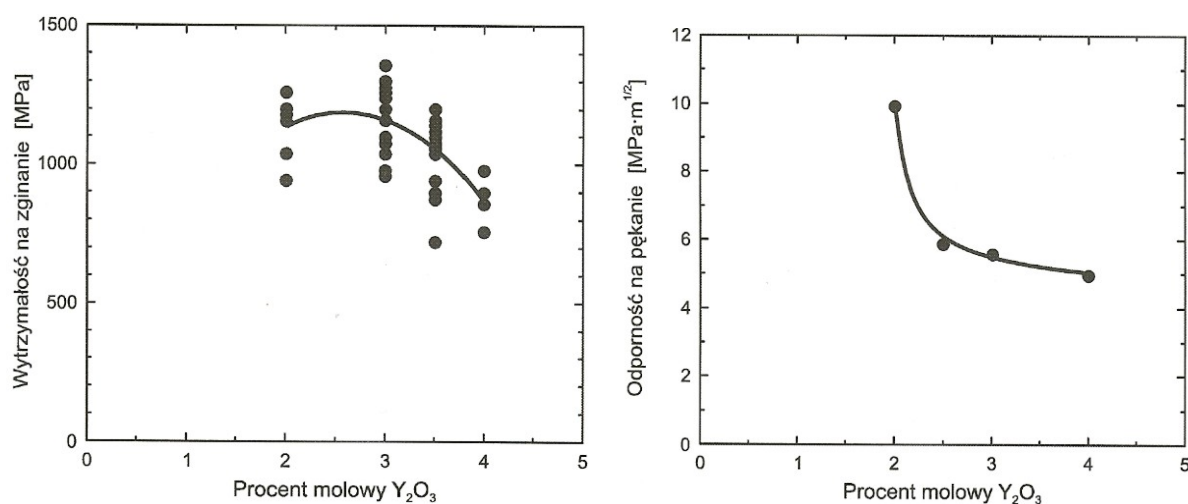


Rys. 2.10. Odporność na szok termiczny w zależności od stężenia  $Y_2O_3$  [2] i [84]

Na rysunkach 2.11 i 2.12 przedstawiono na podstawie danych z przeprowadzonych badań [89] i [83] wykresy zależności współczynnika rozszerzalności cieplnej  $\alpha$ , przewodnictwa cieplnego  $\lambda$ , ceramiki cyrkonowej od temperatury i udziału procentowego tlenku stabilizującego  $Y_2O_3$  oraz odporności tlenku cyrkonu na trójpunktowe zginanie i pęknięcie w funkcji zawartości stabilizatora  $Y_2O_3$ .



Rys. 2.11. Wykres zależności współczynnika rozszerzalności cieplnej  $\alpha$  i przewodnictwa cieplnego  $\lambda$  ceramiki cyrkonowej od temperatury i udziału procentowego tlenku stabilizującego [89]



Rys. 2.12. Wytrzymałość tlenku cyrkonu na trójpunktowe zginanie i odporność na pękanie w funkcji zawartości  $\text{Y}_2\text{O}_3$  [89]

Z powyższych danych wynika, że odporność na pękanie oraz wytrzymałość na zginanie w istotny sposób zależą od zawartości tlenku stabilizującego  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Zwiększenie ilości stabilizatora obniża obydwie te wielkości, co jest związane ze zmniejszeniem się liczby ziaren transformujących z fazy tetragonalnej do jednoskośnej.

### 2.3. Natryskiwanie cieplne

Podstawowym zadaniem spawalniczych technologii natryskiwania cieplnego jest zapewnienie możliwie najlepszych własności eksploatacyjnych powłoki, przy możliwie najmniejszych kosztach. Stosowane obecnie materiały dodatkowe na powłoki nakładane za pomocą technologii natryskiwania zostały przedstawione w tabeli 2.3.

Tabela 2.3. Podstawowe materiały stosowane na powłoki nakładane na części maszyn i urządzeń za pomocą technologii natryskiwania cieplnego [43].

Material	Rodzaje materiału	Podstawowe własności użytkowe
<b>Metale i stopy</b>	stale, stopy niklu, stopy kobaltu, stopy aluminium, stopy miedzi, cynk, ołów, nikiel, kobalt, tytan, wolfram, molibden, tantal, wanad	wysoka wytrzymałość, udarność, twardość, odporność na zużycie ścierne i adhezyjne, na korozję, żaroodporność i żarowytrzymałość
<b>Materiały ceramiczne</b>	węglik W, Cr, Ti, Mo, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Si, B, azotki Ti, V, Zr, Si, Nb, Hf, Ta, W, Cr, Mo, borki Ti, Zr, krzemki Mo, W, tlenki Al, Cr, Ti, Zr, Si lub ich mieszaniny	b. dobra odporność na zużycie ścierne, korozję, duża twardość, żaroodporność, żarowytrzymałość, izolacja elektryczna i cieplna
<b>Cermetale</b>	węglik, borki, krzemki i tlenki w osnowie czystych metali (Ni, Co, Al, Cu, Ti) lub stopów, np. typu Cr-Ni, Fe-Cr-Ni-B-Si	b. dobra odporność na zużycie ścierne, obciążenia dynamiczne, udary cieplne, żaroodporność, żarowytrzymałość, odporność na korozję, mały współczynnik przewodnictwa i rozszerzalności cieplnej
<b>Tworzywa sztuczne</b>	kopolimery polietylenu, poliwinyl, polipropylen, poliester, nylon	b. dobra odporność na korozję, bardzo dobra izolacja elektryczna i cieplna

Ze względu na kierunek badawczy pracy największą uwagę w procesie natryskiwania cieplnego poświęcono tylko materiałom ceramicznym, o których mowa w rozdziale 2.

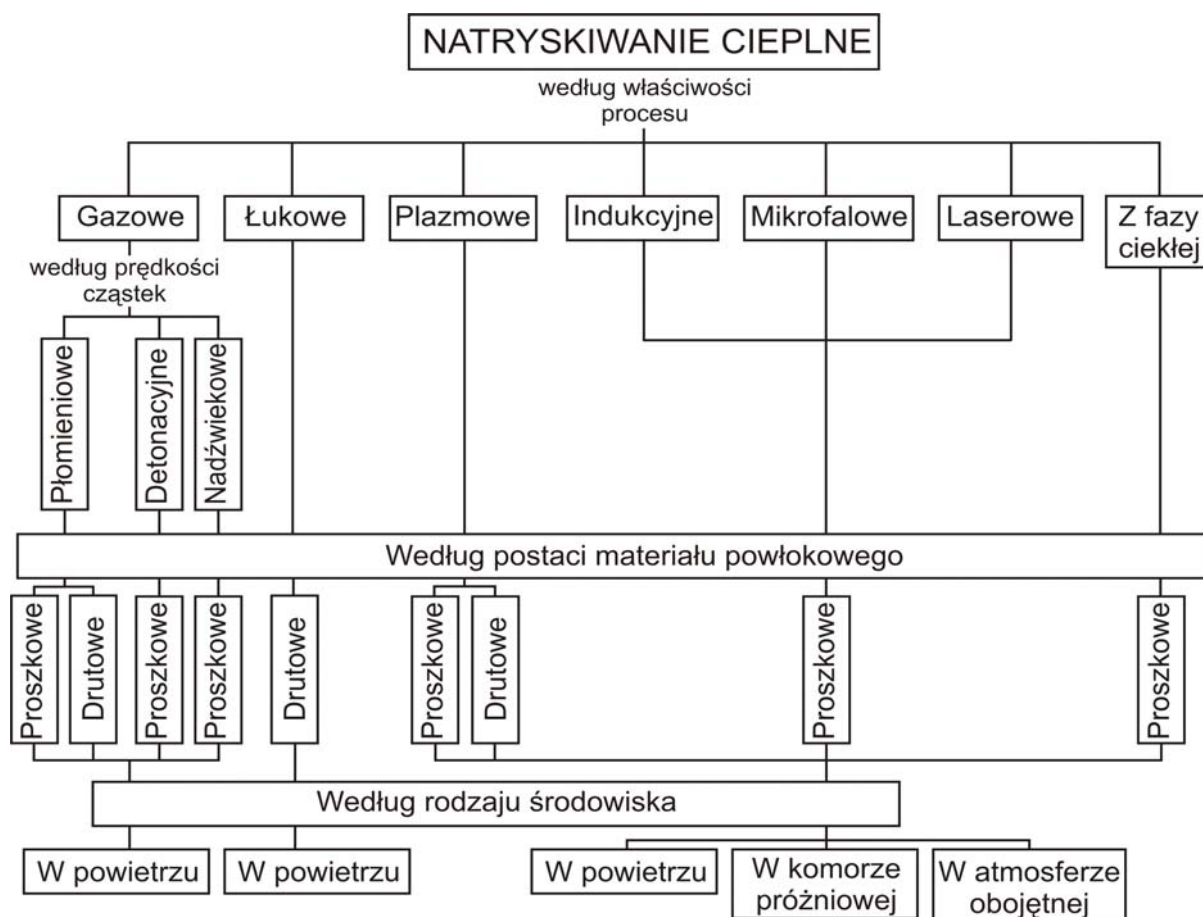
Materiały ceramiczne jak wcześniej wspomniano wykazują własności często nieosiągalne przez metale i stopy, jak np. wysoką temperaturę topnienia, zwykle powyżej 2243K, zdolność spiekania, mały współczynnik rozszerzalności i przewodności cieplnej, dużą twardość, dobrą oporność elektryczną i duży stosunek wytrzymałości do gęstości [43], [1] i [68].

W analizie doboru materiału dodatkowego, bez uwzględnienia kosztów procesu spawalniczego, należy wziąć pod uwagę następujące parametry:

- wymagane własności eksploatacyjne powłoki, tzn. twardość, odporność na ścieranie typu metal-minerał lub typu metal-metal, odporność na obciążenia udarowe, odporność na obciążenia cieplne, żaroodporność, żarowytrzymałość, odporność na korozję,

- dostępną postać materiału dodatkowego, taką jak elektroda otulona, drut lity, drut proszkowy, pręt, taśma, splotka, proszek,
- własności spawalnicze materiału zależne od jego własności fizycznych,
- koszt materiału dodatkowego.

Proces natryskiwania cieplnego jest związany ze zjawiskiem synergicznym i dzieli się na dwie grupy, w zależności od zastosowanego źródła ciepła [38] i [43]. Ostatnio utworzono trzecią grupę, która powstała z możliwości zastosowania lasera jako źródła ciepła. W każdej grupie metody również różnią się rodzajem i formą użytego materiału powłokowego. W pierwszej grupie jako źródła ciepła używa się gazów palnych, a w drugiej ciepło potrzebne do stopienia materiału powłokowego jest dostarczone za pośrednictwem energii elektrycznej. Rysunek 2.13 przedstawia schematycznie podział metod natryskiwania cieplnego.



Rys. 2.13. Podział technologii natryskiwania cieplnego [38]

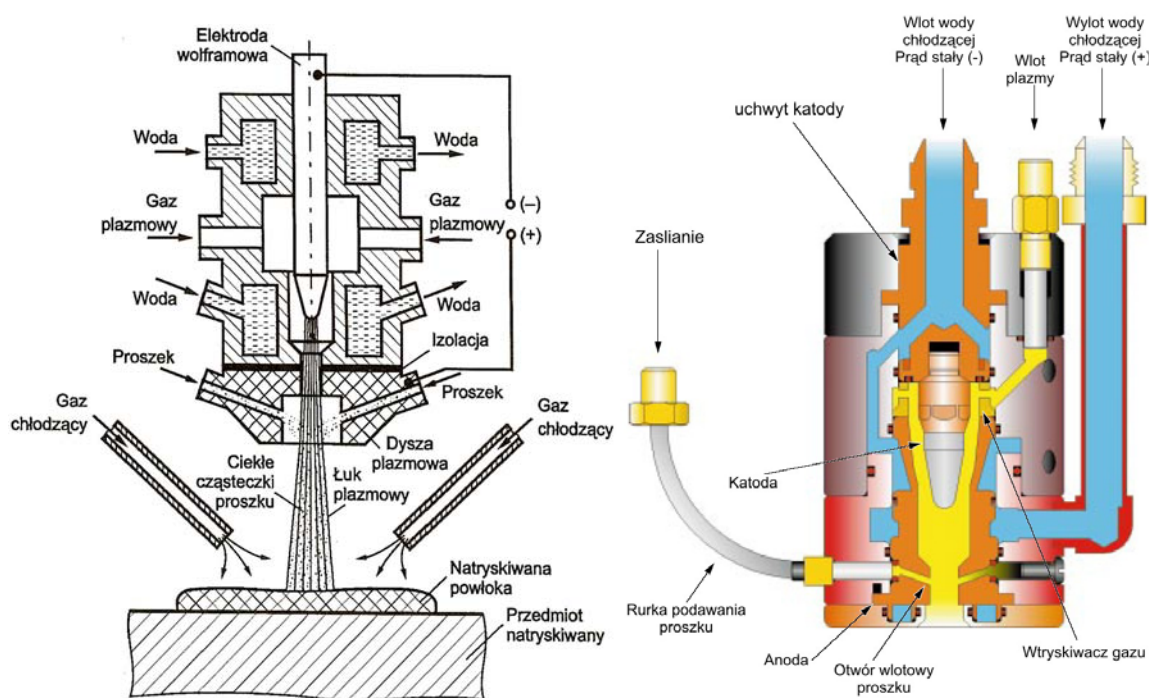
Spośród wielu technik natryskiwania cieplnego najczęściej stosowaną nie tylko ze względu na niskie koszty, ale na jej korzyści w przypadku nanoszenia powłok stanowiących bariery termiczne, jest natryskiwanie plazmowe.



Podstawową zaletą natryskiwania plazmowego jest możliwość natryskiwania powłok, które cechują się jednocześnie odpornością na ścieranie, korozję, udary cieplne i żaroodporność [43], [68] i [38].

### 2.3.1. Natryskiwanie plazmowe

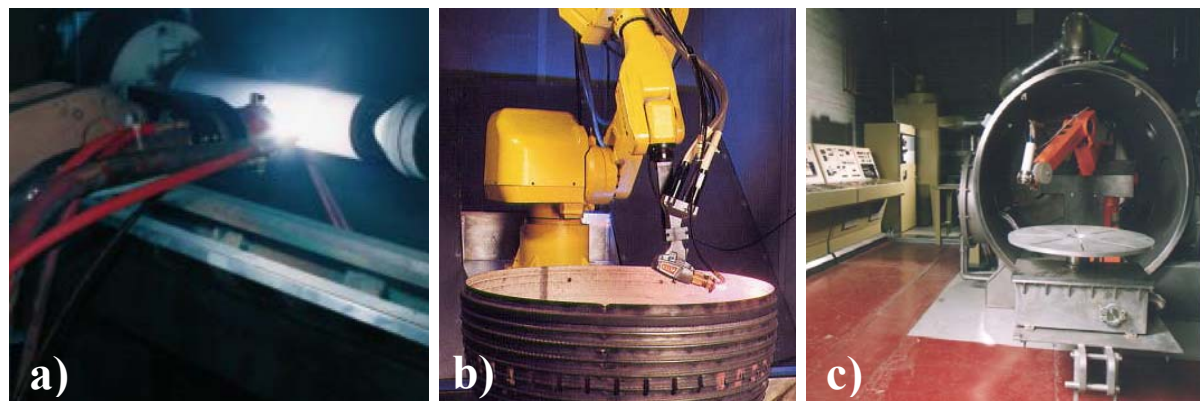
W natryskiwaniu plazmowym mamy do czynienia ze stapianiem ciepłem łuku plazmowego materiału dodatkowego w postaci proszku lub drutu i rzucaniu strumieniem gazu plazmowego roztopionych w nim cząstek materiału dodatkowego na natrykiwaną powierzchnię przedmiotu. Proces natryskiwania plazmowego może być prowadzony w otwartej przestrzeni (natryskiwanie plazmowe atmosferyczne APS – Atmospheric Plasma Spraying), w komorach o regulowanej atmosferze, lub w próżni poniżej 10Pa (natryskiwanie plazmowe próżniowe VPS – Vacuum Plasma Spraying). Najczęściej stosowanymi gazami plazmowymi są argon i azot, a jako gaz pomocniczy stosuje się wodór i hel [43] i [68].



Rys. 2.14. Proces proszkowego natryskiwania plazmowego APS oraz przekrój palnika [43] i [92]

W natryskiwaniu plazmowym proszkowym łuk plazmowy o temp.  $8243 \div 20\,243\text{K}$  ( $8000 \div 20\,000^\circ\text{C}$ ) zajarzany jest w palniku plazmowym, który stanowi dyszę strumienia plazmy i natrykiwanych cząstek proszku (rys.2.14). Stopione cząsteczki natrykiwanego materiału, przyspieszone strumieniem plazmy uderzają w chropowatą, wolną od zanieczyszczeń powierzchnię przedmiotu i silnie przywierają zakleszczając się w jej

nierównościach. W zależności od rodzaju materiału powłoki, warunków technologicznych natrykiwanego przedmiotu między natrykiwaną plazmowo powłoką a materiałem podłoża może wystąpić połączenie mechaniczne, adhezyjne lub metaliczne dyfuzyjne. Na rysunku 2.15 przedstawiono przemysłowe zastosowanie atmosferycznego natrykiwania plazmowego oraz komorę wraz z systemem do natrykiwania próżniowego.



Rys. 2.15. Przykłady przemysłowego natrykiwania plazmowego  
a) i b) metoda APS [92] c) metoda VPS [91]

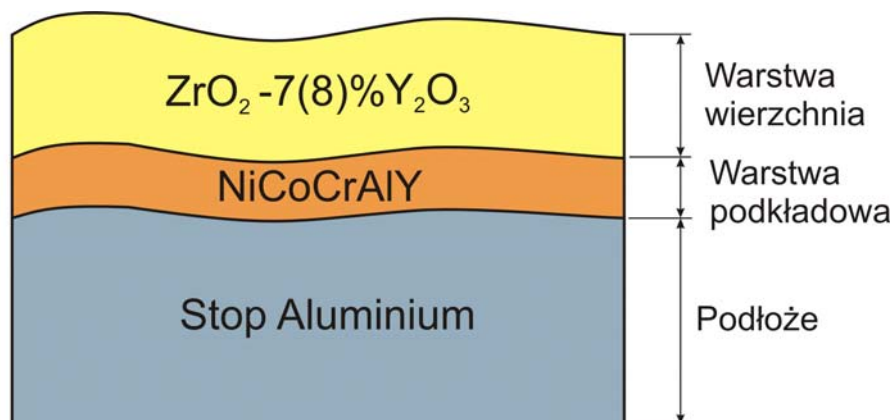
Metoda plazmowego natrykiwania cieplnego ma szerokie zastosowanie do natrykiwania materiałów ceramicznych elementów silników spalinowych oraz elementów turbin gazowych. Przykłady zastosowania przedstawia rysunek 2.16. Metodą tą można wykonywać elementy o grubości ścian nawet 80mm.



Rys. 2.16. Zastosowanie natrykiwania plazmowego powłok ceramicznych w przemyśle samochodowym i lotniczym [68], [49] i [92]

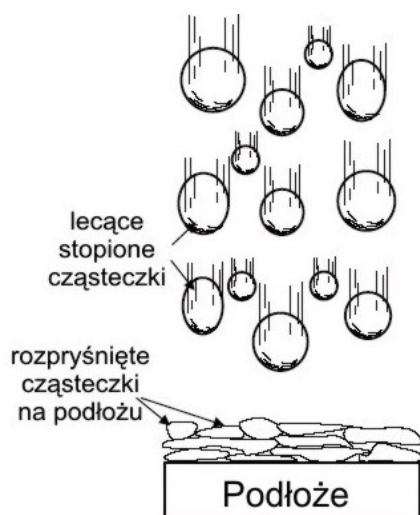
### 3. Analiza powłoki ceramicznej stanowiącej barierę termiczną

W technologii nakładania powłok przez natryskiwanie cieplne opisaną wcześniej w rozdziale 2.3 rozróżnia się trzy podstawowe elementy: podłoże, powłokę wiążącą (warstwę podkładową) i powłokę zasadniczą (warstwę wierzchnią). Typowy przekrój przez warstwową powłokę ceramiczną stosowaną na bariery termiczne przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Przekrój typowej struktury warstwowej powłoki ceramicznej stosowanej na bariery termiczne

Powłoki natryskiwane cieplnie można nakładać na metale, ceramikę, szkło, większość tworzyw sztucznych, gips, papier, tkaniny i drewno, jednak niezależnie od rodzaju podłoża wymaga ono specjalnego przygotowania do procesu natryskiwania. Przygotowanie to polega na usunięciu zanieczyszczeń, lub rozbudowaniu powierzchni za pomocą obróbki



Rys. 3.2. Tworzenie powłoki natryskanej cieplnie

strumieniowo-ściernej. Podstawowym celem tego przygotowania jest uzyskanie jak najlepszych warunków powiązania z natryskiwaną powierzchnią. Powiązanie nakładanej powłoki z podłożem jest kombinacją wiązania metalurgicznego oraz mechanicznego. Na wartość przyczepności powłoki wpływa wiele czynników, z których do najważniejszych należą: rodzaj materiału powłokowego, jakość podłoża, temperatura powierzchni podłoża przed natryskiwaniem, w czasie natryskiwania i po natryskiwaniu oraz energia cząstek w momencie zderzenia z podłożem. Zwiększenie wiązania do natryskiwanej powierzchni uzyskuje się

przez stosowanie specjalnych materiałów, wykorzystujących powstanie reakcji egzotermicznej w momencie tworzenia powłok lub użycie materiałów wykazujących szczególnie dobre powiązanie z podłożem. Nałożenie powłoki wiążącej o grubości od 50 do 150  $\mu\text{m}$  poprzedza natryskiwanie powłoki wierzchniej.

Struktura zarówno powłoki wierzchniej, jak i powłoki wiążącej natryskiwanej w powietrzu, jest różna od struktury tego samego materiału otrzymywanego za pomocą odlewania. Powstaje ona w wyniku nakładania się na siebie ciekłych cząstek natryskiwanego materiału, które się zderzają z podłożem i ulegają odkształceniu (rys. 3.2). Różnice w strukturze są spowodowane naturą procesu, reakcją z otaczającymi gazami i atmosferą, z jaką styka się materiał będący w stanie ciekłym. W przypadku prowadzenia procesu w warunkach otoczenia powstają tlenki użytego do natryskiwania materiału i występują one w znacznych ilościach równomiernie rozłożone w objętości powłoki.

Struktura natryskiwanej powłoki wykazuje budowę płytkową ulegając drobnym modyfikacjom w zależności od użytej metody natryskiwania, parametrów procesu oraz materiału powłokowego. Powłoki ceramiczne w przemyśle nanoszone są różnymi metodami natryskiwania cieplnego. Do najczęściej stosowanych w zależności od przeznaczenia powłoki oraz oczekiwań własności wyróżniamy:

- natryskiwanie gazowe z prętów,
- natryskiwanie gazowe wysokiej prędkości HVOF,
- natryskiwanie detonacyjne DG,
- natryskiwanie plazmowe atmosferyczne APS,
- natryskiwanie plazmowe próżniowe VPS, LPPS,
- natryskiwanie plazmowe wysokiej prędkości HVPS,
- natryskiwanie plazmowe z ciekłych prekursorów lub suspensji SPS,
- próżniowe fizykalne naparowywanie ze wspomaganie wiązką elektronów EB-PVD.

Pokrycia typu barier cieplnych wytwarza się głównie metodą natrysku plazmowego APS ze względu na jej niski koszt oraz dostępność i popularność. W niniejszej pracy do analizy został wybrany jeden z najczęściej stosowanych materiałów na bariery termiczne, tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru dokładnie opisany w rozdziale 2.2.

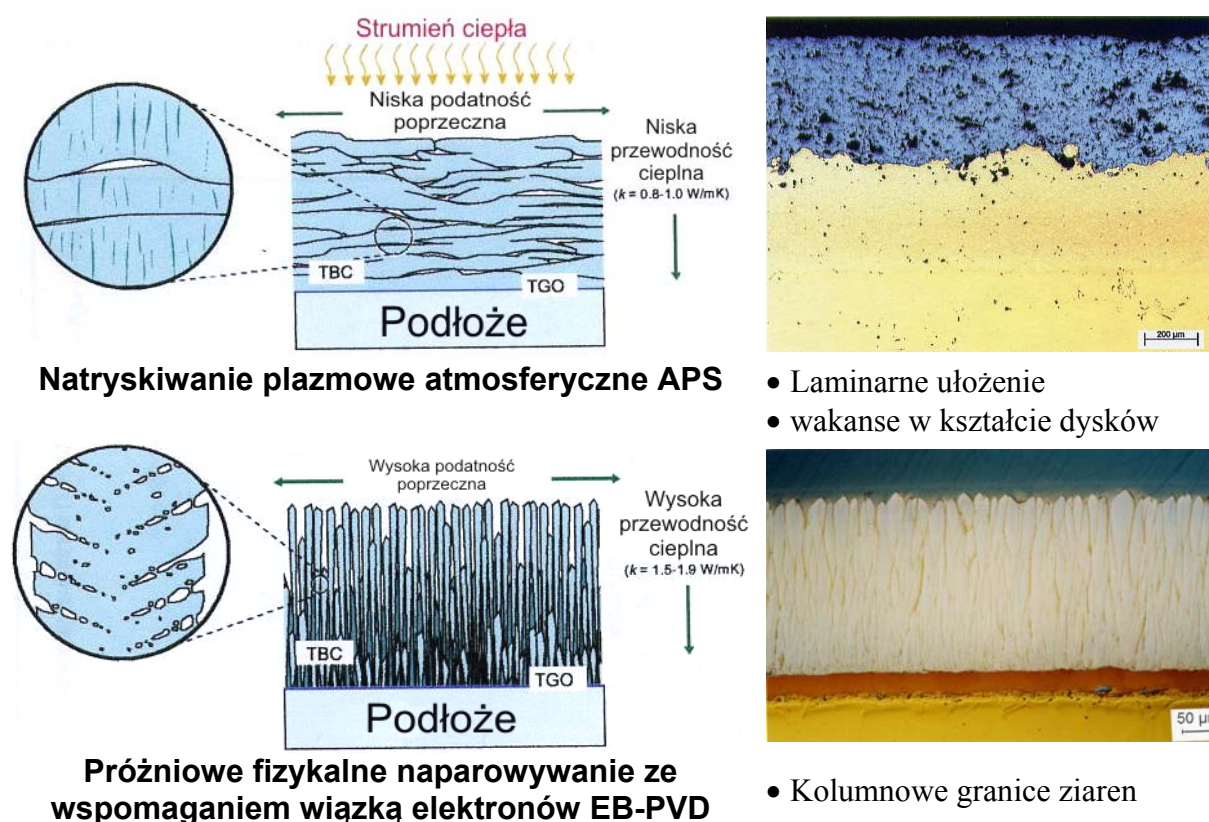
Powłokę ceramiczną dwuwarstwową typu duplex przedstawioną na rysunku 3.1 wykonuje się najczęściej metodą APS, w której na przygotowanym podłożu najpierw nanosimy warstwę podkładową, na ogół typu MCrAlY (M: Ni, Co lub Fe), następnie na niej warstwę ceramiczną z częściowo stabilizowanego  $\text{ZrO}_2$ . Tak jak już wspomniano zadaniem warstwy podkładowej jest zapewnienie dobrej przyczepności wytworzonej struktury do



podłoża oraz zabezpieczenie przed jej korozją. Powierzchnia warstwy podkładowej powinna mieć wielkość i kształt nierówności zapewniający dobrą przyczepność ceramiki. Wytworzona warstwa ceramiczna powinna być na tyle zwarta, aby nie powodować istotnej korozji warstwy podkładowej. Zmienne temperatury pracy bariery termicznej powodują z reguły wzmocnienie korozji oraz odpryskiwanie powłok. Rozważając proces zużycia powłoki możemy go traktować jako sumę dwóch udziałów:

- zmęczenia niskocyklowego spowodowanego zmiennymi temperaturami,
- korozji warstwy podkładowej.

Gęstość natryskiwanej powłoki zależy w dużym stopniu od prędkości cząstek i użytego źródła ciepła, ale zawsze jest mniejsza niż gęstość materiału litego [38]. Tylko natryskiwanie detonacyjne i natryskiwanie płomieniowymi pistoletami naddźwiękowymi, pozwalającymi osiągnąć prędkość cząstek nawet do 1000m/s oraz natryskiwanie w komorach o obniżonym ciśnieniu, pozwalają na uzyskanie powłoki o strukturze porównywalnej do odlewanej i o porowatości bliskiej zeru [38] i [24].



Rys. 3.3. Różne struktury warstwy – porównanie dwóch metod natryskiwania cieplnego [2]

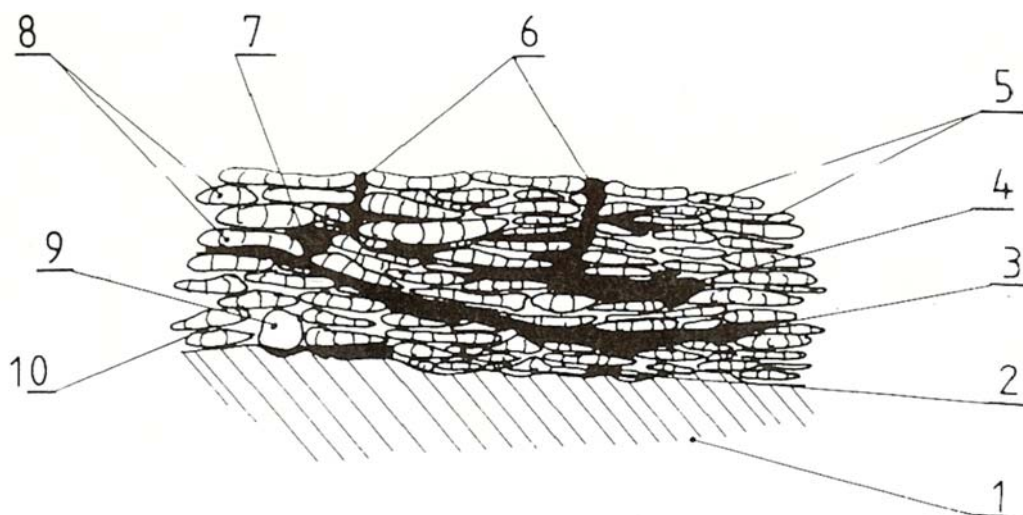
Lepsze własności powłok odpornych na szok termiczny można uzyskać metodą próżniowego fizykalnego naporowywania ze wspomaganie wiązką elektronów (EB-PVD). Powłoki naniesione tą metoda charakteryzują się kolumnową strukturą wykazującą doskonałą

tolerancją odkształceń oraz bardzo dobrą przyczepnością do gładkich powierzchni (rys 3.3). Jednakże, powłoki nanoszone metodą EB-PVD są mniej wytrzymałe w zastosowaniu, gdzie wymaga się częstej pracy cyklicznej (cyklicznego obciążenia cieplnego) oraz gdy narażone są na szybkie chłodzenie po 10 do 20 godzinach cykli termicznych. Należy również dodać, że urządzenia do nanoszenia powłok metodą EB-PVD są bardzo drogie, w efekcie czego powłoki wykonane w ten sposób również są drogie [2].

Wymagania, odnoszące się do właściwości powłok ceramicznych natrykiwanych plazmowo, mogą zmieniać się w zależności od ich zastosowania. Na przykład powłoki stosowane w przemyśle chemicznym muszą mieć odpowiednią odporność na korozję i dużą gęstość. Określona porowatość powłoki będzie bardziej zasadna w przypadku barier cieplnych.

Obliczenia wymiany ciepła w poszczególnych cząstkach podczas natrykiwania wykazały, że krzepnięcie cząstki następuje w czasie kilku mikrosekund, a okres całkowitego ochłodzenia nie przekracza  $100\mu\text{s}$ . Z tego powodu strefa oddziaływania cieplnego na materiał, znajdujący się pod cząstką, jest bardzo mała, a występujący w niej gradient temperatury osiąga wartość ok.  $1 \cdot 10^5 \text{ K/cm}$  [38].

Ze względu na występujące przemiany fazowe omówione wcześniej w czystym  $\text{ZrO}_2$  podczas chłodzenia nie można otrzymać metodą plazmową dobrej powłoki bez wad.



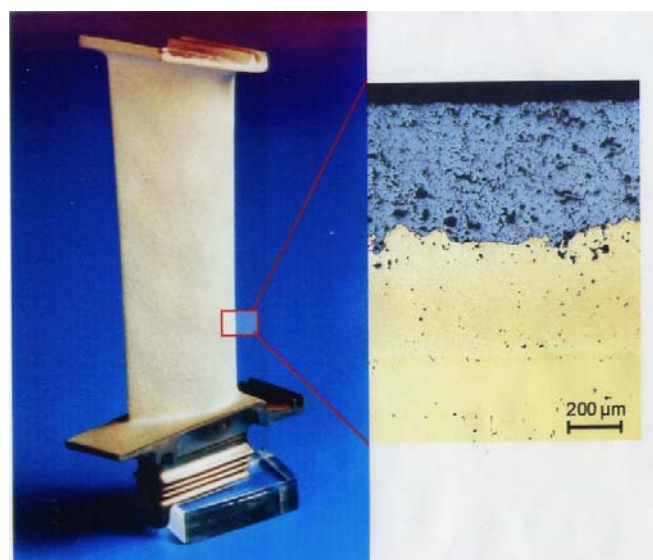
Rys. 3.4. Schematyczny rysunek warstwy natrykanej plazmowo pokazujący możliwe defekty [68].

1- podłoże, 2- niedostateczny kontakt z podłożem, 3- pęknięcia powstałe w wyniku relaksacji naprężeń po jednym przejściu głowicy, 4- pęknięcia powstałe w wyniku relaksacji naprężeń własnych w kierunku pionowym, 5- kolumny płytkowe powstałe w skutek krzepnięcia, 6- pęknięcia powstałe w skutek relaksacji naprężeń własnych w kierunku równoległym do płaszczyzny, 7- luka powstała w skutek niedostatecznej deformacji niepełni przetopionej cząstki, 8- płytki powstałe z w pełni przetopionych cząstek, 9- nie stopione cząstki, 10- luka powstała z niedostatecznego kontaktu pomiędzy-płytkowego

W wyniku natryskiwania i z tym idących procesów krzepnięcia naniesiona powłoka wykazuje strukturę warstwową z możliwymi wadami przedstawiona na rysunku 3.4, a jej własności mogą być rozpatrywane jako wynik odkształcenia i krzepnięcia poszczególnych cząstek oraz ich wzajemnego oddziaływania w miejscach styku między sobą i z podłożem.

Rozważania teoretyczne na temat zjawisk występujących podczas krzepnięcia stopionych cząstek, w wyniku ich zderzenia z zimnym podłożem, są bardzo złożone. Złożoność ta wynika z oddziaływania wzajemnego poszczególnych parametrów procesu oraz z jednoczesnej wymiany ciepła między cząstką a podłożem i sąsiednimi cząstkami. Bardzo duże prędkości, z jakimi zachodzą wspomniane zjawiska, również powodują trudności w bezpośrednich pomiarach i wyznaczeniu określonych wartości eksperymentalnie.

Powłoka ceramiczna stosowana jako bariera termiczna jak wspomniano najczęstsze swe zastosowanie ma w przemyśle lotniczym i samochodowym. Na rysunku 3.5 przedstawiono łopatkę turbiny gazowej pokrytą powłoką TBC metodą APS oraz jej strukturę.



**Bariera termiczna APS**

–  $ZrO_2 - 7 Y_2O_3$

**Warstwa podkładowa odporna na korozję gazową na gorąco LPPS**

– NiCoCrAlY

**Podłoże**

– stop na osnowie Ni

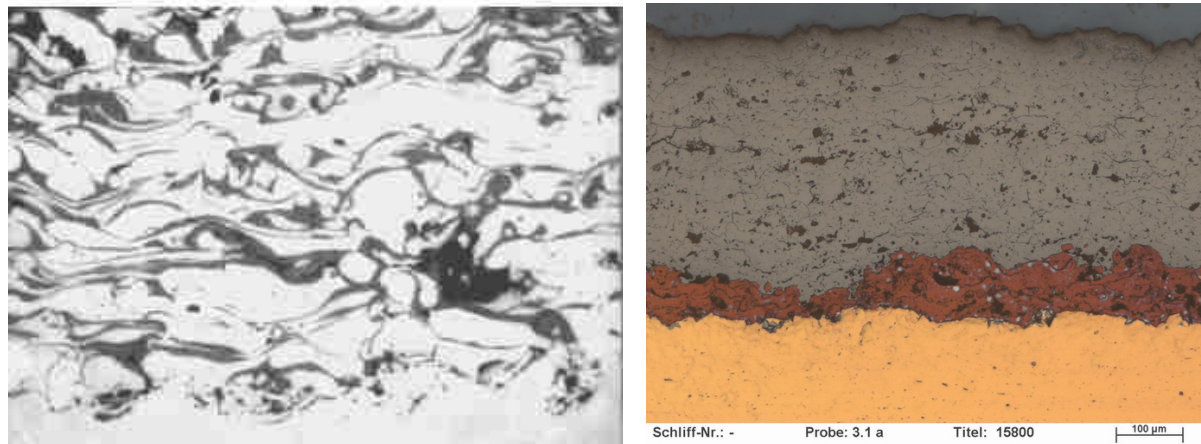
Rys. 3.5. Łopaska turbiny gazowej pokryta TBC oraz widok struktury warstwowej [108]

Bardzo duża szybkość chłodzenia natrykiwanych cząstek po zderzeniu z podłożem, około  $10^6$  K/s, powoduje nierównomierną ich krystalizację. Uzyskana w danych warunkach struktura krystaliczna decyduje o własnościach mechanicznych i eksploatacyjnych natrykiwanej powłoki.

Na rysunku 3.6 przedstawiono strukturę warstwową natrykiwanej metodą APS powłoki ceramicznej  $ZrO_2 - 7Y_2O_3$  z warstwą podkładową NiCoCrAlY. W celu oceny jakości warstwy (oceny wielkości i ilości mikropełnięć po natrykiwaniu) wymagane jest zastosowanie badań mikroskopowych. Badania te mogą być wykonane przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM - Scanning Electron Microscope).

Elektronowy mikroskop skaningowy jest przyrządem elektronooptycznym, rodzajem mikroskopu elektronowego, w którym obraz uzyskiwany jest przez omiatanie próbki wiązką fali elektronowej (wiązka elektronów skupiona jest w postaci małej plamki, która omiata obserwowany obszar linia po linii).

Zdolność rozdzielcza mikroskopu elektronowego jest znacznie większa od mikroskopu optycznego. Dla mikroskopu optycznego podstawowym ograniczeniem zdolności rozdzielczej jest długość fali świetlnej użytej do obserwacji.



Rys. 3.6. Mikrostruktury dwuwarstwowych powłok ceramicznych

Dokładna ocena mikrostruktury warstwy przy użyciu SEM pozwala na kontrolę warstwy po natryskiwaniu cieplnym, jak i w przypadku późniejszych badań odporności na szok termiczny.

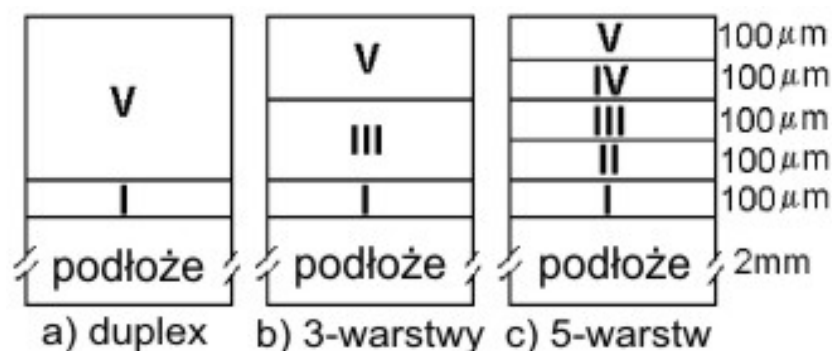
Powłoki TBC składające się z tlenku cyrkonu stabilizowanego itrem charakteryzują się wyjątkową izolacją cieplną i wysoką odpornością temperaturową, ale trwałość tych powłok jest wciąż niewystarczająca. W celu ulepszenia wytrzymałości powłok TBC stosowanych w przemyśle samochodowym i lotniczym niezbędne jest rozpoznanie mechanizmów ich degradacji. Istnieje kilka mechanizmów uszkodzenia TBC, dzięki którym powłoka może odprysnąć od podłoża [2]:

- naprężenia: suma naprężeń własnych i cieplnych,
- zmęczenie cieplne,
- destabilizacja  $ZrO_2 - 7Y_2O_3$  przez zanieczyszczenia z paliw,
- proces spiekania mikropor i mikropęknięć prowadzący do pojawienia się wysokich sił kurczących,
- wzrost międzyfazowej warstwy tlenków pomiędzy warstwą wierzchnią i podkładową powodującej oderwania TBC,
- erozja twardych cząstek.



Również budowa warstwowa TBC powoduje stosunkowo intensywne zużycie ściernie i erozyjne powłok. Najbardziej istotną własnością powłoki jest w tym przypadku kohezja sąsiadujących ziaren powłoki. Odporność na erozję powłok natryskiwanych cieplnie jest najniższa dla metody natryskiwania plazmowego w powietrzu, wyższa dla natrysku plazmowego w próżni, jeszcze wyższa dla powłok wykonywanych metodą naddźwiękową i najwyższa dla spiekanych ceramik [2] i [40].

Wielowarstwowość powłok ceramicznych pozwala na zredukowanie różnic w własnościach materiałowych warstwy wierzchniej i podkładowej, które przyczyniają się do degradacji warstw. Przykładem może być stopniowe mieszanie składu proszku przy natryskiwaniu i nakładanie kilku warstw, co jest przedstawione na rys. 3.7, gdzie  $ZrO_2 - 7Y_2O_3$  zwany w skrócie YSZ mieszany jest z MCrAlY w różnych proporcjach.

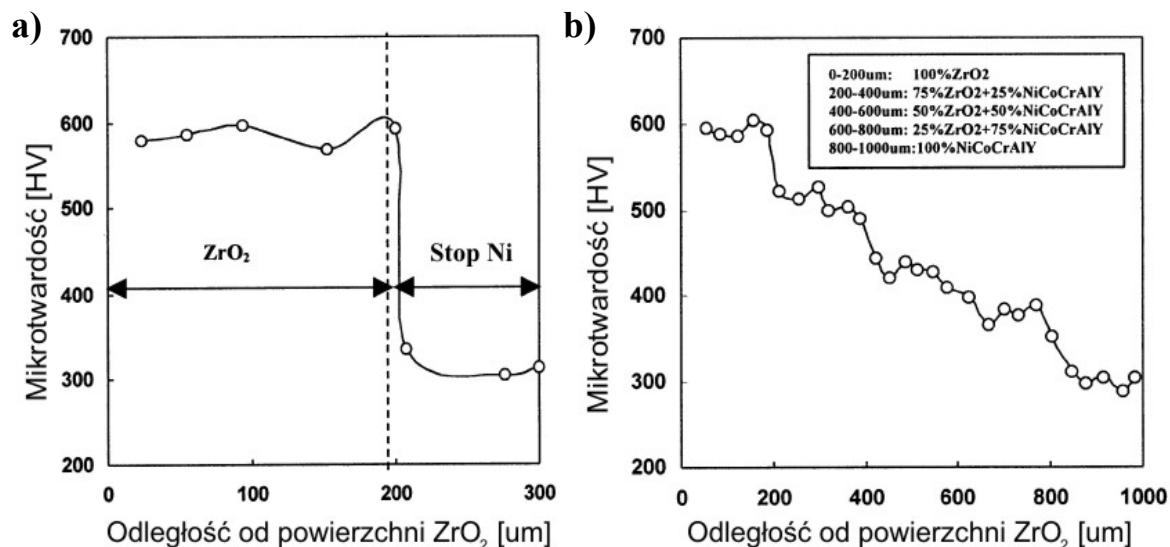


Rys. 3.7. Wielowarstwowość powłok ceramicznych TBC

- I - czysty MCrAlY
- II - 25% YSZ + 75% MCrAlY
- III - 50% YSZ + 50% MCrAlY
- IV - 75% YSZ + 25% MCrAlY
- V - czysty YSZ

Wielowarstwowość pozwala na zmniejszenie naprężeń własnych powłoki, co przyczynia się do zwiększenia sił wiązania między warstwami. Stopniowany skład materiału przyczynia się również do zmniejszenia ostrości powierzchni rozdzielającej fazy oraz zmniejszenia różnicy współczynnika rozszerzalności cieplnej pomiędzy warstwami (podłoże-ceramika) [41]. Dla porównania w pracy [41] przeprowadzono test na szok termiczny powłoki dwuwarstwowej – duplex oraz powłoki 5-cio warstwowej. Otrzymane wyniki są zaskakujące, ponieważ warstwa duplex wytrzymała tylko 19 cykli, gdzie 5-cio warstwowa powłoka aż 90 cykli. Różnice w własnościach możemy też zauważyć na przykładzie mikrotwardości powłok. Na rysunku 3.8 przedstawiono wykresy wartości mikrotwardości powłok typu duplex oraz 5-cio warstwowej.

Powłoka 5-cio warstwowa zachowuje stopniowy charakter zmian mikrotwardości w przeciwieństwie do powłoki dwuwarstwowej.



Rys. 3.8. Różnice w mikrotwardości powłoki TBC a) duplex oraz b) 5-cio warstwowej [40]

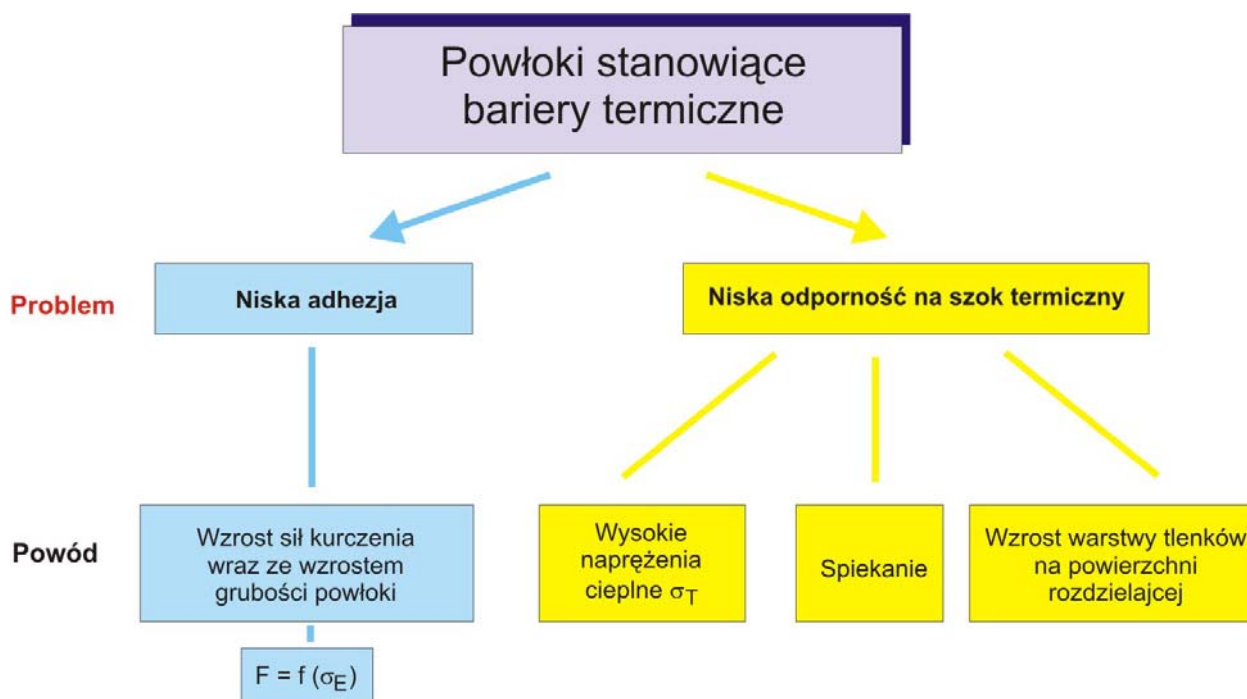
Jeśli chodzi o zastosowanie barier termicznych w silnikach spalinowych, to w literaturze można spotkać następujące wymagania jakie się stawia powłokom TBC stosowanym na elementach silników spalinowych [27], [28], [98], [104] i [32]:

- trwałość przekraczająca 20000h,
- przewodnictwo ciepła niższe niż 2W/mK przy 1270°K,
- grubość powłoki mniejsza 2mm,
- maksymalna temperatura gazów spalinowych-1470°K,
- odporność na zanieczyszczenia obecne w ciężkich paliwach,
- trwałość przekraczająca 5000 cykli temp. pokojowa-1270°K o szybkości narastania zmian temperatury 200K/min,
- trwałość przekraczająca 2000 cykli temp. pokojowa-1470°K.

W niedalekiej przyszłości należy spodziewać się wprowadzenia do powłok typu barier cieplnych dodatków działających jako katalizatory spalania, gdyż prowadzone są w tym zakresie intensywne prace [28] i [104].

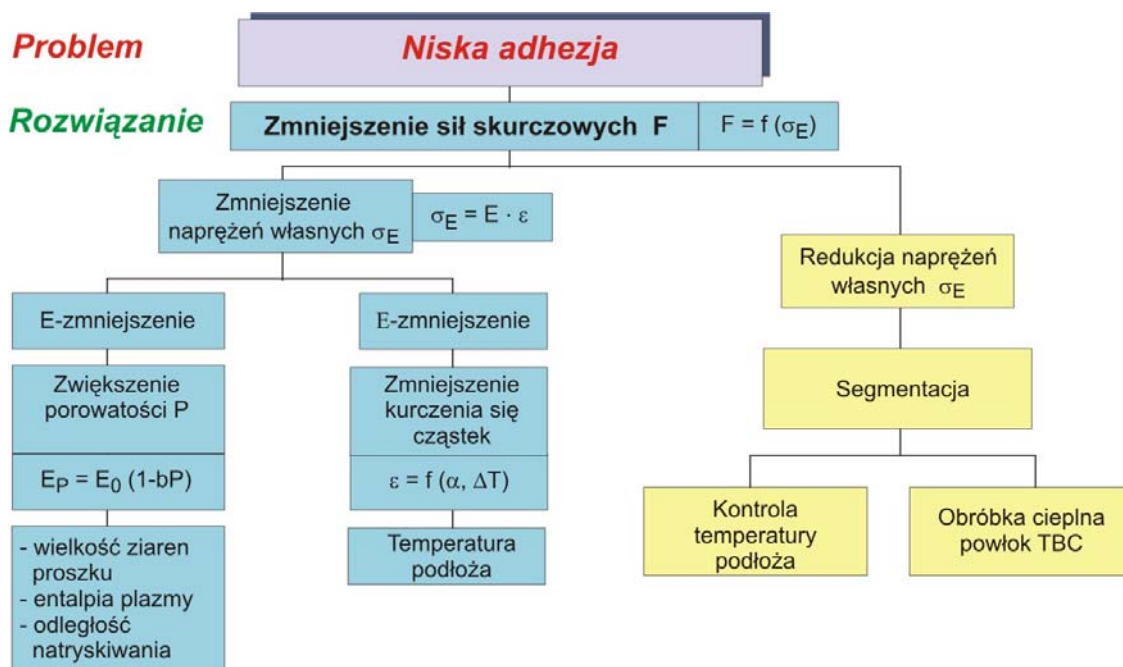
### 3.1. Mechanizmy zużycia powłok ceramicznych stanowiących bariery termiczne

Głównym problemem pojawiającym się przy zastosowaniu powłok stanowiących bariery termiczne jest niska siła wiązania oraz niska odporność na szok termiczny. Najbardziej widoczne jest to dla powłok o grubości ok. 1mm. Innymi problemami drugorzędnymi jest niewystarczająca odporność na korozję oraz niska odporność na erozję. Na rysunku 3.9 przedstawiono główne problemy zastosowania TBC oraz możliwe źródła ich powodowania.



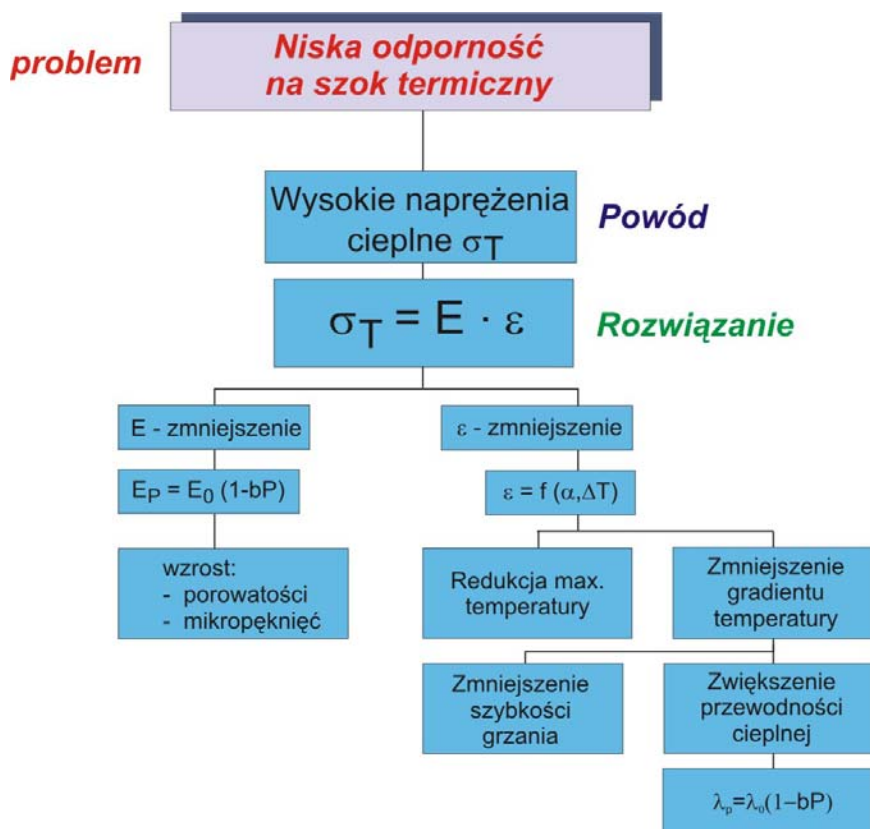
Rys. 3.9. Główne problemy w produkcji i użyciu powłok TBC

Powodem niskiej siły wiązania warstwy jest głównie wzrost sił kurczenia się warstwy wraz ze wzrostem grubości warstwy. Rysunek 3.10 przedstawia zabiegi jakie można zastosować przy produkcji powłoki w celu zwiększenia adhezji warstw.



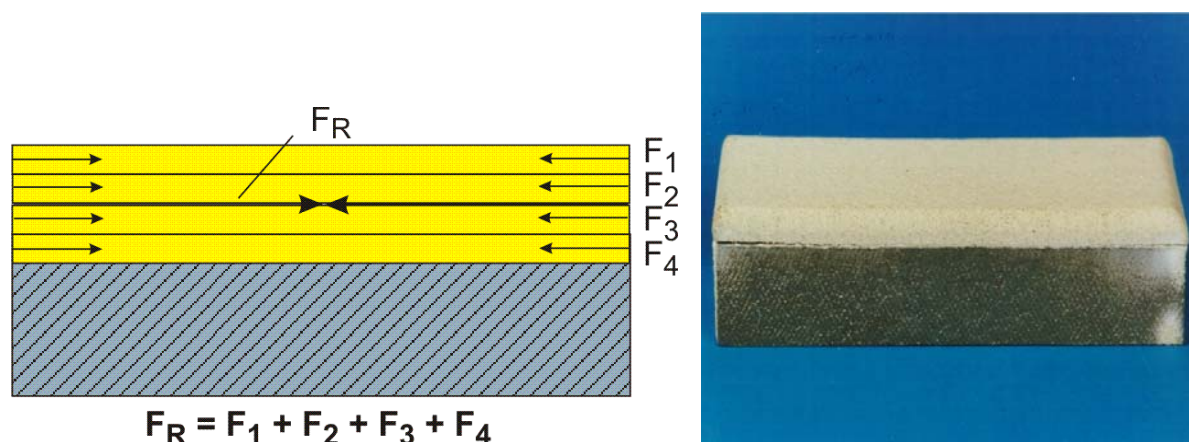
Rys. 3.10. Możliwe rozwiązania w celu ulepszenia siły wiązań warstw powłoki TBC

Wysokie naprężenia cieplne, proces spiekania powłoki oraz rosnąca warstwa tlenków pomiędzy warstwą wierzchnią a podkładową mogą być przyczyną niskiej odporności powłoki ceramicznej TBC na szok termiczny [2]. Na rysunku 3.11 przedstawiono możliwe sposoby na zwiększenie odporności powłoki ceramicznej na szok termiczny.



Rys. 3.11. Zwiększenie odporności na szok termiczny powłok TBC

Siły skurczowe redukują długość warstwy w porównaniu z podłożem lub z warstwą znajdującą pod nią, co przedstawiono na rysunku 3.12. W końcowym efekcie powoduje to zniszczenie warstwy poprzez delaminację po natryskiwaniu.

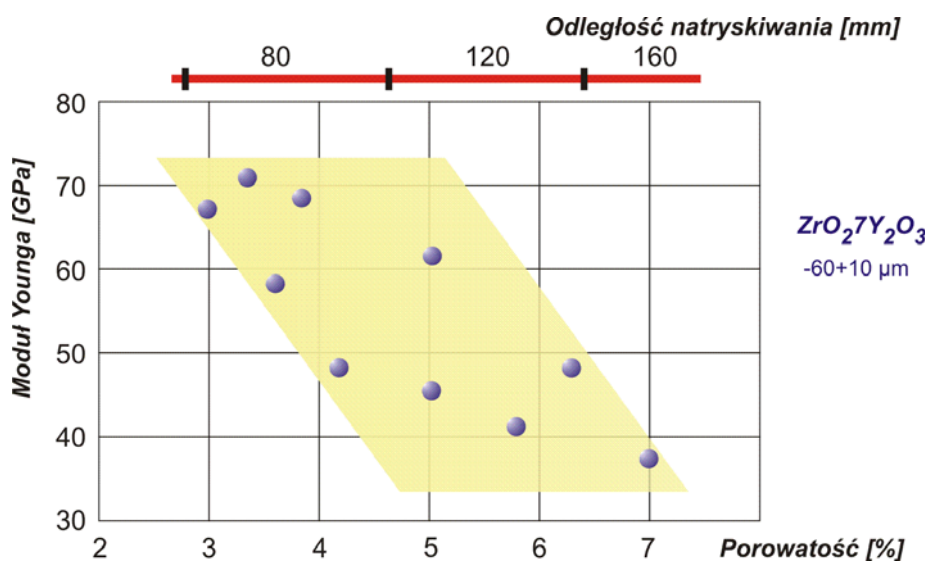


Rys. 3.12. Wzrost sił skurczowych w powłoce TBC wraz ze wzrostem grubości warstwy oraz zdjęcie oddzielania się 3mm powłoki TBC od podłoża w skutek sił skurczowych [2]

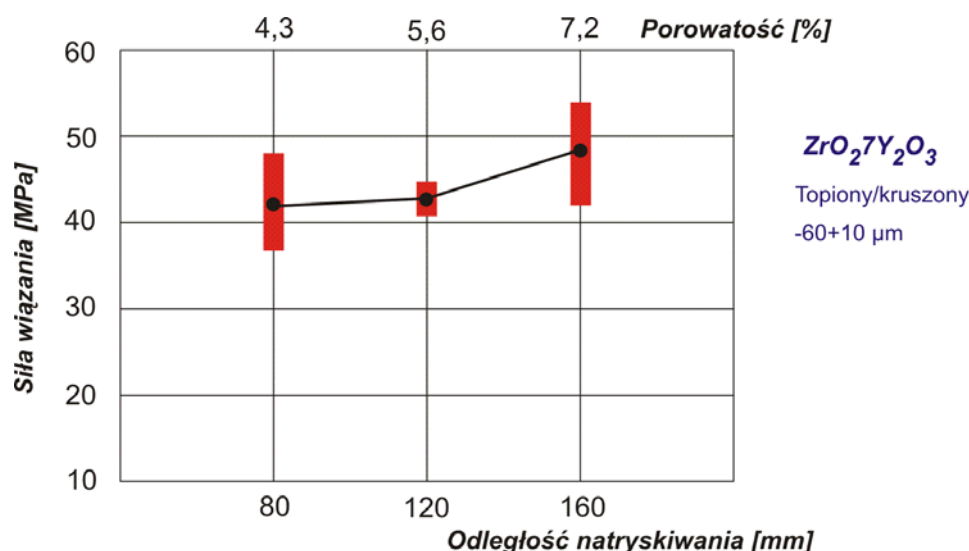
Zmniejszenie sił skurczowych powodujących niską siłę wiązań między warstwami może być osiągnięte dwoma sposobami. Po pierwsze poprzez zmniejszenie naprężeń własnych

$$\sigma_E = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

gdzie  $E$ - moduł Younga może być zmniejszony poprzez zwiększenie porowatości powłoki (rys. 3.13), która jest zależna od jakości proszku, entalpii plazmy i odległości natryskiwania. Wzrost porowatości z 3% do 7% redukuje naprężenia własne o około 50% [2] i [84]. Porowatość również ma wpływ na siłę wiązania w warstwie (rys. 3.14). Zredukowanie kurczenia się natryskiwanych cząstek, które jest uzależnione od temperatury podłoża podczas procesu natryskiwania, zmniejsza wydłużenie  $\varepsilon$ .

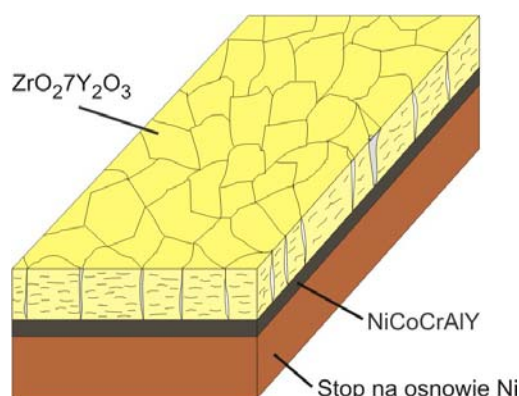


Rys. 3.13. Wpływ porowatości warstwy na moduł Younga [2]



Rys. 3.14. Siła wiązania powłoki TBC w funkcji porowatości warstwy [2]

Drugim sposobem zmniejszenia sił skurczowych jest obniżenie naprężeń własnych. Uzyskać możemy to poprzez segmentację powłoki przedstawioną na rys. 3.15. Stopień segmentacji może być kontrolowany poprzez temperaturę podłoża podczas natryskiwania. Segmentacja prowadzi do pęknięć w powłoce od górnej powierzchni do powierzchni granicznej podłoże-powłoka.

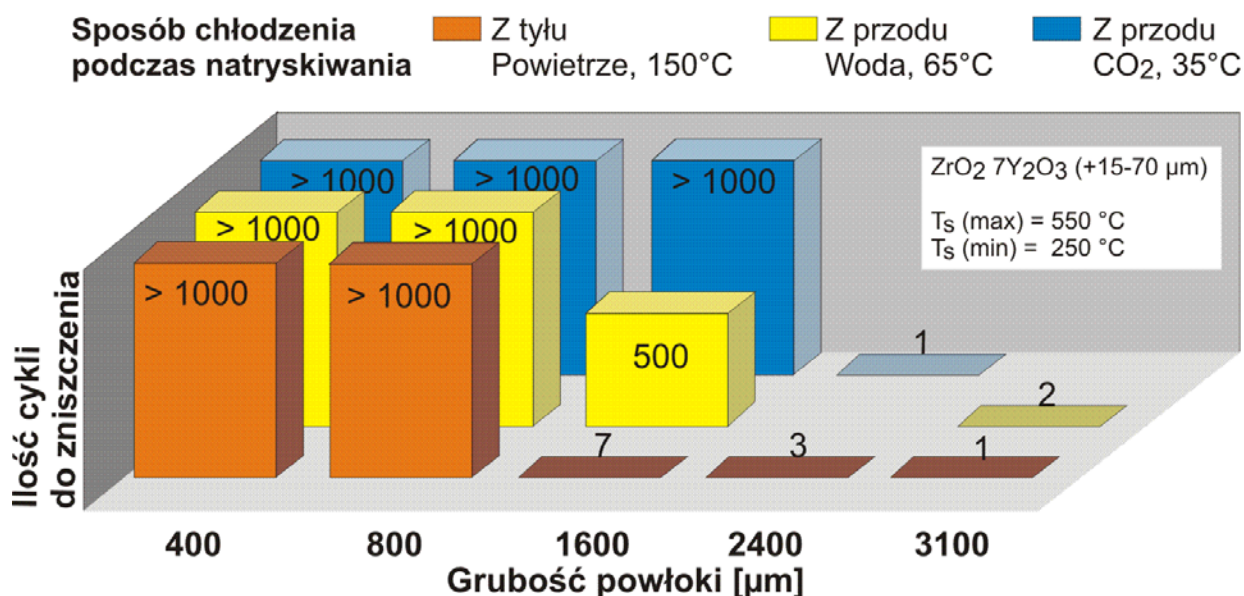


Rys. 3.15. Segmentacja warstwy TBC

Problem niskiej odporności na szok termiczny jest głównie spowodowany przez wysokie naprężenia cieplne  $\sigma_T$  [64], które są funkcją  $E$  oraz  $\varepsilon$ . Stąd redukcja naprężeń cieplnych może zostać uzyskana przez zmniejszenie  $E$  oraz  $\varepsilon$ . Jak wspomniano powyżej moduł Younga jest zależny od porowatości oraz również od mikropeknięć, a wydłużenie może być zredukowane przez zmniejszenie gradientu temperatury. W celu zmniejszenia gradientu temperatury należałoby zwiększyć przewodność cieplną [107] i [2]. Mikropeknięcia w powłoce powstają podczas chłodzenia cząstek po naniesieniu na podłoże (rys 5.5). Im szybszy proces chłodzenia, tym większa jest ilość mikropeknięć w powłoce. Tego typu pęknięcia z reguły są małe, rzędu mniej niż  $100\mu\text{m}$  i są widoczne tylko przy użyciu SEM.



Aby obniżyć naprężenia cieplne, możemy zmniejszyć moduł Younga poprzez zwiększenie liczby mikropęknięć w powłoce czyli zwiększenie gradientu temperatury (normalnie wynoszącego ok.  $10^5$  K/s). Efekt ten możemy uzyskać poprzez dodanie dodatkowego chłodzenia próbek np. gazem lub wodą. Im bardziej wydajne jest chłodzenie, tym większa jest odporność powłoki ceramicznej TBC na szok termiczny. Rysunek 3.16 przedstawia wyniki badań przeprowadzonych na próbkach o różnej grubości stosując różne sposoby chłodzenia.

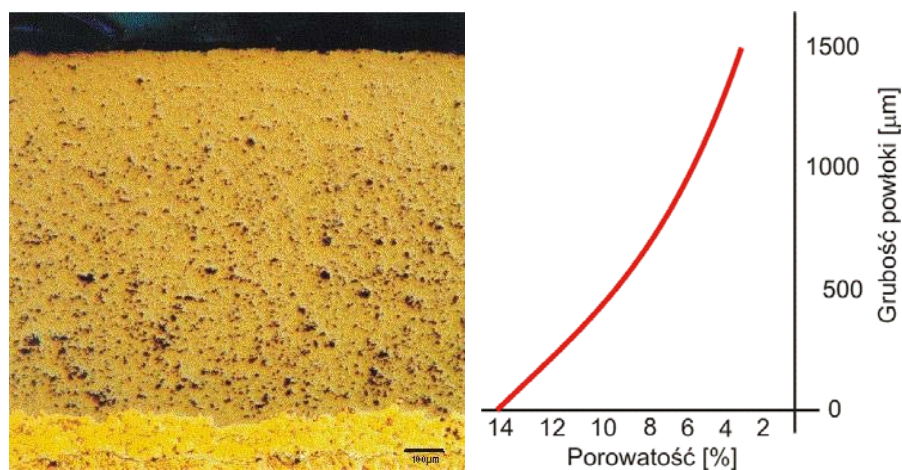


Rys. 3.16. Odporność na szok termiczny TBC w funkcji grubości powłoki oraz metody chłodzenia [2]

W procesie przeprowadzenia testu odporności na szok termiczny przy użyciu palnika gazowego jako źródła ciepła, stan powłoki TBC możemy kontrolować gradientem temperatury podczas grzania. Dana próbka podgrzewana jest do zadanej temperatury następnie chłodzona do momentu, w którym temperatura minimalna zostanie osiągnięta. Temperatura w sposób ciągły jest kontrolowana przy użyciu termopar usytuowanych na styku powłoki ceramicznej z podłożem. Powłoka ceramiczna pozostaje niezniszczona dopóki czas potrzebny na nagrzanie próbki do temperatury zadanej jest niezmienny. Powłokę ceramiczną możemy uznać za zniszczoną dopiero, gdy czas potrzebny na nagrzanie próbki obniży się. Wówczas test zostaje przerwany, a liczba przeprowadzonych cykli jest szacowana jako odporność powłoki TBC na szok termiczny.

Analizując powłokę ceramiczną TBC można stwierdzić, że z jednej strony aby zredukować moduł Younga porowatość jest bardzo ważna, zaś z drugiej strony gradient temperatury powinien zmaleć poprzez wzrost przewodności cieplnej (przez zmniejszenie

porowatości). Aby pogodzić te dwa przeciwne efekty, można zastosować stopniowaną strukturę – stopniowaną porowatość (rys 3.17). Część powłoki przy powierzchni warstwy wierzchniej ma małą porowatość i przez to gradient temperatury jest mniejszy, zaś wraz ze wzrostem porowatości w głąb powłoki gradient wzrasta. Na porowatość można wpłynąć poprzez zmianę odległości podczas natryskiwania palnika plazmowego od podłoża [95] i [101].

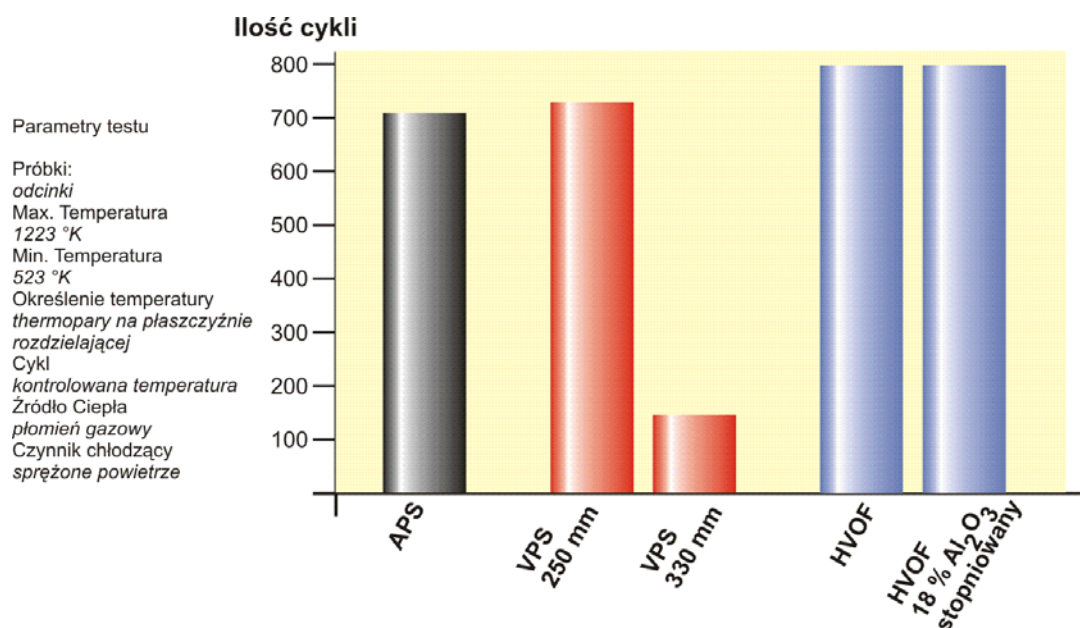


Rys. 3.17. TBC z stopniowaną porowatością [2] i [84]

Innym sposobem uzyskania stopniowania jest dodanie cząstek innego materiału np.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Poprzez tego typu dodatek możemy nie tylko zwiększyć odporność na szok termiczny ale również zwiększyć odporność na erozję. Podane przykładowe zabiegi poprawienia odporności powłoki na szok termiczny były uzyskiwane przy natryskiwaniu plazmowym typu APS. Inne metody opisane we wcześniejszej części pracy jak VPS czy HVOF pozwalają uzyskać inną strukturę warstwy oraz zwiększyć odporność na szok termiczny, jednak są one nieekonomiczne co w wyniku podraża koszty produkcji powłok TBC.

Należałoby również wspomnieć, że w przypadku produkcji powłok TBC bardzo duży wpływ na odporność na szok termiczny ma odległość podczas natryskiwania od palnika plazmowego. Przykładowo jak pokazano na rys. 3.18 powłoka natrykiwana z odległości 250mm ma pięć razy większą odporność na szok termiczny niż powłoka natrykiwana z odległości 330mm [2] i [3]. Przyczyną tego jest powstanie mikropęknięć tylko przy 250mm dystansie przy natryskiwaniu.





Rys. 3.18. Odporność na szok termiczny powłok TBC natrykiwanych metodami APS, VPS oraz HVOF [2] i [3]

Reasumując powyższe rozważania można stwierdzić, iż na różne wartości porowatości, liczbę mikropęknięć i segmentację ma wpływ odległość natrykiwania, temperatura podłoża i prędkość chłodzenia cząstek materiału [96]. To pozwala na uzyskanie powłok TBC o dobrej odporności na szok termiczny i dużej sile wiązań między warstwami. W procesie analizy bądź modelowania warstwowych powłok stanowiących bariery termiczne, wzięcie pod uwagę wszystkich tych warunków jest bardzo ważne i zarazem konieczne. Właściwe projektowanie-modelowanie powłok pozwoli na uzyskanie warstw o wyjątkowej – wystarczającej odporności na szok termiczny w zależności od przeznaczenia danej powłoki.

#### 4. Przegląd istniejących metod wyznaczania temperatury

Stan fizyczny każdego ciała fizycznego określony jest przez wartości zwane parametrami stanu. Jednym z tych podstawowych parametrów stanu ciała jest temperatura, która w środowisku zawsze ma określoną wartość [53] i [65]. W dowolnym punkcie tego ciała i w określonym czasie występuje temperatura, którą można zapisać:

$$T = T(x, y, z, t) \quad (4.1)$$

gdzie:  $x, y, z$  - współrzędne dowolnego punktu ciała,  $t$  - czas.

Wartość temperatury wyraża się w bezwzględnej skali temperatury – *kelwinach* ( $K$ ).

Jeżeli w danej chwili w każdym punkcie pewnego obszaru ciała podana jest temperatura to przyjmując, że dane ciało znajduje się w prostokątnym układzie współrzędnych zapis taki dla wielu punktów lub całego obiektu określa tzw. *pole temperatury*.

Pole temperatury pojawiające się w odkształconym ciele stałym jest przyczyną powstania w nim stanów odkształcenia i naprężenia o charakterze trwałym lub przemijającym. Wywołane zmianami wartości i rozkładów temperatury naprężenia określa się jako naprężenia cieplne. Naprężenia te wywołują znaczny wpływ na pracę, wytrzymałość oraz trwałość elementów i układów konstrukcyjnych.

Z temperaturą ściśle związane jest pojęcie *przepływu ciepła* lub *wymiany ciepła* [53] i [65]. Gdy pole temperatury zmienia się w czasie (gdy w równaniu 3.1  $t \neq 0$ ) wymiana ciepła jest *nieustalona*, natomiast w przypadku gdy pole temperatury nie zmienia się w czasie, czyli gdy temperatura jest tylko funkcją współrzędnych przestrzeni

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4.2)$$

mamy do czynienia z ustalonym przepływem ciepła.

Zbiór punktów o jednakowych temperaturach tworzy *linię izotermiczną*, natomiast w przestrzeni *powierzchnię izotermiczną*.

Przepływ ciepła w przyrodzie i technice jest zjawiskiem powszechnym. Występuje on pomiędzy ciałami o różnej temperaturze. Może się to odbywać różnymi mechanizmami fizycznymi: *przewodzeniem, przejmowaniem i promieniowaniem*.

*Przewodzenie* ciepła spowodowane jest różnicą temperatur i polega na przenoszeniu energii kinetycznej mikroskopowego ruchu cząsteczek ciał stykających się bezpośrednio lub pomiędzy różnymi obszarami tego samego ciała. Przewodzenie to przebiega zgodnie

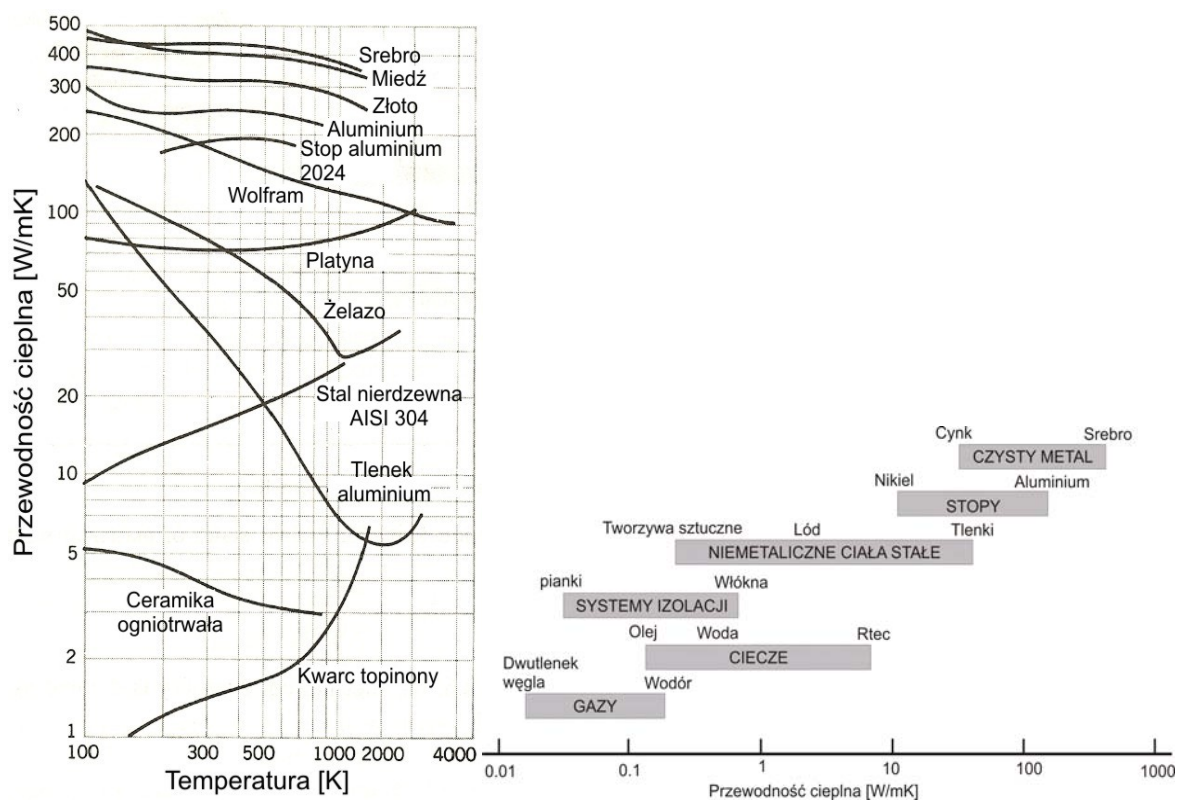
z prawem Fouriera, które określa gęstość przewodzonego strumienia ciepła jako wprost proporcjonalną do gradientu temperatury. Prawo to ma postać:

$$q = -\lambda \text{grad}T, \quad (4.3)$$

lub w zapisie skalarnym:

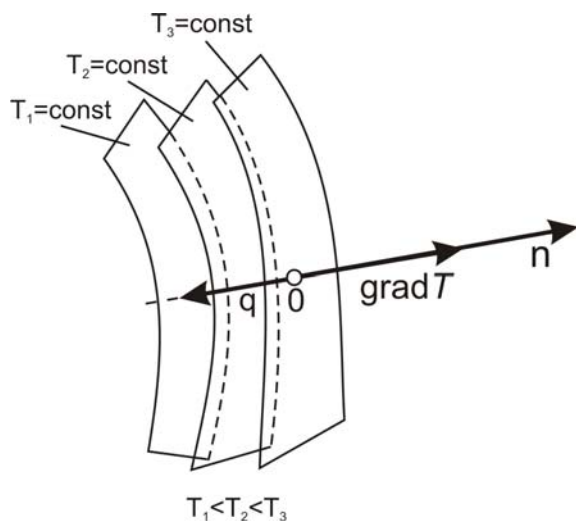
$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (4.4)$$

gdzie  $\text{grad}T$  jest gradientem temperatury w kierunku przepływu ciepła prostopadle do powierzchni izotermicznej (rys 4.1), a  $\lambda$ , to współczynnik przewodzenia ciepła wyrażany w  $W/(mK)$ .



Rys. 4.1. Przewodność cieplna w funkcji temperatury dla różnych materiałów ceramicznych, organicznych oraz metali [72] i [44].

Współczynnik przewodności cieplnej zależy od rodzaju ciała i jego parametrów termodynamicznych (temperatury, gęstości, ciśnienia), a w ciałach anizotropowych od kierunku propagacji ciepła. Na rysunku 4.1 przedstawiono wartości współczynnika przewodzenia ciepła w funkcji temperatury dla różnych materiałów. Materiały ceramiczne charakteryzują się niską przewodnością cieplną co wyróżnia je w aspekcie dobrych izolatorów ciepła – barier termicznych.



Rys. 4.2. Kierunek przepływu ciepła pomiędzy izotermami

Przejmowanie ciepła określa się jako przepływ ciepła pomiędzy powierzchnią ciała stałego a opływającym tę powierzchnię płynem. Wiąże się to z makroskopowym ruchem cząstek płynu (zwanym konwekcją) przy równoczesnym występowaniu przewodzenia w płynie.

Gęstość przejmowanego strumienia ciepła  $q$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) przenoszonego podczas przejmowania ciepła określona jest prawem Newtona:

$$q = \alpha(T_a - T_s), \quad (4.5)$$

gdzie  $\alpha$  - współczynnik przejmowania ciepła, [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ];  $T_a$  - temperatura płynu, [K];  $T_s$  - temperatura ścianki [K].

Wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła sprawia trudności ze względu na zależność  $\alpha$  od różnych czynników takich jak: rodzaj płynu, jego temperatura, prędkość przepływu i geometria ciała.

*Promieniowanie termiczne* [53] i [65] polega na wysyłaniu przez ciała o temperaturze wyższej od temperatury zera bezwzględnego fal elektromagnetycznych, takich samych jak fale promieniowania świetlnego, lecz obejmujących cały zakres długości fal od zera do nieskończoności lub selektywnie tylko niektóre długości fal. W wyniku promieniowania termicznego energia wewnętrzna ciała przekształca się w energię promieniowania elektromagnetycznego, która po napotkaniu innych ciał lub innych części tego samego ciała częściowo lub całkowicie jest pochłaniana i przekształcana w energię wewnętrzną. Emitowany przez ciało strumień energii zależy od własności fizycznych i chemicznych ciała, od stanu jego powierzchni oraz jego temperatury. Cechą charakterystyczną promieniowania termicznego jest to, że nie odbywa się ono między ciałami stykającymi się, lecz między ciałami rozdzielonymi ośrodkiem przenikliwym dla promieniowania termicznego lub nawet próżnią.

Z analizą przepływu ciepła związanych jest bardzo wiele zagadnień, które są uwzględniane w obliczeniach inżynierskich. Rozwiązywanie tych zjawisk można podzielić na kilka czynności:

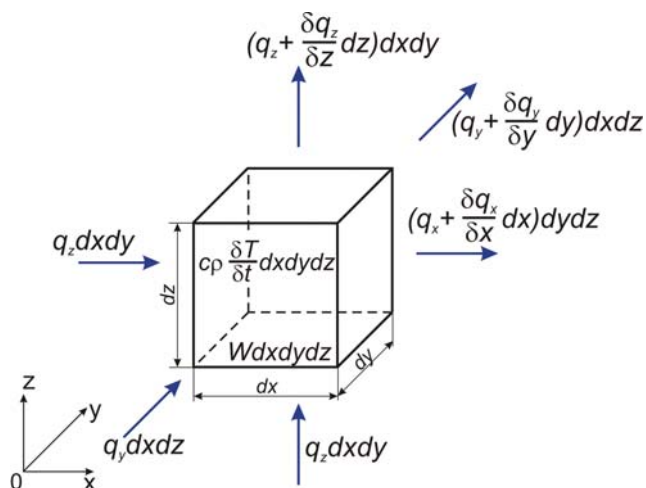
- określenie modelu fizycznego zjawiska,
- sporządzenie matematycznego modelu,
- wybór metody rozwiązania zagadnienia,
- przyjęcie warunków początkowych i brzegowych,
- realizacja wybranej metody rozwiązania problemu,
- opracowanie wyników w postaci wzorów, tablic lub wykresów,
- analiza wyników i wykorzystanie ich do dalszych obliczeń technicznych.

Szeroki zakres przedstawionych zagadnień obiektu fizycznego, pozwala na stosowanie wielu metod określania pola temperatury obiektów fizycznych. Można je badać metodami zarówno teoretycznymi, jak i doświadczalnymi.

#### 4.1. Metody analityczne

W metodach analitycznych stosuje się różne sposoby rozwiązywania równań określających pole temperatury przy uwzględnieniu warunków początkowych i brzegowych. Metody analityczne dają wyniki w postaci wzorów matematycznych, które dla prostych przypadków wymiany ciepła są dosyć dokładne. W przypadku obiektów o skomplikowanych kształtach rozwiązania analityczne wymagają jednak bardzo dużych założeń upraszczających, co prowadzi do znacznych rozbieżności w wynikach obliczeń numerycznych.

Do określania pola temperatury w ciele stałym wykorzystuje się równanie różniczkowe przewodzenia ciepła, które otrzymuje się na podstawie równania bilansu energii dla elementarnej objętości substancji [53], [65] i [77]. Biorąc pod uwagę jednorodne izotropowe ciało wykonane z materiału o gęstości  $\rho$ , cieple właściwym  $c_p$  i współczynnikiem przewodzenia ciepła  $\lambda$ , przyjmujemy że wewnątrz występuje przepływ ciepła określony w każdym jego punkcie gęstością strumienia ciepła  $q$ . Zakładając ponadto, że w ciele istnieją wewnętrzne źródła ciepła o wydajności  $q_v$ , określonej jako energia ciepła wydzielana w jednostce objętości i czasu w danym punkcie ciała. W celu uzyskania zależności opisującej pole temperatury zastosowany zostanie bilans energetyczny dla wyodrębnionego myślowo elementu prostopadłościennego przedstawionego w układzie współrzędnych  $x, y, z$ , jako prostopadłościan o bokach  $dx, dy, dz$  (rys. 4.3).

Rys. 4.3. Bilans cieplny dla elementarnego prostopadłościanu  $dx, dy, dz$ 

Rozważając przepływ ciepła przez ścianki elementu prostopadłe do osi  $x$  to w ciągu jednostki czasu do wnętrza elementu wnika ciepło  $q_x dy dz$  [53], [65] i [37]. Z wnętrza na zewnątrz wypływa ciepło  $\left(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx\right) dy dz$ .

Wyznaczając różnicę tych wielkości otrzymamy ubytek ciepła z wnętrza elementu, dla przepływu w kierunku osi  $x$  równy  $\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz$ .

Po uwzględnieniu przepływu ciepła przez pozostałe ścianki otrzymujemy łączny ubytek ciepła z wnętrza elementu w postaci sumy o wartości

$$dQ = \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dx dy dz. \quad (4.6)$$

Wartość w nawiasie określa się dywergencją wektora  $\mathbf{q}$  i oznacza  $\text{div} \mathbf{q}$ . Wielkość ta wyraża ubytek w jednostce objętości i jednostce czasu ilości ciepła przepływającego przez dany punkt ciała. Drugi składnik bilansu cieplnego, który oznaczymy symbolem  $dQ_2$ , wynika z istnienia wewnętrznych źródeł ciepła o wydajności  $W$  i wyraża się wzorem

$$dQ_2 = q_v dx dy dz. \quad (4.7)$$

Trzecim składnikiem omawianego bilansu będzie ciepło  $dQ_3$ , które w jednostce czasu akumuluje się we wnętrzu elementu i wynika z jego pojemności cieplnej określonej ciepłem właściwym  $c$  danego materiału. Zmianę temperatury  $T$  elementu w jednostce czasu wyraża pochodna cząstkowa  $\partial T / \partial t$  temperatury względem czasu, a stąd

$$dQ_3 = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz. \quad (4.8)$$

Z bilansu cieplnego wynika, że różnica ciepła wpływającego do elementu i wypływającego z niego musi być równa ciepłu w nim akumulowanemu, czyli

$$dQ_2 - dQ_1 = dQ_3. \quad (4.9)$$

Po podstawieniu odpowiednich wartości i uproszczeniach otrzymujemy równanie różniczkowe przewodzenia ciepła w rozpatrywanym ciele:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + q_v = 0 \quad (4.10)$$

upraszczając równanie 4.10 otrzymujemy:

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + q_v = 0 \quad (4.11)$$

Przy stałym współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda$ , po wprowadzeniu operatora Laplace'a

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (4.12)$$

otrzymuje się równanie różniczkowe przewodzenia ciepła w postaci:

$$\left( \lambda \nabla^2 - c\rho \frac{\partial}{\partial t} \right) T + q_v = 0. \quad (4.13)$$

Równanie to określa pole temperatury w rozpatrywanym ciele. Jeżeli założymy, że brak jest wewnętrznych źródeł ciepła i że rozkład temperatury nie zależy od czasu, to równanie 4.13 przyjmuje postać równania Laplace'a

$$\nabla^2 T = 0. \quad (4.14)$$

W przypadku nieustalonego przewodzenia ciepła, równanie różniczkowe można przedstawić w ogólnej postaci:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} + \frac{k \partial T}{l \partial l}, \quad (4.15)$$

gdzie:  $k = 2$ ,  $l = r$  dla kuli,  $k = 1$ ,  $l = r$  dla walca,  $k = 0$ ,  $l = x$  dla płaskiej płyty.

Rozwiązanie przedstawionych powyżej równań różniczkowych pozwala na określenie rozkładu temperatury w różnych zagadnieniach związanych z obciążeniem cieplnym konstrukcji.

Równanie różniczkowe nieustalonego przewodzenia w ciałach stałych daje najogólniejszy związek między temperaturą, czasem i współrzędnymi przestrzeni. Aby z dowolnie dużej liczby rozwiązań wybrać tylko takie, które odpowiada rozpatrywanemu zjawisku, należy określić warunki jednoznaczności jego rozwiązania. Do takich warunków jednoznaczności rozwiązania równania różniczkowego nieustalonego przewodzenia ciepła w ciałach stałych należą [37], [93], [53] i [65]:

- warunki geometryczne, określające kształt geometryczny ciała,
- warunki fizyczne, określające własności fizyczne materiału, z którego wykonane jest ciało,
- rozkład wydajności wewnętrznych źródeł ciepła,
- warunki początkowe, określające rozkład temperatury w umownej chwili początkowej.

Na przykład w przypadku przyjęcia równomiernej temperatury początkowej o wartości  $T_0$ , warunek początkowy można wyrazić wzorem

$$T(P, t_0) = T_0, \quad (4.16)$$

gdzie  $P$  oznacza dowolny punkt ciała.

Warunki brzegowe [65], określają warunki wymiany ciepła na powierzchniach zewnętrznych ciała. Mogą być określane dla przewodzenia ciepła w ciałach stałych różnymi sposobami. Ze względu na zastosowania praktyczne szczególne znaczenie mają cztery sposoby.

Warunki brzegowe pierwszego rodzaju, tzw. *warunki Dirichleta*, określone są przez rozkład temperatury  $T_s$  na powierzchni ciała w każdej chwili.

Warunki brzegowe drugiego rodzaju, tzw. *warunki Neumanna*, podane są przez rozkład gęstości strumienia ciepła  $\dot{q}_s$  na powierzchni ciała w każdej chwili.

Warunki brzegowe trzeciego rodzaju, tzw. *warunki Fouriera*, polegają na określeniu temperatury  $T_p$  płynu otaczającego ciało i współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  w każdym miejscu powierzchni ciała i w każdej chwili.

Przejmowanie ciepła od powierzchni ciała stałego przez płyn jest opisywane przez *prawo Newtona* stwierdzające, że gęstość strumienia ciepła przejmowanego przez płyn od powierzchni ciała stałego jest wprost proporcjonalna do różnicy temperatury powierzchni ciała  $T_s$  i płynu  $T_p$ , czyli:

$$q_s = \alpha(T_s - T_p). \quad (4.17)$$



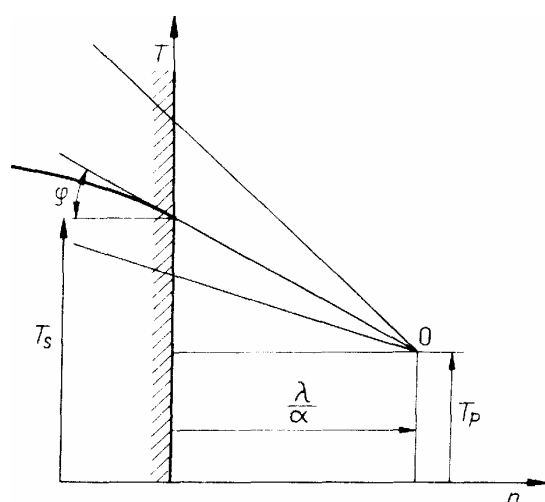
Temperatura płynu jest określana w sposób ściśle ustalony. Współczynnik proporcjonalności  $\alpha$  nazywany jest *współczynnikiem przyjmowania ciepła*.

Gęstość strumienia ciepła w kierunku prostopadłym do powierzchni ciała stałego może być również obliczona na podstawie prawa Fouriera, zatem gradient temperatury w ciele stałym przy powierzchni zewnętrznej wynosi:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_s = -\frac{\alpha}{\lambda_s}(T_s - T_p), \quad (4.18)$$

gdzie:  $\lambda_s$  - współczynnik przewodzenia ciepła ciała stałego,  $n$  - współrzędna prostopadła do powierzchni ciała. Gradient temperatury przy powierzchni ciała przedstawia tangens kąta między prostopadłą do powierzchni ciała stałego a styczną do krzywej rozkładu temperatury w ciele stałym u jego powierzchni (rys. 4.4).

Warunki brzegowe czwartego rodzaju występują wtedy, gdy przewodzenie ciepła po



Rys. 4.4. Graficzna interpretacja gradientu temperatury [65]

obydwu stronach powierzchni idealnego styku dwóch ciał stałych jest opisywane przez prawo Fouriera. W tym przypadku warunki brzegowe obejmują równość temperatury obydwu ciał na powierzchni styku:

$$T_{s1}(P_s, t) = T_{s2}(P_s, t), \quad (4.19)$$

oraz równości gęstości strumieni ciepła po obydwu stronach styku

$$q_s = -\lambda_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial n}\right)_s = -\lambda_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial n}\right)_s, \quad (4.20)$$

W przypadku ustalonego przewodzenia ciepła (tj. wymiany ciepła w nieruchomym czynniku) bez zewnętrznych źródeł ciepła mamy do czynienia z najprostszym przypadkiem równania Fouriera-Kirchhoffa

$$\nabla(\lambda \nabla T) = 0 \quad (4.21)$$

W przypadku gdy temperatura zależy od jednej zmiennej rozpatrujemy trzy jednowymiarowe przypadki, dotyczące następujących układów współrzędnych [37] i [53]:

- kartezjańskiego  $(x, y, z)$
- cylindrycznego  $(r, \varphi, z)$
- sferyczny  $(r, \varphi, \psi)$

Uwzględniając zależność przewodności od temperatury, przyjmując  $\lambda = \lambda(T)$  oraz przypadek zależności liniowej to:

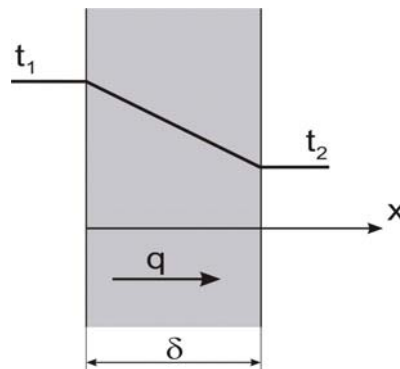
$$\lambda = \lambda_0 + K_\lambda T \quad \text{gdzie} \quad K_\lambda = \text{const.} \quad (4.22)$$

Biorąc pod uwagę przypadek płaskiej ściany (rys. 4.5) równanie 4.21 przybiera postać

$$\frac{d}{dx} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (4.23)$$

Całkując otrzymujemy  $\lambda dT/dx = \text{const} = -q$ . Strumień cieplny więc jest stały. Rozdzielając zmienne otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \lambda(T)dT &= -qdx \\ \int \lambda(T)dT &= -qx + \text{const} \end{aligned} \quad (4.24)$$



Rys. 4.5. Przewodzenie ciepła w jednowarstwowej przegrodzie płaskiej

Nawiązując do rysunku 4.4 wyznaczamy stałą gdzie dla  $x = 0$  mamy  $T = T_1$ . Stąd:

$$\begin{aligned} \text{const} &= \int_{T_1}^T \lambda dT \\ qx &= \int_{T_1}^T \lambda dT \end{aligned} \quad (4.25)$$

Aby określić wielkość  $q$  wykorzystujemy drugi warunek gdzie dla  $x = \delta$  mamy  $T = T_2$  i otrzymujemy ogólny wzór:

$$q = \frac{1}{\delta} \int_{T_2}^{T_1} \lambda dT \quad (4.26)$$

Podstawiając równanie (4.22) do powyższego wzoru po dokonaniu działań otrzymujemy:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\delta} \left( \lambda_0 + K_\lambda \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \quad (4.27)$$

Wrażenie w nawiasie stanowi średnią arytmetyczną przewodności cieplnych dla skrajnych temperatur:

$$\lambda_m = \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_2) = \lambda_0 + K_\lambda \frac{T_1 - T_2}{2} \quad (4.28)$$

W związku z tym otrzymujemy ogólny wzór:

$$q = \frac{\lambda_m}{\delta} (T_1 - T_2) \quad (4.29)$$

Łącząc go z wzorem (4.26) otrzymamy wzór na średnią wartość przewodność w danym zakresie temperatur.

$$\lambda_m = \frac{1}{T_1 - T_2} \int_{T_2}^{T_1} \lambda(T) dT \quad (4.30)$$

Jeśli przewodność jest liniowa zależna od temperatury to średnia wartość jest średnią arytmetyczną. Proces przepływu ciepła można porównać z przepływem prądu elektrycznego gdzie często wykorzystywany jest wzór (4.30). Wtedy to strumień cieplny porównuje się z prądem, a spadek temperatury z napięciem elektrycznym [37] i [53]. Rolę oporu elektrycznego  $R$  odgrywa wielkość, która nazwana jest analogicznie oporem cieplnym:

$$\frac{\delta}{\lambda_m} = R \quad (4.31)$$

Uogólniając wzór (4.29) nie koniecznie opór cieplny musi być określany wzorem jak powyżej. Wielkość  $R$  opór cieplny możemy wyrazić w postaci  $R=1/\alpha$  a wartość  $q$  przyjmuje postać:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (4.32)$$

Jeśli mamy do czynienia ze strumieniem cieplnym pokonującym szeregowo ustawione opory cieplne (tak jak w przypadku elementów warstwowych, rys. 4.6) to opory cieplne sumuje się jak opór wypadkowy.

$$R = \sum R_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (4.33)$$

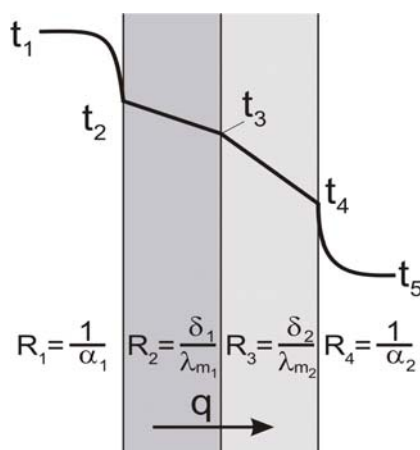
Opór  $R_i$  oznacza opór cieplny nr  $i$ , występujący przy spadku temperatury  $\Delta T_i$ , który wynosi:

$$\Delta T = \sum \Delta T_i, \quad (4.34)$$

Strumień cieplny w takim przypadku wynosi:

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_i} \quad (4.35)$$

W przypadku gdy mamy do czynienia z przewodzeniem ciepła przez płaską ścianę wielowarstwową.



Rys. 4.6. Przenikanie ciepła w przypadku szeregowego połączenia oporów cieplnych – materiał kompozytowy [53]

Bazując na przypadku przedstawionym na rysunku 4.6 i wzorze (4.29) otrzymamy dla poszczególnych warstw zależności:

$$q = \frac{\lambda_m}{\delta} (T_i - T_{i+1}) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (4.36)$$

$$\Delta T = \sum_{i=1, 2, 3, \dots} (T_i - T_{i+1}) = q \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{mi}} = q \sum R_i$$

Jeśli oprócz oporów cieplnych przewodzenia ciepła wystąpią jeszcze opory cieplne przejmowania ciepła  $R = 1/\alpha$  to występuje przypadek przenikania ciepła. Stąd sumując powyższe równania otrzymujemy ogólny wzór:

$$R = \sum \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta}{\lambda_m} \quad (4.37)$$

Szczegółowiej bazując na rysunku 4.6 równanie to możemy zapisać:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_{m1}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{m2}} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (4.38)$$

Odwrotność oporu cieplnego przenikania ciepła nazywamy współczynnikiem przenikania ciepła  $k$  i zapisujemy wzorem:

$$k = \frac{1}{R} = \frac{1}{\sum \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta}{\lambda_m}} \quad (4.39)$$

Na rysunku 4.6 przedstawione przypadek bardzo wyidealizowany, z którego wynika że temperatury stykających się warstw przewodzących są identyczne. W rzeczywistości występują tam zawsze pewien spadek temperatury.

Między powierzchniami styku dwóch ciał często występuje opór termiczny zwany *termicznym oporem kontaktowym*. Powstaje on wtedy, gdy powierzchnie dwóch ciał stałych nie stykają się ze sobą idealnie, a tylko wierzchołkami nierówności. Wolne przestrzenie między powierzchniami styku wypełnione są płynem (gazem lub cieczą) o mniejszej przewodności cieplnej niż materiały stykających się ciał.

Termiczny opór kontaktowy zależy od chropowatości (gładkości) stykających się powierzchni, nacisków jednostkowych na powierzchnie, rodzaju ośrodka zawartego w szczelinie między powierzchniami i od temperatury w obszarze styku. Na ogół jest on wyznaczany eksperymentalnie.

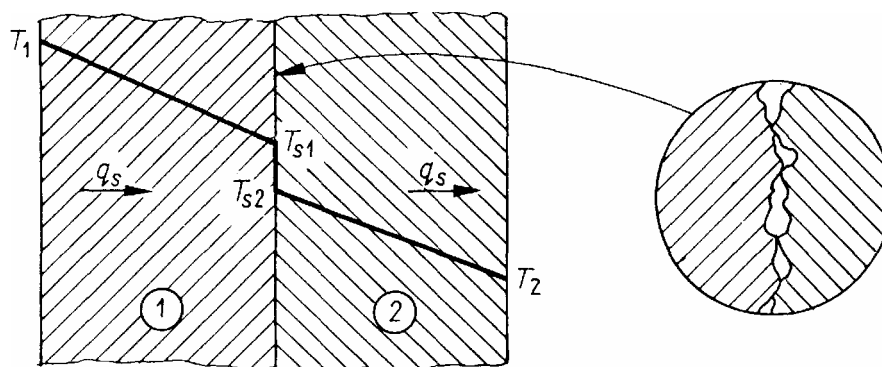
Uskok temperatury na powierzchni styku  $T_{s1} = T_{s2}$  (rys. 4.7) przy termicznym oporze kontaktowym  $r_s$  i gęstości strumienia ciepła  $q_s$  wynosi

$$T_{s1} - T_{s2} = r_s q_s. \quad (4.40)$$

Z warunku brzegowego czwartego rodzaju łącząc powyższą zależność z wzorem (4.20) otrzymujemy warunek brzegowy przy nie idealnym styku dwóch ciał stałych i ma on postać matematyczną:

$$q_s = -\lambda_1 \left( \frac{\partial T_1}{\partial n} \right)_{s1} = -\lambda_2 \left( \frac{\partial T_2}{\partial n} \right)_{s2} = h_s (T_{s1} - T_{s2}), \quad (4.41)$$

gdzie  $h_s = \frac{1}{r_s}$  jest współczynnikiem wymiany ciepła przez styk.



Rys. 4.7. Uskok temperatury na styku dwóch ciał

Przy wymianie ciepła przez promieniowanie między powierzchniami ciał występują całkiem odrębne warunki brzegowe. Gęstość strumienia ciepła wymienianego przez promieniowanie jest wtedy proporcjonalna do różnicy czwartych potęg temperatury bezwzględnej. Warunki brzegowe wymiany ciepła warto jest zaznaczyć na rysunku rozpatrywanego obiektu zwanego wtedy *modelem matematycznym przewodzenia ciepła*.

Rozwiązywanie zagadnień przy rozpatrywaniu pól temperatury w ciałach stałych można zaliczyć do zadań różnych typów [11]:

- *zadania proste*, polegające na określeniu rozkładu temperatury z danych warunków początkowych i brzegowych oraz właściwości materiałowych rozpatrywanego ciała,
- *zadania odwrotne*, polegające na określeniu warunków brzegowych lub początkowych, położenia wewnętrznych źródeł ciepła, właściwości termofizycznych ciała, położenia granicy fazy substancji itp. ze znanych niektórych wartości temperatury wewnątrz ciała i ewentualnie innych danych.

Rozwiązując równania różniczkowego przewodzenia ciepła przy danych warunkach jednoznaczności jego rozwiązania, należy sprawdzić czy dane zagadnienie jest *poprawnie sformułowane* pod względem fizycznym, czyli czy model fizyczny opisuje zjawisko jednoznacznie pod względem fizycznym i czy nie jest sprzeczny z prawami fizyki, np. prawem zachowania energii. Zadane warunki brzegowe nie mogą być sprzeczne a ich liczba nie może być zbyt mała lub zbyt duża. W zagadnieniach ustalonego przewodzenia ciepła strumienie ciepła i wewnętrzne źródła ciepła muszą się bilansować. W przypadku gdy nie podano przynajmniej jednej temperatury, obliczenia pola temperatury będą mogły być zrealizowane tylko względem dowolnie przyjętej temperatury odniesienia. Formułowanie zagadnień odwrotnych często sprawia problemy co powoduje, że są one niepoprawnie sformułowane.

*Zagadnienie brzegowe*, obejmujące równanie różniczkowe i warunki brzegowe przewodzenia ciepła, jest liniowe, jeżeli właściwości termofizyczne substancji tworzącej ciało, wewnętrzne źródła ciepła oraz oddziaływania na brzegu ciała nie zależą od temperatury. Tego typu zagadnienie liniowe można rozłożyć na zagadnienia prostsze, łatwiejsze do rozwiązania, a następnie zastosować superpozycję (nakładanie się) tych rozwiązań. *Superpozycja* rozwiązań przewodzenia ciepła polega na algebraicznym sumowaniu pól temperatury. Superpozycjonowane mogą być zarówno ustalone, jak i nieustalone pola temperatury.

Innym uproszczeniem zagadnienia nieliniowego jest *Linearyzacja* zagadnienia brzegowego, tak że ulega ono przekształceniu w liniowe. Przewidując, że temperatura ciała zmienia się stosunkowo mało w przestrzeni lub wolno w czasie, to można przyjąć zmienne wielkości termofizyczne decydujące o nieliniowości pola jako stałe dla średniej temperatury pola.

Nieliniowość warunków brzegowych drugiego, trzeciego i czwartego rodzaju może być spowodowana zależnością współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury, a w przypadku warunków brzegowych trzeciego rodzaju również zależnością współczynnika przejmowania ciepła od temperatury (np. przy konwekcji swobodnej). Silnie nieliniowy warunek brzegowy może być stanowić występowanie wymiany ciepła przez promieniowanie na powierzchni ciała.

Szczególny przypadek nieliniowości przewodzenia ciepła występuje przy zmianie fazy substancji, np. topnieniu lub krzepnięciu. Wtedy na powierzchni międzyfazowej działa źródło ciepła o stałej wydajności, lecz o położeniu zależnym od temperatury. Jest to tzw. *zagadnienie Stefana*. Nieliniowość spowodowaną przez zależność współczynnika przewodzenia ciepła od temperatury eliminuje się dla zagadnień ustalonych za pomocą *przekształcenia Kirchhoffa* [53] i [65]

$$\mathcal{G} = \left( \lambda_0 \int_{T_0}^T \lambda(T) dT \right)^{-1} \quad (4.42)$$

gdzie  $\lambda_0$  jest współczynnikiem przewodzenia ciepła przy temperaturze odniesienia  $T_0$ , a wtedy otrzymuje się liniowe równanie różniczkowe Laplace'a

$$\nabla^2 \mathcal{G} = 0. \quad (4.43)$$

Spośród różnych metod zastosowania analizy matematycznej do wyznaczania pola temperatury można wyróżnić metodę rozdzielania zmiennych. Wyjaśnienie jej na przykładzie określenia temperatury w płycie o stałej grubości przedstawiono w pracy [65] i [109].



## **4.2. Metody doświadczalne**

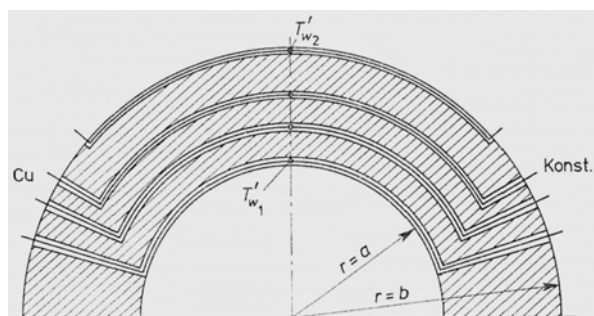
Przedstawione powyżej metody analityczne określania pola temperatury, a w szczególności podstawowe równania różniczkowe (4.11), wymagają znajomości wielu warunków brzegowych i początkowych w celu jednoznaczności rozwiązania. Oprócz tego bardzo istotne jest również znalezienie wpływu tychże warunków brzegowych na pole temperatury. Często w fazie projektowania konstrukcji warunki brzegowe są zwykle wstępnie oszacowane, a następnie za pomocą innych metod np. numerycznych, wyliczane są temperatury i naprężenia cieplne. Wyniki takich numerycznych obliczeń umożliwiają wstępne ustalenie obszarów, w których występują duże różnice temperatur (gradienty temperatur). Obliczenia te pozwalają — w okresie planowania eksperymentu — na właściwe usytuowanie czujników pomiarowych na obiekcie badanym.

W kolejnym etapie badań pomierzone temperatury ciała mogą być wykorzystane jako dane do rozwiązania odwrotnego. Stają się one danymi wejściowymi w zagadnieniu przewodzenia ciepła i ustaleniu lokalnych wartości współczynników przejmowania ciepła. Dla tak ustalonych obciążeń cieplnych zadanie powtarzane jest od początku aż do uzyskania dostatecznej zbieżności obliczeń numerycznych i wyników doświadczalnych. Osiągnięcie dobrej zgodności obliczeń numerycznych z wynikami doświadczalnymi wymaga zatem doskonalenia nie tylko modeli obliczeniowych, ale także metod badawczych określania rozkładów temperatur w badanych ciałach.

Zagadnienie pomiarów temperatury ciała ograniczyć można do dwóch zasadniczych a zarazem najczęściej stosowanych metod pomiarowych. Należy tu wymienić metodę pomiaru temperatury za pomocą termoelementów oraz metodę pomiarów termowizyjnych [25], [76] i [109].

### 4.2.1. Pomiary za pomocą termoelementów

Podstawowym praktycznym sposobem pomiaru temperatur w badaniach naprężeń cieplnych jest zastosowanie czujników termoelektrycznych — *termoelementów* [65], [13] i [109]. Zaletą tych czujników jest prostota ich wykonania, małe rozmiary, wysoka czułość w szerokim zakresie temperatur, stabilność wzorcowania oraz względnie niska wartość stałej czasowej. Dla uzyskania wymaganej dokładności pomiaru temperatur na ściankach modelu niezbędne jest właściwe usytuowanie przewodów termoelementu na powierzchni badanego przedmiotu bądź w jego wnętrzu (np. wzdłuż grubości jego ścianki). Ponadto zakłada się, że



usytuowanie termoelementu nie wpływa na przepływ ciepła (przez konwekcję i promieniowanie) z badanego ciała do otaczającego go płynu i odwrotnie.

W tym celu spoinę pomiarową z termoelektrodami umieszcza się wzdłuż linii izotermicznych we wstępnie przygotowanych płytkach rowkach (rys 4.8).

### 4.2.2. Pomiary temperatury za pomocą termowizji



Rys. 4.9. Kamera termowizyjna Firmy FLUKE [90]

Badania termowizyjne (rys. 4.9) opierają się na znanym zjawisku fizycznym polegającym na emitowaniu fal elektromagnetycznych przez każde ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego. Promieniowanie to, nazywane jest ze względu na długość fali, promieniowaniem podczerwonym, a ze względu na właściwości, promieniowaniem cieplnym[65].

Intensywność promieniowania cieplnego jest proporcjonalna do temperatury ciała. Mierząc promieniowanie podczerwone wysyłane przez dane ciało mierzymy więc pośrednio także jego temperaturę.

Dla ciała doskonale czarnego powiązanie temperatury z natężeniem promieniowania podczerwonego przedstawia się następująco:

$$T = \sqrt[4]{\frac{E_0}{C_0}} \cdot 100, \quad (4.44)$$

gdzie:

$E_0$  - natężenie promieniowania cieplnego w  $W/m^2$ ,

$C_0$  - stała promieniowania (emitancja) ciała doskonale czarnego równa  $5.6693 W/(m^2K^4)$ ,

$T$  - temperatura bezwzględna powierzchni w  $K$ .

Zgodnie z prawem Kirchoffa, współczynnik promieniowania powierzchni ciała szarego  $C$  możemy określić następująco:

$$C = \varepsilon C_0, \quad (4.45)$$

gdzie:

$\varepsilon$  - współczynnik absorpcji - emisyjność [-],  $C_0$  - j.w.

Współczynnik emisyjności ciała jest miarą jego sprawności promieniowania i pochłaniania. Określa ilość ciepła wypromieniowanego z  $1 m^2$  powierzchni ciała w ciągu  $1 h$  do próżni przy absolutnej temperaturze promieniującej powierzchni  $100 K$ .

Ciała szare nie podlegają prawom określającym zachowanie się ciała czarnego. Okazuje się jednak, że prawa te mogą być stosowane i dla ciała szarego przez pomnożenie odpowiednich zależności przez współczynnik emisyjności.

I tak w przypadku np. prawa Stefana-Boltzmana zastosowanego dla ciała szarego otrzymuje się

$$W = \varepsilon \sigma T^4, \quad (4.46)$$

gdzie:

$T$  — temperatura bezwzględna w  $K$ ,

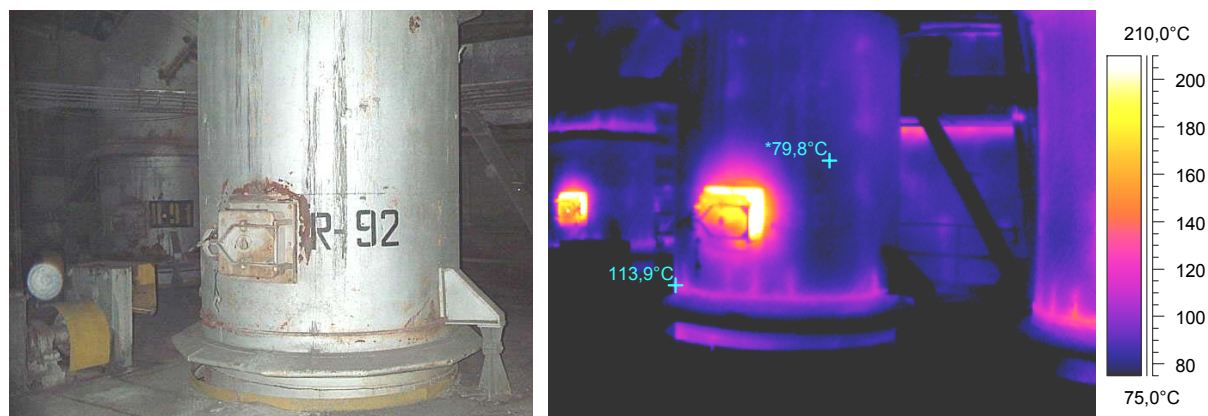
$\sigma$  — stała Stefana-Boltzmana równa  $5,673 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$ .

Współczynnik emisyjności można, zgodnie z powyższym, określić jako wskaźnik odchylenia własności ciała promieniującego od własności ciała doskonale czarnego. Im ten współczynnik jest mniejszy tym bardziej ciało ma własności ciała szarego. Dla ciała doskonale czarnego byłby jednością, a dla ciał szarych zależy od ich składu chemicznego oraz sposobu wykończenia powierzchni. W tabeli 4.1 zestawiono orientacyjne wartości  $\varepsilon$  dla niektórych materiałów.

Tabela 4.1 Emisyjność  $\varepsilon$  niektórych materiałów [65]

Material	Temperatura °K	$\varepsilon$
Aluminium polerowane	498-575	0,039-0,057
Aluminium chropowate	299	0,055
Aluminium utlenione przy 873 K	473-873	0,11-0,19
Chrom	373-1273	0,08-0,26
Chromnikiel	398-1307	0,64-0,76
Cynkowa blacha błyszcząca	301	0,228
Miedź polerowana	353-388	0,018-0,023
Mosiądz szlifowany	295	0,2
Mosiądz utleniony przy 873 K	473-873	0,61-0,59
Srebro polerowane	498-898	0,020-0,032
Stal nierdzewna	753-1073	0,22-0,575
Żeliwo nieobrobione	1198-1388	0,87-0,95
Żeliwo toczone	1103-1263	0,60-0,70
Szkło	295	0,937
Woda	273-373	0,95-0,963

Należy dodać, że oprócz pokryć metalicznych do temperatury 500 °C kolor powierzchni nie ma wpływu na natężenie promieniowania cieplnego. Kamera termowizyjna jest to urządzenie mierzące natężenie promieniowania podczerwonego. Natężenie promieniowania przeliczone jest (przy założonej emisyjności  $\varepsilon$ ) na wartości temperatur i przedstawiane w postaci wizualnej, odcieniami szarości lub kolorami. System termowizyjny pozwala zmierzyć temperaturę w sposób bezdotykowy i w wielu punktach jednocześnie. Należy jednak pamiętać, że porównywać temperatury na termogramie, możemy bezpośrednio tylko w obrębie jednego materiału. Dla materiałów o różnych emisyjnościach temperatury należy przeliczyć. Występowanie różnorodnych materiałów nie uniemożliwia przeprowadzenia badań, lecz wymaga wnikliwszej analizy.



Rys. 4.10. Fragment rurosuszarki w bloku energetycznym elektrowni oraz jej obraz termowizyjny [25]

Pomiar temperatury za pomocą termowizji (rys. 4.10) oparty jest na detekcji promieniowania podczerwonego wysyłanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od 0 K. Rozkład promieniowania w funkcji długości fali, położenia maksimum promieniowania i moc wypromieniowana określone są prawami Wiena i Boltzmana-Stefana. Wynika z nich, że ciała o niskiej i średniej temperaturze (do 373 K) emitują promieniowanie w przedziale długości fal od 2 do 15  $\mu\text{m}$ .

Aparatura termowizyjna pracuje zasadniczo w jednym z dwóch tzw. okienek atmosferycznych  $2\div 5 \mu\text{m}$  lub  $7\div 12 \mu\text{m}$ . Wybór tych przedziałów uzasadniony jest małą absorpcją promieniowania przez czynniki atmosferyczne. W przedziałach tych, a zwłaszcza w przedziale  $7\div 12 \mu\text{m}$ , absorpcja przez parę wodną,  $\text{CO}_2$ , i inne gazy zaczyna być istotna dopiero przy kilkusetmetrowych odległościach kamery od obiektu.

Aparatura termowizyjna przekształca promieniowanie podczerwone na światło widzialne z zamianą mocy promieniowania na stopień jasności lub barwę obrazu. Obraz taki można zarejestrować na błonie fotograficznej. Następnie przez fotometrowanie go przy znajomości zasady przeliczania jasności na temperaturę można określić temperaturę dowolnego punktu obiektu.

Istnieją następujące sposoby przetwarzania obrazu za pomocą omawianej aparatury:

- wybranie na obrazie wszystkich miejsc o takiej samej temperaturze, tzw. nałożenie izotermi odpowiadającej dość wąskiemu przedziałowi temperatury,
- rejestracja obrazu w dyskretnej skali barwnej (7 izoterm) na barwnej błonie fotograficznej,
- przetworzenie obrazu z amplitudą jasności na amplitudę wysokości (na ekranie osobnego monitora), czyli otrzymanie reliefu,

- wybranie jednolitej dowolnej linii z obrazu półtonowego i przedstawienie jej w postaci profilu temperaturowego, jest to jedna z linii reliefu odpowiednio wzmocniona.

Aparatura termowizyjna pracuje w zakresie temperatur otoczenia od 233 do 328 K i umożliwia wizualizację pól temperaturowych od 243 do 1173 K, a po zastosowaniu filtrów do ponad 2273 K.

Dokładność pomiaru temperatury określona jest błędem oceny wartości współczynnika emisji lub jego zmienności na obiekcie. Można przyjąć, że w temperaturach badanego ciała do 323 K dokładność wyznaczenia temperatury jest rzędu  $\pm 0,5$  K, do 373 K wynosi  $\pm 1$  K. Dokładność pomiaru temperatury zależy również od różnicy temperatur obiektu i wzorca o znanej emisyjności. Przy małej różnicy temperatur dokładność jest wyższa. Maksymalna rozdzielczość temperatury występuje w temperaturach od 293 do 313 K i wynosi 0,2 K.

### 4.3. Metody numeryczne

Cechą charakterystyczną *metod numerycznych* [93] i [13] rozwiązywania problemów z fizyki matematycznej, a więc np. problemów przepływu ciepła jest to, że układ fizyczny będący przedmiotem rozważań traktowany jest jak *układ dyskretny*, a nie ciągły. Ta dyskretyzacja dotyczy zmiennych przestrzennych oraz czasu. Można ją przeprowadzić przed zbudowaniem matematycznego modelu procesu lub przez dyskretyzację modelu matematycznego zbudowanego przy założeniu ciągłości przestrzennej i czasowej. Pierwszy sposób jest wykorzystywany w *metodzie bilansów elementarnych*. Metoda ta korzysta tylko z fundamentalnych zasad zachowania, np. zasady zachowania energii oraz praw fenomenologicznych, np. prawa przewodzenia ciepła Fouriera. W swej istocie nie wymaga ona przyjęcia a priori założenia o ciągłości rozpatrywanego ośrodka.

Drugi sposób został wykorzystany m.in. w *metodach różnic skończonych*, *elementów skończonych* [112] i [70] lub *elementów brzegowych*. W metodach tych poddaje się dyskretyzacji równania słuszne dla ośrodków ciągłych, np. równanie Fouriera-Kirchhoffa.

*Metody analityczne* rozwiązywania zagadnień przepływu ciepła także wykorzystują pewne algorytmy numeryczne, np. do rozwiązywania równań przestępnych, obliczania wartości funkcji specjalnych. W tym sensie metody te są także przybliżone [13], [112] i [78]. Zachowują one jednak założenie o ciągłości zmiennych, opisujących rozważany problem.

#### 4.3.1. Metoda bilansów elementarnych

Metoda bilansów elementarnych nie wymaga znajomości równania różniczkowego przewodzenia ciepła. Polega ona na podzieleniu rozpatrywanej przestrzeni na dostatecznie dużą liczbę części (elementów geometrycznych) i sporządzeniu bilansów energii dla tych elementów. Prowadzi to do sformułowania układu równań algebraicznych, określających temperatury w charakterystycznych punktach reprezentujących poszczególne elementy (tzw. węzłach). Zmiany entalpii elementu geometrycznego oblicza się przy założeniu, że cały element ma temperaturę węzła. Obliczając strumienie ciepła zakłada się liniowy rozkład temperatury między sąsiednimi węzłami.

Do podobnego, a często identycznego układu równań dochodzi się w metodzie różnic skończonych (MRS) zastępując ilorazami różnicowymi pochodne występujące w równaniach różniczkowych przewodzenia ciepła.

### 4.3.2. Metoda elementów skończonych

Metoda elementów skończonych (MES) [13], [112], [78], [74] i [70] polega na podzieleniu rozpatrywanej przestrzeni na elementy geometryczne i przyjęciu punktów węzłowych. Liczba węzłów nie musi jednak być zgodna z liczbą elementów, zaś przebieg temperatur aproksymuje się za pomocą funkcji próbnej, określonej skończoną sumą tzw. *funkcji kształtu*. Układ równań algebraicznych określających temperatury w węzłach można uzyskać z *zasady wariacyjnej*, która mówi, że proces przebiega tak, aby pewna wielkość fizyczna (funkcjonał) była minimalna (lub maksymalna). W ustalonym przepływie ciepła np. minimalne powinno pozostawać natężenie produkcji entropii. Należy podkreślić, że podanie sformułowania wariacyjnego jest równoważne z podaniem równania różniczkowego. Z zasady wariacyjnej można zawsze otrzymać równanie różniczkowe. Równania metody elementów skończonych otrzymuje się przez podstawienie aproksymacji przebiegu temperatury do funkcjonału zdefiniowanego przez zasadę wariacyjną i wykorzystanie warunku minimum tego funkcjonału.

Równania elementu skończonego w teorii sprężystości często wyprowadza się z zasady prac wirtualnych, która nie ma jednak prostego odpowiednika w teorii przewodzenia ciepła.

Ostatnio do sformułowania układu równań algebraicznych częściej stosuje się *zasadę rezidualną Galerkiną*, według której powinna być równa zero całka z iloczynu niezgodności pola temperatury i wagi przyporządkowanej poszczególnym punktom pola, przy czym niezgodność wynika z podstawienia funkcji próbnej do równania różniczkowego przewodzenia ciepła.

Równania algebraiczne metody elementów skończonych można też uzyskać za pomocą *elementarnych bilansów energii*, jednak w odróżnieniu od metody bilansów elementarnych gradienty temperatury potrzebne do obliczania strumieni ciepła wyznacza się za pomocą *funkcji kształtu*.

### 4.3.3. Metoda elementów brzegowych

Metoda elementów brzegowych (MEB) opiera się na podziale różnicowym powierzchni ciała. Punkty węzłowe występują więc tylko na powierzchni. Liczba elementów geometrycznych i węzłów jest więc znacznie mniejsza niż w innych metodach. Oblicza się rozkład temperatury na powierzchni ciała. W razie potrzeby można w następnym etapie obliczyć temperatury wewnętrzne.

MEB może być wyprowadzona z zasady wzajemności, która ma prostą interpretację fizyczną w teorii sprężystości (*zasada Bettiego*). Według niej dla dwóch układów obciążeń



i odpowiadających im przemieszczeń, prace jednego układu sił na przemieszczeniach pochodzących od drugiego układu są sobie równe. W teorii przewodzenia ciepła odpowiednikiem obciążeń są gęstości strumieni ciepła, zaś analogiem przemieszczeń są temperatury. W teorii sprężystości iloczyn obciążenia i przemieszczenia może być interpretowany jako praca. Odpowiednik tej wielkości w wymianie ciepła, tj. iloczyn temperatury i gęstości strumienia ciepła, nie ma prostej interpretacji fizycznej. Pozostaje więc interpretacja zasady wzajemności jako superpozycji rozwiązań w odniesieniu do nieskończenie wielu rozwiązań elementarnych.

Porównując interpretację fizyczną metod dochodzi się do wniosku, że dla większości inżynierów najłatwiejsze jest zrozumienie i stosowanie metod różnicowych opartych na zasadach zachowania. Jedynie mechanicy posługują się częściej zasadami wariacyjnymi (zasady Hamiltona) i dlatego mogą oni uznać za łatwiejsze posługiwanie się metodą elementów skończonych. Najtrudniejsza jest interpretacja fizyczna metody elementów brzegowych; na ogół w metodzie tej poprzestaje się na czysto matematycznym wyprowadzeniu równań, co należy uznać za poważną niedogodność w stosowaniu tej metody przez inżynierów.

Z punktu widzenia inżyniera zrozumienie fizycznej interpretacji metody decyduje o łatwości w posługiwaniu się daną metodą numeryczną. Może on bowiem łatwo, bez zagłębiania się w zawikłaność matematyczne, uwzględnić wszelkie zjawiska fizyczne mające wpływ na dany proces. Na przykład w metodzie bilansów elementarnych nie ma żadnych wątpliwości jak uwzględnić fakt wydzielania się ciepła na powierzchni krzepnięcia rozdzielającej obszary fazy ciekłej i stałej.

#### **4.3.4. Metoda Monte Carlo**

Metoda Monte Carlo (stosowana głównie w obliczeniach promieniowania) polega na śledzeniu historii losowo wybranych porcji energii. Jeżeli liczba tych porcji jest dostatecznie duża, to po uśrednieniu uzyskanych wyników uzyskuje się dostatecznie dokładną informację o przebiegu całości rozpatrywanego zjawiska.

### 4.3.5. Postulaty metod numerycznych

*Dyskredytacja zmiennych przestrzennych i czasu*, wnosi pewne niedokładności do modelu matematycznego rozpatrywanego procesu. Powoduje pewne implikacje dotyczące właściwości rozwiązań.

Najważniejszym wymaganiem stawianym metodzie numerycznej jest efektywność. Należy przez to rozumieć możliwość jej praktycznej realizacji, np. za pomocą maszyny cyfrowej. Ważne są tu dwie wielkości charakteryzujące komputer: pamięć operacyjna i czas wykonywania operacji matematycznych. Co prawda dzięki rozwojowi techniki komputerowej problem ten nie jest już tak istotny, jak w latach ubiegłych, ale zwłaszcza przy rozwiązywaniu wielowymiarowych zadań konwekcyjnej wymiany ciepła możliwości maszyny cyfrowej mogą stanowić poważne ograniczenie. Efektywność metody numerycznej maleje ze zwiększeniem złożoności metody, ale z drugiej strony większa złożoność na ogół prowadzi do większej dokładności. Istnieje tu zatem potrzeba pewnego kompromisu. W problemach wielowymiarowych należy przede wszystkim wykorzystywać możliwość częściowej dyskretyzacji problemu.

Trudno byłoby wskazać, która z metod numerycznych jest najbardziej efektywna. Najczęściej zależy to od konkretnego przypadku. Metody bilansów elementarnych lub elementów skończonych prowadzą zwykle do układów równań ze znacznie większą liczbą niewiadomych niż np. metoda elementów brzegowych. Z drugiej strony macierz układu równań dla metody bilansów elementarnych lub elementów skończonych jest macierzą pasmową i to często symetryczną, co pozwala istotnie zmniejszyć liczbę operacji matematycznych niezbędnych do rozwiązania układu równań. Metoda elementów brzegowych prowadzi natomiast do pełnych, niesymetrycznych macierzy, co wymaga znacznie większej liczby operacji.

Kolejnym wymaganiem stawianym metodzie numerycznej jest zgodność aproksymacji różnicowej. Jest to wymaganie najbardziej podstawowe. Chodzi o to, by operator różnicowy, opisujący rozpatrywane zagadnienie dyskretne w granicy małych kroków w przestrzeni i czasie, był zgodny z operatorem różniczkowym opisującym odpowiadające dyskretnemu zagadnienie ciągłe. Problem ten jest ważny w metodach, które nie wykorzystują równań opisujących problem ciągły, np. w metodzie bilansów elementarnych, która jest oparta w pewnym stopniu na intuicji autora rozwiązania i na jego umiejętności sporządzania bilansów wybranych wielkości fizycznych i może prowadzić do niezgodnych schematów różnicowych (np. w przypadku pominięcia istotnych pozycji bilansu).

Niebezpieczeństwo takie nie istnieje w metodach, w których dyskretyzuje się równania opisujące problem ciągły, np. elementów skończonych lub elementów brzegowych. Należy tu jednak wyraźnie odróżnić zgodność metody numerycznej od zgodności modelu matematycznego z modelem fizycznym.

Od pojęcia *zgodności aproksymacji różnicowej* należy także odróżnić pojęcie dokładności *aproksymacji różnicowej*. Stosowanie dyskretnych kroków czasu i przestrzeni wnosi do rozwiązania pewne niedokładności, co sprawia, że rozwiązanie odbiega od dokładnego.

Istnieje kilka przyczyn niedokładności rozwiązania numerycznego. Pierwszą jest *dyskretyzacja* równań różniczkowych, całkowych itp., która prowadzi do tzw. *błędu metody*. Oszacowanie tego błędu jest bardzo trudne, ale w niektórych przypadkach możliwe. Jeżeli metoda spełnia postulat zgodności, a wielkość błędu maleje ze zmniejszaniem kroku przestrzennego lub czasowego. Dlatego rząd tego błędu często szacuje się w ten sposób, że wykonuje się obliczenia przy różnych długościach kroku i porównuje wyniki. Jednakże zmniejszenie kroku siatki prowadzi zwykle do większej liczby niewiadomych, zatem prowadzi do zmniejszenia efektywności metody.

Kolejną przyczyną niedokładności metody jest *niedokładność operacji arytmetycznych*, wykonywanych przez komputer (*błędy zaokrąglenia*). W rozwiązaniach numerycznych mogą pojawić się błędy z innych jeszcze przyczyn. W metodach statystycznych pojawia się np. błąd *modelowania probabilistycznego*. Zbyt małą dokładność aproksymacji różnicowej nazywa się *brakiem zbieżności metody*.

Błąd metody numerycznej może narastać w kolejnych krokach obliczeń także z przyczyn związanych z samą strukturą schematu różnicowego. Taka właściwość schematu różnicowego nazywa się *niestabilnością metody*. Problem może wystąpić w przypadku dyskretyzacji równań typu parabolicznego. Cechę stabilności można określić następująco: metoda numeryczna jest stabilna, jeżeli niewielkie zaburzenia (np. stanu początkowego) lub wystąpienie błędu numerycznego na dowolnym etapie obliczeń przenosi się dalej (tzn. ze wzrostem liczby wykonywanych operacji matematycznych) z malejącą amplitudą.

Każda metoda numeryczna powinna być przynajmniej *warunkowo stabilna*, tzn. stabilna dla pewnego zakresu parametrów takich jak np. krok czasu lub siatki przestrzennej. Zwykle też ze stabilności metody wynika jej zbieżność. Postulat stabilności nie jest jednak wystarczającym warunkiem przydatności metody.

Osobnym problemem jest rozwiązywanie zagadnień, które ze swej natury dają niestabilne rezultaty. Do tej grupy zagadnień należą *zadania odwrotne*. Zwykle wymaga się,

aby rozpatrywany problem był dobrze uwarunkowany, co oznacza, że jego rozwiązanie powinno spełniać trzy postulaty: istnienia, jednoznaczności i stabilności. Rozwiązanie problemów odwrotnych na ogół nie spełnia postulatów stabilności.

Przez wiele lat problemy takie nazywano *źle sformatowanymi fizycznie* i ich rozwiązywaniem nie zajmowano się. Istotnie, trudno byłoby nadać interpretację fizyczną takim niestabilnym wynikom. Dopiero rozwój metod umożliwiających rozwiązywanie zadań źle uwarunkowanych spowodował, że obecnie należą one do klasycznych problemów fizyki matematycznej. W przypadku zadań odwrotnych nie wystarcza zatem przedstawienie rozwiązania w postaci np. układu równań algebraicznych. Należy koniecznie przedstawić dodatkowo algorytm umożliwiający uzyskiwanie stabilnych wyników liczbowych, przynajmniej dla pewnego zakresu danych. W przeciwnym razie niewielkie niedokładności danych mogą spowodować duże niedokładności wyników, czyniąc je zupełnie bezwartościowymi.

Wspomniano już, że spełnienie postulatów stabilności nie jest wystarczającym warunkiem praktycznej przydatności metody numerycznej. Stabilność rozwiązania, np. problemu niustalonego, oznacza, że oscylacje rozwiązania znikają z upływem czasu. Tymczasem w zagadnieniach przepływu ciepła przedmiotem zainteresowania jest zazwyczaj rozwiązanie w dowolnym momencie czasu, a takie oscylujące rozwiązanie może być pozbawione sensu fizycznego. Wynika stąd kolejny postulat tzw. fizycznej poprawności schematu różnicowego, który można sformułować następująco: równanie różnicowe powinno mieć taką strukturę, aby podwyższenie każdej ze znanych temperatur w sąsiedztwie rozpatrywanego punktu prowadziło do podwyższenia wartości temperatury w tym punkcie w następnym kroku czasu. W wielu przypadkach kontrola fizycznej poprawności schematu jest dość prosta, zwłaszcza wtedy, gdy każde równanie różnicowe zawiera tylko jedną niewiadomą. Kontrola fizycznej poprawności polega na kontroli znaków współczynników występujących w rozpatrywanym równaniu różnicowym po sprowadzeniu go do postaci zawierającej tylko jedną niewiadomą. Postulat fizycznej poprawności jest w wielu przypadkach zgodny z warunkami określającymi stabilność. Bywają jednak przypadki, kiedy warunki określające stabilność są łagodniejsze od warunków określających fizyczną poprawność.

Dowolna metoda numeryczna staje się zatem przydatna praktycznie, jeżeli spełnia wszystkie wymienione w niniejszym rozdziale postulaty.

## **5. Przegląd metod oceny stanu wyężenia powłok ceramicznych poddanych obciążeniom cieplnym**

Każdy proces projektowania konstrukcji składa się z wielu elementów. Jednym z podstawowych a zarazem składowym jest zapewnienie konstrukcji jej dostatecznej wytrzymałości. Zapewnienie wytrzymałości nie jest ważne tylko w samym procesie projektowania, ale i w późniejszym okresie użytkowania konstrukcji w przypadku jej regeneracji. Teoria sprężystości i plastyczności [97], wychodząc z przyjętego założenia ciągłości materiału, wprowadziła pojęcia stanu naprężenia i odkształcenia, określające siłowe i odkształceniowe skutki występujące w jednym punkcie pod wpływem obciążeń. Ich poprawne określenie w wielu punktach konstrukcji pozwala wyznaczyć stan jej wyężenia.

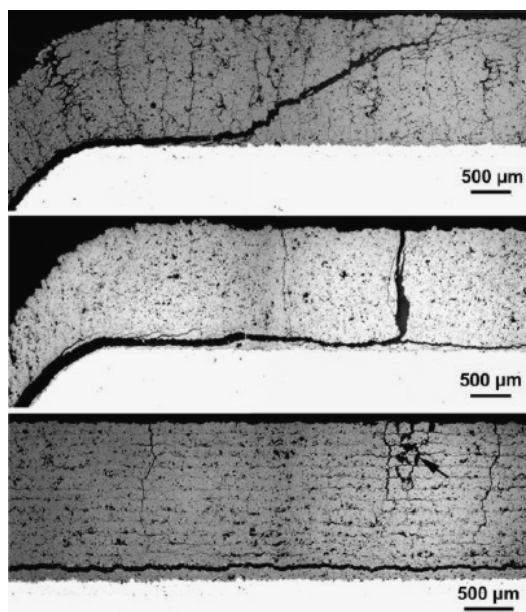
Każda zaprojektowana konstrukcja przez pewien określony czas pracy powinna spełniać w zadowalający sposób założone funkcje. Warunki pracy, a w szczególności sposób obciążenia, są często określone w dość szerokich granicach, a ponadto nigdy nie można wykluczyć losowych przeciążeń. Dlatego każda konstrukcja jest wymiarowana według kryteriów wytrzymałościowych z pewnym nadmiarem, z pewnym stopniem bezpieczeństwa, co znajduje odbicie w każdorazowo wprowadzanym współczynniku bezpieczeństwa. We współczynniku bezpieczeństwa zawarty jest stopień niewiedzy jak również odstępstwa konstrukcji i własności materiału od przyjętego modelu. W procesie projektowania nowych obiektów lub weryfikacji istniejących praca inżynierów sprowadza się do oceny wyężenia konstrukcji i wyężenia materiału, z którego dana konstrukcja jest zbudowana.

Huberowska definicja wyężenia znana od przeszło półwiecza mówi, że „ wyężenie jest miarą osiągnięcia stanu niebezpiecznego”. Nie jest jednak sprecyzowane, co uznawane jest za „stan niebezpieczny”. Z uytularnego punktu widzenia stanem niebezpiecznym będzie osiągnięcie nieodwracalnych odkształceń o wartości przekraczającej wartości dopuszczalne, lub podział na części konstrukcji, czy też jej elementów. Wymienione uszkodzenia należy rozpatrywać indywidualnie dla każdej konstrukcji, ponieważ to co w jednej jest „stanem niebezpiecznym” dla drugiej stanowi jeszcze normalne warunki pracy. Konieczne jest zatem określenie kryteriów zniszczenia materiałów konstrukcji.

## 5.1. Kryteria zniszczenia materiału

Kryterium zniszczenia jest to warunek, który określa graniczną wartość wybranej miary uszkodzenia materiału. Najprostszym i najbardziej jednoznacznym przykładem zniszczenia jest złom, czyli utrata spójności elementu konstrukcji w skali makroskopowej. Za zniszczenie elementu można uważać również pojawienie się pęknięć oraz takie zmiany własności mechanicznych materiału, lub geometrii elementu, które uniemożliwiają dalsze jego użytkowanie (rys. 5.1). Za miarę uszkodzenia przyjmuje się zmiany geometrii elementu (odkształcenie), energię zgromadzoną w jednostce objętości materiału i stopień utraty ciągłości ciała, którego stanem granicznym jest złom. W zależności od wyboru miary uszkodzenia kryteria zniszczenia dzielą się na:

- geometryczne (odkształceniowe),
- energetyczne,
- spójności ciała.



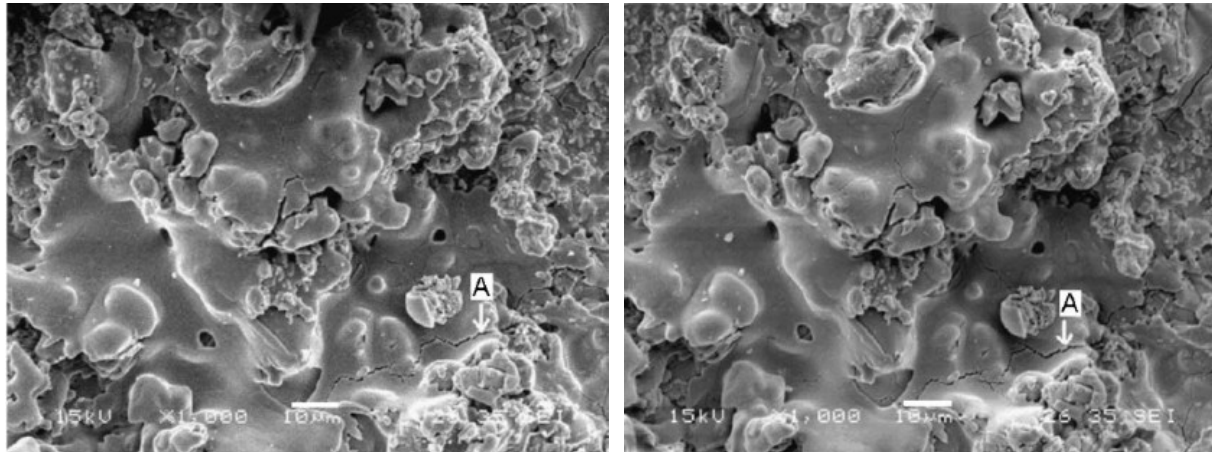
Rys. 5.1 Zmiany w strukturze materiału – powłoki pod wpływem zmiennego obciążenia cieplnego [29]

Zmiany geometrii elementu w warunkach cyklicznych zmian temperatury mogą być spowodowane przez gradient temperatury, siły czynne lub bierne i anizotropię struktury.

Zmianom stanu energetycznego materiału towarzyszą zmiany jego własności. Inne własności materiału są przejawem jego degradacji, czyli rozwoju uszkodzenia, co jest pewną formą zużycia tego materiału jako tworzywa konstrukcyjnego. Podział kryteriów zniszczenia na odkształceniowe i energetyczne jest w pewnym sensie umowny, gdyż do określenia energii

właściwej nagromadzonej w materiale w jednym cyklu wykorzystuje się szerokość pętli histerezy, czyli odkształcenie.

W kryteriach spójności ciała za miarę uszkodzenia przyjmuje się utratę spójności ciała w skali makroskopowej (złom, pęknięcie) oraz mikroskopowej (pory na granicach ziaren) na rysunku 5.2.



Rys. 5.2 Zdjęcie mikrostruktury powłoki ceramicznej przedstawiające propagację pęknięcia na granicy ziaren podczas testu na szok termiczny a) po natryskiwaniu b) po 50 cyklach cieplnych [21]

Omówione powyżej kryteria zniszczenia odnoszą się do różnych procesów obciążania. Niektóre z nich sprawdzono doświadczalnie w warunkach zmęczenia izotermicznego w różnych temperaturach, inne w warunkach pełzania, a tylko nieliczne zaproponowano dla zmęczenia cieplnego. Spośród wszystkich kryteriów zniszczenia powstanie złomu, czyli utrata spójności w skali makroskopowej, jest najbardziej jednoznaczne. Niestety kryterium to nie zawsze może być stosowane, gdyż często inne cechy elementu przesądzają o konieczności wycofania go z dalszej eksploatacji.

## 5.2. Ocena stanu wytężenia materiału

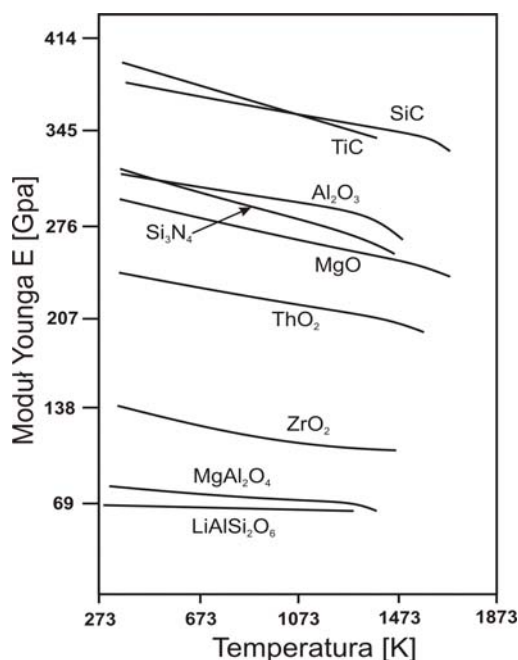
W procesie użytkowania maszyn i innych konstrukcji następuje wyczerpywanie nośności poszczególnych elementów na skutek działania obciążeń i temperatury. To wyczerpanie nośności jest spowodowane przez rozpraszanie energii i gromadzenie części tej energii w materiale, co z kolei powoduje zmiany mikrostruktury oraz osłabienie materiału. Osłabienie materiału jest wywołane przez powstanie mikrouszkodzeń, które rozwijając się i łącząc pod działaniem obciążeń prowadzą do zniszczenia danego elementu. Rozwój uszkodzeń w materiale przejawia się w postaci jego degradacji, czyli pogorszenia różnych

własności fizycznych, co jest pewną formą zużycia tego materiału jako tworzywa konstrukcyjnego.

W celu oceny stopnia uszkodzenia materiału ceramicznego, a dokładniej powłoki ceramicznej należy ocenić zmiany jej różnych własności fizycznych. W przypadku elementów obciążonych cieplnie jakimi są powłoki ceramiczne stanowiące bariery termiczne ocenia się głównie:

- mikrostrukturę warstwy,
- własności mechaniczne (twardość, wytrzymałość na zginanie i pękanie, odporność na ścieranie),
- własności fizyczne (odporność na szok termiczny i na korozję wysokotemperaturową, własności magnetyczne, własności izolacyjne).

W przypadku materiałów ceramicznych TBC głównym obciążeniem, któremu są one poddane jest temperatura. Temperatura jest jednym z czynników, który ma wpływ na wartość wszystkich wielkości charakteryzujących materiał. Tworzywa ceramiczne podobnie jak metale mają ściśle określony moduł Younga, zwykle większy niż metale, co jest związane z większą sztywnością wiązań jonowych występujących w prostych tlenkach i wiązań kowalencyjnych w krzemianach. Jego wartość zależy w sposób znaczący od czasu trwania obciążenia cieplnego - temperatury lub jeżeli obciążenie to zmienia się cyklicznie to od częstości zmian [72] i [44]. Na rysunku 5.3 przedstawiono wpływ temperatury na zmienność modułu Younga wybranych materiałów ceramicznych. Różnice w wartości tego modułu w przypadku ceramiki zaczynają być wyraźne w temperaturze przekraczającej 473 K.



Rys. 5.3. Wpływ temperatury na moduł sprężystości podłużnej [72]



Tworzywa ceramiczne są najtwardszymi z ciał stałych. Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), węgiel krzemu ( $\text{SiC}$ ) i diament ( $\text{C}$ ) są stosowane jako materiały ściernie. W tabeli 5.1 zestawiono wartości twardości  $H$ , odniesionej do modułu Younga  $E$ , dla kilku metali, stopów i tworzyw ceramicznych. Czyste metale wykazują bardzo małą twardość i niską granicę plastyczności  $R_e$  (gdzie  $H \approx 3R_e$ ). Głównym celem wytwarzania stopów jest poprawienie tych własności.

Tabela 5.1. Znormalizowana twardość czystych metali, stopów metalicznych i tworzyw ceramicznych [1]

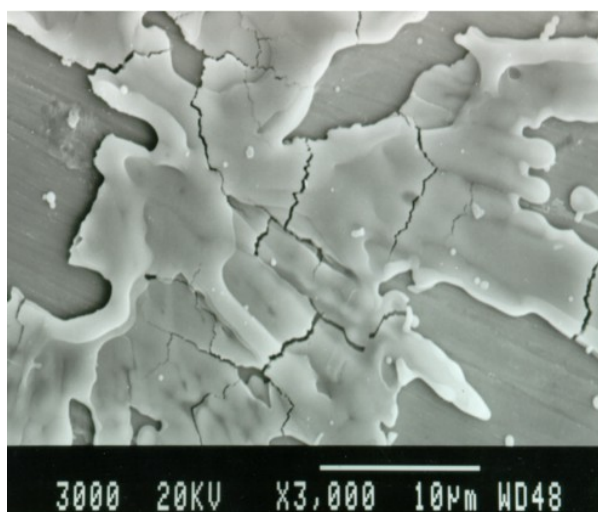
Czysty metal	H/E	Stop metaliczny	H/E	Tworzywo ceramiczne	H/E
Miedź	$1,2 \cdot 10^{-3}$	Mosiądz	$9 \cdot 10^{-3}$	Diament	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Aluminiu	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Dural (Al. 4%Cu)	$1,5 \cdot 10^{-2}$	Korund	$4 \cdot 10^{-2}$
Nikiel	$9 \cdot 10^{-4}$	Stal nierdzewna	$6 \cdot 10^{-3}$	ZrO <sub>2</sub>	$6 \cdot 10^{-2}$
Żelazo	$9 \cdot 10^{-4}$	Stal niskostopowa	$1,5 \cdot 10^{-2}$	SiC	$6 \cdot 10^{-2}$
Średnia dla metali	$1 \cdot 10^{-3}$	Średnia dla stopów metalicznych	$1 \cdot 10^{-2}$	Średnia dla t. ceramicznych	$8 \cdot 10^{-2}$

Z tabeli 5.1 wynika, że twardość czystej jednoskładnikowej ceramiki jest bez porównania większa niż twardość najtwardszego stopu metalicznego. Jest to możliwe dzięki temu, że w czasie odkształcenia plastycznego materiału podczas próby rozciągania lub przy pomiarze twardości, gdy wgłębnik wciskany jest w powierzchnię materiału ceramicznego, istniejące w materiale dyslokacje ulegają przemieszczeniu. Ceramika w swojej sieci krystalicznej dzięki wiązaniom jonowym lub kowalencyjnym stawia bardzo silny opór przemieszczającym się dyslokacjom. Dyslokacja przemieszczająca się wewnątrz takiej struktury musi rozerwać i ponownie utworzyć te wiązania. Naprężenia potrzebne do przemieszczenia dyslokacji są równe pewnej dużej części modułu Younga – zwykle ok.  $E/30$ . Powoduje to że granica plastyczności materiałów ceramicznych jest rzędu 5 GPa [1]. Tą niezwykle dużą twardość ceramiki wykorzystuje się w elementach ściernych. Przy projektowaniu elementów ceramicznych nigdy nie trzeba uwzględniać przekroczenia granicy plastyczności materiału, ponieważ zawsze wcześniej następuje jego kruche pęknięcie (rys. 5.4). Nawet przy wierzchołku pęknięcia, gdzie następuje koncentracja naprężeń, opór sieci bardzo utrudnia poślizg. W tworzywach ceramicznych zakres stopnia uplastycznienia jest bardzo ograniczony, zarówno energia pochłaniania jest mała jak i odporność na kruche pęknięcie.



Rys. 5.4. Typowy wykres rozciągania materiałów ceramicznych z przełomem kruchym [72]

Wartość współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic}$  dla ceramik jest w przybliżeniu 50 –krotnie mniejsza niż dla metali o dobrej plastyczności. Ponadto ceramika zawiera prawie zawsze pęknięcia oraz różne defekty struktury. Pęknięcia te mogą być wywołane różnymi sposobami. Przykładem może być to, że w procesie technologicznym lub podczas eksploatacji gdzie naprężenia cieplne powstałe w czasie chłodzenia lub cykli zmiany temperatury powodują powstanie pęknięć (rys.5.5).



Rys. 5.5. Mikro-pęknięcia w natrykiwanej ciepłnie cząstce  $ZrO_27Y_2O_3$  [2]

Projektowa wytrzymałość ceramiki jest więc określona małą odpornością na pękanie i długością mikro-pęknięć, które ona zawiera.

Jeśli najdłuższe mikro-pęknięcie w danej próbce materiału ma długość dwu krotnie większą od  $a_m$  – wielkości ziarna to jej wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  przedstawia się wzorem:

$$R_m = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a_m}} \quad (5.1)$$

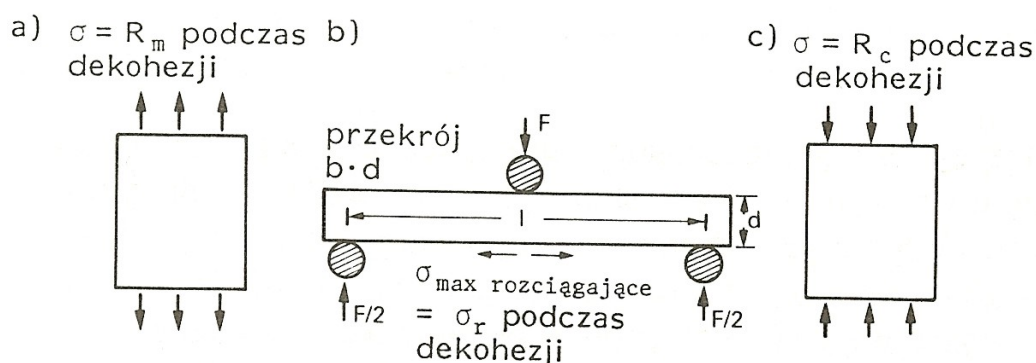
Wytrzymałość na rozciąganie niektórych ceramiek jest równa połowie wytrzymałości stali – ok. 200MPa. Jeżeli typowa wartość krytycznego współczynnika intensywności naprężeń  $K_{Ic} = 2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , wówczas największe pęknięcie ma długość  $60\mu\text{m}$ , co odpowiada wymiarowi cząstki proszku wyjściowego.

Na rysunku 5.6 przedstawiono metody pomiaru wytrzymałości materiałów ceramicznych. W próbie wytrzymałości na rozciąganie mierzy się naprężenie, przy którym najdłuższe pęknięcie rozprzestrzenia się niestabilnie. Inna metodą jest próba pomiaru siły zginającej, potrzebnej do złamania belki. Maksymalne naprężenie rozciągające w warstwie powierzchniowej takiej belki w momencie jej pęknięcia nazywa się umowną wytrzymałością na zginanie  $\sigma_r$ .

Trzeci rodzaj próby przedstawiony na rysunku 5.6 to próba ściskania. Dla metali wytrzymałość na ściskanie jest równa wytrzymałości na rozciąganie. Dla ciał kruchych jest inaczej – wytrzymałość na ściskanie jest w przybliżeniu 15-krotnie większa

$$R_c \approx 15 R_m \quad (5.2)$$

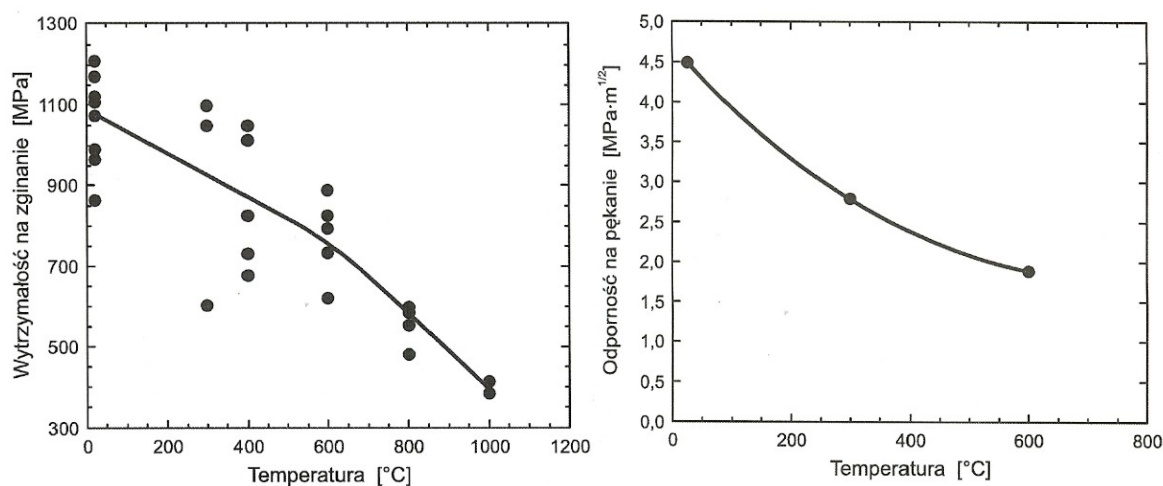
Wyjaśnia to fakt, że pęknięcia przy ściskaniu rozprzestrzeniają się w sposób stabilny, zmieniając swą początkową orientację na równoległą do osi ściskania. Pęknięcie nie następuje w wyniku niestabilnego rozprzestrzeniania się jednego z pęknięć, lecz poprzez powolne powiększanie się wielu pęknięć, które tworzą *strefę spekania* [1].



Rys. 5.6. Rodzaje prób wytrzymałościowych dla tworzyw ceramicznych:

- a) próba rozciągania
- b) próba zginania
- c) próba ściskania

Na rysunku 5.7 przedstawiono wykresy wytrzymałości na zginanie i odporności na pękanie tlenku cyrkonu stabilizowanego  $3\%Y_2O_3$  materiału przeznaczonego na bariery termiczne w funkcji temperatury. Temperatura powoduje, iż wytrzymałość próbki na zginanie wraz ze wzrostem temperatury maleje jak również adekwatnie do tego odporność na pękanie.



Rys. 5.7. Odporność tlenku cyrkonu stabilizowanego 3%  $Y_2O_3$  na zginanie czteropunktowe i pękanie w funkcji temperatury [89]

Jak już wcześniej wspomniano temperatura ma bardzo duży wpływ na zachowanie się materiału ceramicznego. Wadą materiałów ceramicznych jest to, że niestety pękają pod wpływem gwałtownych zmian temperatury. Ich odporność na udary cieplne waha się od 353 K (popularne szkła) do 773 K (azotek krzemu). Dlatego stosuje się wspomniane we wcześniejszych rozdziałach różne dodatki w celu otrzymania tzw. ceramiki wysokotemperaturowej, która może być zastosowana w udarowo zmiennych warunkach cieplnych. Jednym ze sposobów pomiaru odporności na udary cieplne jest test na szok termiczny. Test ten może przebiegać na wiele sposobów, jak np. na początku podgrzanie próbki następnie chłodzenie jej ustalone lub szybkie np. wodą. Maksymalna różnica temperatur  $\Delta T$  [K], jaką próbka wytrzyma, jest miarą odporności. Mając dany współczynnik liniowej rozszerzalności cieplnej materiału  $\alpha$  możemy wyznaczyć skurcz ochłodzonej warstwy powierzchniowej materiału który wynosi  $\alpha\Delta T$ . Ponieważ warstwa ta stanowi część całej próbki, która nadal jest gorąca, wymiary warstwy nie mogą się zmienić, natomiast powstanie w niej sprężyste naprężenie rozciągające równe  $E\alpha\Delta T$ . Jeżeli naprężenie to przekroczy wytrzymałość materiału na rozciąganie  $R_m$  powierzchnia próbki popęka i w końcu odpadnie od resztki próbki. Maksymalny dopuszczalny spadek temperatury można obliczyć ze wzoru:

$$E\alpha\Delta T = R_m \quad (5.3)$$

Wartości  $\Delta T$  dla różnych materiałów podano obrazowo w tabeli 5.2.

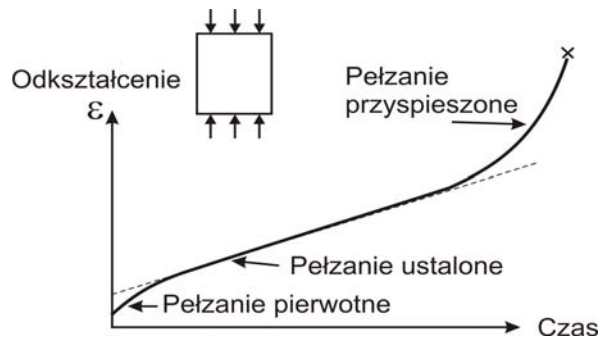
W wysokich temperaturach w tworzywach ceramicznych, podobnie jak w metalach występuje również zjawisko pełzania. Przedstawiona krzywa pełzania na rysunku 5.8 zbliżona jest do

krzywej pełzania metali. W początkowym etapie pełzania szybkość odkształcania maleje w funkcji czasu, dążąc do wartości ustalonej:

$$\dot{\epsilon}_{ss} = A\sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (5.4)$$

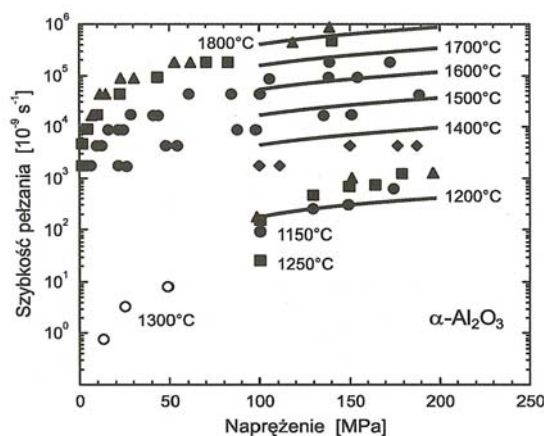
gdzie:  $\sigma$  - naprężenie, A i n stałe pełzania, Q - energia aktywacji pełzania.

Wzór (4.4) stosowany jest przy projektowaniu większości elementów w których przewiduje się wystąpienie zjawiska pełzania. W ostatniej fazie pełzania szybkość pełzania ponownie rośnie aż do momentu pęknięcia próbki.



Rys. 5.8. Krzywa pełzania dla materiałów ceramicznych [1] i [72]

W przypadku wyższych temperatur zjawisko pełzania stanowi problem. Jeżeli temperatura próbki wynosi  $1/3 T_m$  temperatury topnienia ceramiki konstrukcyjnych ( $T_m$  powyżej 2273 K) to zjawisko pełzania musi być brane pod uwagę jak przy projektowaniu elementów do pracy w bardzo wysokich temperaturach. Na rysunku 5.9 przedstawiono szybkość pełzania  $\dot{\epsilon}_{ss}$  w funkcji przyłożonego naprężenia  $\sigma$  i temperatury T [K].



Rys. 5.9 Szybkość pełzania przy zginaniu w funkcji naprężenia przy różnych temperaturach ceramiki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  spiekanej swobodnie [60]

Tabela 5.2 Właściwości tworzyw ceramicznych

<i>Ceramika</i>	<i>Gęstość</i> [Mg·m <sup>-3</sup> ]	<i>Moduł</i> <i>Younga</i> [GPa]	<i>Wytrzymałość</i> <i>na ściskanie</i> [MPa]	<i>Umowna</i> <i>wy-</i> <i>trzymałość</i> <i>na zginanie</i> [MPa]	<i>Odporność</i> <i>na kruche</i> <i>pękanie</i> [MPa·m <sup>1/2</sup> ]	<i>Temperatura</i> <i>topnienia</i> <i>(mięknięcia)</i> [K]	<i>Ciepło</i> <i>właściwe</i> [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	<i>Współczynnik</i> <i>przewodzenia</i> <i>ciepła</i> [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	<i>Współczynnik</i> <i>rozszerzalności</i> <i>ciepłej</i> [·10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ]	<i>Osporność</i> <i>na szoki</i> <i>termiczne</i> [K]
<i>Szklą</i>										
Szkło sodowe	2,48	74	1000	50	0,7	(1000)	990	1	8,5	84
Szkło borokrzemianowe	2,23	65	1200	55	0,8	(1100)	800	1	4,0	280
<i>Wyroby gancarskie</i>										
Porcelana	2,3-2,5	70	350	45	1,0	(1400)	800	1	3	220
<i>Nowoczesne tworzywa konstrukcyjne</i>										
Diamant	3,52	1050	5000	-	-	-	510	70	1,2	1000
Korund o dużej gęstości	3,9	380	3000	300-400	3-5	2323 (1470)	795	25,6	8,5	150
Węglik krzemu	3,2	410	2000	200-500	-	3110	1422	84	4,3	300
Azotek krzemu	3,2	310	1200	300-850	4	2173	627	17	3,2	500
Tlenek cyrkonu	5,6	200	2000	200-500	4-12	2843	670	1,5	8	500
Sialony	3,2	300	2000	500-830	5	-	710	20-25	3,2	510
Cement	2,4-2,5	20-30	50	7	0,2	-	-	1,8	10-14	<50
Beton	2,4	30-50	50	7	0,2	-	-	2	10-14	<50
<i>Minerały i lód</i>										
Wapień	2,7	63	30-80	20	0,9	-	-	-	8	
Granit	2,6	60-80	65-150	23	-	-	-	-	8	≈100
Lód	0,92	9,1	6	1,7	0,12	273	-	-	-	

### **5.3. Wybrane metody oceny stanu wyężenia powłok TBC poddanych obciążeniom cieplnym**

W celu oceny stopnia uszkodzenia materiału ceramicznego, a dokładniej powłoki ceramicznej poddanej cyklicznemu obciążeniowi cieplnemu wykorzystuje się najczęściej zmiany jej własności fizycznych oraz mikrostruktury. Jedną ze zmian wykorzystywanych do oceny stanu wyężenia jest zmiana własności wytrzymałościowych materiału dokładniej odporność na szok termiczny.

Biorąc pod uwagę fakt, iż w pracy podjęto problem oceny stanu wyężenia powłok ceramicznych obciążonych siłami zewnętrznymi jak i cieplnie, niezbędnym wydaje się wykorzystanie metod pomiarowych opartych na bezpośrednim pomiarze odkształceń. W zależności od tego, czy pomiar dokonywany jest w wybiórczych miejscach czy też równocześnie na pewnym obszarze, rozróżnia się odpowiednio metody punktowe i powierzchniowe. Wśród metod punktowych najbardziej powszechna wydaje się być tensometria.

#### **5.3.1. Ocena stanu wyężenia na podstawie zmian własności wytrzymałościowych materiałów**

Z praktyki laboratoryjnej powszechnie znany jest fakt zmiany własności wytrzymałościowych na skutek długotrwałego oddziaływania obciążeń i temperatury. To spostrzeżenie legło u podstaw próby wykorzystania wyników pomiarów tych własności do oceny zapasu wytrzymałości materiału, czyli stopnia jego zużycia. Badania zmian własności wytrzymałościowych są powszechnie stosowane w ocenie stanu różnych maszyn i urządzeń, brak jednak dotychczas metody pozwalającej na jednoznaczną kwalifikację tych części na dowolnym etapie ich użytkowania.

W przypadku barier termicznych obciążonych cieplnie jednym z ważnych badań jest ocena odporności materiału na szok termiczny. Uogólniając jest to zdolność kruchego materiału jakim jest ceramika do przetrwania w warunkach zmiennej temperatury bez zniszczenia. Odporność na szok termiczny zależy od warunków grzania powłoki (stan ustalony, nieustalony przez konwekcje lub promieniowanie) i jest wyrażona, jak wspomniano już wcześniej, jako maksymalna różnica temperatur jaką próbka wytrzyma pod obciążeniem cieplnym.

Dla ustalonego przepływu ciepła odporność na szok termiczny (OST) wg. Hasselman'a przedstawia się następująco:

$$OST = \frac{\sigma_f(1-\nu)}{\alpha E} \quad (5.5)$$

gdzie  $\sigma_f$  – naprężenia powodujące pęknięcia

Odporność na szok termiczny stosowana jest do oceny stanu powłok natryskiwanych cieplnie. Jest ona bardzo ważna ze względu na duży wpływ naprężeń własnych powstałych w procesie natryskiwania materiału na podłoże.

### 5.3.2. Doświadczalne metody oceny stanu wyężenia

Doświadczalne metody oceny stanu wyężenia stanowią obszerny dział mechaniki eksperymentalnej [73]. Są one wykorzystywane w wielu dziedzinach badań:

- określanie własności mechanicznych materiałów konstrukcyjnych,
- wyznaczanie rozkładu i wartości odkształceń w elementach konstrukcyjnych,
- wyznaczanie sił wewnętrznych w elementach konstrukcji poddanych obciążeniom eksploatacyjnym,
- analiza odkształceń i naprężeń w konstrukcjach poddanych obciążeniom cieplnym,
- badanie naprężeń własnych,
- wyznaczanie wielkości charakteryzujących stan deformacji i ruchu konstrukcji.

Biorąc pod uwagę fakt, iż w pracy podjęto problem oceny stanu wyężenia konstrukcji obciążonych cieplnie, niezbędne jest wykorzystanie metod pomiarowych opartych na bezpośrednim pomiarze struktury materiału.

W przemyśle stosującym powłoki na bariery termiczne stosowane są różne metody badania odporności na szok temperaturowy. Firmy produkujące powłoki budują własne stanowiska i opracowują indywidualne cykle termiczne zazwyczaj w zależności od przeznaczenia zastosowania powłoki (inne warunki są w turbinie gazowej inne w silniku spalinowym, a jeszcze inne w kotle energetycznym). Jednak wszystkie te stanowiska i procesy muszą spełniać podstawowe wymagania testu na szok termiczny. Przebieg testu odporności na szok termiczny można przedstawić w następujących etapach:

- proces grzania (powolne, szybkie)
  - wykorzystanie różnych źródeł ciepła (piec elektryczny, indukcyjny, palnik gazowy-propan, acetylen, laser)



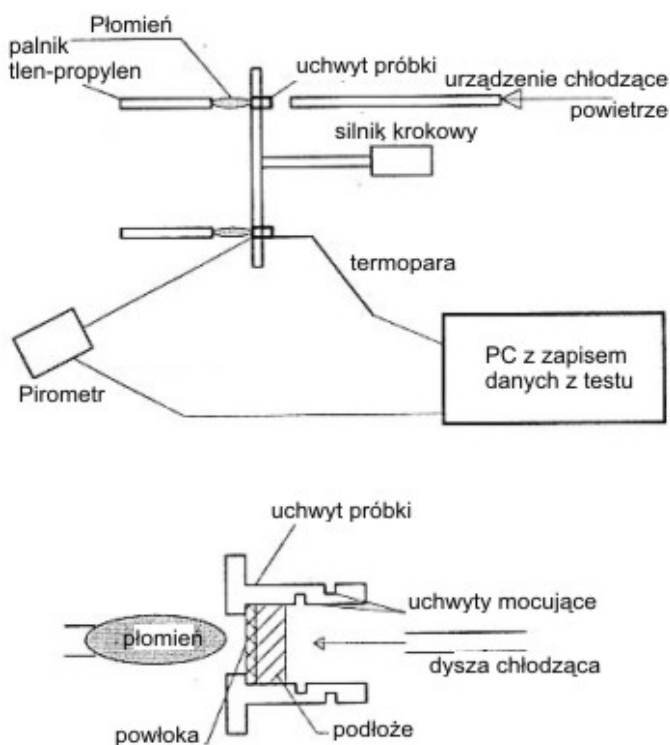
- proces chłodzenia (swobodne, wymuszone)
  - wykorzystanie różnych źródeł chłodzenia (wodne, powietrzne- otwarte, sprężone powietrze lub CO<sub>2</sub>)

Stanowiska budowane do testowania powłok ceramicznych pozwalają na przeprowadzenie badania odporności na szok termiczny według etapów przedstawionych powyżej, jednak sam jeden cykl czasowo i temperaturowo uzależniony jest od wielu czynników, przede wszystkim od zastosowania powłoki ceramicznej. Miejsce aplikacji np. powłok stanowiących bariery termiczne decyduje o sposobie podgrzania, zakresie temperatur oraz czasach podgrzewania (wygrzewania), jak i chłodzenia.

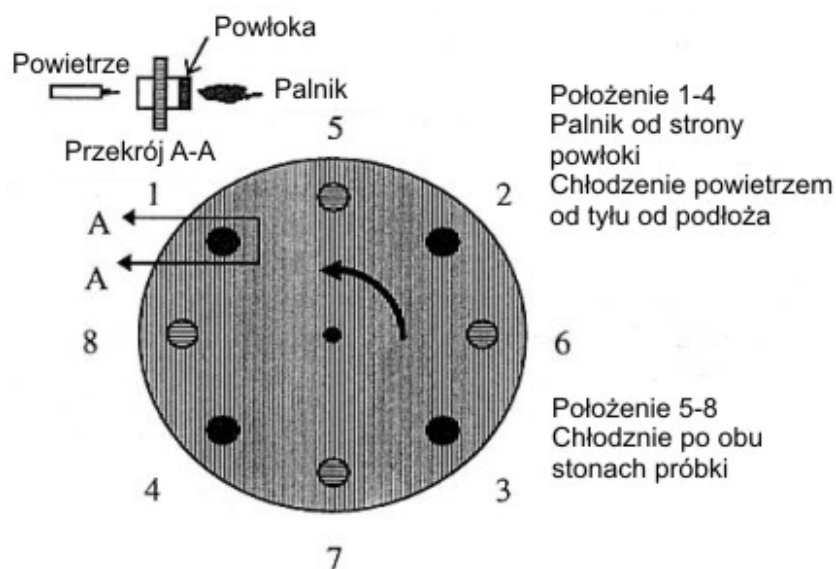
Jak wspomniano, proces grzania próbki może przebiegać z wykorzystaniem różnych źródeł grzania w sposób powolny lub przyspieszony. Badana próbka może być wygrzewana w całości (np. w piecu elektrycznym) lub tylko powierzchnia badana może być poddana działaniu temperatury (np. od płomienia z palnika gazowego). W literaturze można znaleźć wiele przebiegów cyklu termicznego. Ze względu na różne źródło ciepła i chłodzenia oraz zakres temperatur i czasy, zjawisko to przedstawia się to następująco [108], [30] i [85]:

- podgrzanie piecowe z temperatury pokojowej do temperatury 1573K
  - czas podgrzania 5min,
  - przetrzymywanie próbki w temperaturze maksymalnej 10min,
  - chłodzenie do temperatury pokojowej w 5min,
- podgrzanie gazem – propanem  $T_{\max}= 823\text{K}$   $T_{\min}=523\text{K}$ 
  - chłodzenie powietrzem 423K – od tyłu
  - chłodzenie wodą 338K – od frontu
  - chłodzenie CO<sub>2</sub> 308K – od frontu
- podgrzanie gazem - Acetylenem  $T_{\max}=1073\text{K}$  - 1473K
  - przytrzymywanie w temperaturze max. - 5min
  - chłodzenie w temperaturze pokojowej
- palnik gazowy  $T_{\max}= 1473\text{K}$ 
  - grzanie czas - 20s
  - przytrzymywanie w temperaturze max - 5min
  - chłodzenie powietrzem pod ciśnieniem
- podgrzanie palnikiem, gazem – propanem  $T_{\max}= 1223\text{K}$   $T_{\min}= 623\text{K}$ 
  - chłodzenie powietrzem pod ciśnieniem

Jak przedstawia powyższe zestawienie, zakres temperatur oraz rodzaj źródła ciepła i chłodzenia jest różnorodny i indywidualny dla danego producenta stanowiska. Na rysunkach 5.10 ÷ 5.17 przedstawiono schematy typowych przemysłowych, jak i badawczych instalacji do badań odporności na szok termiczny (zmęczenie cieplne). Badana próbka w zależności od sposobu grzania i chłodzenia jest mocowana w uchwycie mocowanym na stałe lub zmieniającym swoje położenie.

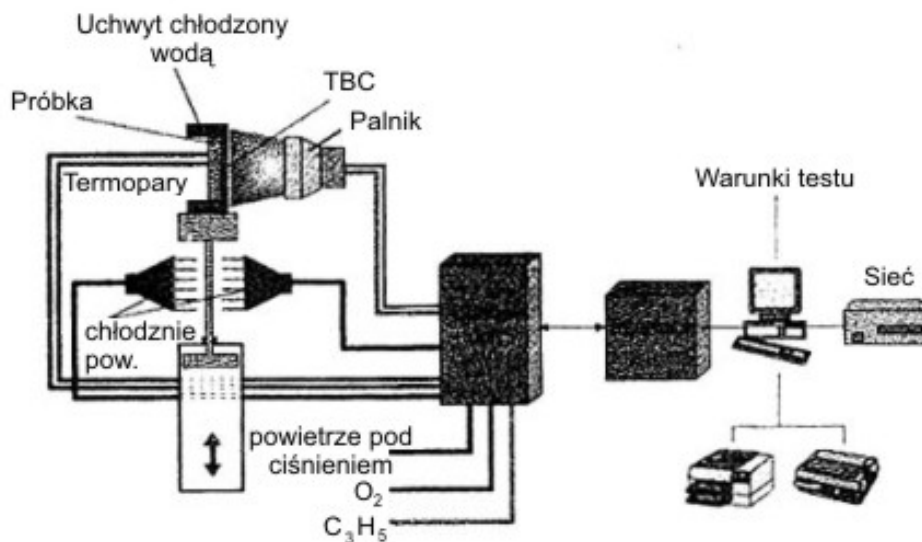


Rys. 5.10. System do badania odporności na szok termiczny: główny rzut i widok wymiennego uchwytu do próbek [30]



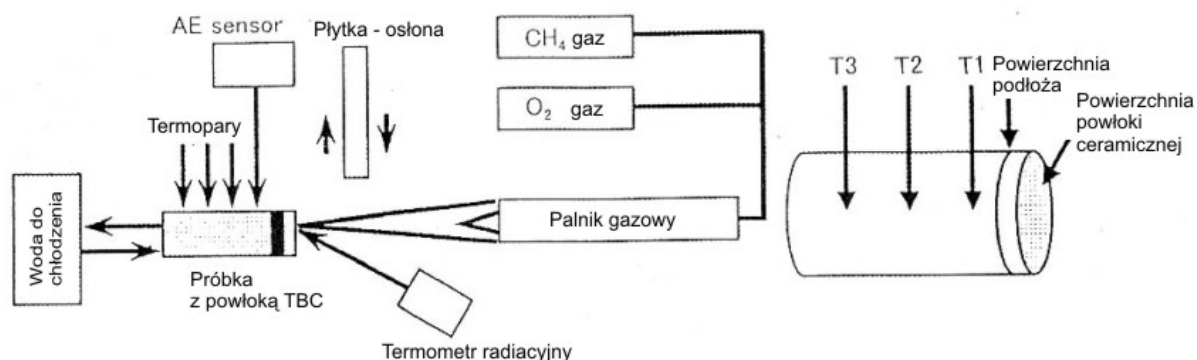
Rys. 5.11. Schemat aparatury do badania odporności na szok termiczny [67]

Jak przedstawiono na rys. 5.11 badana próbka obracana jest skokowo w obrotowym talerzu zmieniając swoje położenie raz pod palnikiem, raz pod dyszą sprężonego powietrza chłodzącego. Rysunek 5.12 przedstawia stanowisko dla badania powłok TBC z siłownikiem przemieszczającym cały uchwyt z próbką z miejsca grzania do miejsca chłodzenia.



Rys. 5.12. Schematyczny rysunek stanowiska do badania odporności na szok termiczny [108]

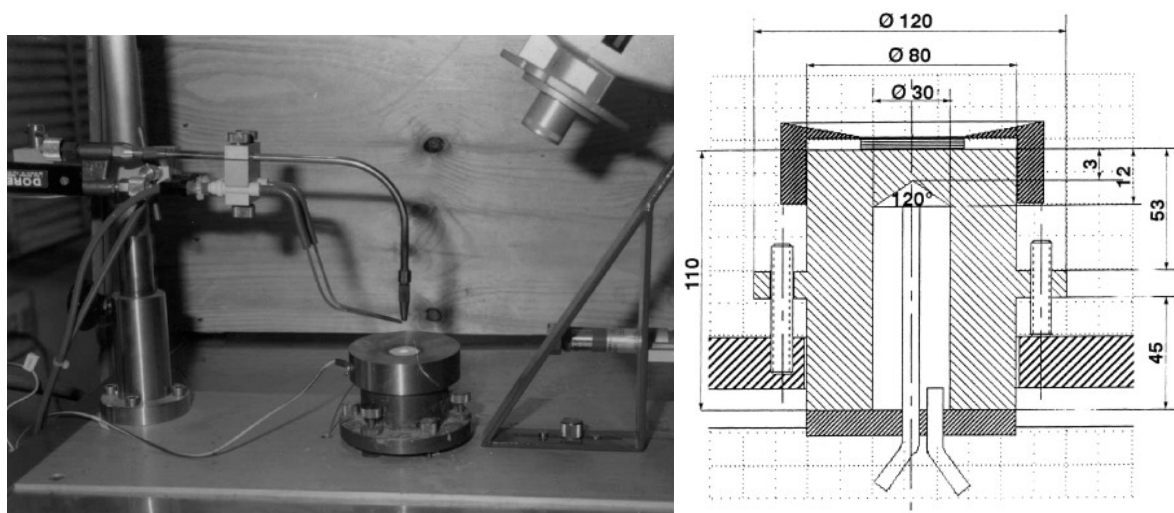
Natomiast na rysunku 5.13 badana próbka jest zakrywana przez tzw. osłonę przysłaniającą palnik gazowy. W tym przypadku nie wymaga się zastosowania urządzenia precyzyjnie przemieszczającego uchwyt z badaną próbką, lecz zastosowanie mobilnej osłony wykonanej z odpornego na wysoką temperaturę materiału.



Rys. 5.13. Schematyczny rysunek stanowiska do symulacji temperaturowej przy użyciu gazowego palnika [94]

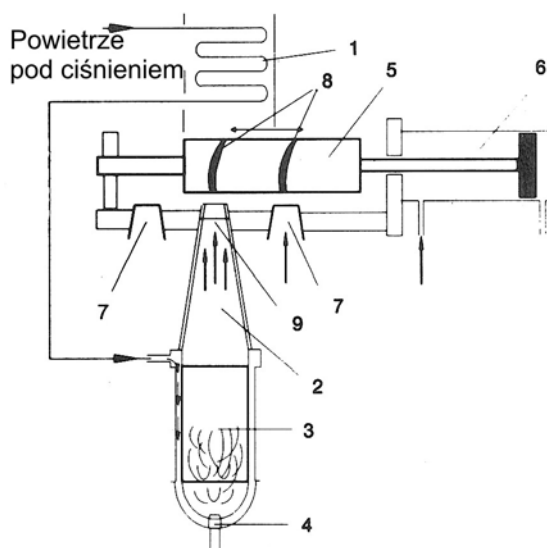
Na rysunkach 5.10 ÷ 5.13 zastosowano wyłącznie powietrzny system chłodzenia, gdzie w niektórych przypadkach chłodzenie od strony podłoża jest ciągle podczas grzania, jak i podczas samego chłodzenia. Zastosowanie jako medium chłodzącego wody przedstawione

zostało schematycznie oraz obrazowo na rys. 5.14 i 5.17 gdzie badana próbka poddawana jest podczas procesu chłodzenia natryskowi wody przez tzw. prysznicowy system wielo-dyszowy lub chłodzenie odbywa się w uchwycie mocującym próbkę.



Rys. 5.14. Widok na stanowisko do badania zmęczenia cieplnego z palnikiem tlenowo-wodorowym oraz schemat uchwytu chłodzonego wodą [66]

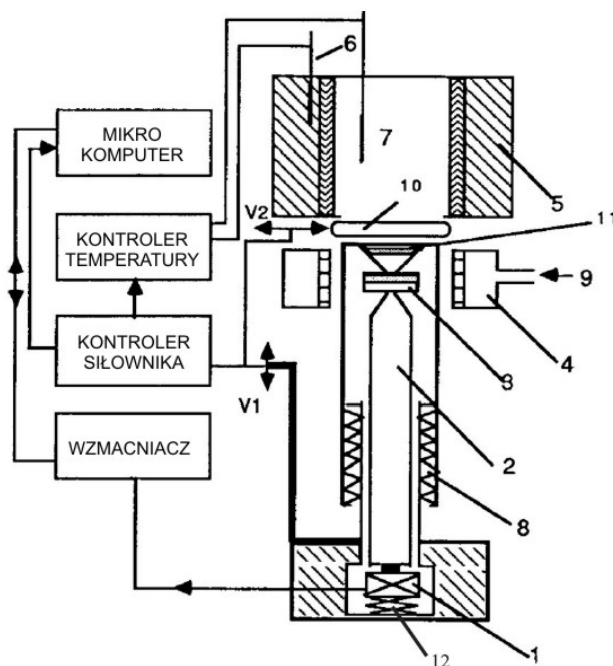
Woda, w przeciwieństwie do powietrza znacznie przyspiesza chłodzenie próbki w sposób bardziej gwałtowny niż strumień powietrzny. Przez to badana próbka poddawana jest bardziej rygorystycznemu testowi niż podczas chłodzenia powietrzem.



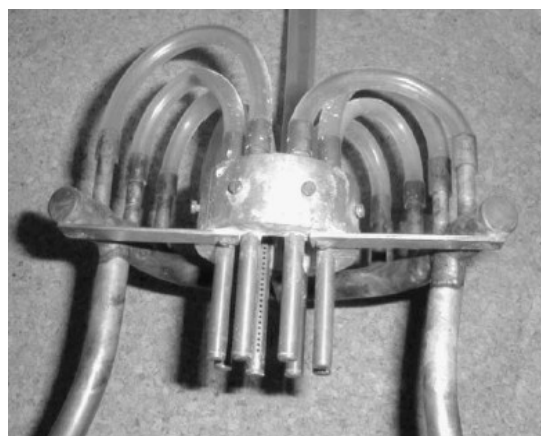
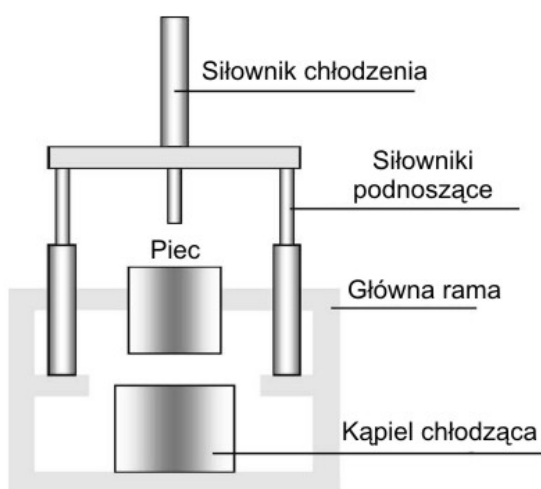
Rys. 5.15. Urządzenie do cieplnego testu powłok ceramicznych [68]:  
 1- Wymiennik ciepła, 2- Dysza ciepłego gazu, 3- komora spalania, 4- Dysza paliwowa,  
 5- Uchwyt próbek, 6- Cylinder pneumatyczny, 7- Dysza powietrza chłodzącego,  
 8- Próbką, 9- termopary

Na rysunku 5.15 przedstawiono typowy test do oceny trwałości cieplnej powłok stosowanych na pokrycia łopatek turbin gazowych. W tym przypadku badana powłoka nie

jest poddawana bezpośredniemu działaniu płomienia gazu, lecz strumieniowi nagrzanego powietrza i gazu skierowanego przez dyszę na próbkę. Proces spalania gazu odbywa się tu w oddzielnej komorze spalania, a nie przed samą próbką jak np. w przypadku testu na rysunkach 5.10 ÷ 5.14, co w rzeczywistości odpowiada procesowi spalania w silniku spalinowym.

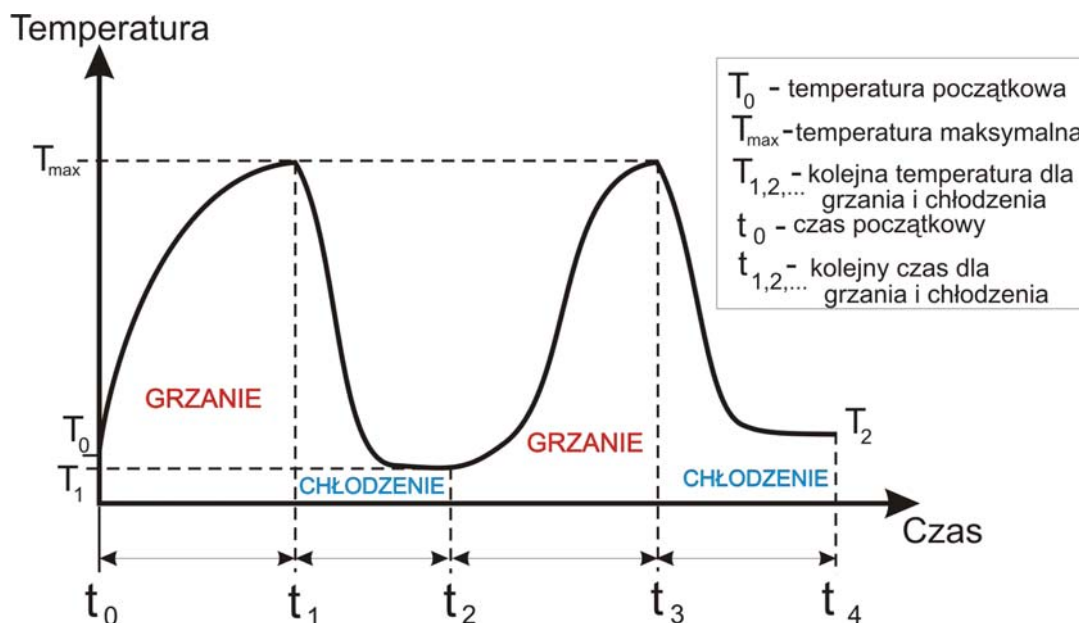


Rys. 5.16. Urządzenie do badania zmęczenia cieplnego: (1) Piezoelektryczny przetwornik, (2) prowadnica, (3) próbka (w pozycji chłodzenia), (4) system chłodzenia powietrzem, (5) piec, (6) termopary regulacji, (7) termopary pomiarowe, (8, 12) sprężyny – dźwigniki (w pozycji chłodzenia), (9) sprężone powietrze, (10) drzwi pieca, (11) izolator akustyczny, V1 dźwignik główny, V2 dźwignik drugorzędny [55]



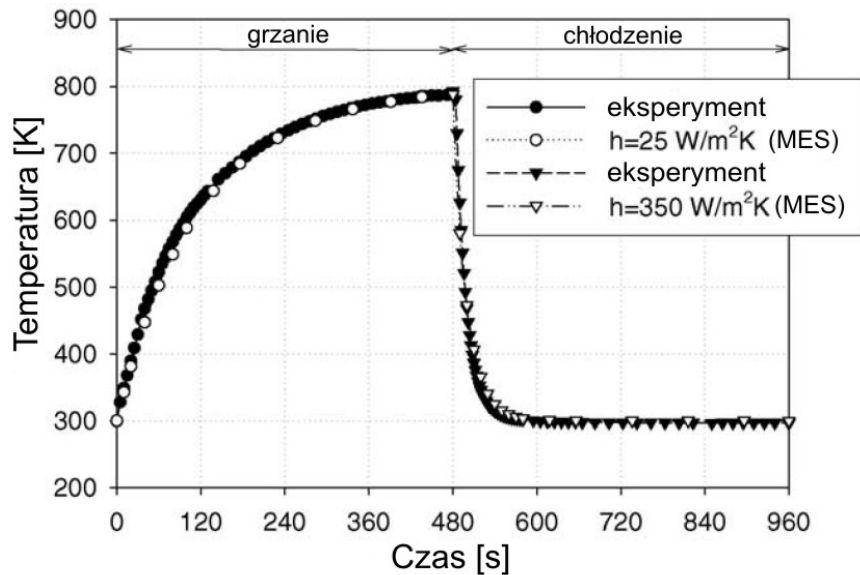
Rys. 5.17. Piecowa aparatura do badania zmęczenia cieplnego wraz z systemem prysznicy chłodzącej próbek [55]

Poszczególne etapy testu odporności na szok termiczny można przedstawić w postaci wykresu zmian temperatury w czasie dla jednego lub wielu cykli cieplnych. Typowy wykres cyklu cieplnego (grzanie i chłodzenie) przedstawia rys. 5.18. Czynnikiem mającym największy wpływ na przebieg testu jest prędkość zmiany temperatury, która jest uzależniona od rodzaju źródła ciepła oraz budowy stanowiska. W zależności od funkcji jaką ma spełniać powłoka ceramiczna w przyszłym lub obecnym zastosowaniu dobór tych parametrów jest bardzo ważny.



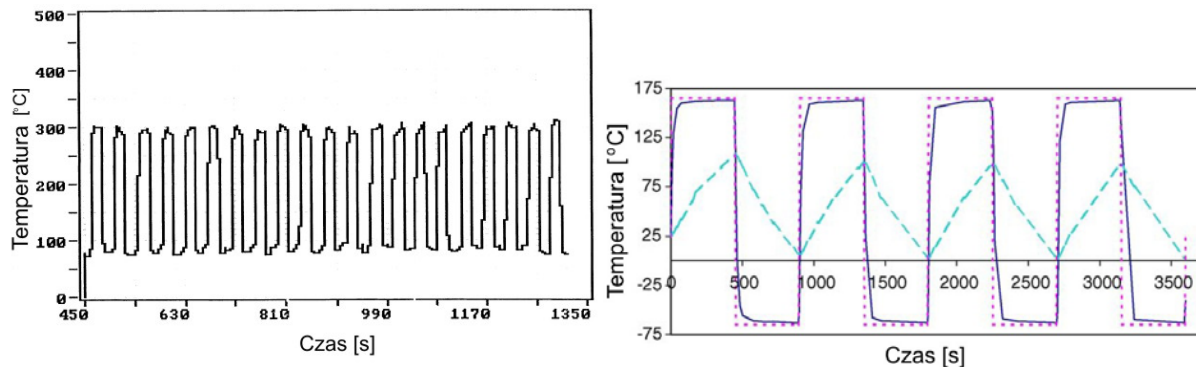
Rys. 5.18. Typowy wykres cyklu badania odporności na szok termiczny

Zaplanowanie odpowiedniego przebiegu cykli termicznych ma duży wpływ na wyniki końcowe testu. Jak już wspomniano dobór temperatur dla określonego testu jest kluczową sprawą. W celu udoskonalenia badań na zmęczenie cieplne z pomocą przychodzą numeryczne symulacje z wykorzystaniem metody elementów skończonych - MES. Dzięki symulacji komputerowej możemy dokładnie dobrać zakres temperatur i czasów dla odpowiedniego badania eksperymentalnego. Na rysunku 5.19 przedstawiono przykładowe porównanie przebiegu jednego cyklu cieplnego uzyskanego metodą numeryczną MES oraz na drodze eksperymentu.



Rys. 5.19. Porównanie temperatur w typowym cyklu termicznym dla metody elementów skończonych oraz badań eksperymentalnych [21]

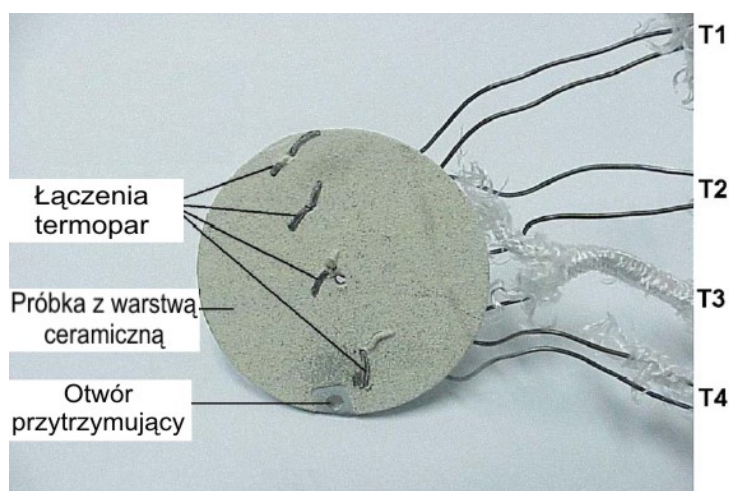
Rysunek 5.20 przedstawia przykładowe przebiegi testu stosowane podczas badań eksperymentalnych i numerycznych.



Rys. 5.20. Przykłady cykli cieplnych [66] i [111]

Wszystkie stanowiska badawcze symulują warunki w jakich ma pracować powłoka ceramiczna a ich odzwierciedlenie w teście wymaga dużej precyzji pomiarowej. Temperatura jaką zakłada się wstępnie przed wykonaniem testu wymaga zastosowania odpowiedniego urządzenia pomiarowego (nawet kilku do celów porównawczych) w celu dokładnego jej kontrolowania. Najczęściej stosowanymi elementami pomiarowymi są termopary (rys. 5.21), pirometry lub kamery termowizyjne. Użycie kilku urządzeń pomiarowych o zmiennej bezwładności pozwala na dokładny pomiar temperatury podczas np. etapu grzania w celu spełnienia początkowych założeń.





Rys. 5.21. Przykład zastosowania termopar do pomiaru temperatury w warstwie ceramicznej [21]

### 5.3.3. Pomiary odkształceń za pomocą tensometrii

Tensometria, jako najbardziej powszechna metoda punktowa pomiaru [61], oparta jest na pomiarze odkształceń za pomocą czujników tensometrycznych mocowanych na powierzchni badanego obiektu. W praktyce pomiar sprowadza się do mierzenia wydłużeń na powierzchni obiektu. Obierając odcinek pomiarowy o pierwotnej długości  $L$  i o żądanym kierunku, dokonuje się pomiaru przyrostu tego  $\Delta L$  tego odcinka. W przypadku jednorodnego stanu odkształcenia iloraz  $\Delta L/L$  określa odkształcenie liniowe.

Początkowo do tego typu pomiarów używano tensometrów mechanicznych, które w obecnym czasie ustąpiły miejsca tensometrom elektrycznym. Najszersze zastosowanie znajdują tensometry rezystancyjne z przewodnikiem metalicznym zwane również tensometrami oporowymi. Zasadniczymi elementami takiego tensometru są równoległe wąskie pasma cienkiej folii metalicznej, połączone szeregowo krótkimi odcinkami. Zadaniem tych pasm (ścieżek) jest przetwarzanie wielkości nieelektrycznej na elektryczną. Końce tych ścieżek są połączone z odpowiednio szerokimi końcówkami, które łączy się z przewodami elektrycznego układu pomiarowego.

Tego typu tensometry nakleja się na odpowiednio przygotowaną powierzchnię przy użyciu klejów. Po przyłutowaniu do końcówek tensometru przewodów układu pomiarowego, pokrywa się jego powierzchnię specjalnymi warstwami w celu ochrony przed wszelkimi zanieczyszczeniami i ewentualnymi uszkodzeniami.

Wraz z odkształceniami powierzchni badanego obiektu ulega również odkształceniom siatka przewodząca tensometru i zmiana długości pomiarowej  $L$  oraz przekroju poprzecznego



ścieżek powoduje odpowiednią zmianę  $\Delta R$  rezystancji tensometru  $R$ , przy czym zachodzi związek

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (5.6)$$

gdzie  $K$  – stała tensometru.

Ze względu na fakt, iż stosowane najczęściej tensometry z reguły pozwalają na pomiar wyłącznie odkształceń wzdłużnych, do wyznaczenia stanu odkształcenia w danym miejscu dokonuje się pomiaru wydłużeń w trzech różnych kierunkach. Pozwala to na określenie poszczególnych składowych odkształcenia  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  w układzie  $x, y$ , co bezpośrednio określa poszczególne składowe naprężenia. Do tego typu pomiarów tensometrycznych stosuje się tzw. rozety tensometryczne.

Przy pomiarach odkształceń za pomocą tensometrów rezystancyjnych obiektów obciążonych cieplnie istotne znaczenia ma wpływ temperatury na ich wyniki. Wpływ ten można wyrazić równaniem:

$$(\Delta R)_T = R[\alpha_0 + K(\alpha - \alpha_1)]\Delta T \quad (5.7)$$

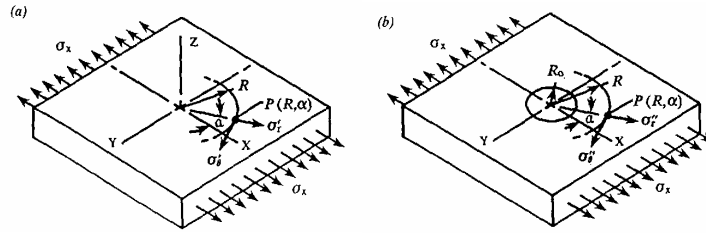
gdzie  $(\Delta R)_T$  - zmiana rezystancji tensometru spowodowana zmianą  $\Delta T$  temperatury  $T$ ,  $R$  – początkowa rezystancja tensometru,  $K$  – współczynnik czułości odkształceniowej,  $\alpha_0$  - współczynnik termicznej zmiany rezystancji siatki tensometru,  $\alpha$  - współczynnik rozszerzalności liniowej materiału podłoża,  $\alpha_1$  - współczynnik rozszerzalności liniowej siatki rezystancyjnej tensometru.

Jednym ze sposobów wyeliminowania wpływu temperatury na pomiar odkształcenia jest stosowanie tzw. tensometrów samokompensujących. Mogą to być tensometry firmy VISHAY-Micro-Measurements Division oznaczone symbolami S-T-C (Self-Temperature-Compensation). Tensometry te są odpowiednio dostosowane do współczynnika rozszerzalności podłoża.

Przy małych i wolno zmieniających się temperaturach badanego obiektu, do wyeliminowania wpływu temperatury na pomiar, stosuje się dodatkowy tensometr kompensacyjny. Charakteryzuje się on rezystancją równą rezystancji tensometru czynnego. Jest on naklejany na małą płytkę wykonaną z tego samego materiału umieszczoną w pobliżu dokonywanych pomiarów.

Badania stanu odkształcenia obiektów poddanych obciążeniom cieplnym powinny zawierać również informacje na temat naprężeń własnych. Ten typ pomiaru polega na ocenie

wielkości odkształceń (rys 5.22) wokół wywierconego w badanym elemencie otworu odciażającego (o średnicy ok. 2 mm).



Rys. 5.22. Idea pomiaru naprężeń własnych przez pomiar odkształceń odciażających po nawierceniu otworu.

Normalne odkształcenia odprężeniowe w punkcie  $P(R, \alpha)$  określa się z zależności:

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[ \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha + \frac{4}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (5.8)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E} \left[ -\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cos 2\alpha - \frac{4\nu}{r^2(1+\nu)} \cos 2\alpha \right] \quad (5.9)$$

Dla czteroczujnikowej rozety (rys. 5.23) i przyjętych oznaczeń:

$$r_i = \frac{R_i}{R_0}, i = 1, 2, 3, 4.$$

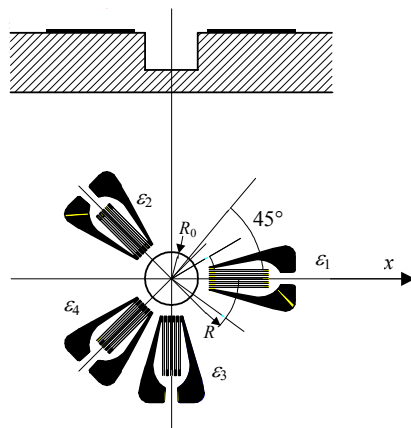
$$A_i = -\frac{1+\nu}{2 \cdot E} \cdot \left( \frac{1}{r_i^2} \right),$$

$$B_i = -\frac{1+\nu}{2 \cdot E} \left[ \left( \frac{4}{1+\nu} \right) \cdot \frac{1}{r_i^2} - \frac{3}{r_i^4} \right],$$

$$w = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 2\alpha}.$$

odkształcenia na kierunkach: 1 = 0°, 2 = 45°, 3 = 90°, 4 = 135° wynoszą:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= A_1(\sigma_x + \sigma_y) + B_1(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha, \\ \varepsilon_2 &= A_2(\sigma_x + \sigma_y) + B_2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\left(\alpha + \frac{5 \cdot \pi}{4}\right) = A_2(\sigma_x + \sigma_y) - B_2(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha, \\ \varepsilon_3 &= A_3(\sigma_x + \sigma_y) + B_3(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) = A_3(\sigma_x + \sigma_y) - B_3(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\alpha, \\ \varepsilon_4 &= A_4(\sigma_x + \sigma_y) + B_4(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\left(\alpha + \frac{3 \cdot \pi}{4}\right) = A_4(\sigma_x + \sigma_y) + B_4(\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\alpha. \end{aligned} \quad (5.10)$$



Rys. 5.23. Rozeta tensometryczna TFRw-2/120 do określania naprężeń własnych metodą nawiercania

Wykorzystując tożsamości:

$$\begin{aligned}\sin 2\alpha &= \frac{\operatorname{tg} 2\alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 2\alpha}} = \frac{\operatorname{tg} 2\alpha}{w}, \\ \cos 2\alpha &= \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 2\alpha}} = \frac{1}{w},\end{aligned}\quad (5.11)$$

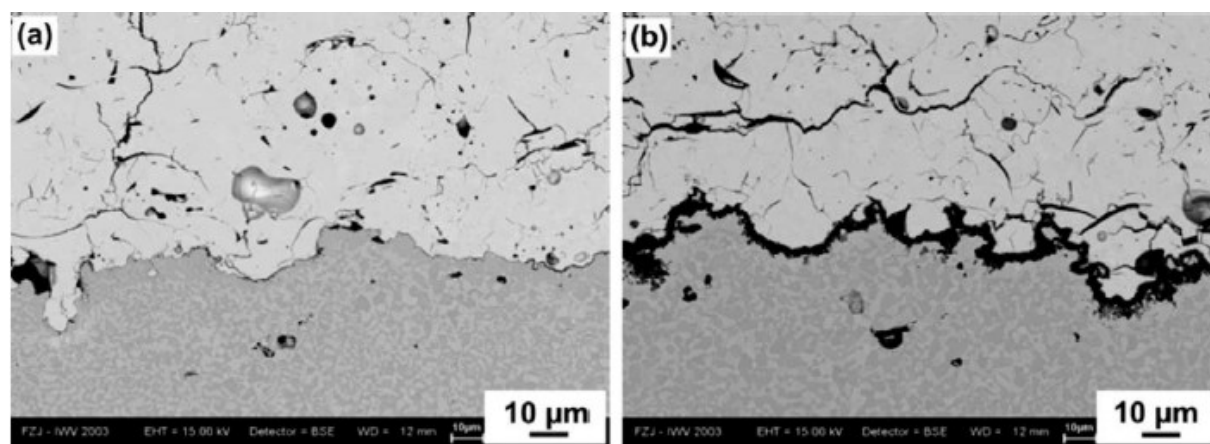
po podstawieniach otrzymujemy układ równań:

$$\begin{aligned}(1) \varepsilon_1 &= A_1(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{B_1}{w}(\sigma_x - \sigma_y), \\ (2) \varepsilon_2 &= A_2(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{B_2}{w}(\sigma_x - \sigma_y)\operatorname{tg} 2\alpha, \\ (3) \varepsilon_3 &= A_3(\sigma_x + \sigma_y) - \frac{B_3}{w}(\sigma_x - \sigma_y), \\ (4) \varepsilon_4 &= A_4(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{B_4}{w}(\sigma_x - \sigma_y)\operatorname{tg} 2\alpha.\end{aligned}\quad (5.12)$$

Rozwiązanie tego układu równań umożliwia określenie wartości naprężeń  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  oraz kąta  $\alpha$ , a tym samym wartość naprężeń głównych  $\sigma_1$  i  $\sigma_2$  w punkcie pomiarowym przed nawierceniem otworu.

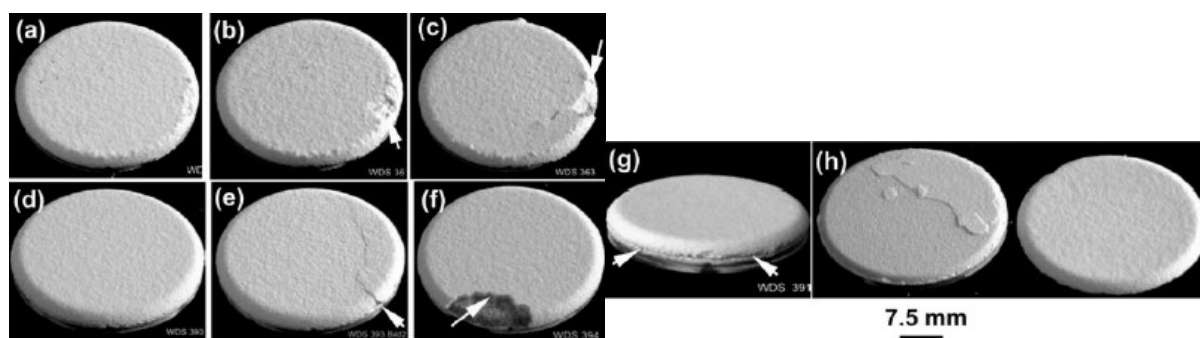
#### 5.4. Ocena powłok ceramicznych poddanych obciążeniom cieplnym

Próbki po wykonaniu testu lub po kolejnych jego etapach są poddawane badaniom metalograficznym w celu określenia jakości struktury warstwy w porównaniu ze stanem początkowym (przed testem). Badanie to ma na celu wskazanie postępu propagacji pęknięć w mikrostrukturze powłoki lub pęknięć na połączeniu powłoki z podłożem. Analiza ta jest najczęściej analizą porównawczą do stanu początkowego ze względu na to, iż próbka po natryskiwaniu posiada w swojej strukturze mikropęknięcia wywołane naprężeniami cieplnymi powstałymi od procesu natryskiwania cieplnego. Wstępna analiza mikrostrukturalna pozwala określić stan początkowy wielkości pęknięć w strukturze warstwy oraz jakość połączenia z podłożem, bądź z warstwą podkładową. Na rysunku 5.24 przedstawiono porównanie zdjęć mikroskopowych powłoki ceramicznej po natryskiwaniu cieplnym (widoczne małe mikropęknięcia w strukturze) oraz powłoki po 1770 cyklach termicznych wygrzewania do temperatury maksymalnej 1511°K. Możemy tu wyraźnie zauważyć dużą propagację mikropęknięć oraz odzepienie się warstwy ceramicznej od podłoża. Natomiast na rysunku 5.25 przedstawiono degradację widoczną bez powiększenia 3 rodzajów powłok ceramicznych po określonej liczbie cykli. Widoczne są odprysnięcia warstwy wierzchniej od podłoża.



Rys. 5.24. Zdjęcia mikroskopowe przekrojów warstwy powłoki ceramicznej (a) po natryskiwaniu, (b) po 1770 cyklach w temp. 1511°K [66]

Najczęstszym kryterium świadczącym o maksymalnej ilości cykli jaką przetrwa badana próbka jest wyraźne jej zniszczenie. Wcześniejsze założenia o ilości cykli testu pozwalają w przypadku gdy nie jest widoczne zniszczenie próbki na powierzchni, na uznanie, że próbka pozytywnie spełniła warunki testu, lub liczba cykli jest na tyle wystarczająca, aby próbka przeszła pozytywnie test.

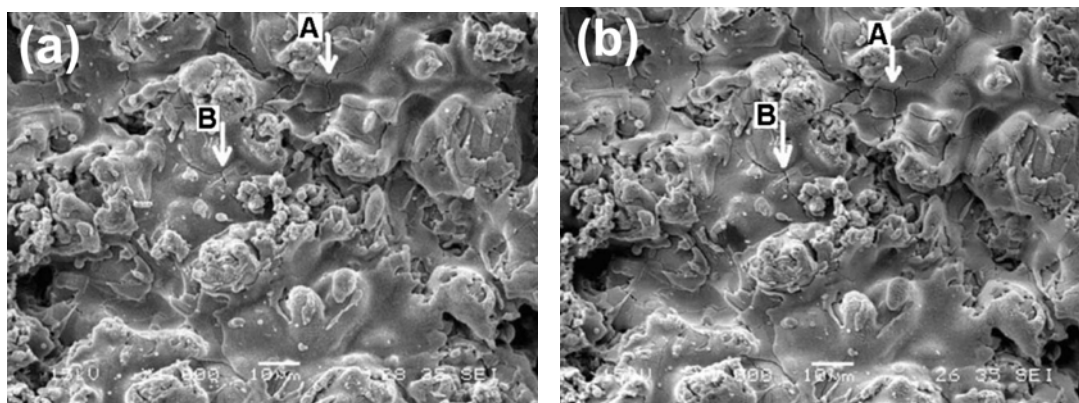


Rys. 5.25. Zdjęcia przedstawiające degradację 3 różnych powłok ceramicznych po określonej liczbie cykli cieplnych [29]:

- (a), (b) i (c) powłoka wygrzewana do temp 1511K dla 1200 cykli, 1770 cykli i 1335 cykli w temperaturze 1608K,
- (d), (e) i (f) powłoka wygrzewana do temp 1500K dla 1650 cykli, 1810 cykli i 174 cykli w temperaturze 1590K,
- (g) i (h) powłoka wygrzewana do temp 1490K dla 1071 i 217 cykli w temperaturze 1600K

Do dokładnej oceny jakości warstwy poddanej określonej liczbie cykli wymagane jest zastosowanie badań mikroskopowych o bardzo dużych powiększeniach. Do tego celu najczęściej używanym urządzeniem jest elektronowy mikroskop skaningowy -SEM.

Rysunek 5.26 przedstawia zdjęcie SEM mikrostruktury warstwy ceramicznej z zaznaczonymi punktami propagacji pęknięć.



Rys. 5.26. Zdjęcia mikroskopowe przedstawiające propagację pęknięć podczas testu odporności na szok termiczny (a) po natryskiwaniu, (b) po 50 cyklach termicznych [21]

Wstępna ocena struktury powłoki, czyli widoczne gołym okiem zmiany na powierzchni (odczepienie od podłoża, odprysnięcia, pęknięcia itp.), pozwala ocenić czy dana próbka spełnia postawione na wstępie kryteria, czyli czy ilość cykli cieplnych do zniszczenia jest wystarczająca. Natomiast szczegółowa analiza struktury SEM umożliwia kontrolowanie stanu próbki bez widocznych, wyraźnych uszkodzeń np. po połowie założonej ilości cykli.

## 6. Podstawy modelowania obciążeń cieplnych w teorii sprężystości

Całkowita weryfikacja stanu wyężenia konstrukcji wymaga uwzględnienia wszystkich czynników wpływających na stan odkształceń w jej objętości. W szczególnym przypadku, dominującą grupę obciążeń mogą stanowić obciążenia cieplne. Stąd też istnieje potrzeba opracowania efektywnego modelu numeryczno-doświadczalnego opisującego trójwymiarowe pole temperatury w konstrukcji o dużej niejednorodności struktury, poddanej działaniu wysokiej temperatury. Do konstrukcji takich możemy zaliczyć w skali makro elementy urządzeń energetycznych (ekrany kotłów energetycznych), oraz w skali mikro wielowarstwowe powłok ceramiczne stanowiące bariery termiczne stosowane w przemyśle lotniczym i samochodowym.

Najczęściej stosowane klasyczne metody doświadczalne wyznaczania pola temperatury ograniczają się jedynie do punktowych lub powierzchniowych pól temperatury. Obiekty posiadające złożoną geometrię wymagają jednak trójwymiarowego ciągłego pola temperatury:

$$T = T(x, y, z, t). \quad (6.1)$$

Rozwiązując jakiegokolwiek zadanie mechaniki ośrodków ciągłych należy utworzyć model obliczeniowy zawierający następujące elementy:

- opis geometrii obszaru  $V$ , wewnątrz którego poszukujemy rozwiązania, z uwzględnieniem powierzchni ograniczającej  $S$ ,
- równania różniczkowe opisujące stan równowagi ciała w obszarze  $V$ ,
- warunki brzegowe na powierzchni ograniczającej  $S$  oraz warunki ciągłości w przypadku ciał niejednorodnych lub wielofazowych,
- obciążenie ciała, czyli pewne zewnętrzne przyczyny wywołujące skutki określone równaniem równowagi.

Stosując do rozwiązania zadania mechaniki Metodę Elementów Skończonych, musimy opracować model dyskretny (obliczeniowy) ekwiwalentny do modelu matematycznego ośrodka ciągłego. W procesie tworzenia tego modelu wyróżniamy następujące etapy postępowania:

- podział rozpatrywanego obszaru  $v$  na podobszary  $v^e$  – elementy,
- przyjęcie punktów węzłowych tak, aby można było przeprowadzić aproksymację poszukiwanej funkcji wewnątrz obszaru  $v^e$  za pomocą funkcji aproksymujących i niezależnych parametrów węzłowych,

- określenie dla każdego elementu struktury macierzy opisujących jego własności,
- utworzenie macierzy dla całego układu na podstawie macierzy elementów,
- określenie warunków brzegowych i obciążenia ciała,
- rozwiązanie podstawowego układu równań,
- obliczenie, na podstawie wyznaczonych parametrów węzłowych, funkcji pochodnych, np. w teorii sprężystości wartości składowych naprężenia lub odkształcenia.

Etapy te mogą występować w różnej kolejności, w zależności od zastosowanego systemu komputerowego.

## 6.1. Przewodnictwo ciepła w ujęciu MES

Rozpatrując zagadnienie przewodnictwa ciepła w ciałach stałych przy zastosowaniu metody elementów skończonych zakładamy, że w transporcie ciepła wewnątrz ciała o niejednorodnej budowie i przy złożonych warunkach brzegowych, wartość temperatury w dowolnym punkcie obiektu nie zależy od pola przemieszczeń (prędkości odkształcenia) [65] i [13]. Weźmy pod uwagę ciało zwarte w ograniczonym obszarze  $V$  powierzchnią  $S$  o gęstości  $\rho$ , cieple właściwym  $c$  i współczynniku przewodzenia ciepła  $\lambda$ . Zagadnienie przewodnictwa ciepła polega na wyznaczeniu temperatury  $\theta$  tego ciała w obszarze  $V$  poprzez rozwiązanie równania różniczkowego:

$$c_p \rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(k \nabla \theta) + q \quad (6.2)$$

gdzie:

$q$  – wydajność wewnętrznego źródła ciepła,  $\nabla$  - operator różniczkowy Nabla,  $t$  – czas.

Rozwiązanie powyższego równania musi spełniać warunki brzegowe w zależności od sposobu wymiany ciepła.

W sformułowaniu wariacyjnym zagadnienia przewodzenia ciepła formułuje się pewien funkcjonal, który osiąga minimum dla funkcji  $\theta$

Dla ciała trójwymiarowego funkcjonal taki ma postać:

$$J = \frac{1}{2} \int_V \left[ \lambda_x \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^2 \right] dV + \int_V \theta q_v dv + \int_S \theta^s q^s ds - \sum_i \theta_i Q_i \quad (6.3)$$

gdzie  $Q_i$  jest strumieniem ciepła wpływającego w punkcie  $i$ -tym o odpowiednich współrzędnych, a  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  są współczynnikami przewodzenia ciepła w odpowiednich kierunkach.

Funkcjonał  $J$  ma identyczną postać dla każdego z podobszarów  $V^e$  zwanych elementami zgodnie z zasadą dyskretyzacji. Elementy te są połączone ze sobą określoną liczbą punktów zwanych węzłami. Wartość tego funkcyjonału w całym obszarze jest równa sumie funkcyjonałów  $J^e$  po wszystkich elementach:

$$J = \sum_e J^e. \quad (6.4)$$

Temperaturę  $\theta$  wewnątrz każdego z elementów, opisanego w prostokątnym układzie współrzędnych, wyrazimy za pomocą jej wartości  $T_i$  określonych w węzłach elementu oraz funkcji interpolacyjnych  $\Phi_i(x, y, z)$ :

$$\theta(x, y, z) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(x, y, z) T_i, \quad (6.5)$$

gdzie  $n$  jest liczbą węzłów w elemencie.

Wprowadzając oznaczenia:

$$\Phi = [\Phi_1 \ \Phi_2 \ \dots \ \Phi_n], \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \end{bmatrix}, \quad (6.6)$$

gdzie  $\Phi_i$  jest funkcją kształtu  $i$ -tego węzła zależność (6.5) można zapisać w postaci macierzowej

$$\theta = \Phi \mathbf{T}. \quad (6.7)$$

Wobec tego pochodne temperatury  $\theta$  względem poszczególnych współrzędnych przestrzennych będą miały postać:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (\Phi \mathbf{T}) = \Phi_{,x} \mathbf{T} \\ \frac{\partial \theta}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} (\Phi \mathbf{T}) = \Phi_{,y} \mathbf{T} \\ \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial z} (\Phi \mathbf{T}) = \Phi_{,z} \mathbf{T} \end{aligned} \quad (6.8)$$



gdzie wyrażenia z przecinkiem oznaczają różniczkowanie wszystkich elementów macierzy  $\Phi$  względem poszczególnej współrzędnej. Dodatkowo wprowadzając oznaczenia odpowiednich macierzy:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z]^T = \mathbf{B}\mathbf{T}, \quad (6.9)$$

gdzie

$$\mathbf{B} = [\Phi_{,x} \ \Phi_{,y} \ \Phi_{,z}]^T \quad (6.10)$$

W przypadku materiału o nieizotropowych własnościach przewodzenia ciepła, określa się macierz  $\mathbf{D}$  współczynnika przewodzenia ciepła dla różnych kierunków osi układu kartezyjańskiego

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix} \quad (6.11)$$

Wykorzystując powyższe zależności można określić funkcjonal  $J^e$  dla e-tego elementu w postaci

$$J^e = \frac{1}{2} \mathbf{T}^T \mathbf{A}^e \mathbf{T} - \mathbf{T}^T (\mathbf{Q}^e + \mathbf{Q}^{es} + \mathbf{Q}^{ei}) \quad (6.12)$$

gdzie

$$\mathbf{A}^e = \int_{V^e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV, \quad (6.13)$$

jest macierzą przewodnictwa cieplnego, natomiast

$$\mathbf{Q}^e = \int_{V^e} \Phi^T q_v dV, \quad (6.14)$$

$$\mathbf{Q}^{es} = \int_{S^e} \Phi^T q^s dS, \quad (6.15)$$

$$\mathbf{Q}^{ei} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix}, \quad (6.16)$$

są odpowiednio jednokolumnowymi macierzami wewnętrznej generacji ciepła, konwekcyjnej wymiany ciepła przez ograniczającą objętość powierzchnię  $S$  oraz wydatkiem źródeł punktowych.

W ogólnym przypadku wewnętrzna generacja ciepła  $q$ , konwekcyjna wymiana  $q^S$  i wydatek źródła punktowego  $Q_i$  mogą być zmienne w czasie. Wtedy temperatura  $\theta$  jest także funkcją czasu i wyrazi się następująco:

$$\theta = \theta(\mathbf{x}, y, z, t) = \Phi(\mathbf{x}, y, z)\mathbf{T}(t) \quad (6.17)$$

W bilansie ciepła można uwzględnić [65]:

- ciepło wytworzone na skutek pewnych przemian chemicznych,
- ciepło utajnione wydzielane lub absorbowane na skutek zmiany stanu skupienia ciała,
- ciepło absorbowane proporcjonalnie do pojemności cieplnej.

Jeżeli uwzględnimy tylko ciepło absorbowane, to otrzymamy:

$$q_v = \rho c \dot{\theta}, \quad (6.18)$$

gdzie  $\rho$  - gęstość ciała.

Wykorzystując zależności (6.14) i (6.15), można wyrazić ciepło absorbowane w węzłach elementu skończonego poprzez:

$$\mathbf{Q}^e = \int_{V^e} \Phi^T \rho c \Phi \dot{\mathbf{T}} dV = \mathbf{M}^e \dot{\mathbf{T}}, \quad (6.19)$$

gdzie

$$\mathbf{M}^e = \int_{V^e} \Phi^T \rho c \Phi dV, \quad (6.20)$$

jest macierzą pojemności cieplnej, natomiast

$$\dot{\theta} = \Phi \dot{\mathbf{T}}(t), \quad (6.21)$$

pochođną temperatury względem czasu.

Biorąc pod uwagę rozważania dotyczące funkcjonału (6.12) można jego wartość zapisać dla danego elementu w postaci:

$$\mathbf{J}^e = \frac{1}{2} \mathbf{T}^T (\mathbf{A}^e + \mathbf{A}^\alpha) \mathbf{T} + \mathbf{T}^T \mathbf{M}^e \dot{\mathbf{T}} - \mathbf{Q}^e \mathbf{T}, \quad (6.22)$$

przy czym wartość funkcji  $\mathbf{Q}^e$  jest określona tylko przez wewnętrzną generację ciepła na skutek przemian chemicznych.

Minimalizując funkcjonal (6.22) względem parametrów węzłowych, czyli względem wartości temperatury w węzłach siatki elementów, otrzymamy macierzowe równanie opisujące przepływ ciepła przez obszar  $V^e$  elementu

$$\bar{\mathbf{A}}^e \mathbf{T} + \mathbf{M}^e \dot{\mathbf{T}} = \mathbf{Q}^e, \quad (6.23)$$

gdzie  $\bar{\mathbf{A}}^e = \mathbf{A}^e + \mathbf{A}^\alpha$ .

Ponieważ wartość funkcjonału  $J$  określonego na całym obszarze  $V$  jest równa sumie wartości funkcjonałów dla poszczególnych elementów  $J^e$ , to słuszna jest zależność:

$$\frac{\partial J}{\partial T} = \sum_e \frac{\partial J^e}{\partial T} = 0, \quad (6.24)$$

a na jej podstawie otrzymujemy równanie przewodzenia ciepła dla całego obszaru  $V$ :

$$\mathbf{A} \mathbf{T} + \mathbf{M} \dot{\mathbf{T}} = \mathbf{Q}, \quad (6.25)$$

gdzie

$$\mathbf{A} = \sum_e \bar{\mathbf{A}}^e, \quad (6.26)$$

$$\mathbf{M} = \sum_e \mathbf{M}^e, \quad (6.27)$$

$$\mathbf{Q} = \sum_e \mathbf{Q}^e. \quad (6.28)$$

Równanie macierzowe (6.25) wraz z warunkami początkowymi

$$\mathbf{T}(t = 0) = \mathbf{T}_0^s \quad (6.29)$$

stanowi podstawowy układ równań, z którego po rozwiązaniu, można znaleźć przestrzenny rozkład temperatury  $T$  w objętości rozważanego ciała. Równanie to jest jednocześnie macierzowym równaniem przewodzenia ciepła, które w przypadku zmiany fazy skupienia ciała w rozpatrywanym obszarze jest równaniem silnie nieliniowym. Aby znaleźć rozkład temperatury w czasie trzeba zastosować jedną z metod całkowania układu równań

różniczkowych. Metoda rozwiązania równania (6.25) musi być stabilna, dawać zbieżne wyniki i co najważniejsze przy dużych układach równań powinna być efektywna.

Jeżeli przyjmiemy, że temperatura w czasie od  $t$  do  $t+\Delta t$  zmienia się liniowo, to jej pochodna względem czasu wyrazi się następująco (metoda Eulera):

$$\dot{\mathbf{T}} = \frac{1}{\Delta t}(\mathbf{T}^{i+1} - \mathbf{T}^i) \quad (6.30)$$

To równanie przewodzenia ciepła (6.25) przyjmie postać

$$\left(\mathbf{A} + \frac{1}{\Delta t}\mathbf{M}\right)\mathbf{T}^{i+1} = \mathbf{Q}^{i+1} + \frac{1}{\Delta t}\mathbf{M}\mathbf{T}^i \quad (6.31)$$

Znając rozkład temperatury  $\mathbf{T}^i$  w czasie  $t = i\Delta t$  ( $i = 0,1,2,\dots$ ), możemy znaleźć wartość  $\mathbf{T}^{i+1}$  po czasie  $\Delta t$  ze wzoru:

$$\mathbf{T}^{i+1} = \left(\mathbf{A} + \frac{1}{\Delta t}\mathbf{M}\right)^{-1} \left(\mathbf{Q}^{i+1} + \frac{1}{\Delta t}\mathbf{M}\mathbf{T}^i\right) \quad (6.32)$$

Jeżeli przyjmiemy liniową zmienność temperatury w czasie od  $t - \Delta t$  do  $t + \Delta t$ , to do obliczenia pochodnej temperatury względem czasu zastosujemy różnicę centralną:

$$\dot{\mathbf{T}}^i = (\mathbf{T}^{i+1} - \mathbf{T}^{i-1}) \frac{1}{2\Delta t} \quad (6.33)$$

Poprawę stabilności oraz dokładności można uzyskać podstawiając za temperaturę  $\mathbf{T}^i$  jej średnią wartość z trzech kolejnych kroków czasowych w postaci:

$$\mathbf{T}^i = \frac{1}{3}(\mathbf{T}^{i+1} + \mathbf{T}^i + \mathbf{T}^{i-1}) \quad (6.34)$$

Podobnie wyrażamy wydatek źródła ciepła w postaci:

$$\mathbf{Q}^i = \frac{1}{3}(\mathbf{Q}^{i+1} + \mathbf{Q}^i + \mathbf{Q}^{i-1}) \quad (6.35)$$

Równanie (6.25) w tym przypadku przyjmie postać:

$$\frac{1}{3}\mathbf{A}(\mathbf{T}^{i+1} + \mathbf{T}^i + \mathbf{T}^{i-1}) + \frac{1}{2\Delta t}\mathbf{M}(\mathbf{T}^{i+1} - \mathbf{T}^{i-1}) = \frac{1}{3}(\mathbf{Q}^{i+1} + \mathbf{Q}^i + \mathbf{Q}^{i-1}) \quad (6.36)$$

W powyższym wyrażeniu macierz przewodnictwa ciepła i pojemności cieplnej posiadają wartość średnią z przedziału czasu  $(t - \Delta t) \div (t + \Delta t)$ .

Przy obliczaniu temperatury

$$\mathbf{T}^{i+1} = \left(\frac{1}{3}\mathbf{A} + \frac{1}{2\Delta t}\mathbf{M}\right)^{-1} \left[\frac{1}{3}(\mathbf{Q}^{i+1} + \mathbf{Q}^i + \mathbf{Q}^{i-1}) - \frac{1}{3}\mathbf{A}(\mathbf{T}^{i+1} + \mathbf{T}^i) + \frac{1}{2\Delta t}\mathbf{M}\mathbf{T}^{i-1}\right] \quad (6.37)$$

na danym kroku czasowym iterowaniu podlega tylko strumień ciepła  $\mathbf{Q}^{i+1}$ .

Równania (6.32) i (6.37) pozwalają obliczyć temperaturę  $T^{i+1}$  w sposób rekurencyjny.

Obliczenia według wzoru (6.37) wykazują większą stabilność, ale wymagają większej liczby operacji rachunkowych [65] i [13].

## 6.2. Wytyżenie obiektu w polu temperatury

Do określenia zagadnień związanych z naprężeniami i odkształceniami w zakresie statyki i dynamiki w urządzeniach poddanych obciążeniom termicznym, należy przedstawić podstawowe równania teorii sprężystości dla określonych warunków brzegowych w postaci sił i przemieszczeń [6], [13], [65] i [93]. W trójosiowym stanie naprężeń określone są związki:

- pomiędzy stanem odkształcenia i przemieszczeniem,
- pomiędzy stanem naprężenia i odkształcenia,
- równania równowagi lub ruchu.

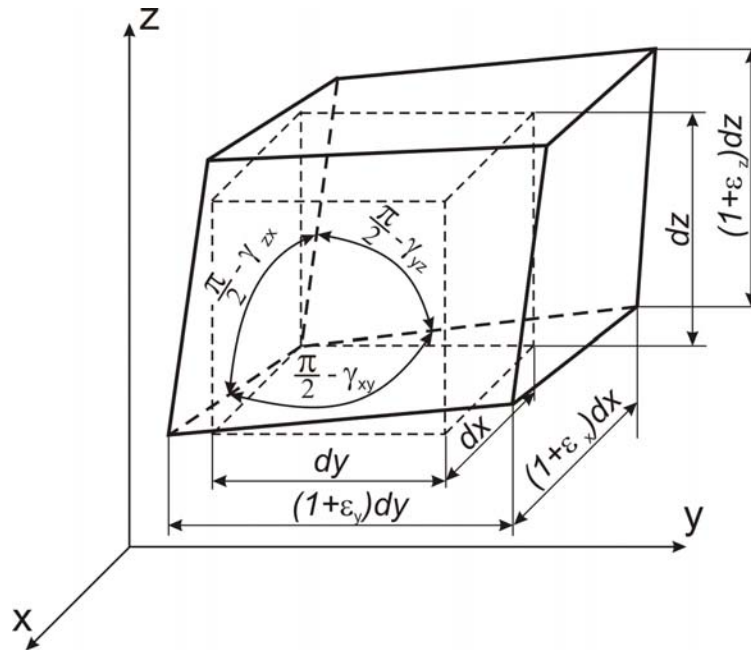
Każde ciało stałe podlegające działaniu obciążeń mechanicznych i cieplnych odkształca się. Jego punkty doznają przemieszczeń, które określamy względem stosownie przyjętego układu odniesienia. W kartezjańskim układzie współrzędnych  $X, Y, Z$  wektor przemieszczeń  $\{U\}$  dowolnego punktu bryły ma postać:

$$\{U\} = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (6.38)$$

gdzie wszystkie wartości przemieszczeń  $u_x, u_y$  oraz  $u_z$  są funkcją współrzędnych  $x, y$  i  $z$

$$\begin{aligned} u_x &= u_x(x, y, z) \\ u_y &= u_y(x, y, z) \\ u_z &= u_z(x, y, z) \end{aligned} \quad (6.39)$$

Przedstawiając opis odkształceń konstrukcji w przestrzeni trójwymiarowej, należy wyodrębnić element prostopadłościenny o długościach krawędzi  $dx, dy$  i  $dz$  (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Odształcenia elementu prostopadłościennego

W wyniku małych odkształceń element prostopadłościenny przekształca się na zbliżony do równoległoscianu element o długościach krawędzi:

$$(1 + \varepsilon_x)dx, (1 + \varepsilon_y)dy, (1 + \varepsilon_z)dz.$$

Wielkości  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  wyrażają względne zmiany długości tych krawędzi przypadające na jednostkę długości nazwane są *odkształceniami względnymi* lub *odkształceniami jednostkowymi liniowymi*.

W przypadku małej wartości deformacji ciała relacje pomiędzy składowymi odkształcenia i składowymi przemieszczenia mają charakter liniowy. Relacje te mają postać

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (6.40)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \quad (6.41)$$

gdzie  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  określają składowe normalne stanu odkształcenia, natomiast  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$ ,  $\gamma_{zx}$  - składowe ścinające.

Dla kompletnego opisu stanu odkształcenia wystarczą trzy równania składowych normalnych stanu odkształcenia (6.40) i trzy składowe ścinające (6.41), gdyż istnieje równość odpowiednich odkształceń:

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ji} \quad \text{dla } i, j = x, y, z \quad (6.42)$$

Relacje zachodzące pomiędzy stanem naprężenia i odkształcenia są zależne od warunków pracy konstrukcji. Określenie udziału naprężeń pochodzących od działania

wysokich temperatur na ogólny stan naprężeń, jest bardzo ważne w projektowaniu nowych konstrukcji pracujących w podwyższonych temperaturach. Stąd też w równaniach określających relacje pomiędzy stanem naprężenia i odkształcenia, należy uwzględnić efekt działania wysokich temperatur.

W celu dokładnego wyjaśnienia wpływu temperatury na modyfikację równań zależności naprężeń i odkształceń, wydzielono z trójwymiarowej sprężystej bryły mały element sześcienny o boku  $dl$  i poddano go działaniu gradientu temperatur  $T-T_0$ . Początkowa długość elementu  $dl$  pod wpływem zmiany temperatury o wartość  $T-T_0$ , przybiera wartość  $[1 + \alpha(T - T_0)]dl$ , gdzie  $\alpha$  jest współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Odkształcenia powodowane taką zmianą temperatury określa się wyrażeniem

$$\varepsilon_{Tij} = \delta_{ij}\alpha(T - T_0) \quad i, j = x, y, z \quad (6.43)$$

gdzie  $\delta_{ij}$  jest tzw. deltą Kroneckera, która przyjmuje wartość

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{dla } i = j \\ 0 & \text{dla } i \neq j \end{cases} \quad (6.44)$$

Dla tak sformułowanych warunków, odkształcenia elementu są sumą odkształceń sprężystych oraz odkształceń pochodzących od zmiany temperatury. Zgodnie z prawem Hooke'a odkształcenia sprężyste są związane z naprężeniami równaniami

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy} \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G}\tau_{yz} \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G}\tau_{zx} \end{aligned} \quad (6.45)$$

gdzie  $G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$  jest *modułem sprężystości poprzecznej* materiału

a  $E$  określa moduł Younga, natomiast  $\nu$  ułamek Poissona.

Uwzględniając wpływ działania temperatur powyższe równania przyjmują postać

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha(T - T_0) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] + \alpha(T - T_0) \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha(T - T_0) \\ \gamma_{xy} &= 2 \frac{1+\nu}{E} \tau_{xy} \\ \gamma_{yz} &= 2 \frac{1+\nu}{E} \tau_{yz} \\ \gamma_{zx} &= 2 \frac{1+\nu}{E} \tau_{zx}\end{aligned}\tag{6.46}$$

Równania (6.46) przedstawiają uogólnione prawo Hooke'a w trójosiowym stanie naprężeń uwzględniające efekty działania temperatur. Powyższy układ równań po rozwiązaniu przyjmuje postać

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_x + \nu(\varepsilon_y + \varepsilon_z)] - \frac{E\alpha(T - T_0)}{1-2\nu} \\ \sigma_y &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_y + \nu(\varepsilon_z + \varepsilon_x)] - \frac{E\alpha(T - T_0)}{1-2\nu} \\ \sigma_z &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}[(1-\nu)\varepsilon_z + \nu(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] - \frac{E\alpha(T - T_0)}{1-2\nu} \\ \tau_{xy} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} \\ \tau_{yz} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yz} \\ \tau_{zx} &= \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{zx}\end{aligned}\tag{6.47}$$

Otrzymujemy w ten sposób równania na relacje pomiędzy naprężeniami a odkształceniami w trójosiowym stanie naprężeń, z uwzględnieniem wpływu temperatur.



Równania te możemy zapisać w rachunku macierzowym jako:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_x \\ \gamma_y \\ \gamma_z \end{Bmatrix} - \frac{E\alpha(T-T_0)}{1-2\nu} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6.48)$$

gdzie przyjmując oznaczenia

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (6.49)$$

$$[D_T] = \frac{E\alpha(T-T_0)}{1-2\nu} \quad (6.50)$$

możemy przedstawić zależność (6.48) w postaci

$$\{\sigma\} = [D] \times \{\varepsilon\} - [D_T] \times \{\varepsilon_0\} \quad (6.51)$$

Związki te często zwane są równaniami *Duhamela-Neumanna* i mają znaczenie podstawowe w analizie naprężeń cieplnych w zakresie ważności prawa Hooke'a, wyznaczanych z wartości składowych stanu odkształcenia. W prowadzonych w tym celu badaniach eksperymentalnych, w otoczeniu określonych punktów ciała mierzy się odkształcenia za pomocą tensometrów elektrozystencjalnych, równocześnie rejestrując odpowiednie przyrosty temperatury [13]. Na podstawie uzyskanych w ten sposób wyników oblicza się naprężenia z wzorów (6.47).

### 6.3. Wpływ zależności parametrów materiałowych od temperatury na wyniki rozwiązania zagadnienia naprężeń cieplnych

Parametry fizyczne wszystkich materiałów występujących w przyrodzie, w mniejszym lub większym stopniu, zmieniają swoje wartości wraz z temperaturą. W wielu zagadnieniach obliczania naprężeń cieplnych istnieje wręcz konieczność uwzględniania zmiany parametrów wraz ze zmianą temperatury, gdyż wpływa to istotnie na wartość odkształceń i naprężeń. Szczególną wrażliwość na zmiany temperatury wykazują parametry znajdujące się w uplastycznionych obszarach rozważanej konstrukcji. W sposób pośredni, zależność parametrów materiałowych od temperatury wpływa na wartość i rozkład odkształceń oraz naprężeń pozostających czyli na deformację i wytrzymałość konstrukcji.

Dla płaskiej tarczy osiowo-symetrycznej znajdującej się w płaskim stanie naprężenia, składowe naprężenia  $\sigma_r$  w kierunku promieniowym i  $\sigma_\theta$  w kierunku obwodowym wywołane przyrostem temperatury  $\Delta T$  wyrażają się wzorami:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta - (1+\nu)\alpha\Delta T] \\ \sigma_\theta &= \frac{E}{1-\nu^2} [\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_r - (1+\nu)\alpha\Delta T]\end{aligned}\quad (6.52)$$

Natomiast równanie równowagi ma postać:

$$\frac{d}{dr}\sigma_r + \frac{1}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) = 0 \quad (6.53)$$

Przy zmiennym module sprężystości  $E = E[T(r)]$  i zmiennym współczynniku rozszerzalności liniowej  $\alpha = \alpha[T(r)]$  oraz stałym współczynniku Poissona  $\nu$ , równanie równowagi wyrażone w przemieszczeniach jest następujące:

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \left(r \frac{E'}{E} + 1\right) \frac{1}{r} \frac{du}{dr} + \left(\nu \frac{E'}{E} - 1\right) \frac{u}{r^2} = (1+\nu) \left[ \frac{E'}{E} + \frac{\alpha'}{\alpha} + \frac{T'}{\Delta T} \right] \alpha T \quad (6.54)$$

gdzie  $T' \frac{dT}{dr}$ , natomiast

$$E' = \frac{\partial E}{\partial r} = \frac{\partial E}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad \alpha' = \frac{\partial \alpha}{\partial r} = \frac{\partial \alpha}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}$$

są współczynnikami obliczanymi na podstawie charakterystyk i one decydują o dokładności rozwiązania równania (6.54). Oczywiście w przypadku gdy  $E' = \alpha' = 0$  równanie sprowadza się do liniowego. Aproksymując funkcję opisującą zmienność parametrów

$E = E[T(r)]$  i  $\alpha = \alpha[T(r)]$  odcinkami prostej możemy przyjąć, że w przedziale  $\Delta r$  temperatura zmienia się o  $\Delta T$  i wtedy:

$$\Delta E = \frac{\partial E}{\partial T} \Delta T, \quad \Delta \alpha = \frac{\partial \alpha}{\partial T} \Delta T.$$

Współczynniki równania (6.54) obliczane są jako suma wartości, własności fizycznej i jej odpowiednio branej pochodnej. Stąd wynika konieczność, aby funkcje opisujące te własności były wystarczająco gładkie. Własności materiału określane na podstawie wyników badań eksperymentalnych, opisane są najczęściej w sposób dyskretny i błędy pomiaru mogą powodować skokową zmianę ich pochodnych. Może się okazać, że współczynnik  $(1+E'/E)$  równania (6.54) jest mniejszy od zera co nie może zaistnieć w opisie ciała rzeczywistego.

Dla odpowiednio małych przyrostów  $\Delta T$  zagadnienia brzegowe naprężeń cieplnych można traktować przez analogie, jako zagadnienie brzegowo początkowe [6] i [45]. Przyjmuje się, że wszystkie zmiany w czasie są na tyle małe, iż pochodne po czasie występujących funkcji są równe zero. Rozwiązanie zagadnienia wymaga jednak określenia warunków jakby początkowych na każdym kroku przyrostu temperatury  $\Delta T$ , czyli stanu zerowego. W procesie grzania ciała o wartość  $\Delta t$ , a następnie jego ochłodzenia, o tą samą wartość przyrostu temperatury, nie uzyskamy stanu zerowego ze względu na nieliniowy charakter równania przewodnictwa ciepła. Z tego względu, zagadnienie naprężeń cieplnych, w przypadku gdy parametry ciała zależą od temperatury, będziemy uważać jako nieliniowe formułując równania równowagi z wykorzystaniem przyrostowego opisu deformacji ciała.

Uwzględnienie zależności parametrów materiałowych od temperatury powoduje zwielokrotnienie czasu obliczeń oraz wymaga określenia wpływu stopnia nieliniowości na żadaną dokładność rozwiązania. O tym, czy występuje silna lub słaba nieliniowość decydują charakterystyki materiałowe oraz przedział temperatury powodujący przyrost odkształcenia ciała. Rozwiązanie zadania jako nieliniowego jest możliwe jeżeli istnieją charakterystyki temperaturowe dla rozpatrywanego ciała. Jednakże uzyskanie takich charakterystyk wymaga przeprowadzenia pracochłonnych i kosztownych podstawowych badań eksperymentalnych. Stąd dla wielu materiałów stosowanych w konstrukcjach inżynierskich, zależność parametrów materiałowych od temperatury znana jest (w postaci tabelarycznej, rozdział 2.2) dla wybranych wartości temperatury. Wymagane obliczenia własności ciała interpolowane są dla dowolnej wartości temperatury na podstawie wartości dyskretnych i uzyskuje się ciągłość poszukiwanej funkcji, natomiast nie zawsze pochodnej co ma istotny wpływ na dokładność i stabilność obliczeń.

## 7. Przegląd numerycznych metod modelowania warstw TBC

Dynamiczny rozwój technologiczny komputerów, powodujący wzrost ich mocy obliczeniowej przyczynił się do rozwoju nowych metod rozwiązywania zagadnień mechaniki konstrukcji, dając możliwości obliczania skomplikowanych zagadnień inżynierskich. Obecnie, metody numeryczne, a w szczególności metoda elementów skończonych, są szeroko wykorzystywane w systemach do numerycznych analiz inżynierskich konstrukcji.

Numeryczne modelowanie materiałów ceramicznych, może wspomagać i zwiększać efektywność prac doświadczalnych oraz czasami dać wyniki nieosiągalne na drodze eksperymentu przy ich projektowaniu. Metoda elementów skończonych (MES) jest wykorzystywana do obliczeń wytrzymałościowych ceramiki i kompozytów ceramicznych w różnych celach.

Metodę elementów skończonych możemy wykorzystać przy modelowaniu mikrostruktury ceramiki lub przy modelowaniu powłok ceramicznych składających się z jednej lub wielu warstw o różnym składzie materiałowym. Numeryczne modelowanie mikrostruktury ceramiki wymaga dokładniejszej analizy materiału, np. uwzględnienie losowej orientacji osi ortotropii w poszczególnych ziarnach. W przypadku modelowania całej powłoki ceramicznej np. TBC bez uwzględnienia mikrostruktury modelowanie wymaga w miarę dokładnego, wystarczającego uwzględnienia wiązań pomiędzy warstwami lub podłożem oraz jakości struktury materiału (wielkości mikropęknięć, wakansów itp.). Proces modelowania ceramiki, bez względu na charakter czy mikro czy makro, wymaga spełnienia przez modele numeryczne warunku zgodności z właściwościami rzeczywistego materiału.

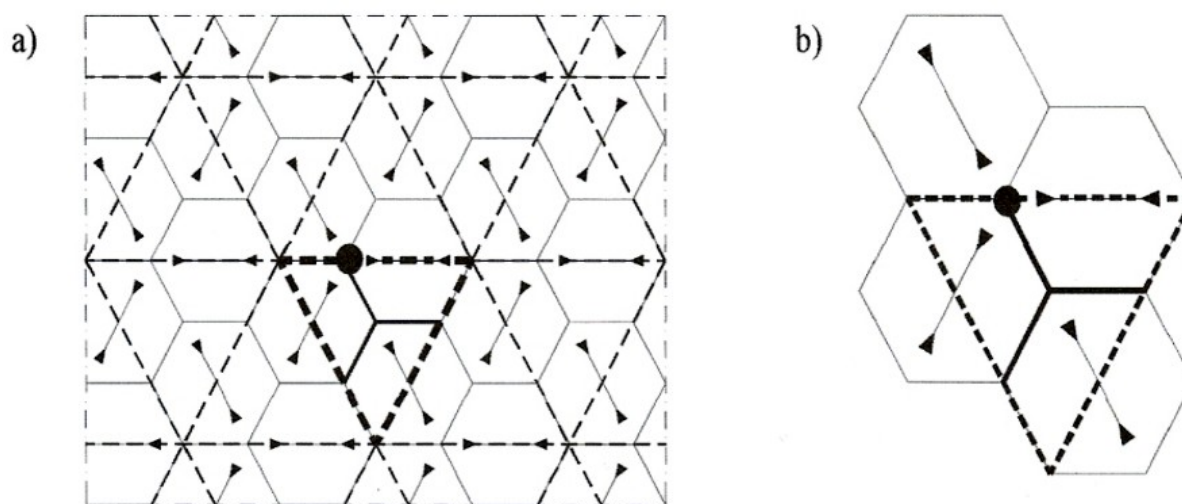
### 7.1. Modelowanie mikrostruktury ceramiki

Modelowanie mikrostruktury jest procesem wymagającym bardzo dokładnego odwzorowania w stosunku do rzeczywistego materiału. Najwięcej uwagi materiałom ceramicznym na poziomie mikrostruktury poświęcono w pracy prof. T. Niezgody [60], w której zostały dokładnie omówione podstawy numerycznego, przestrzennego modelowania mikrostruktury ceramiki z losowym modelem ortotropii w ziarnach. W celu zobrazowania sposobu modelowania mikrostruktury należałoby przedstawić istniejące modele numeryczne mikrostruktury ceramiki.

Do analizy ortotropowej mikrostruktury ceramiki metodą elementów skończonych stosuje się modele dwuwymiarowe, ze względu na niski koszt budowy modelu i obliczeń numerycznych. Na ich podstawie bada się inicjację pęknięcia na granicy ziaren, rozwój pęknięcia oraz zjawisko mostkowania [60]. W pracy [59] autorzy wykorzystali model trójwymiarowy (bez uwzględniania ziarnistości i ortotropii materiału) do symulacji próby wyciskania węgelnikiem Vickersa. W tym przypadku rozpatruje się ustalony stan naprężeń resztkowych w ortotropowej mikrostrukturze, który utrzymuje się w ceramice w temperaturze otoczenia, po schłodzeniu od temperatury wygrzewania. Nie jest tu konieczne uwzględnianie historii schładzania, a także zależności właściwości materiałowych od temperatury.

### 7.1.1. Modele dwuwymiarowe

Za przykład dotychczas stosowanego dwuwymiarowego modelu numerycznego może posłużyć model Tvergaarda i Hutchinsona [100]. Zaproponowali oni dwuwymiarowy model obszaru (rys. 7.1), który jest trójkątnym wycinkiem trzech, sąsiadujących ze sobą sześciokątnych ziaren. Założyli, że trójkątny model wycinka jest obiektem powtarzalnym w najbliższym jego otoczeniu i zostaje zachowana symetria geometryczna oraz symetria warunków brzegowych. Oprócz anizotropii cieplnej, autorzy uwzględniali anizotropie właściwości sprężystych. Jednak przy tak małym co do liczby ziaren modelu, nie mógł być uwzględniony losowy rozkład orientacji osi anizotropii. Na rysunku 7.1 struktura podzielona jest na wycinki, w których stan naprężenia i odkształcenia są identyczne.



Rys. 7.1. a) Dwuwymiarowa, heksagonalna struktura wg Tvergaarda-Hutchinsona, b) Trójkątny wycinek przyjęty do modelowania numerycznego [100]

Zaletą modeli dwuwymiarowych jest możliwość stosowania dużej liczby elementów skończonych, co ma istotne znaczenie przy badaniu inicjacji rozwoju pęknięć [60] i [100].

Ich wadą jest brak możliwości uwzględnienia całej, przestrzennej złożoności oddziaływań między ortotropowymi ziarnami w polikrystalicznej mikrostrukturze.

### 7.1.2. Modele trójwymiarowe

W literaturze wyróżniamy trzy modele trójwymiarowe, do budowy których wykorzystano czternastościany i sześciany. Modele te oznaczone zostały jako [60]:

- MODEL I – na bazie czternastościanów,
- MODEL II – na bazie sześcianów,
- MODEL III – na bazie sześcianów i osiemnastościanów.

Wszystkie modele są generowane automatycznie na podstawie głównych parametrów, dotyczących:

- liczby ziaren liczonej wzdłuż poszczególnych krawędzi modelu,
- kształtu ziaren,
- gęstości podziału ziaren na elementy skończone,
- rodzaju elementów skończonych (8-węzłowe, 20-węzłowe),
- sposobu podparcia i obciążenia kinematycznego zewnętrznych ścian modelu,
- losowania kierunku osi ortotropii.

Modele przedstawione powyżej niestety nie pozwalają na uwzględnienie większej liczby ziaren, dlatego nie można na ich podstawie podjąć próby symulowania rozwoju pęknięcia i szacowania jego krytycznej długości. Pozwalają one natomiast określać lokalizację i szacunkowa wartość spiętrzeń naprężeń resztkowych, które wynikają z losowej orientacji osi ortotropii cieplnej w sąsiadujących ziarnach. Można również szacować wartość średnich naprężeń resztkowych, które są dla danego materiału ceramicznego wartością charakterystyczną [60].

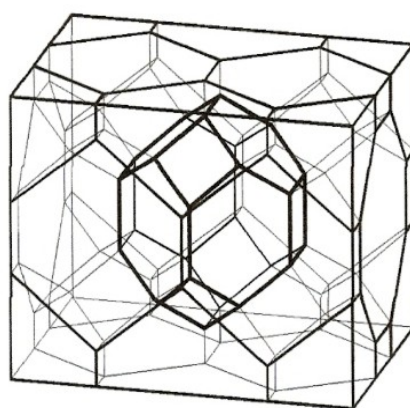
Efektem zastosowania modeli 3D jest opracowanie:

- metody definiowania losowego modelu ortotropii cieplnej,
- metody dwuetapowego wyznaczania stanu naprężenia,
- metody statystycznego określania wartości średnich naprężeń w ceramice na podstawie badania rozkładów widmowych wartości wyliczonych w elementach skończonych w punktach całkowania (punktach Gaussa).

Opis modeli mikrostruktury ceramiki wymienionych powyżej można przedstawić następująco:

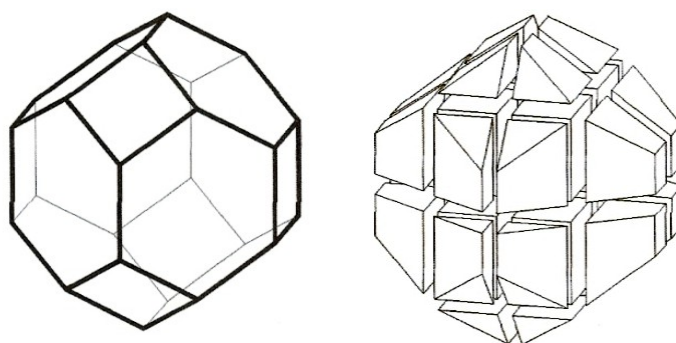
**a) MODEL I – geometria na bazie czternastościanów**

W modelu przedstawionym na rys. 7.2 zastosowano tzw. czternastościany Kelvina i ze względu na ich foremny kształt, zbliżony do kształtu rzeczywistych ziaren, nazywany jest również „modelem kelwinowskim”. Zaletą modelu jest to, iż czternastościanami można wypełnić przestrzeń bez pozostawiania pustek. Do zamodelowania pojedynczego ziarna w modelu tym używa się 32-bryłowych elementów skończonych 20-węzłowych, z możliwością definiowania osi termicznej anizotropii (rys. 7.3).



Rys. 7.2. Model mikrostruktury bazujący na „ziarnie kelinowskim” bez podziału na elementy skończone [60]

Na podstawie Modelu I zostały wykonane obliczenia wykorzystując System Analizy Nieliniowej Konstrukcji, przy którego użyciu opracowano i przetestowano tzw. dwuetapową metodę obliczeń, mającą zastosowanie w następnych modelach.

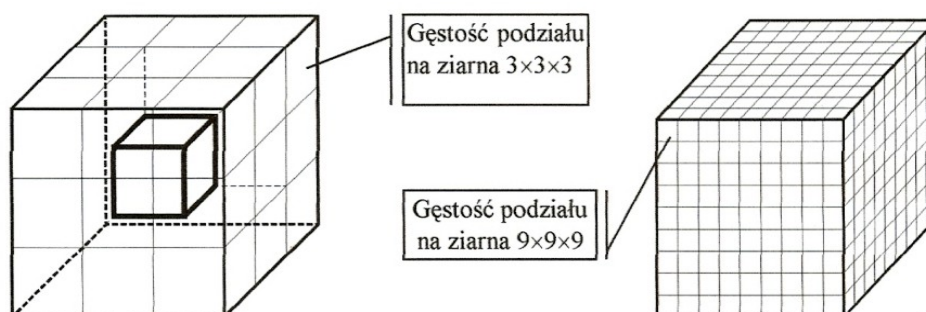


Rys. 7.3.a) Czternastościan Kelina używany do zamodelowania pojedynczego ziarna w Modelu I

b) podział „ziarna kelinowskiego” na 32 elementy (20-węzłowe) [60]

**b) MODEL II – geometria na bazie sześcianów**

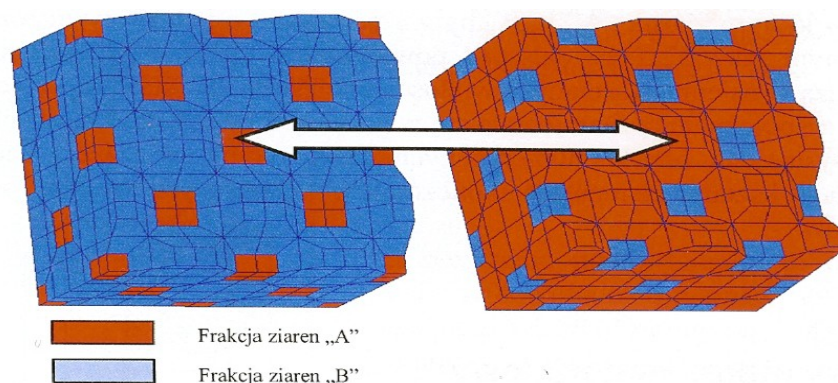
Mając ograniczenia co do rozmiaru – liczby ziaren modelu „kelwinowskiego”, lepszym do analizy jest model uproszczony. W modelu tym pojedyncze ziarna ceramiki są przybliżane sześcianami. Pojedynczemu ziarnu odpowiada pojedynczy 20-węzłowy bryłowy element skończony. Model II jest prosty w opisie i wydajny oraz pozwala na szybkie testowanie stawianych roboczo hipotez. Przedstawiony na rysunku. 7.4 model służył również do opracowania losowego modelu ortotropii materiałowej oraz do opracowania metody ilościowej analizy wyników, które mogą zostać użyte w kolejnym modelu.



Rys. 7.4. Szesnastościenny model mikrostruktury - Model II [60]

**c) MODEL III – geometria na bazie sześcianów i osiemnastościanów**

Przedstawiony na rysunku 7.5 model składa się z sąsiadujących ze sobą naprzemiennie ziaren sześć- i osiemnastościennych, gdzie ziarna sześciokątne zamodelowano za pomocą 8 bryłowych elementów skończonych, a ziarna wielościenne za pomocą 32 bryłowych elementów skończonych. Elementy składają się z 8 elementów o kształcie sześcianów i 24 elementów o kształcie ostrosłupów ściętych. Ziarna danego kształtu, z których 8 występuje w narożach modelu, oznaczono jako „A”, a pozostałe jako „B”.



Rys. 7.5. Model III składający się z ziaren sześciokątnych oraz osiemnastościennych dający możliwości zmiany wzajemnej proporcji rozmiarów ziaren [60]

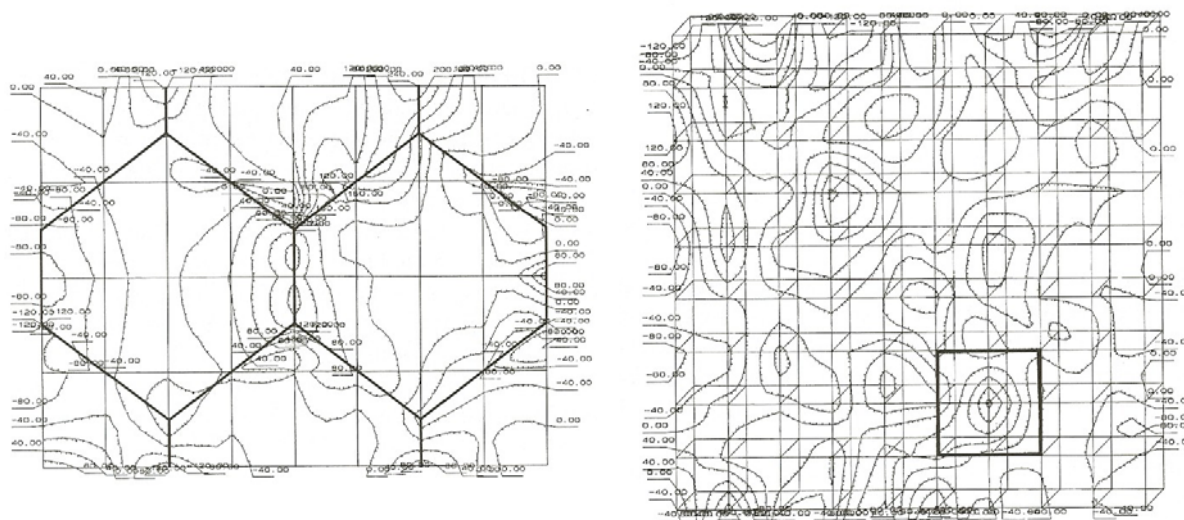


Model III pozwala na zmianę wzajemnych proporcji rozmiarów między ziarnami sześciocziennymi a wielocziennymi opisaną w sposób liniowy współczynnikiem  $S$ . Współczynnik ten został wyrażony przez stosunek krawędzi ziarna sześciennego, do charakterystycznego rozmiaru siatki elementów skończonych. Analizy zostały przeprowadzone dla zestawu modeli o zróżnicowanych proporcjach ziaren, ale o jednakowej konfiguracji wylosowanych osi ortotropii. Losowa orientacja osi ortotropii w poszczególnych ziarnach modelu jest definiowana na etapie automatycznej generacji modelu.

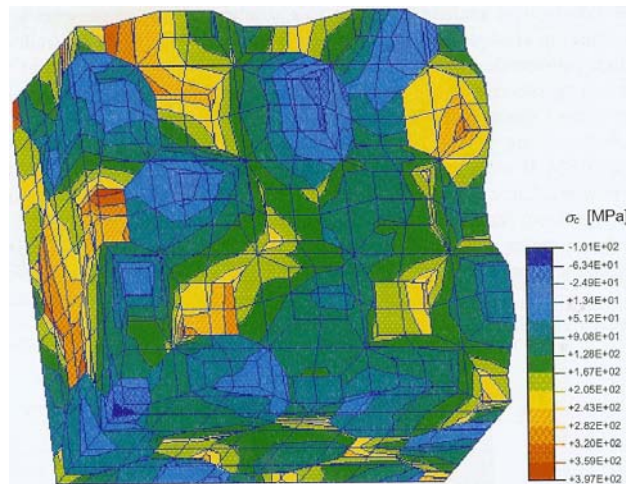
Generacja ziaren następuje w trybie „rząd po rzędzie, warstwa po warstwie”, a celem jej jest uniknięcie nadania tego samego kierunku ortotropii ziarnom sąsiadującym ze sobą przez ścianę, krawędź lub wierzchołek.

Następnie przeprowadzona jakościowa analiza wyników umożliwia wskazanie miejsc występowania spiętrzeń naprężeń, które są spodziewane na granicach styku ziaren, ponieważ granice te wyznaczają powierzchnie, wzdłuż których zachodzi nieciągłość właściwości materiału, polegająca na zmianie orientacji osi ortotropii, idąc od ziarna do ziarna.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano złożony przestrzennie stan naprężeń reszkowych w ceramice. Numerycznie wyznaczone wartości koncentracji naprężenia odpowiadającemu rozciąganiu  $\sigma_c$  przedstawione dla poszczególnych modeli na rysunkach 7.6 i 7.7 wykazują zgodność z danymi z eksperymentów [60].



Rys. 7.6. Przykładowe warstwy naprężeń dla a) MODEL I oraz b) MODEL II [60]



Rys. 7.7. Mapa naprężenia  $\sigma_c$  w kierunku osi c układu lokalnego (a,m,c) [60]

Model III jest modelem najlepszym spośród prezentowanych, dzięki możliwości różnicowania rozmiarów ziaren, co jest bliższe rzeczywistemu materiałowi. Pozwala on również na przeprowadzenie bardziej zaawansowanych badań.

Na rozkład naprężeń w każdym modelu mają wpływ określone cechy, które powinny być zawsze uwzględniane. Cechami tymi są:

- cechy materiałowe (losowość orientacji osi ortotropii),
- cechy geometryczne: kształt i wielkość ziaren,
- liczba elementów skończonych użytych w modelu do budowy ziaren,
- wpływ warunków brzegowych.

Przy użyciu modelu III możliwe jest przystąpienie do badań kompozytów ceramicznych. A przy zastosowaniu większej liczby ziaren, można badać wpływ wtrąceń i pustek na lokalne i średnie naprężenia resztkowe, jak również istnieje możliwość badania materiałów porowatych [60].

## **7.2. Modelowanie powłok ceramicznych stanowiących bariery termiczne**

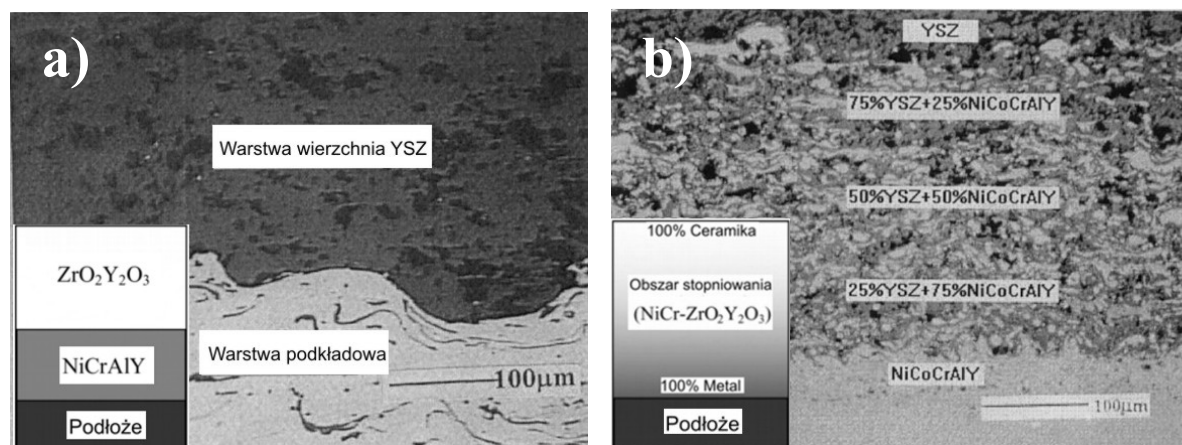
Dla badanego obiektu rzeczywistego można opracować różne modele matematyczne w zależności od przyjętych założeń, uproszczeń oraz sposobu opisu zachodzących procesów fizycznych. Uproszczenia poczynione przy opracowywaniu modelu, ułatwiają opis jego, jednakże mają wpływ na dokładność rozwiązania. Daleko idące uproszczenia mogą przyczynić się do pominięcia istotnych cech układu rzeczywistego, natomiast zbyt złożony model może spowodować błędy w rozwiązaniu ze względu na skomplikowany proces obliczeniowy. W przypadku modelowania powłok ceramicznych o bardzo złożonej strukturze oraz ilości występujących losowo możliwych defektów, jak przedstawiono na rys. 3.4 bardzo ważne jest wybranie oraz zastosowanie możliwych uproszczeń. Najczęściej stosowanymi uproszczeniami są [60]:

- uproszczenie kształtu rozważanego obiektu,
- pomijanie mało istotnych oddziaływań zewnętrznych,
- przyjęcie jednorodności ośrodka zawartego w danym obszarze,
- pominięcie odkształceń lub ciężaru niektórych elementów układu,
- przyjęcie liniowych charakterystyk dla pewnych właściwości fizycznych badanego obiektu,
- założenie, że właściwości są stałe w czasie, lub niezależne od temperatury,
- przybliżenie procesów stochastycznych, zachodzących w układzie rzeczywistym procesami deterministycznymi.

Jak już wcześniej wspomniano wykorzystując Metodę Elementów Skończonych do rozwiązań zagadnień związanych z powłokami ceramicznymi musimy opracować model dyskretny ekwiwalentny do modelu matematycznego ośrodka ciągłego.

Model dyskretny budowany jest najczęściej z modelu geometrycznego lub w przypadku prostych konstrukcji bez wstępnej budowy geometrii badanego obiektu. Rozpatrując jako badany obiekt powłoki ceramiczne w tym przypadku stosowane na bariery termiczne można wyróżnić dwa typy modeli dyskretnych bazujących na modelach geometrycznych. Wyróżniamy tu modele, w rzeczywistości przedstawione na rys. 7.8:

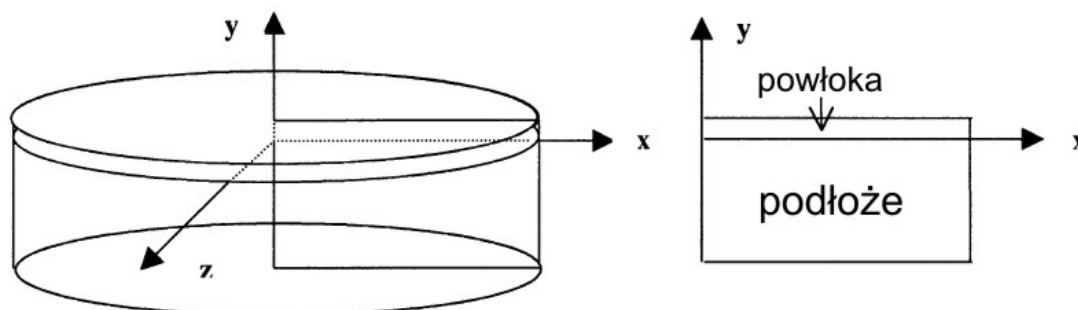
- dwu- lub trzywarstwowy model bez uwzględniania stopniowania materiałowego, tzn. powłoka ceramiczna składa się z podłoża oraz warstwy wierzchniej (właściwej) lub z dodatkowo warstwy pośredniej bez uwzględnienia mieszania się materiałów-warstw,
- wielowarstwowy model gradientowy, tzn. z warstwami o zmiennych zawartościach materiału oraz stopniowo zmiennych własnościach materiału.



Rys. 7.8. Przekrój przez powłokę TBC wraz z modelami powłok a) powłoka Duplex b) 5-warstwowa powłoka z materiałem gradientowym [40]

Na rysunku 7.9 przedstawiono bazowy model geometryczny próbki pokrytej powłoką ceramiczną, wykorzystywany do budowy modeli dyskretnych. Najczęściej do analizy MES wykorzystuje się symetryczność modelu w celu uproszczenia i skrócenia czasu obliczeń numerycznych.

Do obliczeń numerycznych najczęściej stosuje się model o kształcie walca lub prostokąta. Badana próbka zwykle jest wycinkiem z najbardziej charakterystycznymi cechami całej badanej próbki, takimi jak chropowatość, mikropęknięcia, wakanse czy inne wtrącenia.



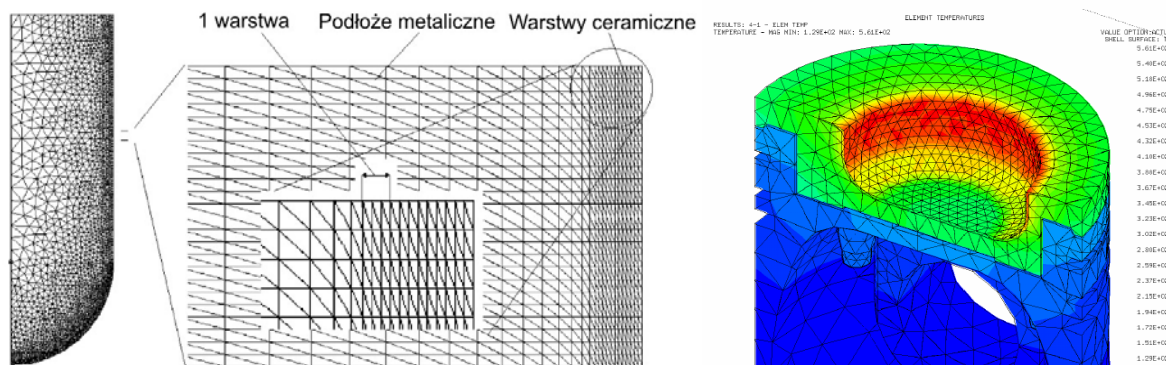
Rys. 7.9. Model geometryczny próbki z powłoką TBC do analizy MES

W zależności od wielkości modelu, grubości powłoki lub samych warstw w modelu geometrycznym brana pod uwagę jest tylko całkowita grubość danej warstwy, lub upraszczając całą powłokę jak na rys. 7.9. Dopiero w późniejszej fazie budowy modelu dyskretnego na każdą warstwę, czy w przypadku powłok typu „duplex”, czy w warstwach gradientowych stosuje się odpowiednią ilość elementów po grubości jednak nie mniej niż 2, w celu otrzymania wyników obarczonych jak najmniejszym błędem. W przeglądzie literaturowym można się spotkać z wieloma sposobami modelowania powłok ceramicznych, jednak wszystkie zaliczają się do wspomnianego wcześniej podziału na modele dwu-warstwowe oraz modele z materiałem gradientowym.

### 7.2.1. Modelowanie warstwowych powłok ceramicznych typu „duplex”

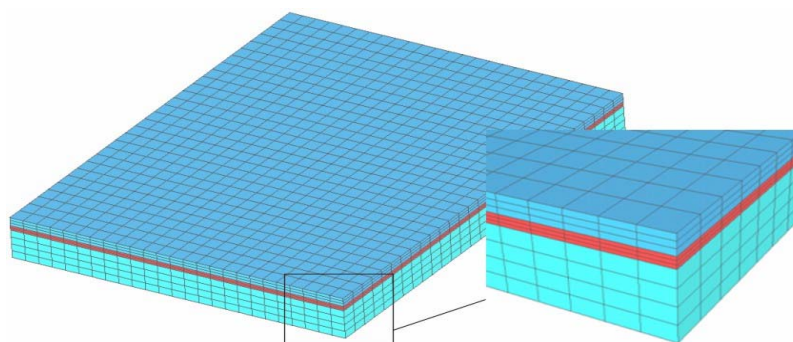
Jak przedstawiono na rys 7.8 oraz omówiono w rozdziale analizującym warstwę TBC, powłoki typu „duplex” składają się z podłoża, warstwy podkładowej – wiążącej oraz warstwy wierzchniej – właściwej.

Przy modelowaniu powłok ceramicznych podstawowymi elementami skończonymi jakie stosuje się przy dyskretyzacji obszaru są czworościan czterowęzłowy i sześcian ośmiowęzłowy.



Rys. 7.10. Model dyskretny cylindra oraz tłoka silnikowego z siatka elementów czworościennych [67]

Na rysunku 7.10 przedstawiono przykłady modelowania powłok TBC z zastosowaniem elementów czworościennych czterowęzłowych. Elementy te nadają się do wyznaczania pola temperatury jednak w przypadku obliczeń wytrzymałościowych wyniki mogą być obarczone dużym błędem. Dlatego najczęściej stosowanym elementem do modelowania powłok ceramicznych jest element sześcienny ośmiowęzłowy. W przypadku prostych elementów geometrycznych, jak np. przedstawiony na rys. 7.11 model dyskretny płytki z powłoką TBC, geometria pozwala na równomierne rozłożenie elementów skończonych. Każdy element odpowiada odpowiedniemu materiałowi, a tworząc rzędy odpowiedniej warstwie w powłoce TBC.

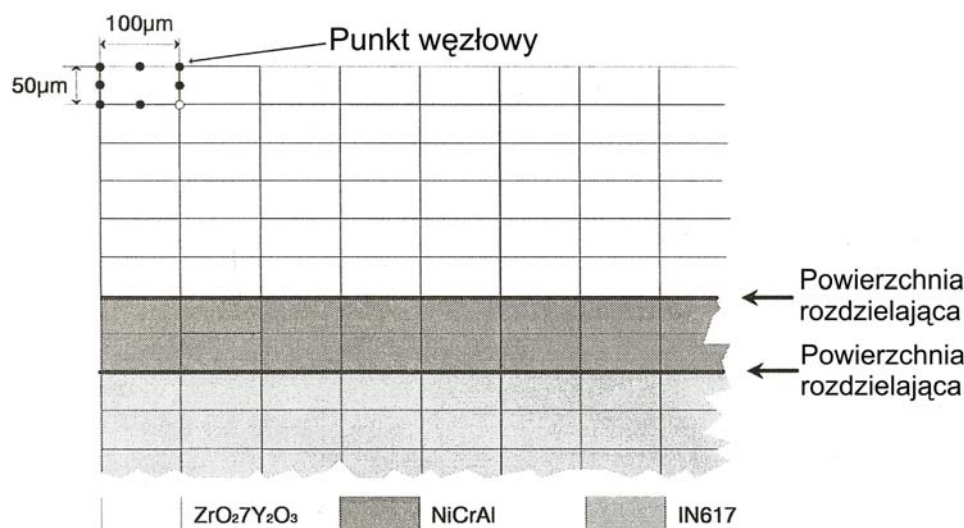


Rys. 7.11. Model dyskretny płytki prostokątnej pokrytej TBC z widokiem na poszczególne warstwy z zastosowaniem elementów sześciennych [12]



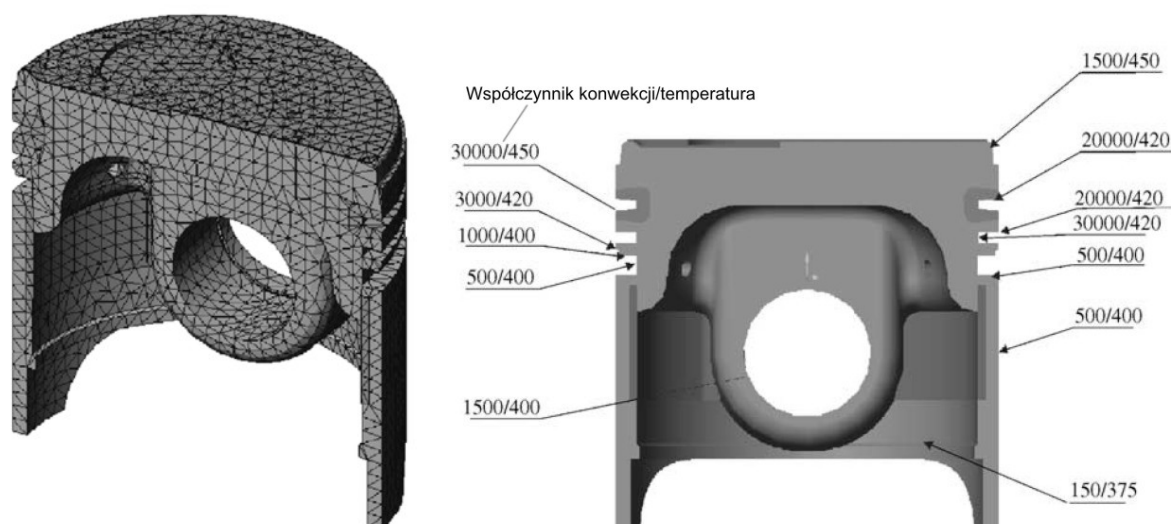
W zależności od grubości poszczególnych warstw w powłoce ceramicznej stosuje się równomierną ilość elementów. Rysunek 7.12 przedstawia typową dyskretyzację warstwowych powłok ceramicznych, gdzie biorąc przykładowo za średnią wielkość elementu długość  $50\mu\text{m}$ , mając warstwę ceramiczną o grubości  $100\mu\text{m}$  rozpinamy 2 elementy na grubości. Przedstawiony przykład jest bardzo uogólnionym przypadkiem modelowania powłok ceramicznych, w którym powierzchnia rozdzielająca jest powierzchnią łączącą ze sobą dwa elementy o różnej charakterystyce materiałowej. W rzeczywistości powierzchnia ta ma kształt nierównomierny z wadami, wtrąceniami oraz możliwym wymieszaniem materiałów. Zatem przykład ten jest bardzo uproszczony, co daje bardzo rozbierne wyniki i jest wykorzystywany głównie do szacunkowych obliczeń powłok TBC.

Takiego typu obliczenia pozwalają na szacunkowe wyznaczenie rozkładu temperatur w warstwach oraz jak np. na rys 7.13 wyznaczenie współczynnika konwekcji.



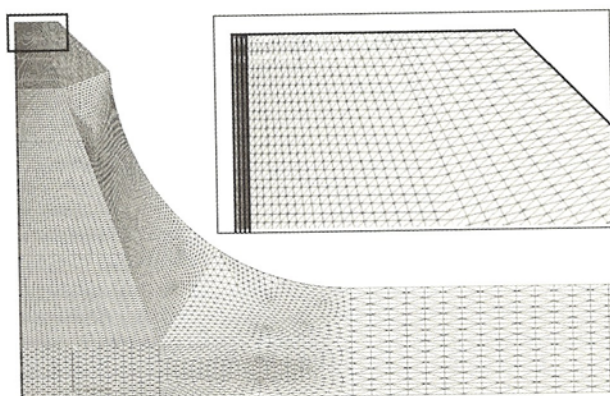
Rys. 7.12. Powłoka ceramiczna z typową siatką elementów skończonych [26]

Obliczenia tego typu nie wymagają dużych oraz skomplikowanych modeli i są czasowo krótkie. Rozpatrując sposób dyskretyzacji badanego modelu, bazując na rysunku 7.13 możemy stwierdzić, iż rodzaj użytego elementu, jego wielkość (ilość elementów na grubości geometrycznej – np. grubości ścianki) świadczy o spełnieniu wystarczających minimalnych warunków dla tego typu analizy.



Rys. 7.13. Model MES tłoka z pokryciem ceramicznym oraz średnie wartości współczynnika konwekcji i temperatur w procesie spalania dla analizy MES [32]

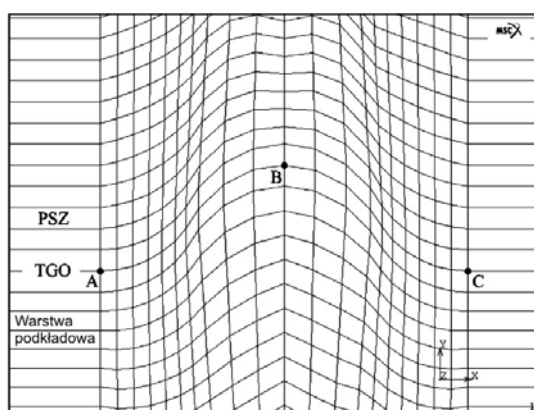
Zagęszczenie siatki, które pozwala na dokładne odzwierciedlenie geometrii badanego obiektu pozwala na uzyskanie dokładniejszych wyników tzn. np. w przypadku analizy rozkładu temperatury w badanym obiekcie, dokładniejszego określenia miejsc maksimum jak i minimum temperaturowego. Mówiąc ogólniej, im gęstsza siatka tym pole temperaturowe dokładniejsze. Przykładem większego zagęszczenia siatki elementów skończonych jest model 2D zaworu silnika spalinowego przedstawiony na rys. 7.14, który pokryty jest od czoła powłoką TBC. Przyjęcie w tym przypadku modelu 2D pozwoliło na zastosowanie większych gęstości podziału na elementy niż w przypadku przyjęcia modelu 3D oraz stworzyło możliwość dokładniejszego modelowania warstwy powierzchniowej. Jednak przyjęto w modelu tym pewne uproszczenie, że na brzegu grzybka nie występuje ani fazowanie, ani zaokrąglenie, co stanowi najbardziej niekorzystną sytuację.



Rys. 7.14. Siatka osiowosymetrycznego modelu fragmentu zaworu, w powiększeniu: brzeg grzybka z zamodelowaną warstwą ceramiczną [61]

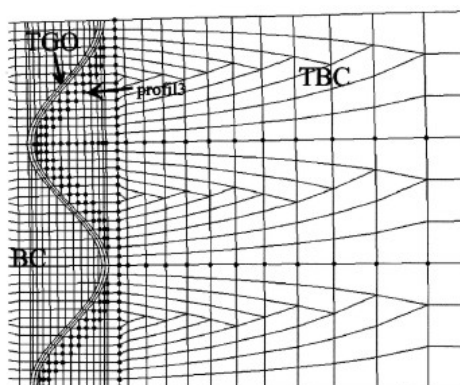
W powyższym przypadku obliczenia testowe mogą pozwolić na określenie lokalizacji obszaru występowania koncentracji naprężeń resztkowych oraz oszacowanie ich wartości. Można uzyskać również informacje, w jakim obszarze należy dokonać zagęszczenia siatki elementów skończonych.

Innym sposobem zbliżenia się w modelowaniu do obiektu rzeczywistego jest uwzględnienie chropowatości warstwy. Na rysunku. 7.15 przedstawiono przykładowe uwzględnienie chropowatości w modelu MES w postaci wypukłości elementów. W tym przypadku chropowatość została zamodelowana w postaci elementów rozpiętych po krzywej o promieniu  $50\mu\text{m}$  gdzie warstwa podkładowa ma  $200\mu\text{m}$  (w tym warstwa tlenków TGO  $20\mu\text{m}$ ) oraz warstwa wierzchnia  $300\mu\text{m}$  [50] i [99].



Rys. 7.15. Chropowatość w modelu MES w postaci wypukłości elementów [50]

Tego typu modelowanie połączenia warstw pozwoliło na ocenienie wpływu chropowatości na wyniki badania odporności na szok termiczny. W modelu z elementami rozpiętymi po krzywej naprężenia główne podczas nagrzewania i chłodzenia były dużo większe niż w modelu z płaską powierzchnią między warstwami podkładowa a wierzchnią.



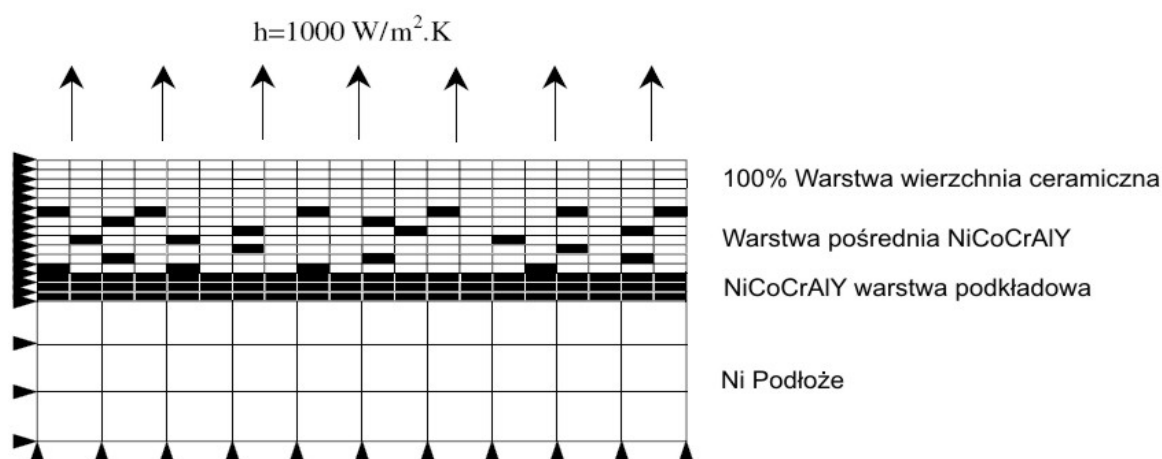
Rys. 7.16. Przykładowa siatka MES z uwzględnieniem warstwy tlenków TGO oraz sinusoidalnym odzwierciedleniem chropowatości [103]



Rysunek. 7.16 przedstawia podobny sposób uwzględnienia chropowatości w modelu dyskretnym, jednak tutaj strefa powstałych tlenków TGO jest dokładniej zamodelowana a elementy skończone w całym modelu nie są rozpinane po krzywej tylko równoległe do powierzchni warstwy wierzchniej (powierzchni płaskiej).

Jak widać na rysunku. 7.8 połączenie warstwy podkładowej z wierzchnią, zarówno w przypadku powłok typu „duplex”, jak i gradientowych ma bardzo nieregularną strukturę i jest bardzo ciężkie do zamodelowania, by odzwierciedlało jak najbardziej rzeczywistość. Sposoby modelowania struktury warstwowej w powłoce są bardzo różne. Omówiony powyżej przykład jest jednym z sposobów odzwierciedlenia struktury połączenia warstw.

Innym sposobem modelowania jest przykład pokazany na rysunku.7.17, w którym uwzględniono mieszanie się cząsteczek materiału (o różnych właściwościach) podczas natryskiwania i powstanie tzw. warstwy pośredniej. Zamodelowana tu warstwa pośrednia składa się z elementów skończonych losowo pomieszanych o różnych właściwościach materiału. Jest to w pewnym sensie odzwierciedlenie struktury, jaka występuje w rzeczywistości występuje. Jednak model ten jest modelem dwuwymiarowym co nie pozwala na otrzymanie przestrzennego pola temperatury jak i również pola naprężeń szczątkowych. Analizując model 2D możemy bardzo łatwo i szybko uzyskać informację w zależności od ilości poszczególnych warstw pośrednich, jaki mają wpływ na zmianę naprężeń jak i również na odporność na szok termiczny całej powłoki. To pozwala na oszacowanie grubości poszczególnych warstw w procesie projektowania powłok TBC.



Rys. 7.17. Model MES z warstwą pośrednią (wymieszane elementy o różnych właściwościach materiału) oraz przykładowe warunki brzegowe analizy [79]

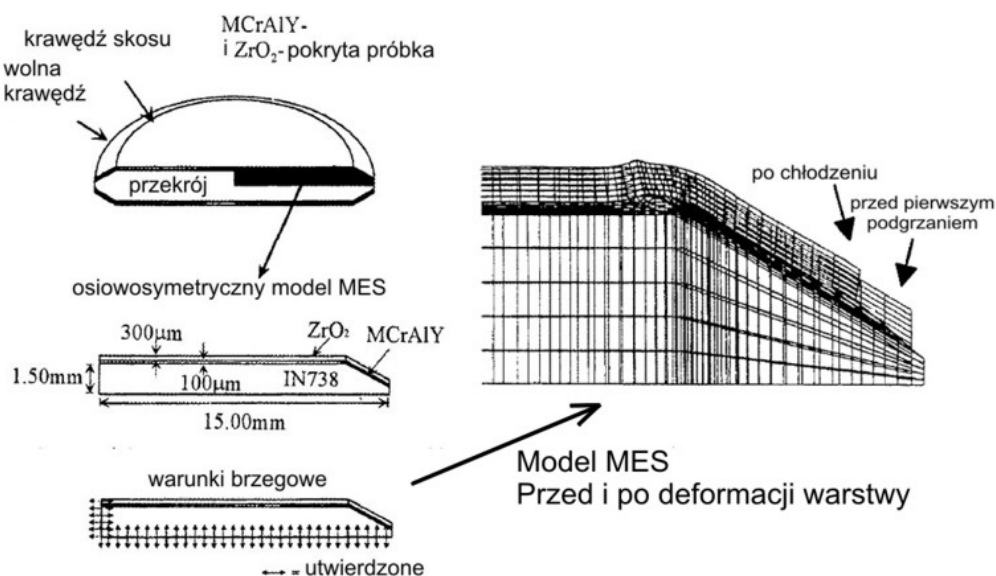
Jak już wcześniej wspomniano modelując obiekt – badaną próbkę najczęściej wykorzystujemy jeżeli to możliwe w budowaniu modelu dyskretnego symetryczność modelu

geometrycznego. Jeżeli badany obiekt jest np. symetryczny to wystarczy zbudować model dyskretny na jego ćwiartce.

Zastosowanie tego typu uproszczenia pozwala nam na:

- dokładniejsze zamodelowanie obiektu,
- większe zagęszczenie siatki w miejscach możliwych spiętrzeń naprężeń takich jak korbów, otworów zaokrągleń, fazowań itp.,
- zwiększenie liczby elementów (mniejszy model MES w porównaniu z geometrią),
- dokładniejsze modelowanie warstw powłoki ceramicznej, uwzględnienie chropowatości, wtrąceń, mieszania się materiału.

Na rysunku 7.18 przedstawiono wykorzystanie osiowosymetryczności badanej próbki oraz dokładne zamodelowanie krawędzi – fazowania próbki.

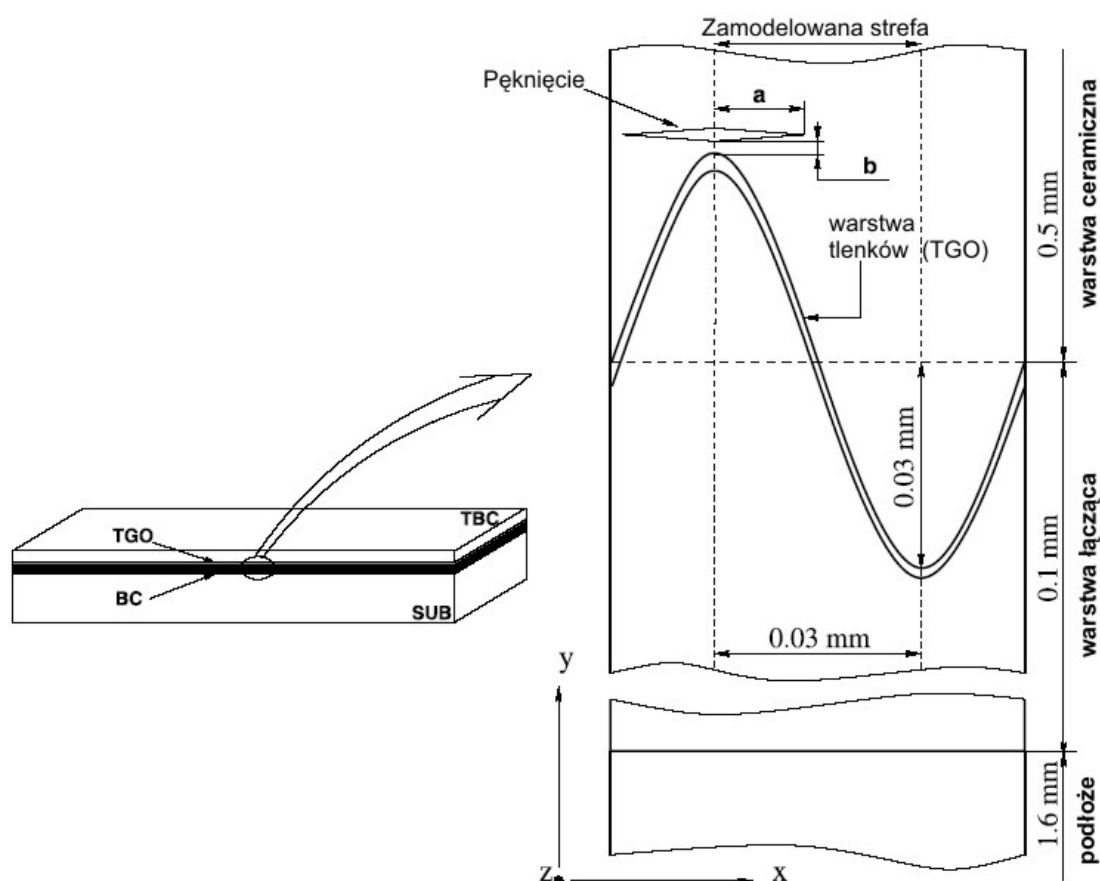


Rys. 7.18. Widok przykładowej próbki oraz osiowosymetryczny model MES z warunkami brzegowymi i siatką przed i po deformacji warstwy [40] i [20]

Możemy tu zauważyć, że dokładne zamodelowanie krawędzi próbki uwidoczniło się w wynikach w postaci deformacji, która spowodowana była pełzaniem po dwóch cyklach termicznych [20].

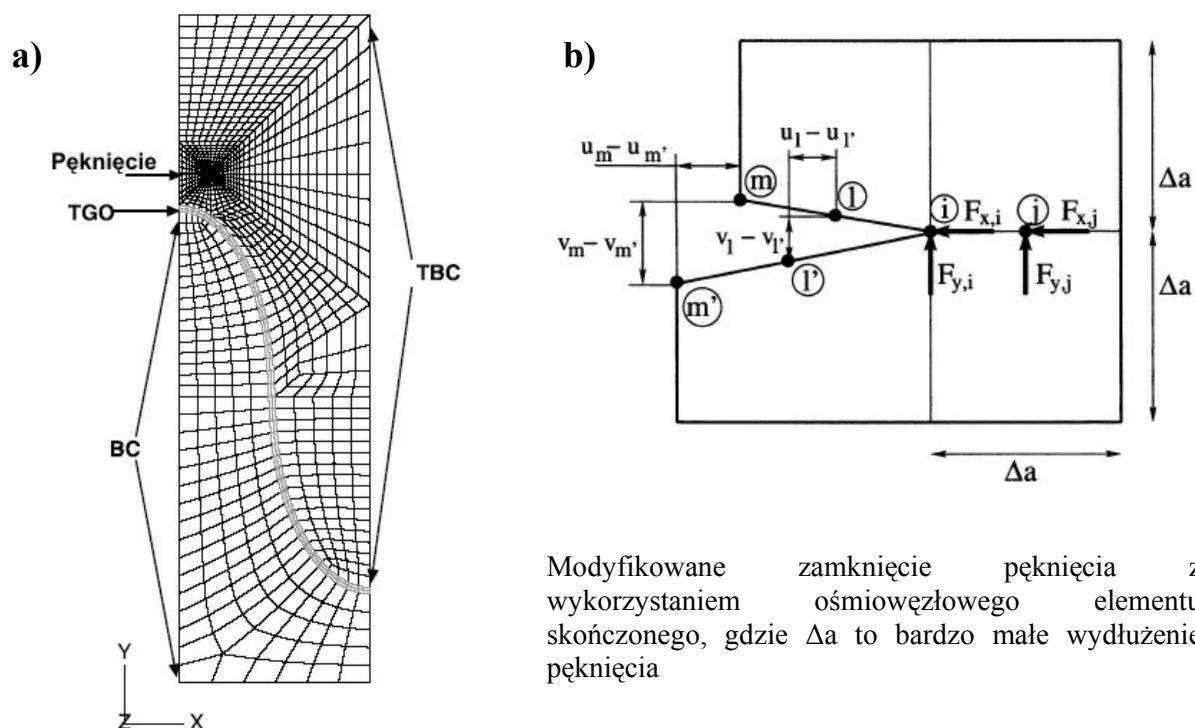
Powyższe przykłady przedstawiają numeryczny sposób modelowania powłok ceramicznych z uwzględnieniem różnic materiałowych, chropowatości pomiędzy podłożem - warstwą podkładową – warstwą wierzchnią oraz warstwy pośredniej z różnym stopniem mieszania się cząstek różnych materiałów. Ważną cechą powłok ceramicznych, która nie została uwzględniona w powyższych modelach, a ma duży wpływ na odporność powłoki TBC na szok termiczny są mikropęknięcia struktury. W celu ogólnej analizy powłoki nie są one uwzględniane, jednak aby uzyskać odpowiedź jaki wpływ mają mikropęknięcia na

odporność powłoki na cykliczne obciążenia cieplne niezbędne jest wzięcie tego pod uwagę. Na rysunku 7.19 przedstawiono sposób w jaki w pracy [82] zamodelowano mikropęknięcie powstałe w warstwie ceramicznej-wierzchniej. Wycinek jak brany był pod uwagę został zamodelowany z wykorzystaniem symetryczności modelu. Została uwzględniona chropowatość jako fala o amplitudzie  $30\mu\text{m}$  i długości  $60\mu\text{m}$ . Dla zamodelowania pęknięcia przyjęto dwa parametry jego odległość od warstwy tlenków TGO oraz długość.



Rys. 7.19. Model geometryczny z pęknięciem w mikrostrukturze [82]

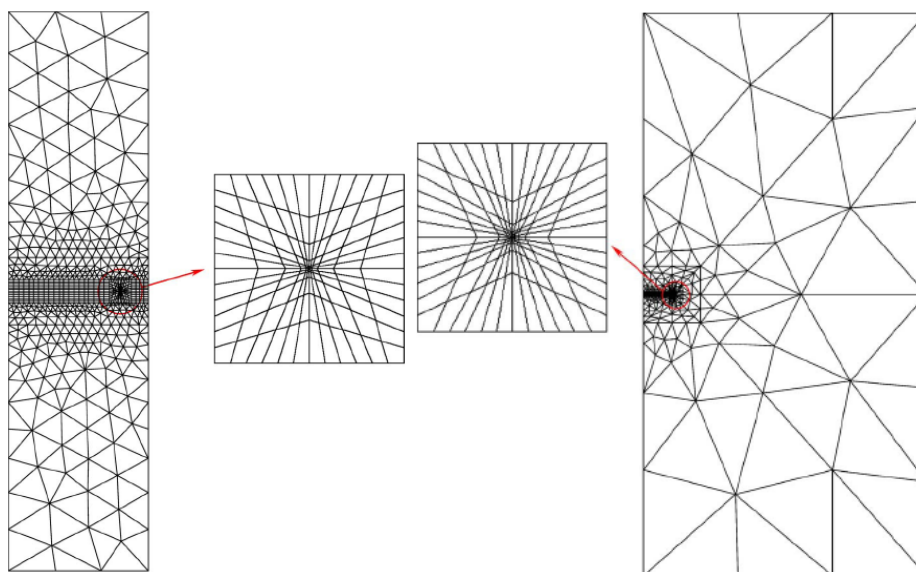
Model dyskretny z siatką elementów skończonych 2D przedstawiono na rys. 7.20a. Zamodelowanie pęknięcia pozwoliło uzyskać wyniki wpływu pęknięcia na rozkład naprężeń w badanej próbce, oszacować jak duży ma to wpływ na powłokę oraz porównać wyniki do modelu bez uwzględnienia pęknięcia. W pracy tej również wykonano ocenę pęknięcia ze względu na występowanie warstwy tlenków TGO oraz różnych konfiguracji pęknięcia (parametry a i b) i wpływu pełzania materiału (rys. 7.20b). Ocena ta została wykonana wzorując się na wcześniejszych badaniach Rybnickiego i Kanninena [82] z uwzględnieniem postulatu Irvina [82].



Rys. 7.20. a) Model MES z zamodelowanym pęknięciem  
b) sposób oceny pęknięcia przy użyciu MES [82]

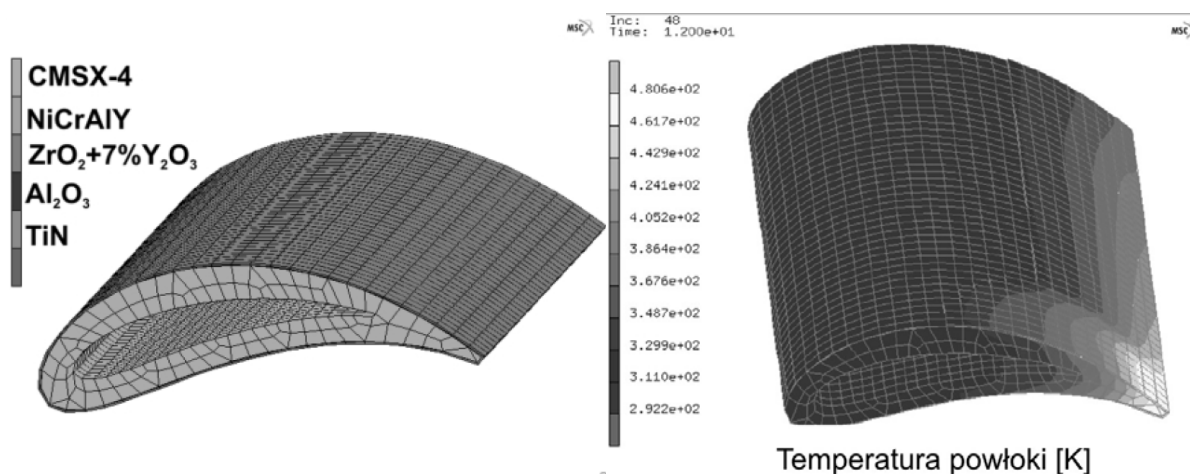
W literaturze można spotkać się z różnymi sposobami modelowania mikropęknięć w strukturze powłoki ceramicznej i najczęściej jest to robione przy użyciu dwuwymiarowych elementów skończonych. Sprowadzenie całego problemu na układ 2D pozwala na skupienie większej uwagi mechanizmom pęknięcia, ich wpływowi na warstwę oraz dokonując analizy numerycznej na naprężenia powstałe w okolicy pęknięcia. Dla zobrazowania w pracy [22] przeanalizowano powłokę TBC z uwzględnieniem powstałego pęknięcia na krawędzi próbki oraz między warstwami podkładową i wierzchnią (rys. 7.21).

W tych przypadkach siatka elementów skończonych jest bardzo zagęszczona w okolicy pęknięcia i modelowany jest mały wycinek próbki (stąd mikropęknięcie traktowane jest jak duże pęknięcie). W rzeczywistości takiego typu pęknięć w powłoce może pojawić się o wiele więcej i największą trudnością jest oszacowanie ile ich powstanie. Tylko badania eksperymentalne pozwalają zweryfikować strukturę powłoki, powstałe mikropęknięcia ich rodzaj i wielkość, jednak w skali przemysłowej te badania powodują wzrost kosztów projektu.



Rys. 7.21. Model MES z pasmem pęknięcia na krawędzi [22]

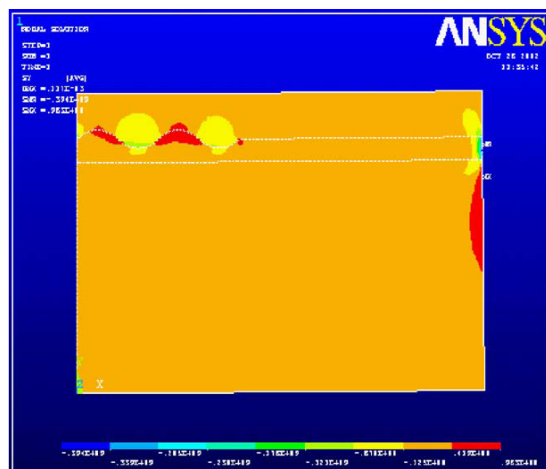
Ze względu na skomplikowaną strukturę powłoki ceramicznej TBC w procesie jej modelowania wykorzystuje się uproszczenia pozwalające np. na szybkie określenie rozkładu temperatur lub oszacowanie stanu wyężenia próbki pokrytej TBC. Dlatego najczęściej stosowanym modelem MES do opisu powłok ceramicznych typu „duplex” jest model o prostej budowie uwzględniający omówione wcześniej uproszczenia, o odpowiedniej, wystarczającej liczbie elementów skończonych. Przykładem jest tu model MES przedstawiony na (rys. 7.22) o zróżnicowaniu warstw własnościami materiałowymi.



Rys. 7.22. Przykładowy model MES łopatkę turbiny z różnymi materiałami oraz rozkład temperatury w łopatkę uzyskany podczas analizy MES [51]

Na rysunku 7.22 przedstawiono również przykładowy rozkład temperatury uzyskany w wyniku analizy numerycznej metodą elementów skończonych. Dalszy etap analizy numerycznej pozwala na wykorzystanie wcześniej otrzymanego pola temperatur jako

warunku obciążenia w celu uzyskania rozkładu naprężeń w badanej próbce pokrytej TBC, a dokładniej na granicy warstw (rys. 7.23).

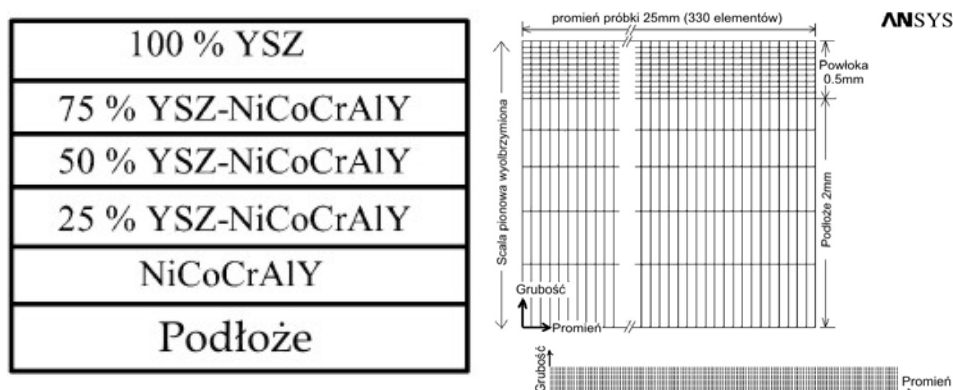


Rys. 7.23. Wyniki przykładowej analizy MES pokazujące rozkład naprężeń na granicy warstw powłoki typu „duplex” [110]

Uzyskane wyniki pozwalają na oszacowanie powłoki ceramicznej (tzn. odpowiedniej jej całkowitej grubości, ilości oraz grubości poszczególnych warstw) oraz jej odporności na zmienne cykliczne obciążenie cieplne.

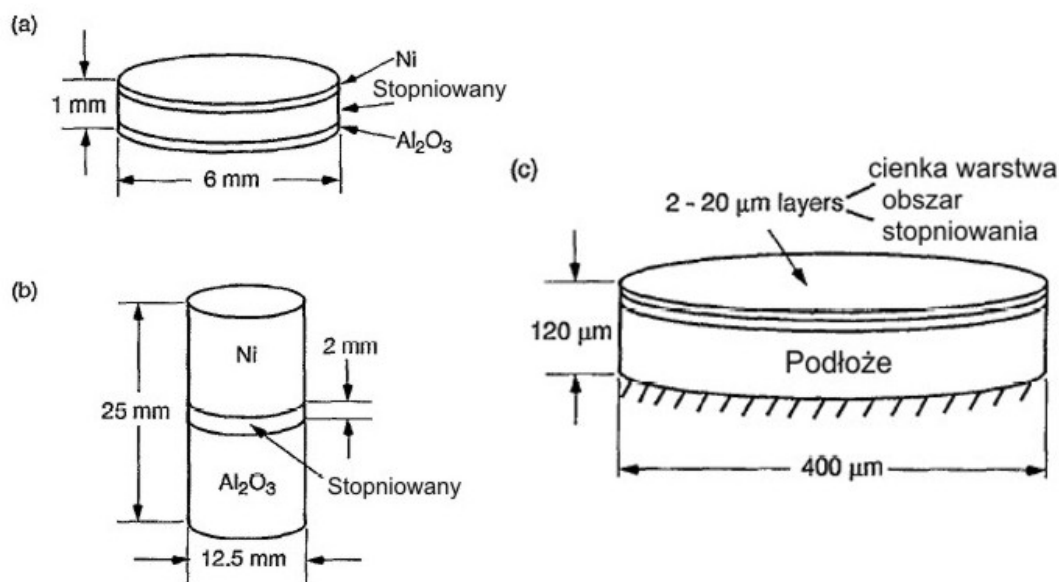
## 7.2.2. Modelowanie warstwowych powłok ceramicznych – stopniowe (gradientowe)

W odróżnieniu od powłok typu „duplex” powłoki wielowarstwowe stopniowe – gradientowe charakteryzują się stopniowaniem materiału ceramicznego w celu zmniejszenia różnic w właściwościach granicznych ze sobą materiałów. Rysunek 7.24 przedstawia typowy rozkład warstw z materiałem gradientowym w powłoce ceramicznej TBC. W tym przypadku tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru – YSZ stopniowo mieszając się z materiałem podkładowym NiCoCrAlY tworzy powłokę natrykiwaną na podłoże.



Rys. 7.24. Opis stopniowania materiałowego powłoki ceramicznej oraz siatka elementów skończonych z warstwami stopniowanymi [69] i [58]

Grubość czystej warstwy wierzchniej zawierająca 100% materiału – YSZ oraz warstwy podkładowej również zawierającej 100% - NiCoCrAlY jest w porównaniu z warstwami powłok typu „duplex” dużo mniejsza. Tego typu stopniowanie stosuje się dla różnego typu próbek. W pracy [15] przedstawiono zastosowanie powłok o stopniowanym charakterze dla różnego rodzaju próbek (rys. 7.25).

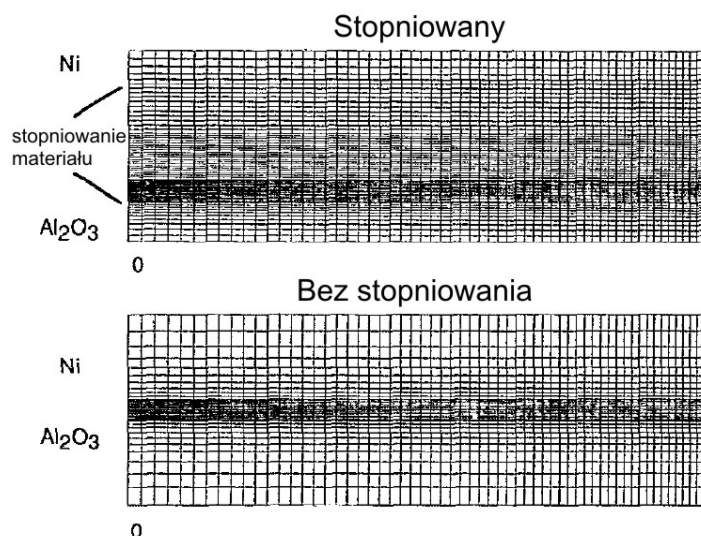


Rys. 7.25. Stopniowanie materiału w różnych rodzajach próbek:  
a) dysku, b) pręciku c) powłoce-cienkiej warstwie [15]

Sam sposób modelowania siatki elementów skończonych dużo nie różni się od wcześniej opisanego. Charakter dyskretyzacji jest taki sam, jak i uwzględniane uproszczenia bądź cechy charakterystyczne struktury powłoki takie jak chropowatość czy mikropełnięcia. Jedyną rzeczą różniącą się od poprzedniego jest sposób modelowania warstw. Wcześniej dwie warstwy – podkładowa i właściwa (również warstwa tlenków TGO) oddzielone były powierzchnią rozdzielającą tzn. powierzchnią styku dwóch elementów o różnych właściwościach. Tutaj warstw o różnych właściwościach materiałowych jest więcej, nawet do pięciu, a różnice we właściwościach są niewielkie, co w rzeczywistości sprzyja zachowaniu się tego typu powłok w zmiennym polu temperaturowym.

Na przykładzie pracy [9] pokazano na rysunku 7.26 model dyskretny badanej próbki z powłoką ceramiczną TBC o charakterze gradientowym. Siatka elementów w przypadku warstw stopniowanych jest gęstsza i jest związana z ilością warstw. Bardzo ważną rzeczą w przypadku modelowania powłok gradientowych są własności materiałowe każdej warstwy. Powłoki typu duplex składające się z warstwy wierzchniej i podkładowej z materiału standardowego posiadają już własności znane lub podawane nawet przez producenta. W przypadku powłok stopniowanych niekiedy w celu wprowadzenia danych

materiałowych niezbędnym jest wykonanie testów – badań własności danego materiału o różnym składzie procentowym. W zależności ile mamy warstw pośrednich tyle własności materiałów musimy określić.



Rys. 7.26. Model dyskretny powłoki ceramicznej z obszarem stopniowania materiału oraz bez strefy [14] i [9]

Stopniowanie powłoki pozwala nam na równe rozłożenie ilości elementów na grubości warstwy ze względu na to, że cała powłoka dzielona jest na ilość warstw o różnej zawartości materiałów jak na rys. 7.24. To upraszcza budowę modelu dyskretnego i zmniejsza zagęszczenie siatki, jak w przypadku modelowania powłok dwuwarstwowych.

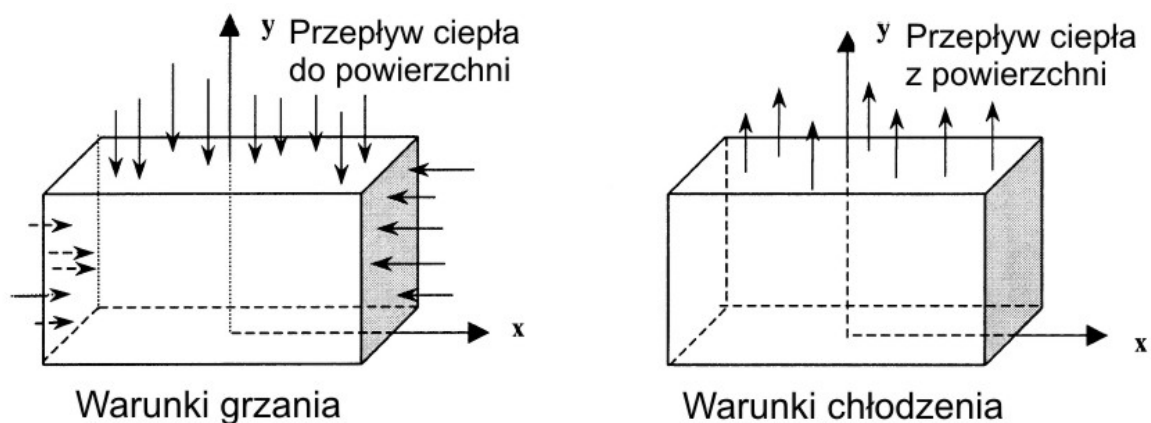
### 7.3. Symulacja numeryczna badania odporności na szok termiczny

Zbudowany model dyskretny próbki pokrytej powłoką ceramiczną TBC poddawany jest następnie analizie numerycznej MES w celu oszacowania np. naprężeń resztkowych w warstwach, czy odporności powłoki na szok termiczny. Jednak aby przeprowadzić daną analizę należy określić warunki brzegowe, tzn. obciążyć badaną próbkę. W przypadku badania odporności na szok temperaturowy, obciążeniem będzie temperatura zmieniająca się w sposób cykliczny. W literaturze można wyróżnić dwa etapy w jakich przebiega analiza badania odporności na szok termiczny. Pierwszym jest określenie pola temperatury w jakim przebywać będzie badana próbka. Następnie otrzymane pole użyte zostaje jako obciążenie do dalszej analizy wytrzymałościowej.

Pole temperatury jakie chcemy uzyskać dla badanej próbki zależy od rodzaju – źródła ciepła jakie zadamy. Źródłem tym może być omówiony wcześniej piec elektryczny, bądź palnik gazowy. Rysunek. 7.27 przedstawia schemat typowych warunków brzegowych dla

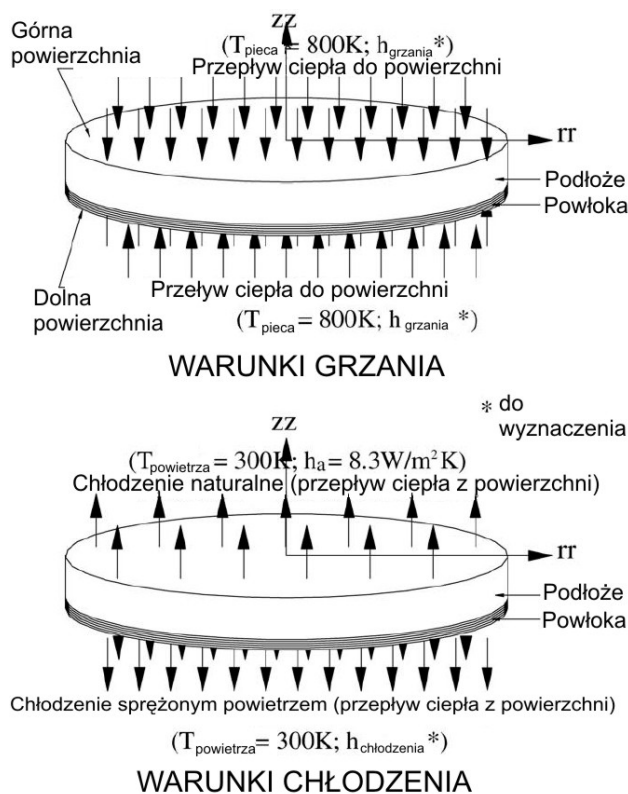


jednego cyklu termicznego (grzania i chłodzenia), gdzie badana płytka nagrzewana jest ze wszystkich stron równomiernie poprzez przepływ ciepła do powierzchni, natomiast chłodzenie odbywa się poprzez symulację wiatraka skierowanego tylko na górną powierzchnię (przepływ ciepła odbywał się tylko z górnej powierzchni).



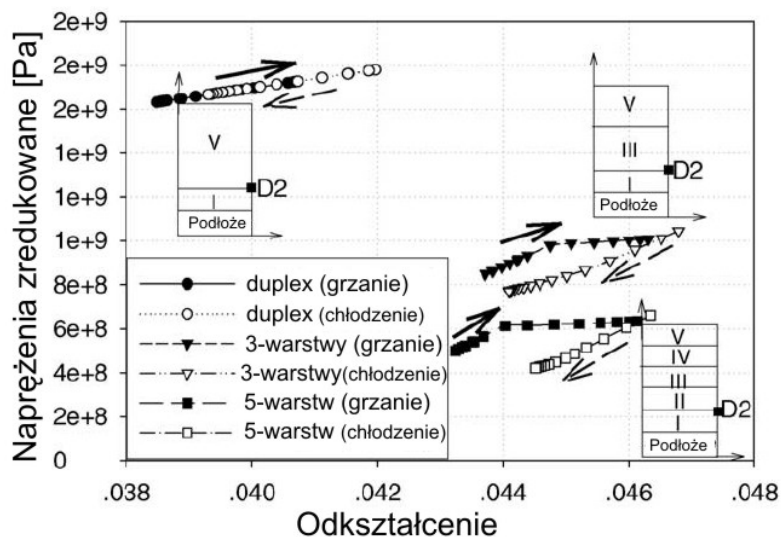
Rys. 7.27 Warunki brzegowe do cyklu termicznego [40]

Rysunek 7.28 dokładnie opisuje warunki brzegowe cyklu termicznego wykorzystane w pracy [21] do obciążenia badanej próbki pokrytej powłoką ceramiczną w celu wyznaczenia przestrzennego pola temperatury.



Rys. 7.28. Warunki grzania w piecu oraz chłodzenia sprężonym powietrzem [21]

Następnie otrzymane pole temperatury zostało skopiowane jako obciążenie do dalszej analizy wytrzymałościowej, która pozwala nam na uzyskanie rozkładu naprężeń w badanym obiekcie dla procesów grzania i chłodzenia. Na rysunku 7.29 przedstawiono zależność odkształcenie – naprężenie dla różnych typów próbek wykorzystanych do badań w pracy [21].



Rys. 7.29. Zależność odkształcenie-naprężenie dla typowego cyklu termicznego dla krawędzi płytki w punkcie D2 [21]

Tego typu symulacje pozwalają na badanie odporności powłok TBC na zmienne obciążenie temperaturowe bez budowania stanowisk oraz wykonywania żmudnych, a zarazem drogich badań eksperymentalnych, w których określenie temperatury jak i stanu wyężenia w danej warstwie jest bardzo trudne. Jedyną rzeczą w jakiej modelowanie jest zależne od eksperymentu są własności materiałowe, które muszą zostać wyznaczone na drodze eksperymentu.

## 8. Cel, zakres i teza pracy

Przeprowadzone studia literaturowe dotyczące modelowania warstwowych powłok ceramicznych potwierdziły, iż problem ten nie został definitywnie rozwiązany. Pomimo wielu lat badań i doświadczeń jakie przeprowadzono w różnych ośrodkach naukowych wciąż brak jest precyzyjnej, a jednocześnie szybkiej i wygodnej w stosowaniu metody oceny stanu wyężenia powłok ceramicznych poddanych obciążeniom cieplnym.

Już na etapie projektowania elementów pokrytych powłokami ceramicznymi, jednym z najważniejszych zadań jest ocena stanu ich wyężenia. Stan wyężenia powłok TBC zależny jest od działania stałego lub zmiennego pola temperatury. W związku z tym, istnieje konieczność wyznaczenia pola temperatur w całej objętości analizowanego elementu z powłoką TBC.

Dla obiektów o stosunkowo prostej postaci geometrycznej i niezłożonych warunkach obciążeń, przedstawienie przestrzennego pola temperatury możliwe jest poprzez zastosowanie kilku metod opisanych w rozdziale 4. Tym samym ocena stanu odkształcenia lub wyężenia materiału, w takim przypadku nie sprawia większego problemu.

Zupełnie inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku obiektów o bardzo złożonej strukturze jakimi są powłoki ceramiczne, dla której zjawiska cieplne składają się z wielu zmiennych w czasie czynników. Równocześnie dla takich zjawisk, których efektem jest zmienne pole temperatury, bardzo istotne jest uwzględnienie zmiennych z temperaturą własności fizycznych, cieplnych i mechanicznych materiału.

Dla obiektów o złożonej strukturze rozwiązanie zadania opisu przestrzennego pola temperatury dla całego obiektu jest zadaniem dosyć trudnym. Świadczyć o tym może wiele powstałych projektów, w których wpływ obciążeń cieplnych nie był w dostatecznym stopniu uwzględniony, przede wszystkim ze względu na złożoną strukturę powłoki ceramicznej.

Obecnie przy bardzo złożonym układzie rzeczywistym pracującym przy obciążeniach cieplnych stosuje się uproszczenia pozwalające na fragmentaryczny opis pola temperatury. Zazwyczaj są to pomiary przedstawiające punktowe lub powierzchniowe rozkłady temperatury. W przypadku powłok ceramicznych trudne jest wyznaczenie temperatury w warstwie wierzchniej metodami ogólnie stosowanymi.

Biorąc pod uwagę dotychczasowy stan wiedzy oraz możliwości wykorzystania komputerowych metod mechaniki, postawiono w pracy następujące cele:

- opracowanie numeryczno – doświadczalnej metodyki wyznaczania przestrzennego pola temperatury warstwowej powłoki ceramicznej poddanej obciążeniom cieplnym,

metodyka ta będzie oparta na integracji ogólnie znanych doświadczalnych metod pomiarowych temperatury oraz metod komputerowych, wykorzystujących algorytmy obliczeniowe metody elementów skończonych,

- opracowanie własnych oryginalnych modeli obliczeniowych warstwowych powłok ceramicznych w celu wyznaczenia przestrzennego pola temperatury i rozkładu naprężeń, w stanach ustalonych i nieustalonych przepływu ciepła,
- oszacowanie wpływu budowy modeli obliczeniowych powłok TBC (uwzględniających defekty tych powłok) na rozkład przestrzennego pola temperatury.
- zastosowanie zaproponowanej metodyki do oceny stanu wyężenia powłok ceramicznych poddanych działaniu stałych i zmiennych pól temperatur,
- przeprowadzenie szeregu badań eksperymentalnych na obiektach fizycznych w celu weryfikacji metodyki obliczeń numerycznych.

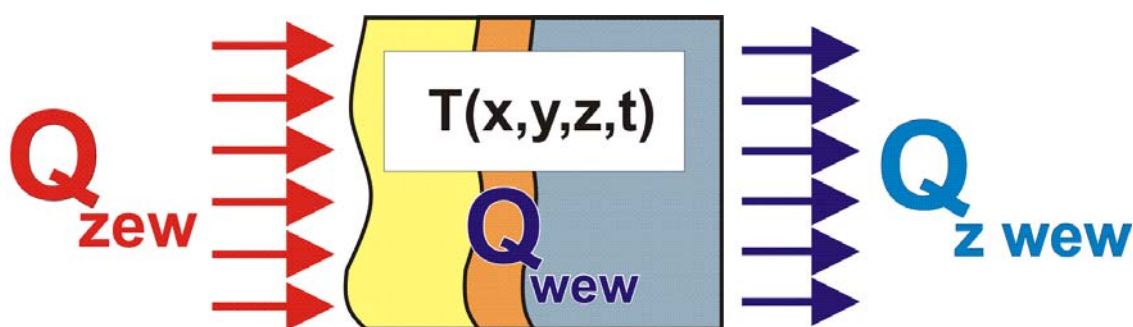
Równolegle do sformułowanych celów pracy postawiono tezę:

**„Możliwe jest wyznaczenie przestrzennego pola temperatury i wyężenia w elementach pokrytych powłoką ceramiczną przez zastosowanie numeryczno-doświadczalnej metodyki obliczeń, opartej na integracji doświadczalnych metod pomiarowych temperatury (punktowe lub powierzchniowe) oraz obliczeń numerycznych opartych na metodach komputerowych”**

Opracowanie metody obliczeniowej uwzględniającej czynniki związane z opisem stanu wyężenia, obciążeń dynamicznych i stanu naprężeń własnych – cieplnych, działających na analizowany obiekt umożliwi poprawę jakości prowadzonych prac projektowych, prognozowania trwałości oraz wyznaczania trwałości resztkowej pracujących obiektów, jak również obniży koszty produkcji elementów pokrytych powłokami TBC poprzez wyeliminowanie badań doświadczalnych.

## 9. Numeryczno – doświadczalna metodyka modelowania warstwowych powłok ceramicznych poddanych obciążeniom cieplnym

Opisując stan każdego obiektu w przestrzeni musimy uwzględnić jeden z ważniejszych czynników, którym jest temperatura związana z położeniem obiektu w przestrzeni i z czasem. Jest ona zależna od źródeł ciepła doprowadzających ciepło z zewnątrz, odprowadzonych z wnętrza ciała oraz ciepła wydzielonego w elemencie (rys. 9.1). Wszystkie te elementy składają się na sumę przyrostu energii wewnętrznej oraz pracy zewnętrznej.



Rys. 9.1. Opis przestrzenny pola temperatury danego ciała

Bilans energii w dowolnym elemencie ciała można zatem zapisać w formie nieliniowego równania różniczkowego przewodzenia ciepła nazywanego równaniem Fouriera-Kirchhoffa [37], [47], [53] i [65]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{q}_v = \rho c_p \frac{Dt}{d\tau} \quad (9.1)$$

Równanie (9.1) ma dowolnie dużą liczbę rozwiązań wynikających ze stałych całkowania. Aby wybrać spośród nich jedynie właściwe dla danych warunków wymiany ciepła, należy określić warunki jednoznaczności. Są to: warunki geometryczne (kształt, wymiary ciała), warunki fizyczne (właściwości fizyczne ciała), warunki początkowe oraz warunki brzegowe. Dla szeregu obiektów rzeczywistych rozwiązanie równania (9.1) jest zadaniem bardzo trudnym. Jednocześnie przeprowadzenie jakiegokolwiek analizy stanu wyężenia obiektu fizycznego będącego w polu działania obciążeń cieplnych, stawia za warunek konieczny wyznaczenie przestrzennego pola temperatury. Niejednokrotnie pole takie jest zmienne w czasie (w stanach nieustalonych), co w znaczny sposób komplikuje zadanie. Opis przestrzennego pola temperatury jest tym trudniejsze im bardziej złożona jest geometria obiektu.

Analityczne metody opisu pola temperatury przedstawione w rozdziale 4, sprowadzają się wyłącznie do zagadnień „elementarnych”, natomiast metody doświadczalne dają tylko połowiczny obraz pola temperatury (punktowy lub powierzchniowy), co w przypadku powłok ceramicznych stanowi duży problem, jakim jest wyznaczenie temperatury w warstwie powłoki ceramicznej.

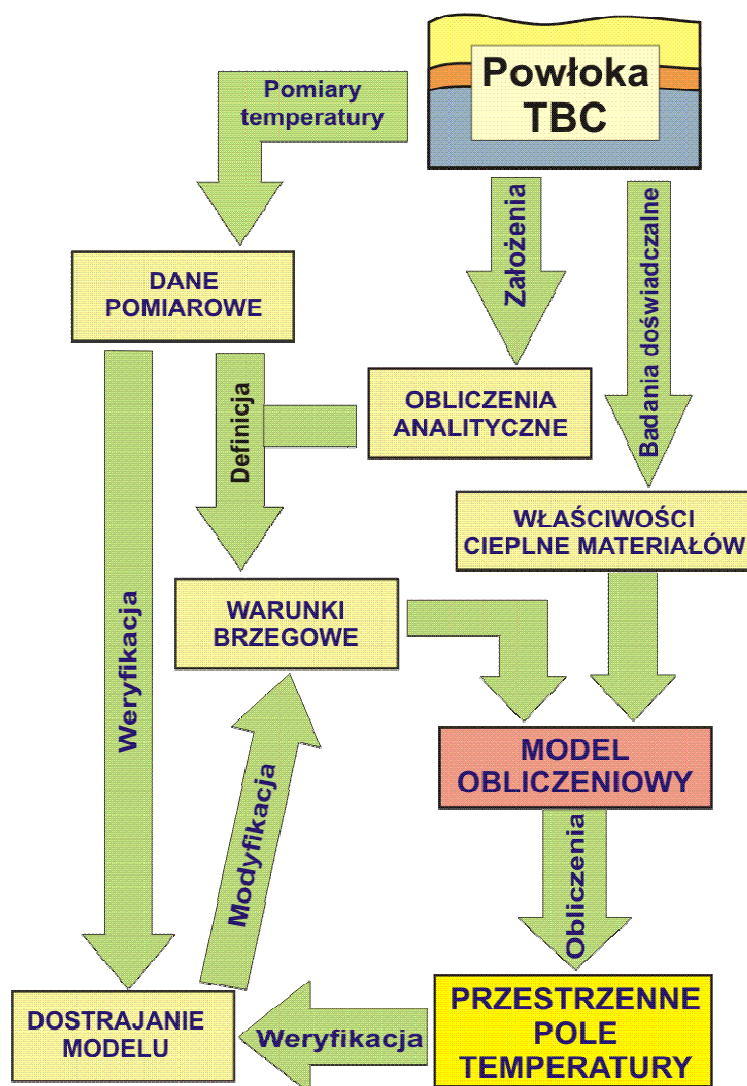
W celu przedstawienia przestrzennego pola temperatury dla bardzo złożonych geometrycznie obiektów jakimi są powłoki ceramiczne, zastosowano jedną z numerycznych metod obliczeniowych, którą jest metoda elementów skończonych [74], [78] i [112]. Zastosowanie numerycznych metod obliczeniowych do przestrzennego rozkładu pola temperatury wiąże się z deklaracją wielu danych wejściowych. Są to przede wszystkim charakterystyki materiału w funkcji temperatury, warunki początkowe i brzegowe. Ich zdefiniowanie jest warunkiem koniecznym, w celu uzyskania rzeczywiste pola temperatury będącego wynikiem obliczeń numerycznych. Uzyskane pole temperatury można zweryfikować poprzez badania eksperymentalne bezpośrednio na obiektach fizycznych (rzeczywistych) w celu otrzymania wiarygodnych wyników.

W oparciu o takie założenia, zdefiniowano oryginalny algorytm (metodykę) postępowania przy rozwiązywaniu problemów wyężenia powłok ceramicznych poddanych obciążeniom cieplnym. Opracowaną metodykę można podzielić na dwa główne etapy.

Etap pierwszy, czyli analiza termiczna, zorientowany jest na numeryczną analizę rozkładu przestrzennego pola temperatury. Opiera się on na wykorzystaniu numerycznych metod obliczeniowych bazujących na metodzie elementów skończonych.

Etap pierwszy przedstawia rysunek 9.2, poprzez schemat blokowy poszczególnych kroków prowadzenia analiz numeryczno-doświadczalnych.

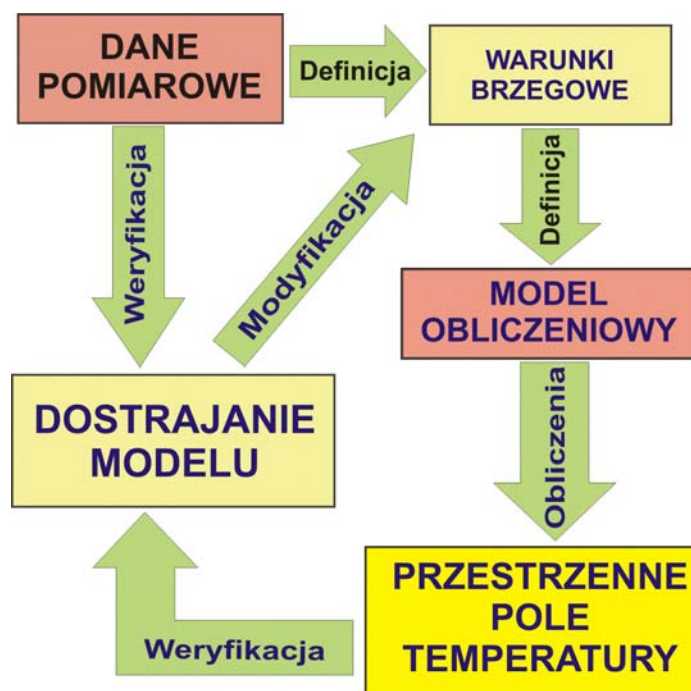
Zastosowanie metody elementów skończonych stymuluje odwzorowanie obiektu rzeczywistego w modelu wirtualnym (dyskretnym) z określonymi warunkami brzegowymi i początkowymi. Zdefiniowanie tych warunków należy poprzedzić wstępnymi obliczeniami analitycznymi, jak również szeregiem badań doświadczalnych. W tym wypadku badaniami doświadczalnymi są pomiary temperatury obiektu rzeczywistego.



Rys. 9.2. Schemat pierwszego etapu - analizy termicznej

Wśród wielu metod pomiaru temperatury można wyróżnić badania za pomocą np. termoelementów czy termowizji omówione dokładniej w rozdziale 4. Pomiarów te wnoszą tylko fragmentaryczne informacje na temat przestrzennego pola temperatury. Przeprowadzenie pomiarów pozwala określić jedynie punktowe lub powierzchniowe pole temperatury, które uwzględniając w trakcie definicji warunków brzegowych i początkowych w modelu obliczeniowym – dyskretnym, przy znanych zmiennych parametrach materiałowych, wyznacza przestrzenny obraz temperatury w całej objętości obiektu. Wyniki tych obliczeń są weryfikowane z bazą danych pomiarowych i w przypadku rozbieżności następuje modyfikacja warunków brzegowych oraz kolejne obliczenia numeryczne.

Taki tok postępowania prowadzi do dostrojenia modelu numerycznego do warunków rzeczywistych. Schemat dostrojenia modelu numerycznego przedstawia rysunek 9.3.



Rys. 9.3. Schemat dostrajania modelu obliczeniowego

Powtarzalność działań weryfikujących wartości temperatury otrzymane z obliczeń numerycznych prowadzi do otrzymania przestrzennego pola temperatury, które jest adekwatne do rzeczywistych warunków panujących na badanym obiekcie.

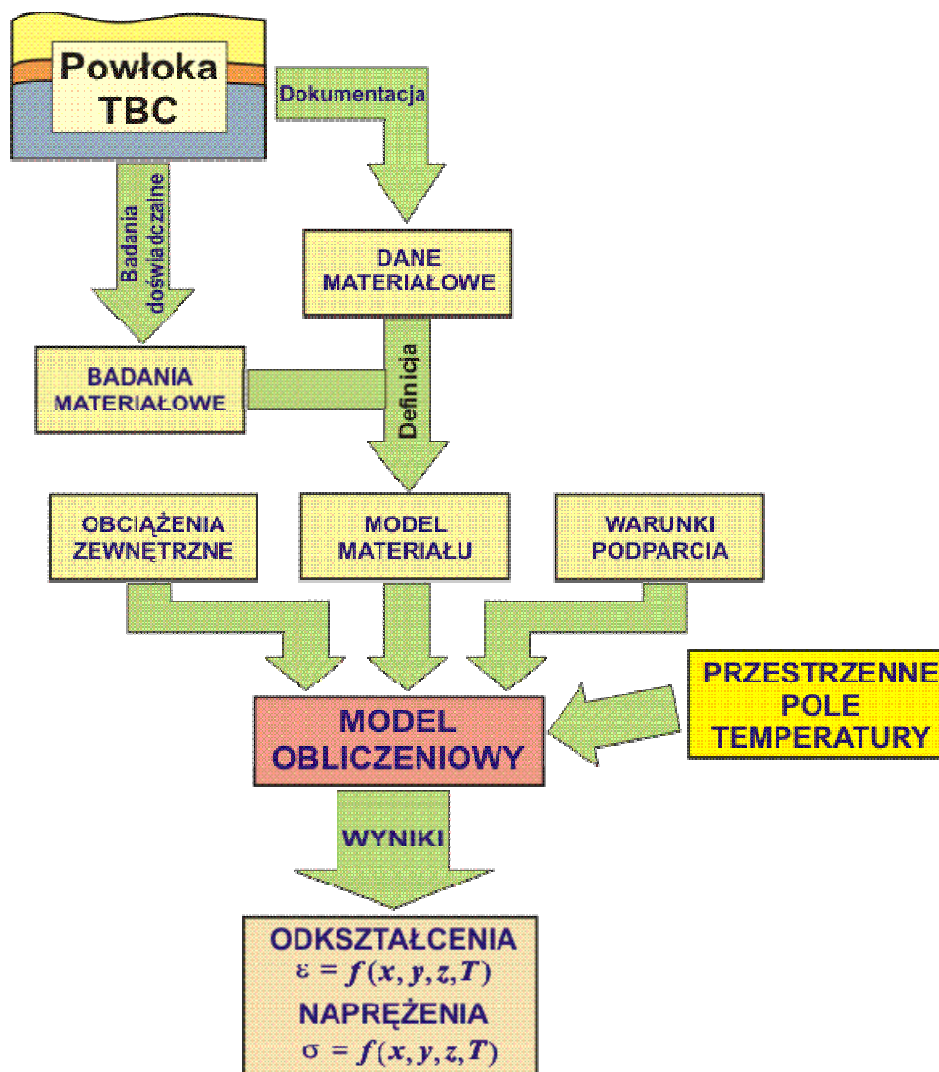
Wyznaczony trójwymiarowy obraz temperatury obiektu za pomocą integracji doświadczalnych metod pomiarowych i obliczeń numerycznych jest bardzo cennym źródłem informacji pozwalającym wyznaczyć pole temperatury w poszczególnych warstwach powłoki ceramicznej (warstwa wierzchnia TBC, warstwa łącząca BC), które jest bardzo trudne do wyznaczenia na drodze eksperymentalnej. Otrzymane przestrzenne pole temperatur stanowi przestrzenne pole obciążeń zewnętrznych, które wykorzystywane jest w drugim etapie zastosowania opracowanej metodyki. Etapem tym jest analiza wytrzymałościowa złożonej struktury powłoki ceramicznej (rys. 9.4).

Przestrzenne pole temperatury wyznaczone w pierwszym etapie jest warunkiem koniecznym poprawnego przyjęcia wszystkich obciążeń do obliczeń wytrzymałościowych (strukturalnych) badanej powłoki ceramicznej. Zastosowanie opracowanego modelu trójwymiarowego pola temperatury opartego na wynikach badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych pozwala na określenie warunków brzegowych.

Przeprowadzenie obliczeń wytrzymałościowych w oparciu o opracowany model obliczeniowy - numeryczny zawierający opis przestrzennego pola temperatury w całym obiekcie oraz obciążenia wynikające z warunków eksploatacji, umożliwiają wyznaczenie



adekwatnego stanu odkształceń i naprężeń. Można zatem globalnie ocenić stan wyęczenia zarówno wybranych fragmentów elementów o prostej postaci geometrycznej, jak również o bardzo złożonej strukturze jakimi są powłoki ceramiczne stosowane na bariery termiczne, poddane działaniu obciążeń cieplnych.



Rys. 9.4. Schemat drugiego etapu - analizy wytrzymałościowej

Podobnie jak w pierwszym etapie, również po obliczeniach wytrzymałościowych, otrzymane wyniki można zweryfikować poprzez badania eksperymentalne.

Weryfikację tą przeprowadza się poprzez zastosowanie pomiarów odkształceń za pomocą opisanej w rozdziale 5 tensometrii oporowej. Oczywiście jest to uwarunkowane możliwością wykonania pomiarów, biorąc pod uwagę środowisko w jakim znajduje się obiekt (wpływ wysokiej temperatury). Tak więc zaproponowana metodyka w istocie uwzględnia również kompleksową ocenę poprawności prowadzonych analiz numerycznych.

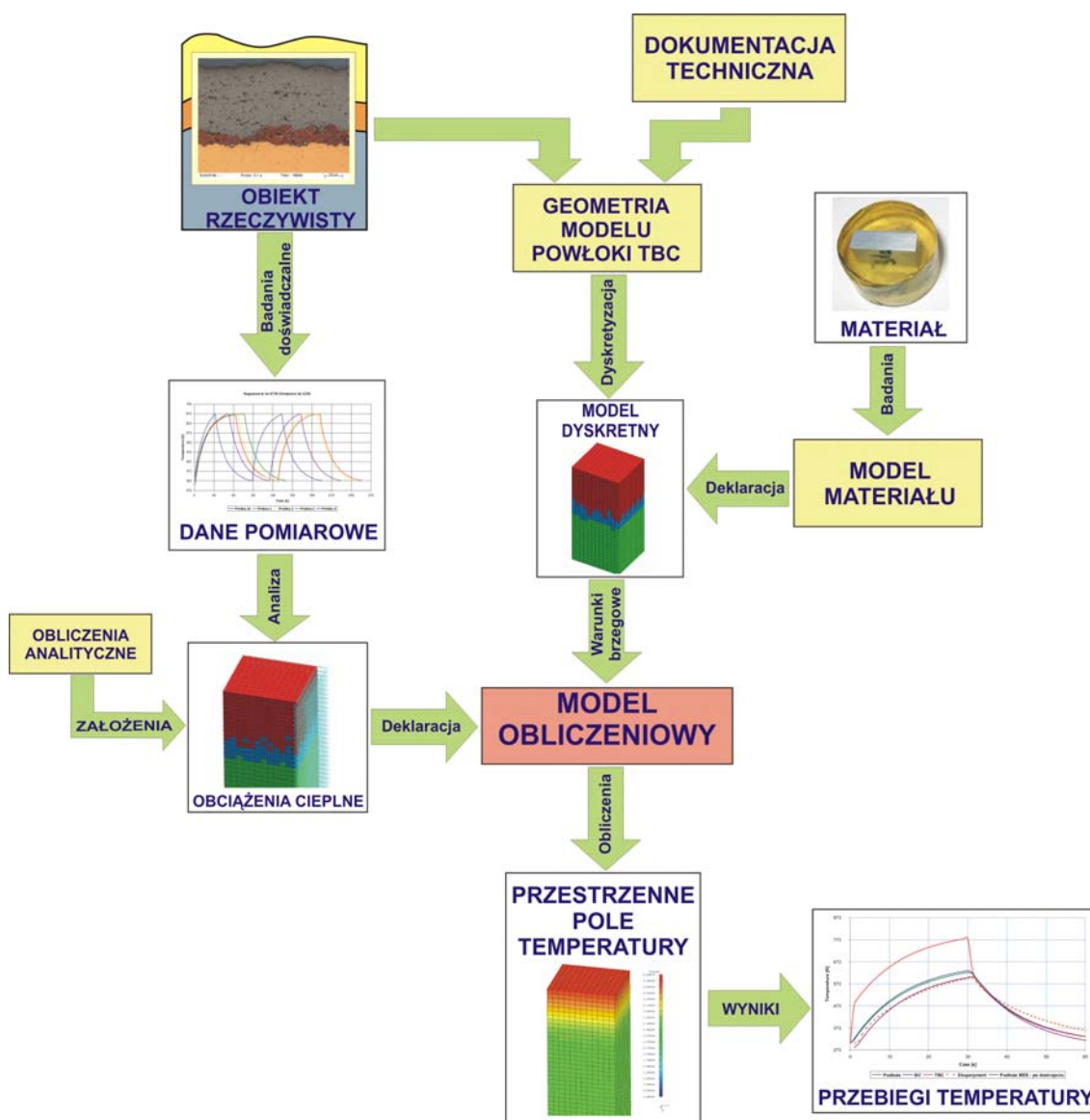
Zaproponowana integracja metod numerycznych i doświadczalnych w opracowanej metodyce (algorytmie), nie tylko wyznacza dane wejściowe do obliczeń numerycznych, ale

również weryfikuje wyniki otrzymane z obliczeń zarówno termicznych, jak i wytrzymałościowych.

W kolejnych rozdziałach pracy przedstawiono szczegółowo etapy zaproponowanej metodyki w analizie termicznej i wytrzymałościowej elementów pokrytych powłokami ceramicznymi stosowanymi na bariery termiczne.

### 9.1. Analiza termiczna

Analizując szczegółowo etap analizy termicznej powłok termicznych obciążonych cieplnie przedstawionej na rysunku 9.2, należy podkreślić iż podstawowym jej celem jest przedstawienie przestrzennego pola temperatury w całej objętości rozpatrywanego obiektu. Aby to wyraźnie przedstawić poszczególne elementy składowe analizy termicznej wyodrębniono z ogólnego schematu 9.2. i zaprezentowano na rysunku 9.5.



Rys. 9.5. Metodyka wyznaczania przestrzennego pola temperatury

Podstawowym zadaniem proponowanej metodyki jest zdefiniowanie ogólnego modelu matematycznego (modelu myślowego) zawierającego zespół formuł opisujących własności układu rzeczywistego będącego obszarem w przestrzeni obejmującym ośrodek ciągły, rzeczywisty obiekt techniczny lub jego projekt. Do rozwiązania zadań numerycznych zastosowano metodę elementów skończonych [78] i [112].

Przy rozwiązywaniu zagadnień związanych z przepływem ciepła należy opracować model dyskretny (obliczeniowy) ekwiwalentny do modelu matematycznego ośrodka ciągłego. W rozumieniu MES, przez rozpatrywany obiekt rozumie się obszar geometryczny zdefiniowany poprzez zespół punktów, linii i powierzchni tworzących przestrzenny wirtualny model geometryczny. Jest on zależny od przyjętych założeń i poczynionych uproszczeń. Już na tym etapie należy eliminować szczegóły geometryczne nie mające wpływu na późniejsze wyniki obliczeń.

Z drugiej strony w przypadku powłok ceramicznych należy wiernie zamodelować ich strukturę (uwzględnić możliwe defekty) co jest istotne z punktu widzenia prowadzonych obliczeń. Nie ma jednakże jednoznacznych wytycznych w jaki sposób wprowadzać uproszczenia podczas budowy modelu geometrycznego. Proces ten musi być oparty na intuicji i doświadczeniu inżynierskim.

Zastosowanie odpowiednich narzędzi CAD pozwala na budowę nawet bardzo skomplikowanych modeli ze względu na postać geometryczną. Podstawową bazą informacyjną przy modelowaniu jest dokumentacja konstrukcyjna lub sam obiekt rzeczywisty. W niektórych przypadkach nieodzowne jest zastosowanie metod pomiarowych w celu poprawnego określenia rzeczywistych wymiarów geometrycznych obiektu. W tym celu dla powłok ceramicznych można wykonać badania metalograficzne pozwalające na dokładne określenie struktury powłoki, jej grubości itp. Budowa modelu geometrycznego wraz z dokonywanymi pomiarami na obiekcie rzeczywistym prowadzi do poprawnego zdefiniowania wirtualnej postaci geometrycznej analizowanego obiektu – powłoki TBC.

Kolejnym krokiem proponowanej metodyki jest zdefiniowanie modelu dyskretnego w oparciu o przygotowany model geometryczny. Można tu wyodrębnić etap podziału globalnego obszaru na mniejsze podobszary zwane elementami oraz przyjęcie punktów węzłowych tak, aby można było przeprowadzić aproksymację poszukiwanej funkcji wewnątrz elementów za pomocą funkcji aproksymujących. Są to bardzo ważne etapy w tworzeniu modelu obliczeniowego MES. Proces dyskretyzacji zależy w dużej mierze od wcześniej przygotowanej geometrii, własności fizycznych oraz oczekiwanych wyników

obliczeń. Warunkuje on liczbę niewiadomych, wielkość i kształt elementów, co bezpośrednio przekłada się na dokładność rozwiązania zadania.

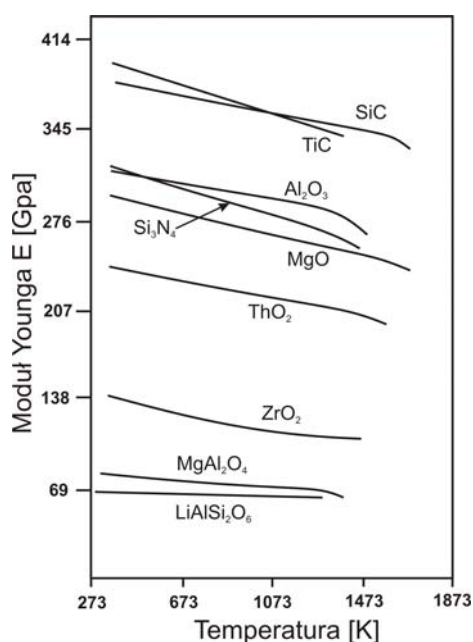
Różnorodność geometryczna analizowanych obiektów konstrukcyjnych stymuluje również stosowanie elementów skończonych odpowiedniego typu. Dla powłok ceramicznych będą to elementy skończone typu bryłowego. Poprawność wykonania modelu uwarunkowana jest również w doborze odpowiedniej gęstości elementów skończonych w miejscach, w których dokładność otrzymanych wyników jest bardzo istotna (np. w miejscach mikropęknięć). W takim wypadku elementy powinny być odpowiednio małe.

Innym czynnikiem mającym wpływ na postać modelu dyskretnego do analizy termicznej jest konieczność stosowania odpowiednich elementów skończonych w celu zamodelowania określonych zjawisk fizycznych. W przypadku konwekcyjnej wymiany ciepła pomiędzy objętościowymi elementami ciała stałego a medium ciekłym lub gazowym wymaga się zastosowania dodatkowo elementów powłokowych. Są one konieczne w celu definicji warunków wymiany ciepła.

Dokonując dyskretyzacji obszaru, wyróżniamy w nim skończoną liczbę punktów zwanych węzłami. Poszukiwane wartości parametrów w tych węzłach (np. temperatury) stanowi podstawowy układ niewiadomych. Sam podział ciągłego obszaru daje w efekcie skończoną liczbę elementów połączonych ze sobą w węzłach wspólnych znajdujących się na granicy podziału. W wielu wypadkach węzły mogą się znajdować również wewnątrz poszczególnych elementów podnosząc tym samym dokładność obliczeń.

W kolejnym etapie proponowanej metodyki (rys. 9.5) następuje definicja parametrów związanych z zastosowanymi materiałami w analizowanym obiekcie. Ogólnie wiadomo, że własności materiałów ceramicznych zawsze zależą, w większym lub mniejszym stopniu, od temperatury. W ogólnym przypadku, uwzględnienie zmiennych parametrów fizycznych, cieplnych i mechanicznych, dla najbardziej popularnych materiałów konstrukcyjnych nie sprawia większych problemów. Przykładowo rysunek 9.5 przedstawia wykres modułu Younga zależnego od temperatury dla różnych materiałów ceramicznych.

Zatem bardzo ważne jest już na etapie przygotowywania modelu obliczeniowego, równoległe prowadzenie badań eksperymentalnych. Podobnie jak przy dokładności przygotowania modelu geometrycznego i dyskretnego jakość prowadzonych badań nad własnościami materiałowymi wpływa na późniejsze wyniki obliczeń numerycznych.



Rys. 9.5. Zależność modułu Younga od temperatury dla różnych materiałów ceramicznych

Kolejnym etapem proponowanej metodyki jest zdefiniowanie obciążeń cieplnych w opracowanym modelu dyskretnym. Związane jest to z identyfikacją analizowanego obiektu z punktu widzenia bilansu cieplnego. Należy w tym miejscu dokładnie zdefiniować wszystkie źródła ciepła (wewnętrzne i zewnętrzne) oraz określić fizyczne mechanizmy przepływu ciepła jakie mogą zaistnieć podczas eksploatacji obiektu. Podejście analityczne definicji tych mechanizmów wydaje się najtrafniejsze, jednakże w wielu wypadkach jest to bardzo trudne albo wręcz niemożliwe do wykonania. Dla przykładu, bardzo częstym sposobem wymiany ciepła jest konwekcja zachodząca pomiędzy ciałem stałym a cieczą lub gazem. Przekazywany tym sposobem strumień ciepła określa prawo Newtona:

$$\dot{q} = \alpha(T_{sc} - T_p) \quad (9.2)$$

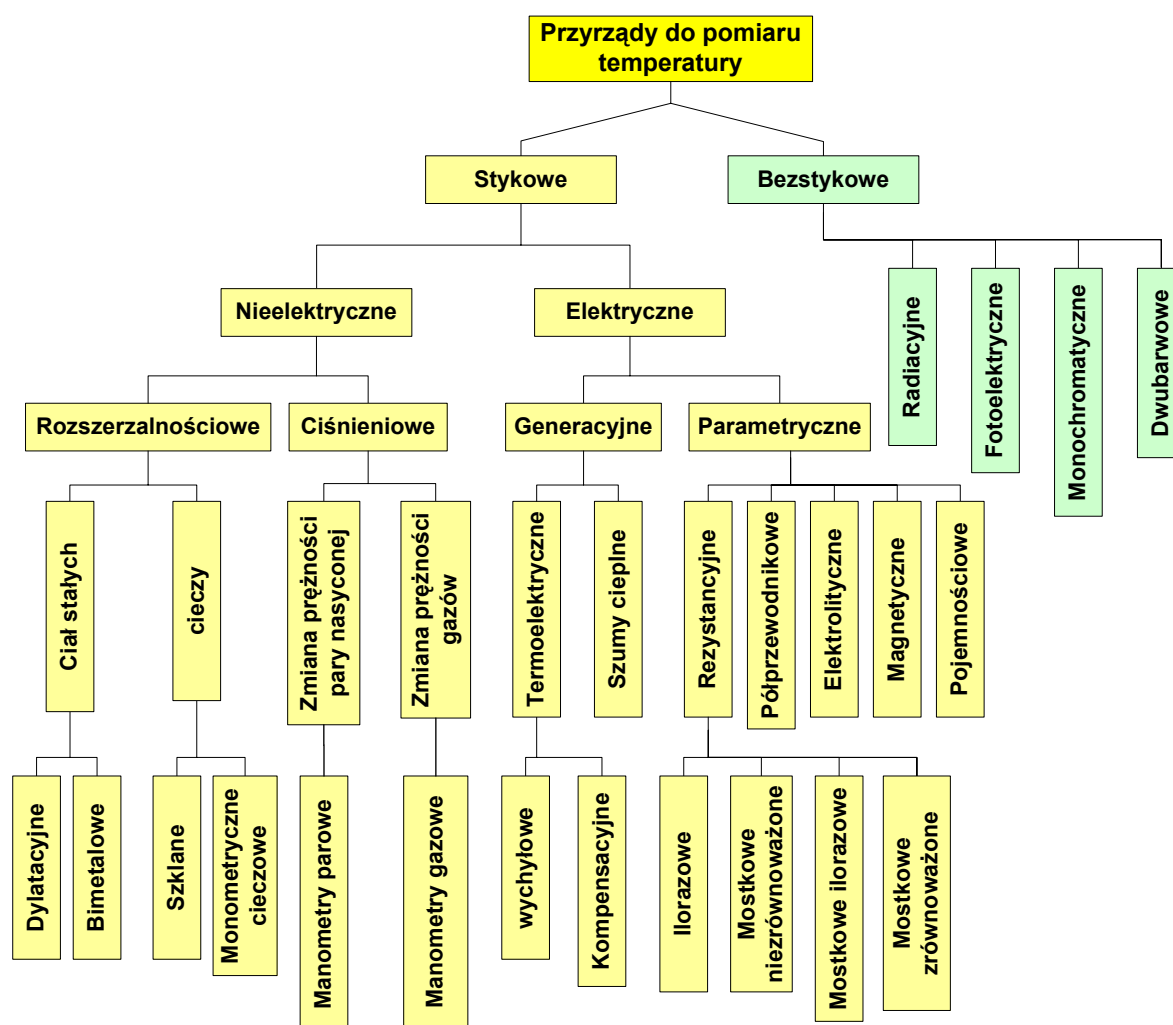
gdzie  $T_{sc}$  i  $T_p$  określają odpowiednio temperaturę ścianki ciała stałego i temperaturę płynu, natomiast  $\alpha$  jest współczynnikiem wnikania lub przejmowania ciepła.

Wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła, który zależny jest od bardzo wielu czynników, jest jednym z trudniejszych zagadnień. Dlatego też niezbędne w takich wypadkach jest przeprowadzenie badań doświadczalnych, na które składają się pomiary zjawisk mechanicznych (np. prędkości przepływu medium, ciśnienia, gęstości, itp.), jak i termicznych (temperatury).

Sposób wyznaczenia temperatury w każdym punkcie obiektu rzeczywistego bazuje na ścisłej integracji numerycznych metod obliczeniowych oraz pomiarów doświadczalnych. Pomiaru temperatury można dokonać wykorzystując fakt, że prawie wszystkie właściwości

obiektów rzeczywistych (np. objętość, długość, własności elektryczne i magnetyczne, itp.) zmieniają się podczas ogrzewania i chłodzenia. Jeżeli zatem możliwe jest wyznaczenie funkcji opisującej zależność takiej zmiennej właściwości ciała względem temperatury, to staje się ona podstawą do zmierzenia temperatury. Wobec takich relacji pomiędzy temperaturą a właściwościami fizycznymi ciała metody pomiaru temperatury można podzielić na stykowe i bezstykowe [109].

Przyrządy stykowe (termometry) mają bezpośredni kontakt z ciałem badanym za pośrednictwem czujników, które wymieniają ciepło na drodze przewodzenia, konwekcji lub promieniowania. W przyrządach bezstykowych wykorzystywane jest zjawisko promieniowania cieplnego wysyłanego przez obiekt. Jest ono zależne od wartości temperatury na powierzchni emitującej promieniowanie. Podział przyrządów do pomiaru temperatury przedstawiono na rysunku 9.6. We wszystkich wymienionych przyrządach wynikiem pomiarów są punktowe lub powierzchniowe pola temperatury, niezbędne do poprawnej budowy numerycznego modelu obliczeniowego.



Rys. 9.6. Schemat podziału przyrządów do pomiaru temperatury

Zbudowana w ten sposób baza danych pomiarowych oprócz wartości temperatury w wybranych miejscach obiektu posiada również informacje o innych parametrach związanych bezpośrednio z przepływem ciepła. Mogą to być wartości ciśnienia, prędkości przepływu medium, itp.

Na podstawie tak przeprowadzonych pomiarów można wyznaczyć dla pewnych warunków pracy rozkład wartości współczynnika wnikania lub przejmowania ciepła przez ciało stałe opisanego w równaniu (9.2), w zależności od zmiennych parametrów ciśnienia, prędkości przepływu medium chłodzącego lub ogrzewającego jak również temperatury.

Należy jednak podkreślić, że wyznaczanie wartości współczynnika niejednokrotnie wymaga dość skomplikowanej aparatury jak również wiele czasu poświęconego na żmudne symulowanie różnych warunków pracy. Można więc zauważyć, jak ważnym i nieodzownym elementem składowym w proponowanej metodyce są badania laboratoryjne własności cieplnych materiałów.

Interpretacja wszystkich obciążeń cieplnych rozpatrywanego obiektu jest warunkiem koniecznym do definicji warunków brzegowych i początkowych analizy termicznej w metodzie elementów skończonych. W efekcie otrzymujemy kompletny model obliczeniowy zawierający wszelkie informacje o postaci geometrycznej, charakterystykach materiałowych oraz zjawiskach fizycznych odpowiadających za rozkład temperatury w całej objętości analizowanego obiektu.

Ostatnim etapem analizy termicznej jest przeprowadzenie obliczeń numerycznych, w wyniku których powstaje przestrzenne pole temperatury dla całej objętości analizowanego obiektu. Pole takie, zgodnie z przedstawioną na rysunku 9.3. metodą dostrajania modelu do warunków rzeczywistych, jest w końcowym etapie poddane weryfikacji w oparciu o bazę danych pomiarowych. W przypadku spełnienia założonych kryteriów poprawności (odpowiednio małej różnicy temperatury w modelu i pomiarze) pole takie jest bardzo cenną informacją na temat stanów obciążeń uwzględnianą w kolejnym etapie metodyki dotyczącym analizy wytrzymałościowej.

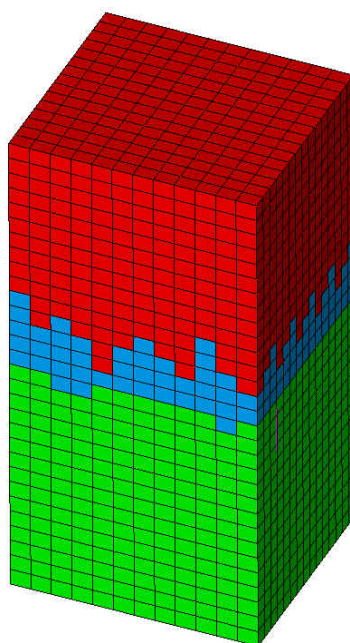
## 9.2. Analiza wytrzymałościowa

Drugi etap proponowanej metodyki oceny stanu wyężenia elementów pokrytych powłokami ceramicznymi TBC poddanych obciążeniom cieplnym opiera się na obliczeniach numerycznych wyznaczających poziom ich odkształceń i naprężeń. Bazą obliczeniową staje się w tym wypadku numeryczny model obliczeniowy zastosowany w obliczeniach termicznych wraz z pełną informacją na temat wartości temperatury w każdym geometrycznym punkcie obiektu. Jest to warunek konieczny do definicji warunków brzegowych w analizie wytrzymałościowej. Wobec możliwości istnienia różnego rodzaju obciążeń cieplnych zagadnienie oceny stanu wyężenia obiektów rzeczywistych podzielono na dwa podstawowe przypadki. Jest to ocena wyężenia obiektu obciążonego stałym polem temperatury oraz nieustalonym przepływem ciepła.

Wykorzystanie przedstawionego algorytmu oceny stanu wyężenia elementów pokrytych powłokami ceramicznymi TBC wyznacza nam w ogólnym przypadku zależność wartości naprężeń dla  $k$ -tego punktu obiektu względem temperatury:

$$\sigma_k = f(T_k). \quad (9.3)$$

W celu prezentacji proponowanej metodyki oceny stanu wyężenia zbudowano geometryczny i dyskretny model płytki aluminiowej pokrytej powłoką ceramiczną TBC (rys. 9.7). Dla celów poglądowych opracowany model dyskretny posiada wystarczającą liczbę ośmiowęzłowych elementów skończonych typu SOLID oraz elementów powłokowych typu SHELL.



Rys. 9.7. Modelowy obiekt obliczeniowy do analiz numerycznych

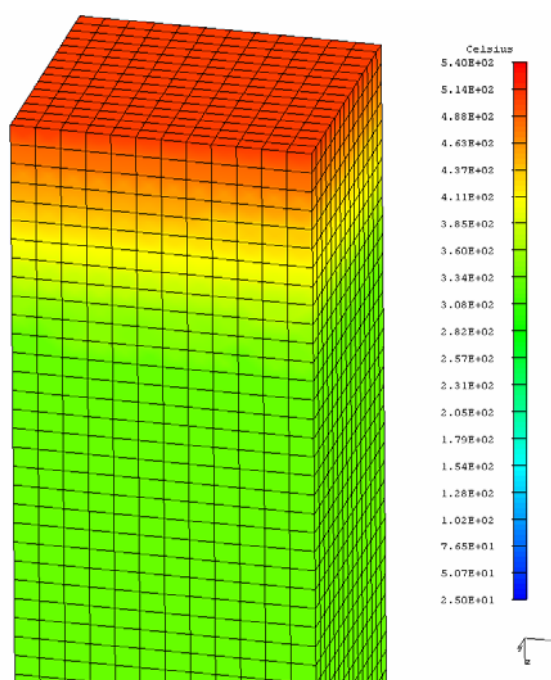


W oparciu o przedstawioną metodykę wyznaczania przestrzennego pola temperatury zdefiniowano warunki obciążeń cieplnych. Jako źródło ciepła przyjęto ciepło palnika wykorzystanego w badaniach eksperymentalnych, upraszczając go w symulacji do elementu o niezmiennej temperaturze na całej powierzchni grzania.

Przy takim założeniu, zdefiniowano warunki wymiany ciepła poprzez konwekcję przyjmując odpowiednie współczynniki przejmowania ciepła  $\alpha [W/m^2K]$  pomiędzy powierzchnią zewnętrzną płyty, a otaczającym ją środowiskiem podane w literaturze [21], [40], [50], [58], [79] i [82].

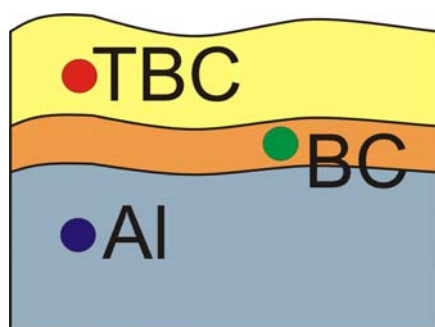
Dla nieustalonego przepływu ciepła założono warunki początkowe i brzegowe. Definiując je uwzględniono zmianę wszystkich parametrów materiałowych wraz ze zmianą temperatury.

W efekcie przeprowadzenia obliczeń numerycznych obiektu, poddanego zmiennym w czasie obciążeniem cieplnym, otrzymano przestrzenny rozkład pola temperatury w całej jego objętości (rys. 9.8).



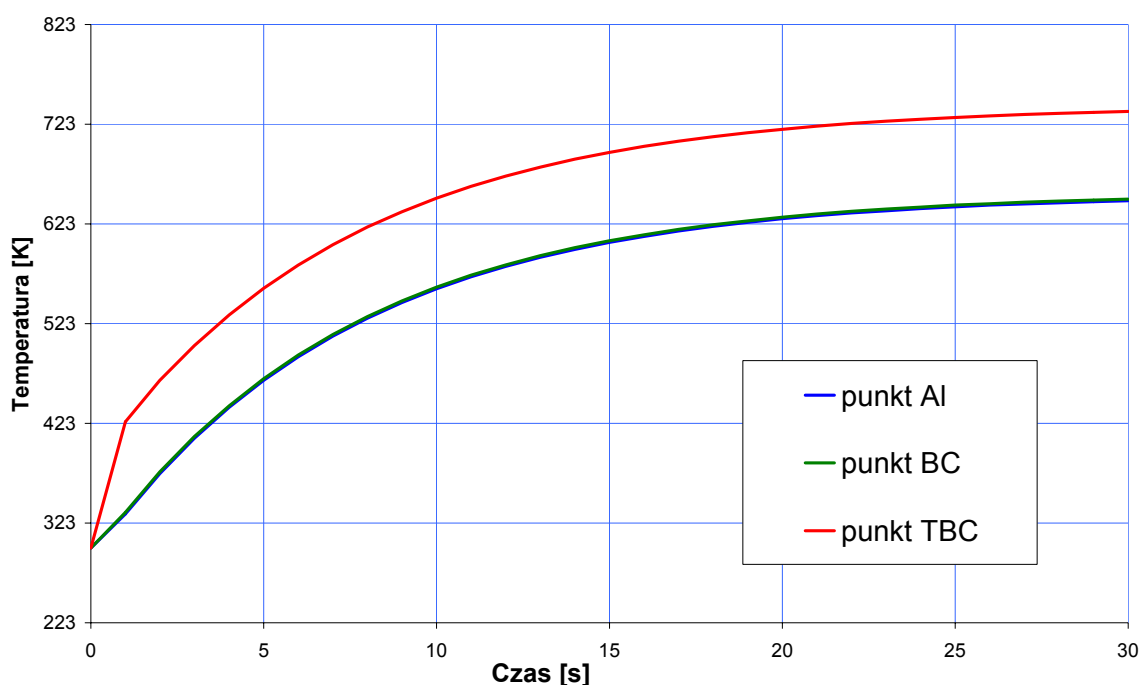
Rys. 9.8. Przestrzenny rozkład temperatury w obiekcie modelowym

W celu interpretacji wyników obliczeń numerycznych wytypowano trzy punkty leżące w każdej warstwie powłoki ceramicznej (TBC, BC) oraz w podłożu (rys. 9.9).



Rys. 9.9. Położenie punktów do interpretacji wyników obliczeń numerycznych

Analizując różne przypadki nagrzewania powłoki, przy nieustalonym przepływie ciepła, w wybranych punktach geometrycznych otrzymano określone wartości temperatury (rys. 9.10).

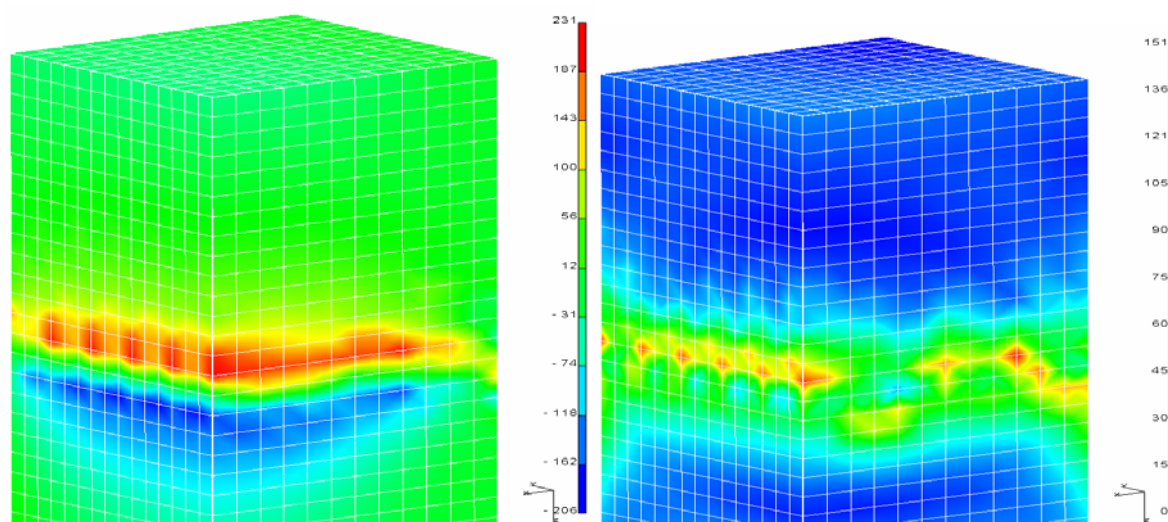


Rys. 9.10. Wartości temperatury w punktach AI., BC i TBC podczas przykładowego czasu grzania

Na powyższym wykresie widać wyraźnie wpływ prędkości wzrostu temperatury palnika na poziom temperatury w analizowanych punktach obiektu. Początkowy szybki wzrost temperatury stabilizuje się po określonym czasie. Jest on tym dłuższy, im prędkość nagrzewania jest mniejsza. Jednocześnie porównując zmianę temperatury w podłożu i warstwie wierzchniej TBC wyraźnie widać bezwładność cieplną modelowego obiektu, czyli działanie bariery termicznej.

Takie informacje, opisujące całe spektrum prędkości zmiany temperatury dla różnych warunków obciążeń zewnętrznych oraz chwilowy obraz przestrzennego pola temperatury są warunkiem koniecznym do przedstawienia występujących w obiekcie stanów naprężeń. Poszukiwanie lokalnych wartości i ustalenie obszarów, w których wyteżenie materiału może być niebezpieczne, wiąże się z rozwiązaniem zadań numerycznych dla kolejnych kroków czasowych nieustalonego przepływu ciepła.

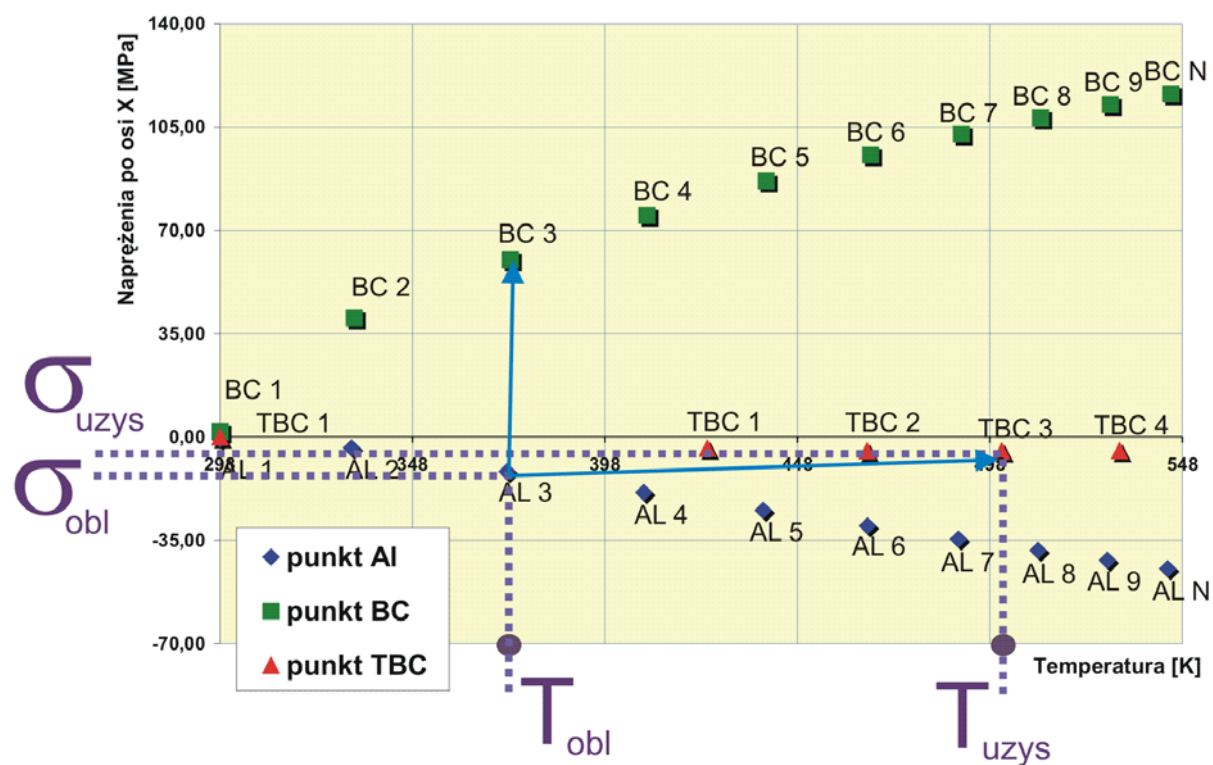
Aby model obliczeniowy do analizy wytrzymałościowej był kompletny, niezbędne jest oprócz wyznaczonego wcześniej przestrzennego pola temperatury zdefiniowanie warunków podparcia i wszystkich obciążeń zewnętrznych (ciśnien, sił skupionych, grawitacji, itp.). Po przeprowadzonych obliczeniach wytrzymałościowych w oparciu o zdefiniowane warunki brzegowe otrzymujemy przestrzenny rozkład warstwic naprężeń (rys. 9.11).



Rys. 9.11. Warstwic naprężeń wzdłuż osi X oraz maksymalnych tnących [MPa]

Na badanym obiekcie, po przeprowadzeniu obliczeń numerycznych zgodnie z zaproponowaną metodyką, otrzymano zespół punktów opisujących wartości temperatury i naprężeń dla wybranego punktu Al, BC oraz TBC leżącego wewnątrz obiektu – płytki z powłoką TBC (rys. 9.12). Dla tych samych punktów obiektu co w przestrzennym polu temperatur można przyporządkować parę liczb  $(T, \sigma)$  opisujących wartość temperatury i naprężeń. W ten sposób kontrolując temperaturę obiektu w dowolnym punkcie geometrycznym, można ocenić stan naprężeń w innych miejscach. Mogą to być miejsca o newralgicznym znaczeniu z punktu widzenia występującego tam stanu naprężeń. Jednocześnie miejsca te są niedostępne dla jakichkolwiek badań doświadczalnych zarówno cieplnych jak i wytrzymałościowych.

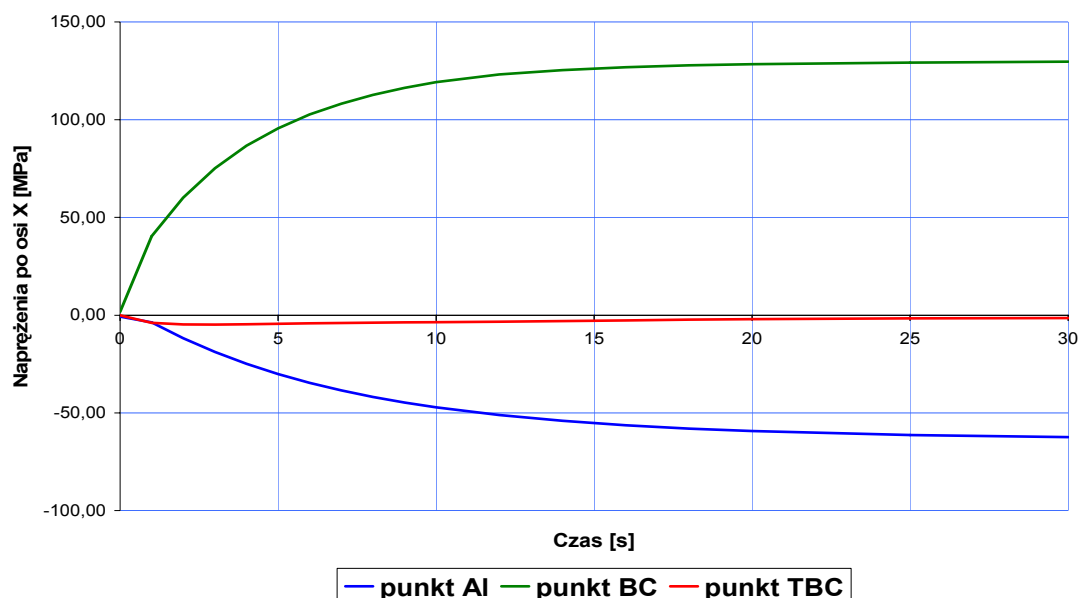
Przykładowo uzyskując w wyniku obliczeń temperaturę  $T_{obl}$  w punkcie AL 3 (3 krok czasowy wygrzewania) oraz stan wyężenia  $\sigma_{obl}$  możemy określić w prosty sposób temperaturę oraz stan wyężenia w innych punktach powłoki – warstwy. I tak dla 3 kroku czasowego otrzymamy w warstwie TBC –  $T_{uzys}$  oraz  $\sigma_{uzys}$ .



Rys. 9.12. Schemat oceny stanu wyężenia dla dowolnych punktów obiektu

Ogólnie przedstawiając zastosowanie przedstawionej metodyki oceny wyężenia konstrukcji obciążonej cieplnie w stanach nieustalonych można powiedzieć, że dla dowolnego  $k$ -tego punktu obiektu będzie określana para wartości liczb  $(T_{(i)k}, \sigma_{(i)k})$ , gdzie  $i$  oznacza kolejny krok czasowy przeprowadzonej analizy termicznej i wytrzymałościowej.

Otrzymany w wyniku obliczeń numerycznych przestrzenny plan rozkładu poszczególnych składowych naprężeń w całym analizowanym obiekcie pozwala na analizowanie wybranych punktów geometrycznych obiektu. Dla tych punktów można przedstawić zmianę wartości naprężeń w trakcie trwania zmiennego procesu nagrzewania (rys. 9.13).



Rys. 9.13. Zmiana wartości naprężeń wzdłuż osi X dla punktów Al, BC i TBC w powłoce ceramicznej w funkcji czasu nagrzewania

Wyznaczając powyższe wykresy zmiany naprężeń dla trzech wybranych punktów dokonano (interpolacji), gdyż w wyniku obliczeń otrzymujemy jedynie wartości w odpowiednich krokach czasowych.

Z przedstawionego powyżej toku obliczeń można wykazać, że dla zadanych warunków obciążeń cieplnych w dowolnych punktach geometrycznych istnieje zależność miejscowej wartości naprężeń od temperatury. Ponieważ znane są wartości naprężeń  $\sigma_{(0)}, \sigma_{(1)}, \sigma_{(2)}, \dots, \sigma_{(i)}$  dowolnego miejsca badanej płytki z powłoką TBC w punktach o określonych wartościach temperatury  $T_{(0)}, T_{(1)}, T_{(2)}, \dots, T_{(i)}$  dla kolejnych kroków obliczeniowych, to można zbudować wielomian przyjmujący wartości  $\sigma_{(i)}$  dla kolejnych wartości temperatury  $T_{(i)}$ .

Wykorzystując interpolację wielomianem Lagrange'a, można przedstawić ciągłą zależność pomiędzy miejscową wartością naprężeń a temperaturą bazując na kolejnych krokach czasowych:

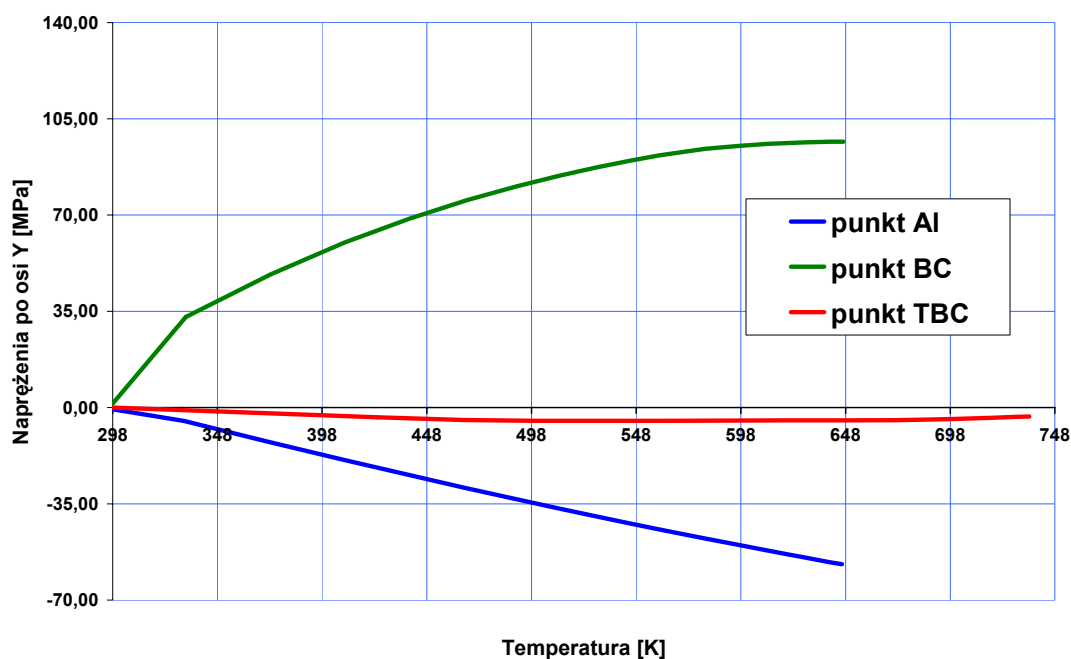
$$\sigma = L_0\sigma_0 + L_1\sigma_1 + \dots + L_i\sigma_i = \sum_{m=1}^i L_m\sigma_m, \quad (9.4)$$

gdzie poszczególne  $L_m$  są wielomianami Lagrange'a w postaci

$$L_m = \frac{(T - T_0) \dots (T - T_{m-1})(T - T_{m+1}) \dots (T - T_i)}{(T_m - T_0) \dots (T_m - T_{m-1})(T_m - T_{m+1}) \dots (T_m - T_i)}, \quad (9.5)$$

przy czym  $L_m=1$  dla  $T=T_m$  oraz  $L_m=0$  dla  $T=T_n$ , przy  $n \neq m$ .

W ten sposób otrzymano funkcję zmienności naprężeń ze zmianą temperatury w danym miejscu obiektu podczas nagrzewania. Zależność taką w modelowym obiekcie dla analizowanych trzech punktów przedstawiono na rysunku 9.14.



Rys. 9.14. Zmiana wartości naprężeń wzdłuż osi Y dla punktów *AL*, *BC*, *TBC* w funkcji temperatury podczas przykładowego procesu rozgrzewania

Zbudowana funkcja (9.4) zależności naprężeń od temperatury w dowolnym punkcie obiektu jest niezmiernie cennym źródłem informacji nt. szacowania stanu naprężeń w całej objętości. Pozwala ona poprzez monitoring wartości temperatury w dostępnym punkcie pomiarowym (np. punkt *AL* - podłoże - rys. 9.14), ocenić zarówno wartość temperatury w dowolnym punkcie obiektu ( np. punkt *BC* i *TBC*), jak również występujący tam poziom naprężeń. Takie monitorowanie temperatury podczas eksploatacji powłok ceramicznych umożliwia ciągłą weryfikację stanu wyężenia wybranych punktów w oparciu o pomiary temperatury. Można również poprzez symulację hipotetycznych stanów obciążeń cieplnych z wyprzedzeniem zareagować podczas niebezpiecznych zmian temperatury.

Opracowana metodyka, poprzez ocenę temperatury w warstwie wierzchniej *TBC*, co jest bardzo trudne do wykonania na drodze eksperymentu, pozwala na określenie zakresu pracy powłok ceramicznych stanowiących bariery termiczne oraz ocenę wyężenia tych powłok bez wykonywania badań eksperymentalnych. Przekłada się to na wymierne korzyści ekonomiczne wynikające z eliminacji budowy stanowisk pomiarowych.

## 10. Numeryczne modelowanie powłok ceramicznych poddanych obciążeniom cieplnym

W celu wyznaczenia przestrzennego pola temperatury w analizie termicznej, a w dalszej części wyznaczenia naprężeń i odkształceń powłok TBC poddanych obciążeniom cieplnym zastosowano numeryczną metodę obliczeniową bazującą na metodzie elementów skończonych [74], [78] i [112]. Do definicji warunków brzegowych zarówno w analizie termicznej, jak i wytrzymałościowej oraz definicji materiału posłużono się danymi z wcześniej przeprowadzonych badań, oraz z własnych badań eksperymentalnych omówionych w następnym rozdziale.

Badania numeryczne zostały wykonane przy użyciu systemu I-DEAS<sup>®</sup> wersja 11 [36] bazującego na metodzie elementów skończonych. Do przeprowadzenia całej symulacji wykorzystywane były poszczególne moduły systemu I-DEAS<sup>®</sup> takie jak:

- moduł „MESHING” – modelowania powłok, budowa modeli dyskretnych, definicja materiałów,
- moduł „BOUNDARY CONDITIONS” – zadawanie warunków brzegowych,
- moduł „TMG” – zadawanie warunków analizy termicznej oraz obliczenia termiczne,
- moduł „MODEL SOLUTION” – definicja warunków analizy wytrzymałościowej,
- moduł „POST PROCESSING” – przegląd i analiza wyników.

Biorąc pod uwagę wyniki badań eksperymentalnych i analizę metalograficzną struktury powłok w modelach dyskretnych starano się uwzględnić najczęściej występujące defekty struktur powłok TBC opisane wcześniej w rozdziale 3.

### 10.1. Modele dyskretne powłoki TBC

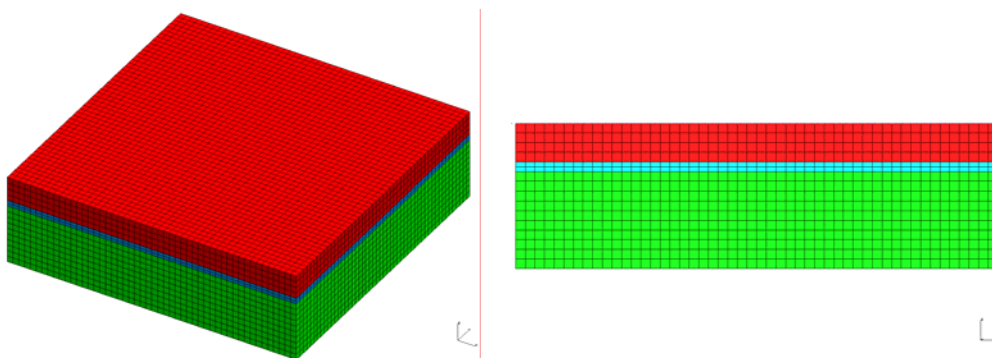
Do analizy numerycznej zostało zbudowanych 20 modeli o różnej budowie i cechach charakterystycznych. W modelach uwzględniono takie cechy jak: chropowatość powierzchni, mieszanie się materiałów na granicach warstw oraz powstałe w procesie natryskiwania cieplnego mikropęknięcia w strukturze. Uwzględnienie mieszania się materiałów na granicach warstw zamodelowane zostało w postaci losowego rozmieszczenia w trzech płaszczyznach (przestrzennie) elementów o różnych własnościach materiałowych. Chropowatość w modelach przedstawiona została jako krzywa o zmiennej amplitudzie, po której rozpięte zostały elementy skończone. Jeśli chodzi o uwzględnienie mikropęknięć przedstawione zostały one w modelu w postaci nieciągłości elementów w losowo wybranych miejscach modelu dyskretnego.

Wykorzystując symetrię względem dwóch prostopadłych płaszczyzn można było odpowiednio zagęścić siatkę elementów skończonych. Biorąc pod uwagę niewielką grubość poszczególnych warstw materiału szczególnie istotne z punktu widzenia obliczeń było zagęszczenie siatki po grubości płyty.

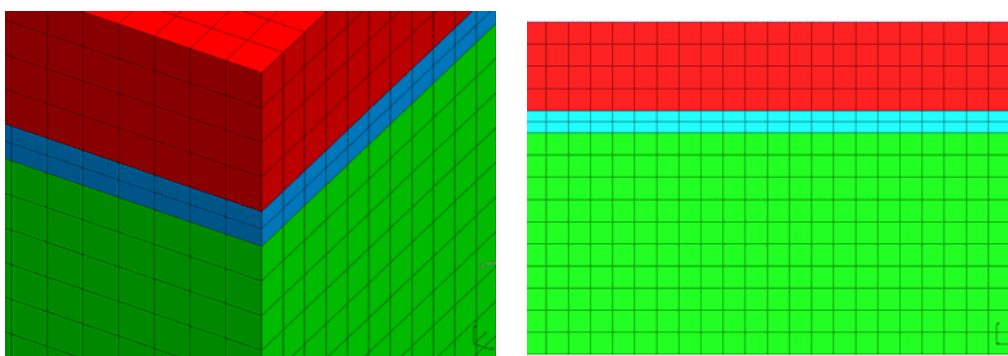
Zbudowane modele dzielą się na:

- **5 modeli z powłoką typu „duplex” bez defektów**
  - 1 model z siatką równomiernie rozłożoną – model idealny – **Model 1** (rys. 10.1 i 10.2),
  - 1 model z uwzględnieniem chropowatości w postaci rozpiętości elementów po krzywej – **Model 2** (rys. 10.3 i 10.4),
  - 3 modele z siatką z losowo wymieszanymi elementami o różnych właściwościach – **Modele 3, 4 i 5** (od rys. 10.5 do 10.14),
- **5 modeli z powłoką typu „duplex” z uwzględnionymi defektami – pęknięciami**
  - 3 model z uwzględnieniem chropowatości w postaci rozpiętości elementów po krzywej oraz wprowadzonymi pęknięciami – **Modele 6, 7 i 9** (od rys. 10.15 do 10.21 i od rys. 10.25 do 10.27),
  - 2 modele z siatką z losowo wymieszanymi elementami o różnych właściwościach – **Modele 8 i 10** (od rys. 10.22 do 10.24 oraz od 10.28 do 10.30),
- **5 modeli z powłoką 1- warstwową bez warstwy pośredniej oraz bez defektów**
  - 1 model z siatką równomiernie rozłożoną – model idealny – **Model 11** (rys. 10.31 do 10.32),
  - 1 model z uwzględnieniem chropowatości w postaci rozpiętości elementów po krzywej – **Modele 12** (rys. 10.33 i 10.34),
  - 3 modele z siatką z losowo wymieszanymi elementami o różnych właściwościach – **Modele 13, 14 i 15** (od rys. 10.35 do 10.40),
- **5 modeli z powłoką 1- warstwową bez warstwy pośredniej z uwzględnionymi defektami – pęknięciami**
  - 3 model z uwzględnieniem chropowatości w postaci rozpiętości elementów po krzywej oraz wprowadzonymi pęknięciami – **Modele 16, 17 i 19** (od rys. 10.41 do 10.45 oraz rys. 10.49 i 10.50),
  - 2 modele z siatką z losowo wymieszanymi elementami o różnych właściwościach – **Modele 18 i 20** ( od rys. 10.46 do 10.48 oraz od rys. 10.51 do 10.53),

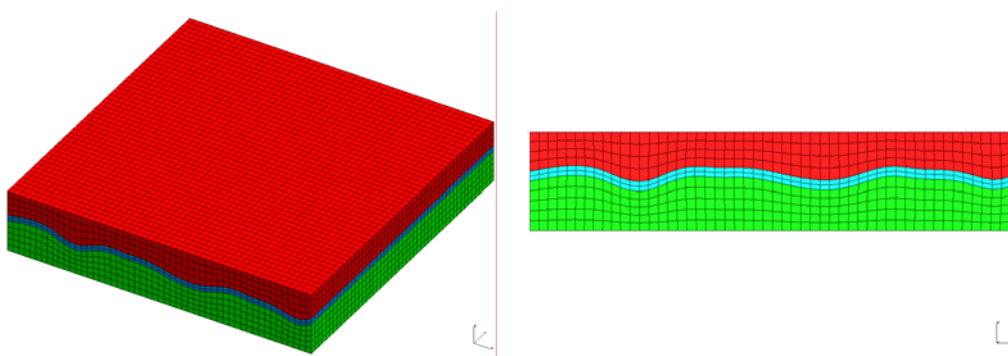


**MODEL 1 – powłoka typu „duplex”**

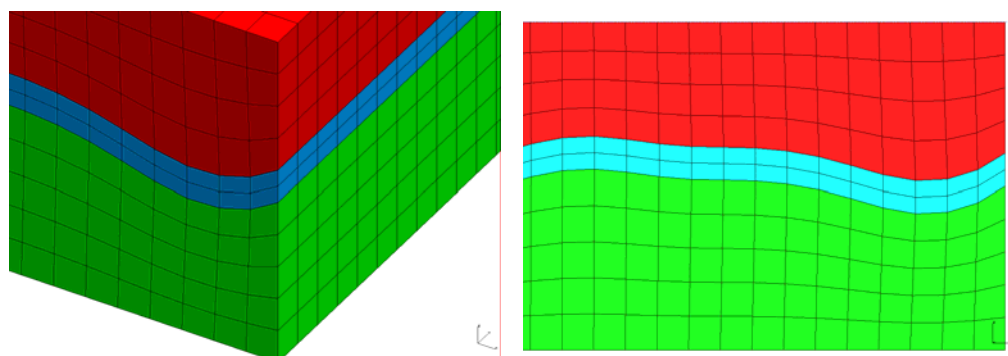
Rys. 10.1. Model dyskretny nr 1 – siatka MES widok ogólny



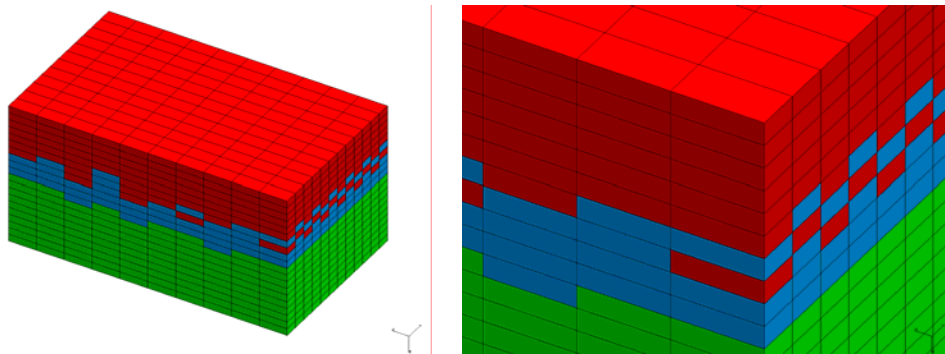
Rys. 10.2. Model dyskretny nr 1 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 2 – powłoka typu „duplex”**

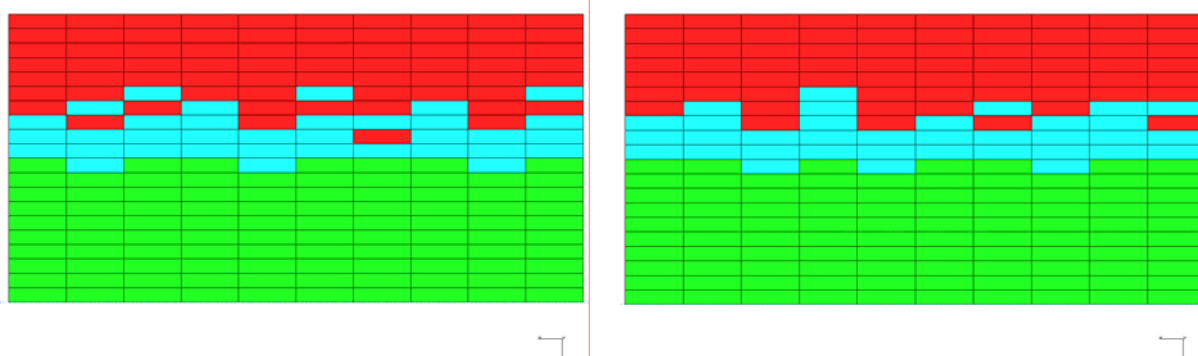
Rys. 10.3. Model dyskretny nr 2 – siatka MES widok ogólny



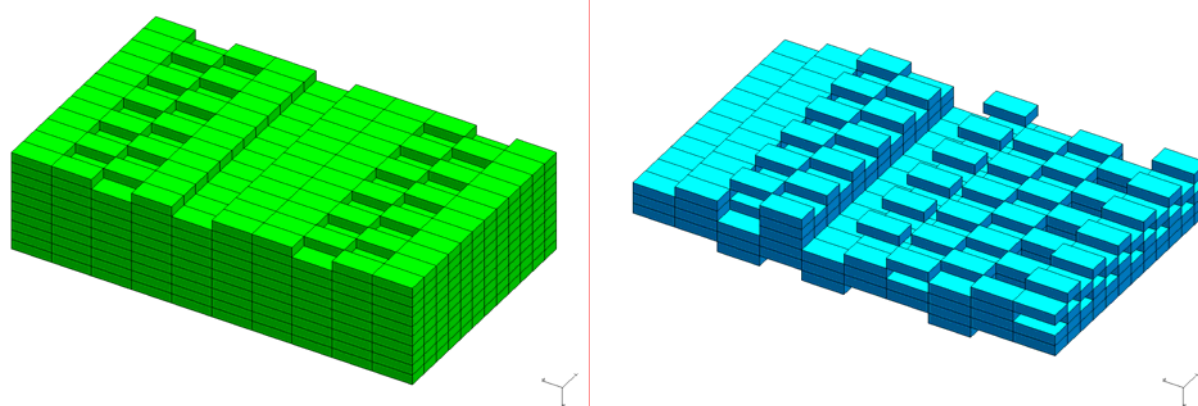
Rys. 10.4. Model dyskretny nr 2 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 3 – powłoka typu „duplex”**

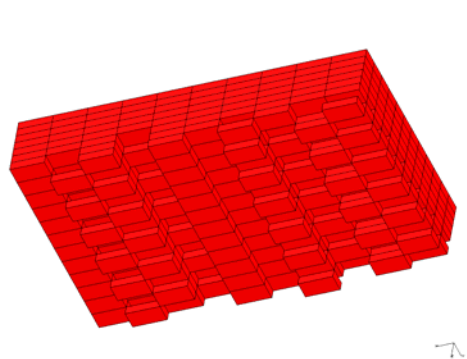
Rys. 10.5. Model dyskretny nr 3 – siatka MES widok ogólny



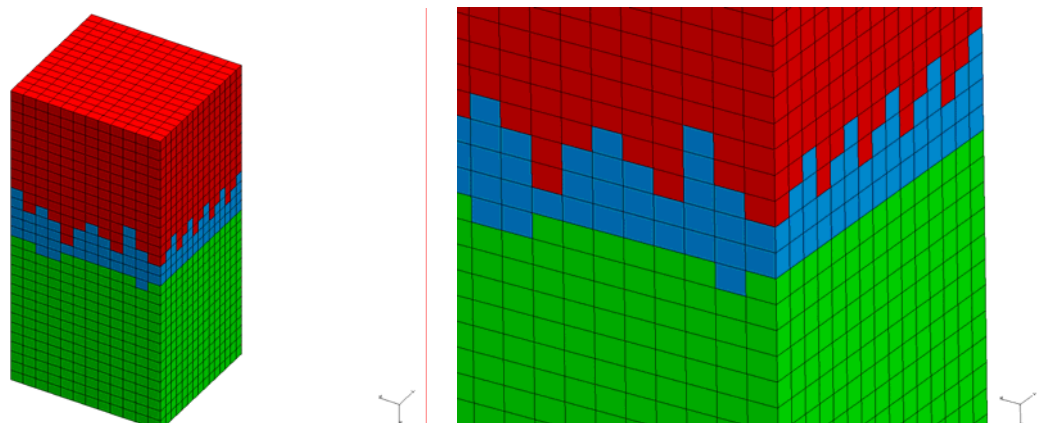
Rys. 10.6. Model dyskretny nr 3 – siatka MES widok szczegółowy



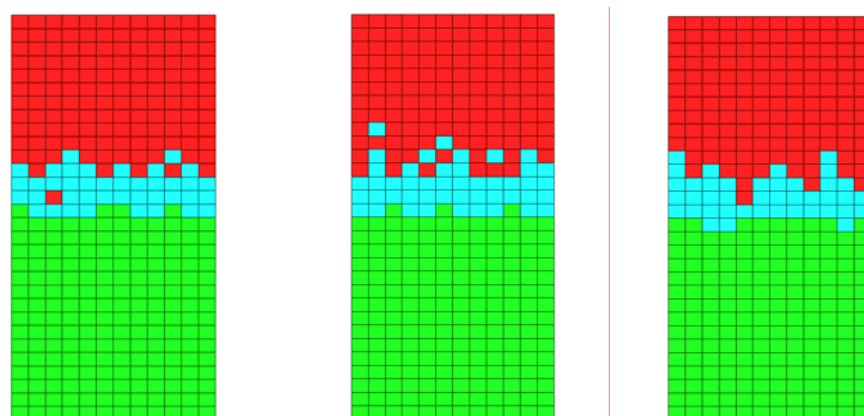
Rys. 10.7. Model dyskretny nr 3 – siatka MES widok ogólny



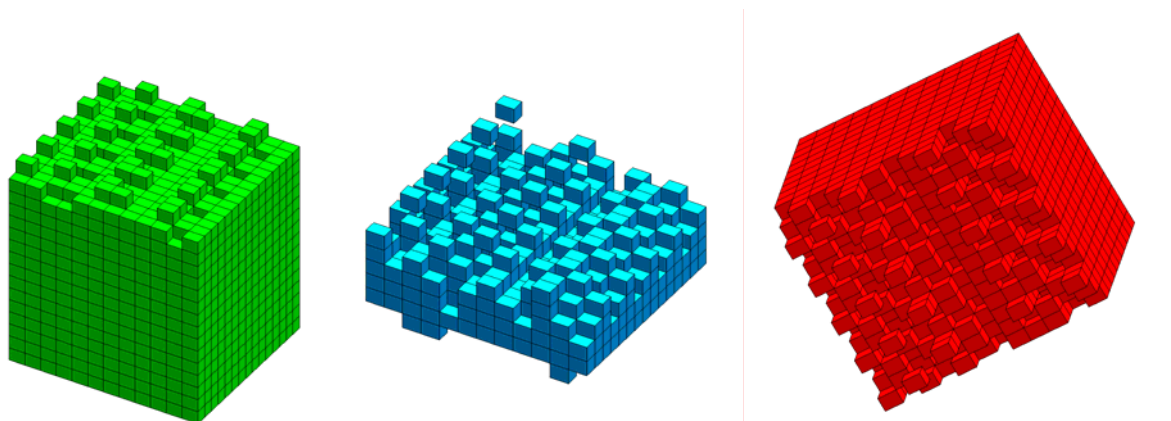
Rys. 10.8. Model dyskretny nr 3 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 4 – powłoka typu „duplex”**

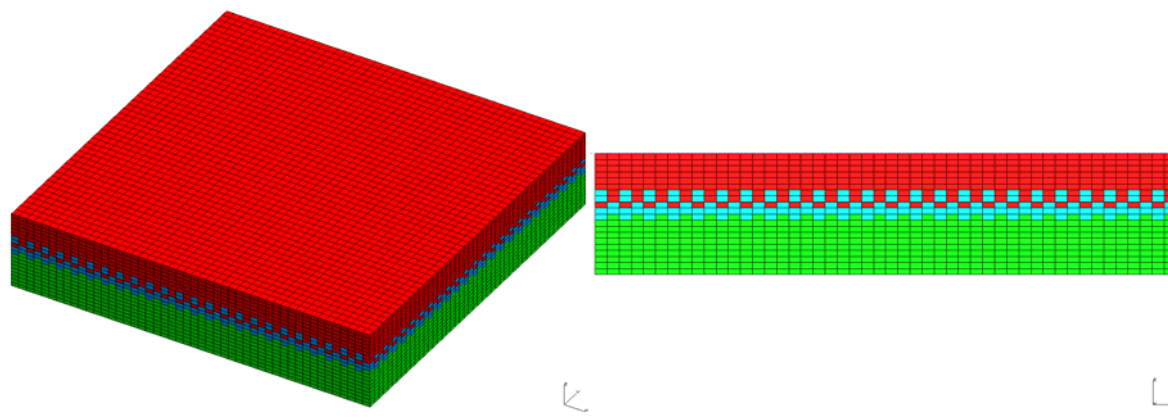
Rys. 10.9. Model dyskretny nr 4 – siatka MES widok ogólny



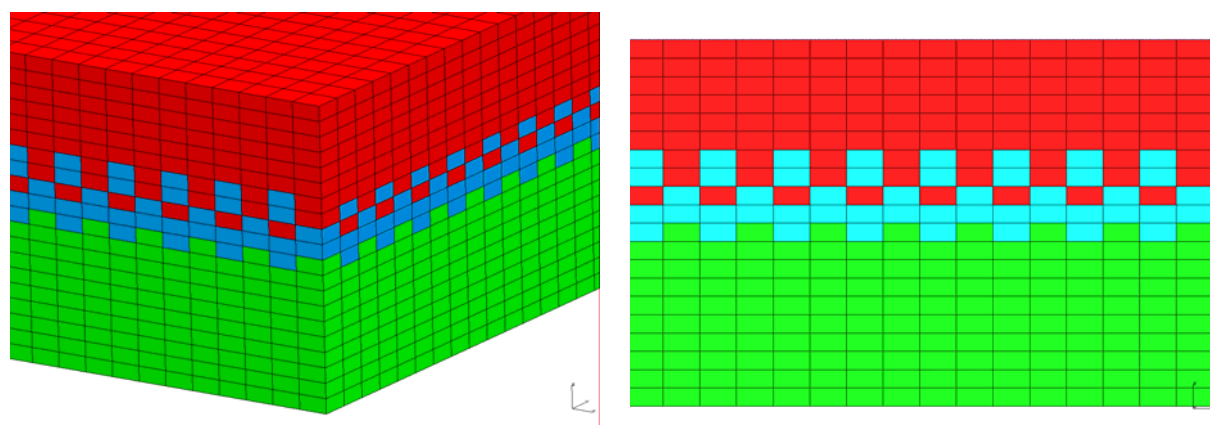
Rys. 10.10. Model dyskretny nr 4 – siatka MES widok szczegółowy



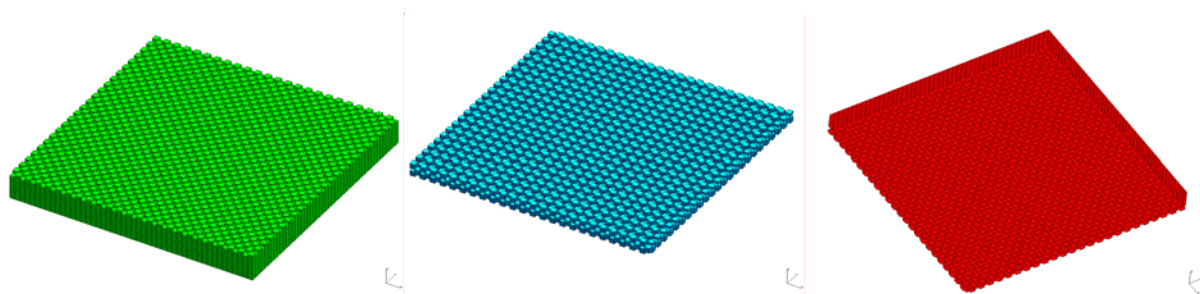
Rys. 10.11. Model dyskretny nr 4 – siatka MES widok ogólny

**MODEL 5 – powłoka typu „duplex”**

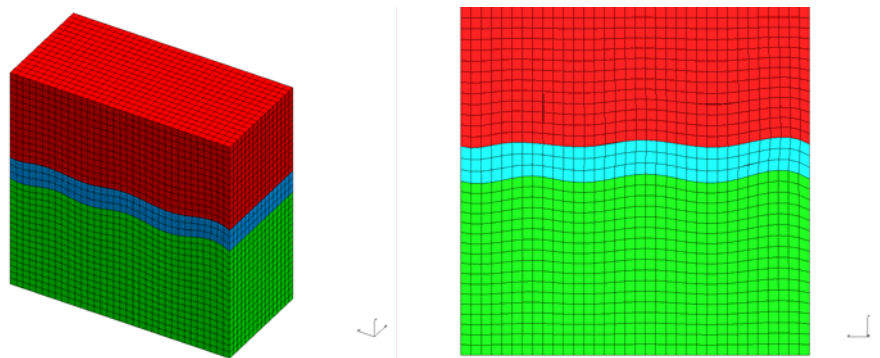
Rys. 10.12. Model dyskretny nr 5 – siatka MES widok ogólny



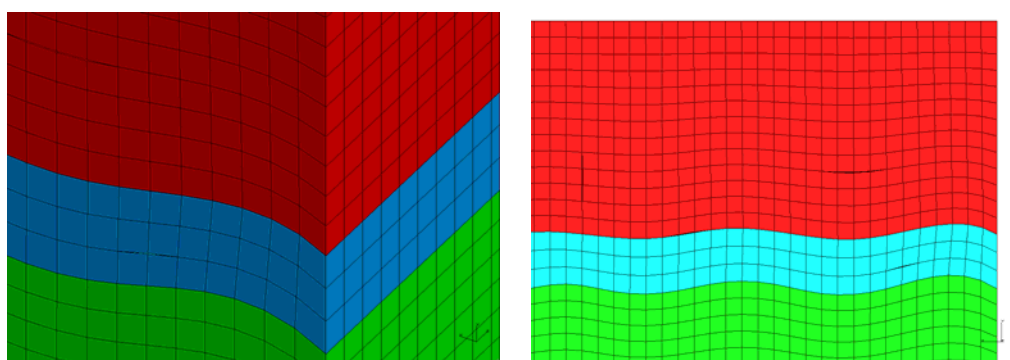
Rys. 10.13. Model dyskretny nr 5 – siatka MES widok szczegółowy



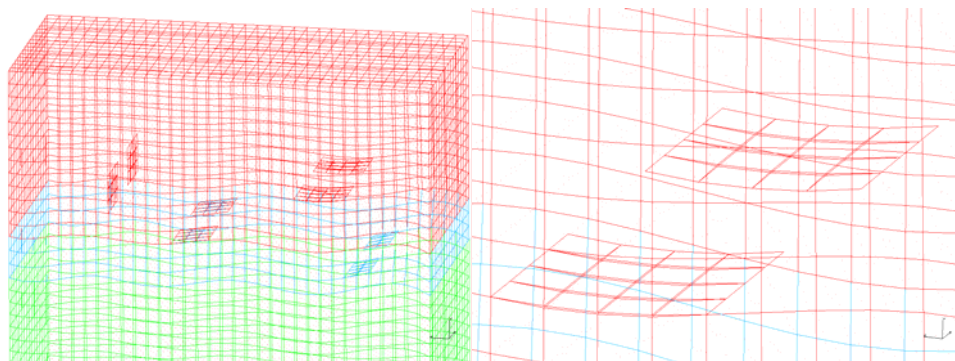
Rys. 10.14. Model dyskretny nr 5 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 6 – powłoka typu „duplex” z defektami (wprowadzone pęknięcia)**

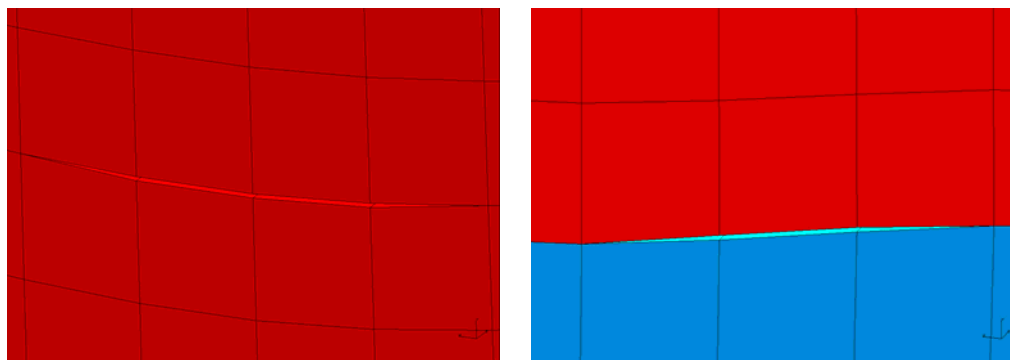
Rys. 10.15. Model dyskretny nr 6 – siatka MES widok ogólny



Rys. 10.16. Model dyskretny nr 6 – siatka MES widok szczegółowy

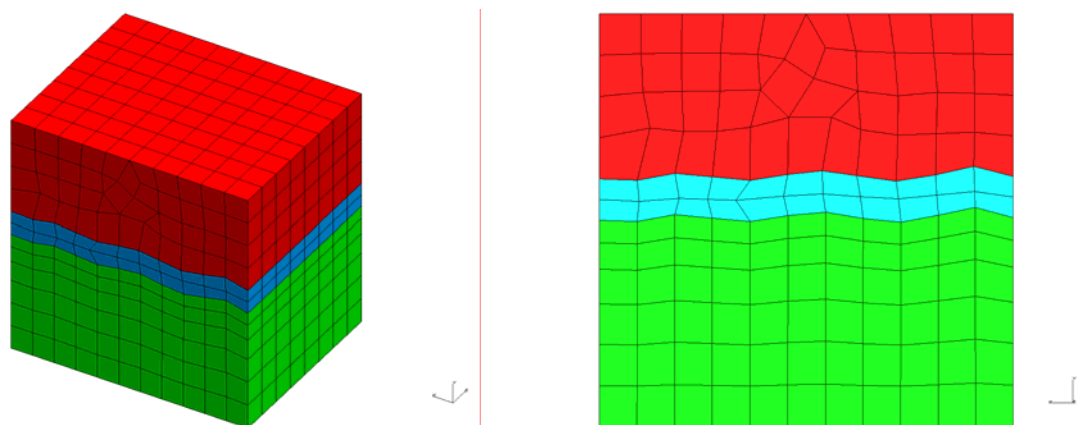


Rys. 10.17. Model dyskretny nr 6 – siatka MES widok szczegółowy

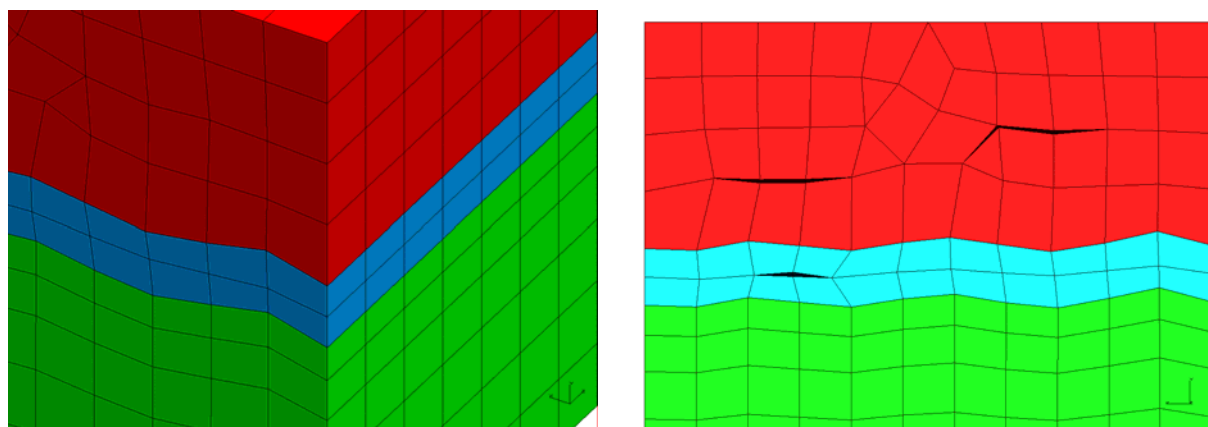


Rys. 10.18. Model dyskretny nr 6 – siatka MES widok ogólny

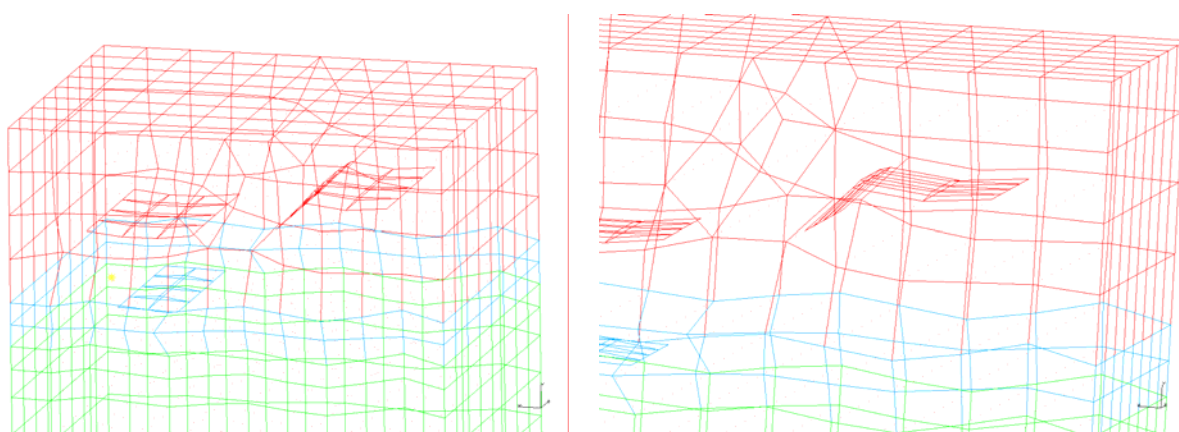
**MODEL 7 – powłoka typu „duplex” z defektami (wprowadzone pęknięcia)**



Rys. 10.19. Model dyskretny nr 7 – siatka MES widok ogólny

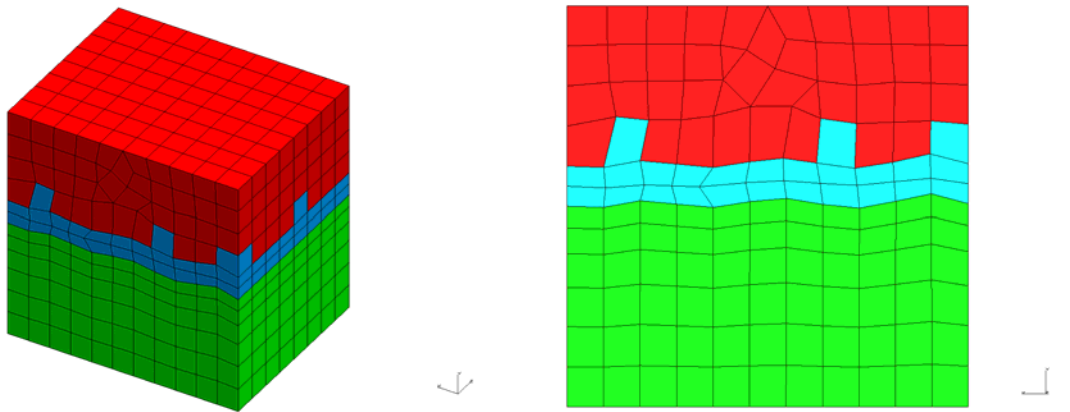


Rys. 10.20. Model dyskretny nr 7 – siatka MES widok szczegółowy

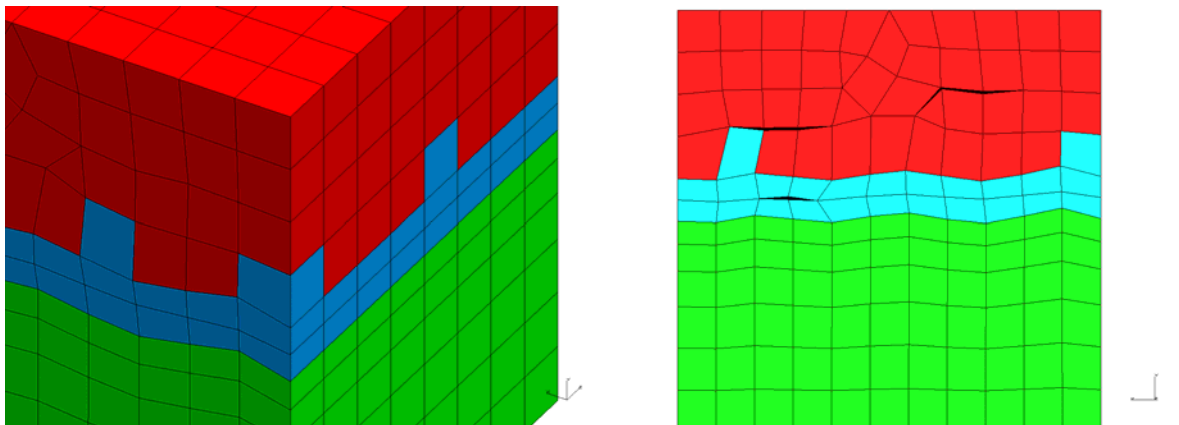


Rys. 10.21. Model dyskretny nr 7 – siatka MES widok ogólny

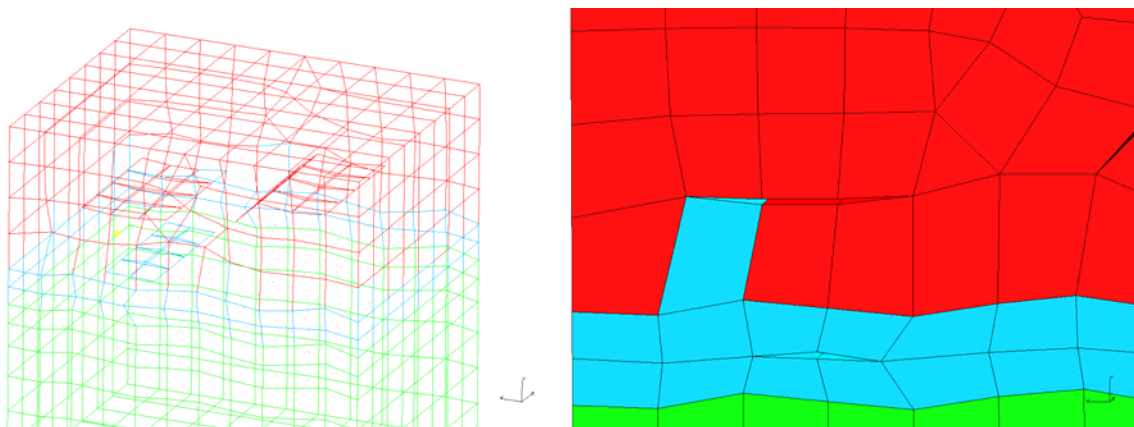


**MODEL 8 – powłoka typu „duplex” z defektami (wprowadzone pęknięcia)**

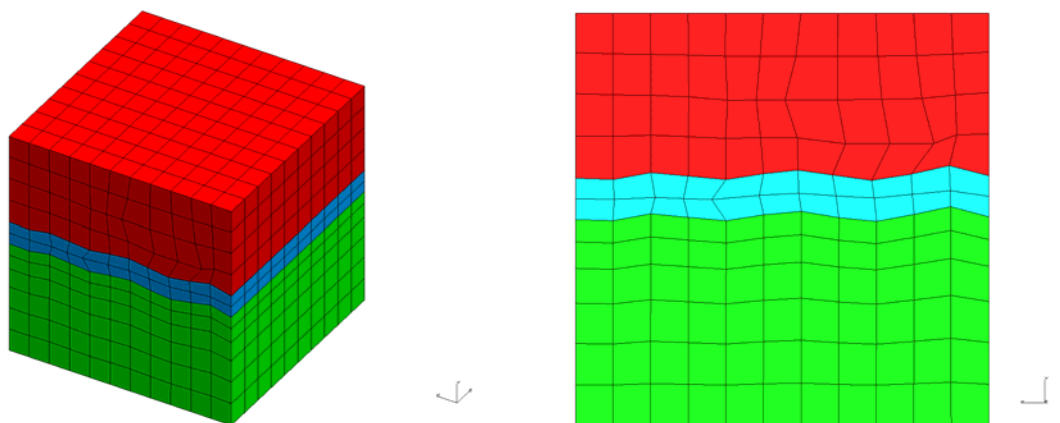
Rys. 10.22. Model dyskretny nr 8 – siatka MES widok szczegółowy



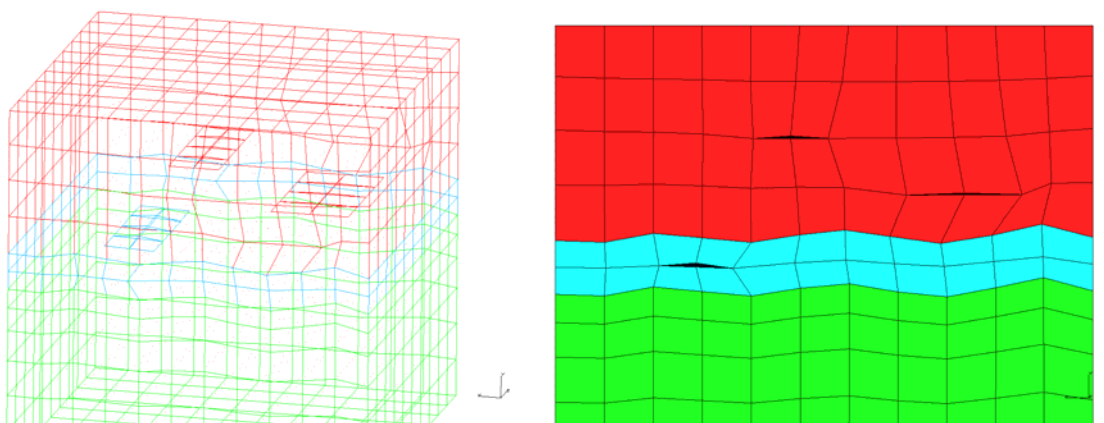
Rys. 10.23. Model dyskretny nr 8 – siatka MES widok ogólny



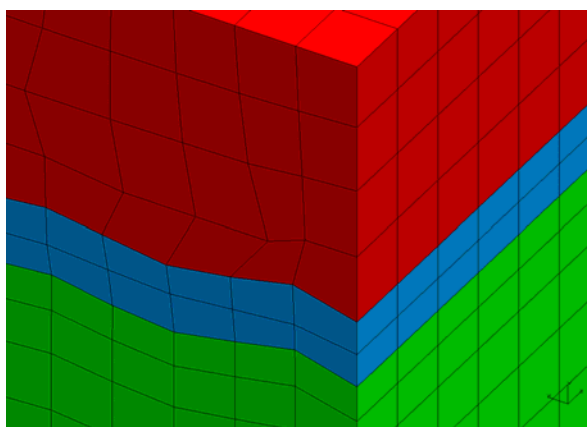
Rys. 10.24. Model dyskretny nr 8 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 9 – powłoka typu „duplex” z defektami (wprowadzone pęknięcia)**

Rys. 10.25. Model dyskretny nr 9 – siatka MES widok szczegółowy

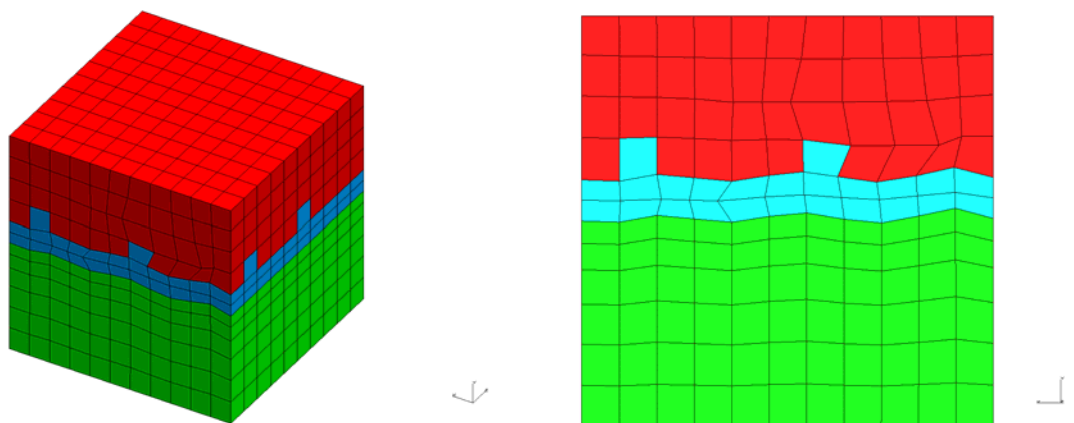


Rys. 10.26. Model dyskretny nr 9 – siatka MES widok szczegółowy

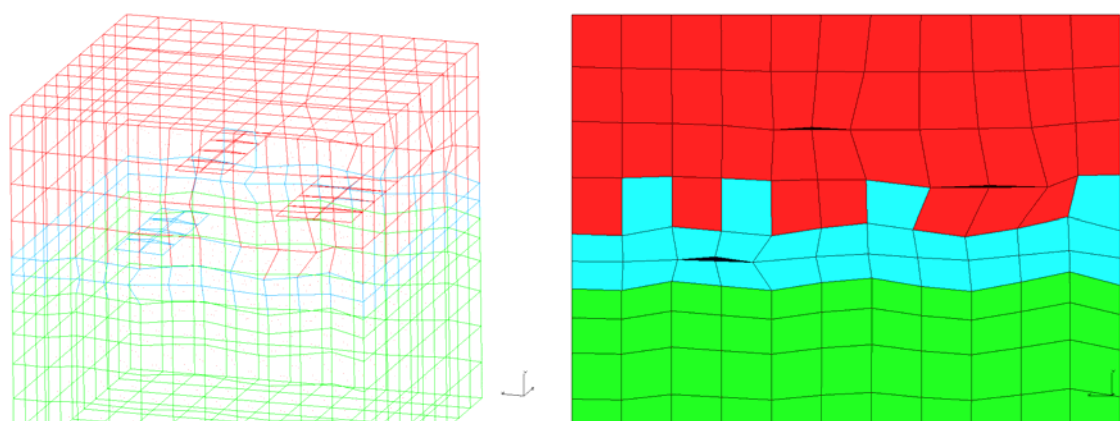


Rys. 10.27. Model dyskretny nr 9 – siatka MES widok ogólny

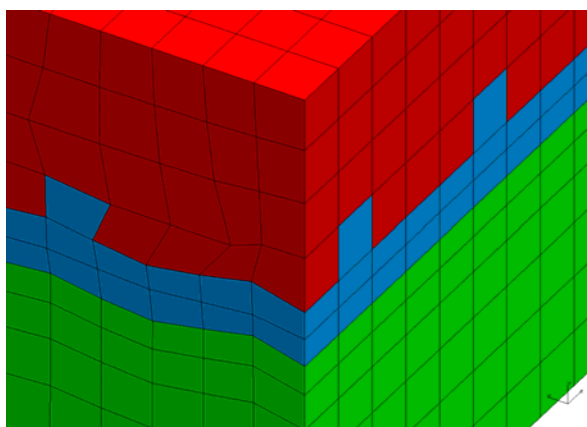


**MODEL 10 – powłoka typu „duplex” z defektami (wprowadzone pęknięcia)**

Rys. 10.28. Model dyskretny nr 10 – siatka MES widok ogólny

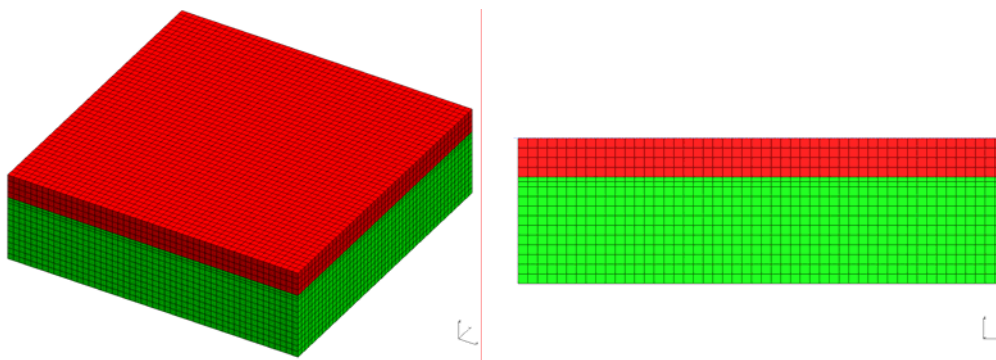


Rys. 10.29. Model dyskretny nr 10 – siatka MES widok szczegółowy

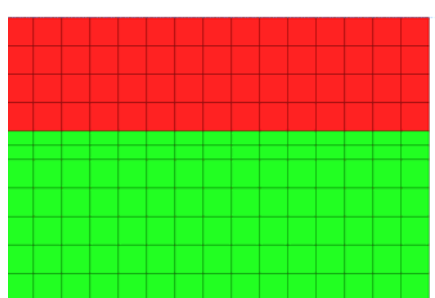


Rys. 10.30. Model dyskretny nr 10 – siatka MES widok szczegółowy

### MODEL 11 – powłoka 1-warstwowa

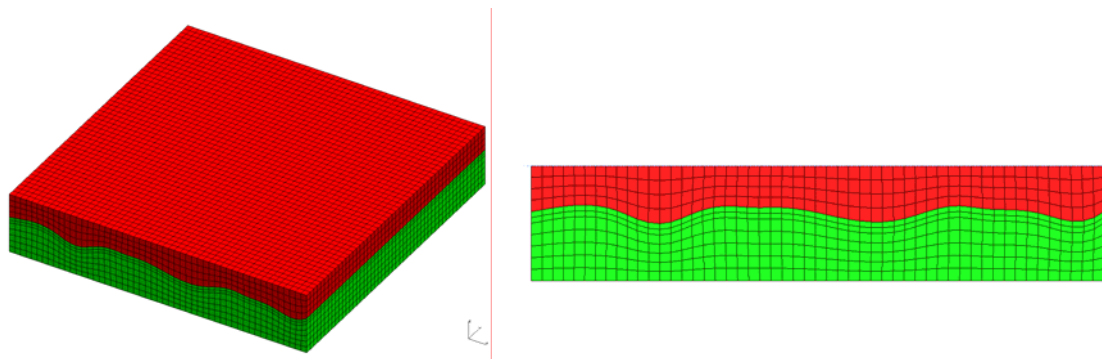


Rys. 10.31. Model dyskretny nr 11 – siatka MES widok ogólny

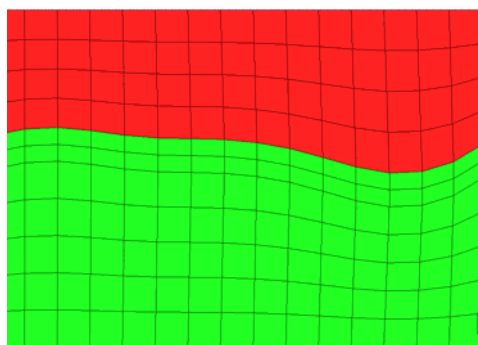


Rys. 10.32. Model dyskretny nr 11 – siatka MES widok szczegółowy

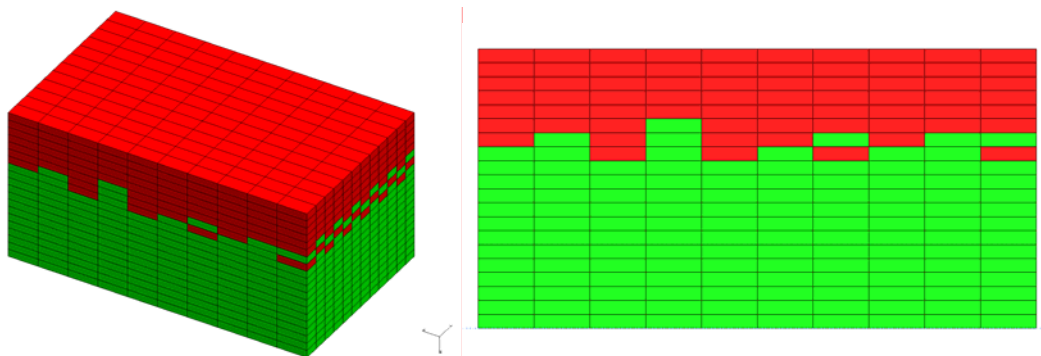
### MODEL 12 – powłoka 1-warstwowa



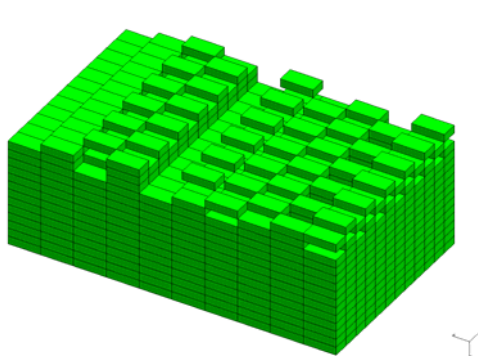
Rys. 10.33. Model dyskretny nr 12 – siatka MES widok ogólny



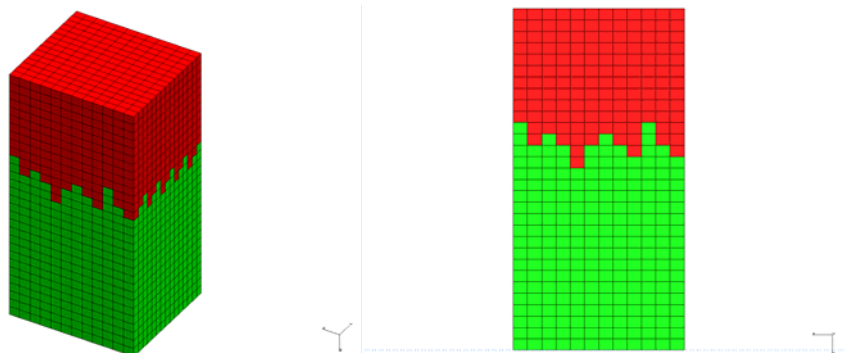
Rys. 10.34. Model dyskretny nr 12 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 13 – powłoka 1-warstwowa**

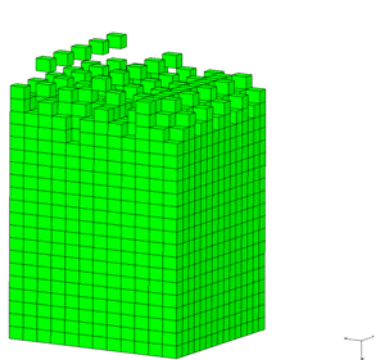
Rys. 10.35. Model dyskretny nr 13 – siatka MES widok ogólny



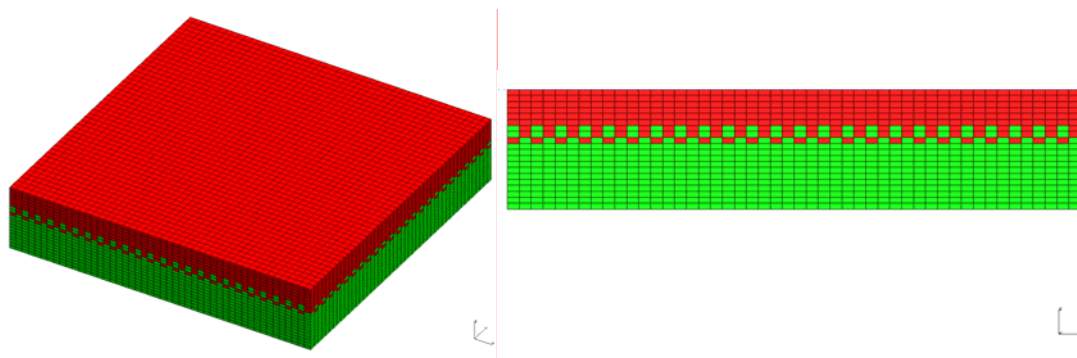
Rys. 10.36. Model dyskretny nr 13 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 14 – powłoka 1-warstwowa**

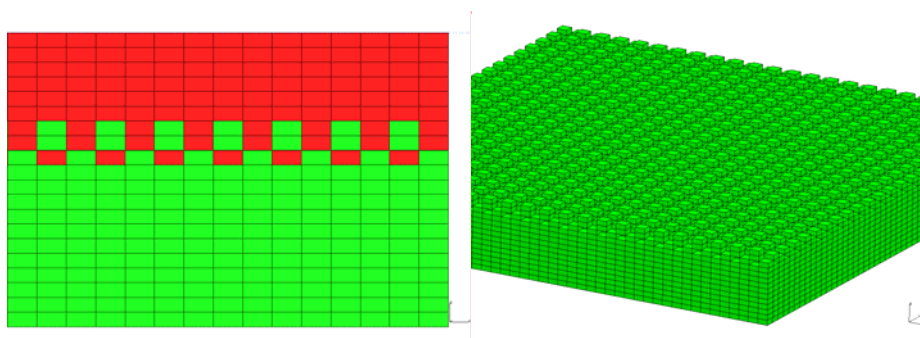
Rys. 10.37. Model dyskretny nr 14 – siatka MES widok ogólny



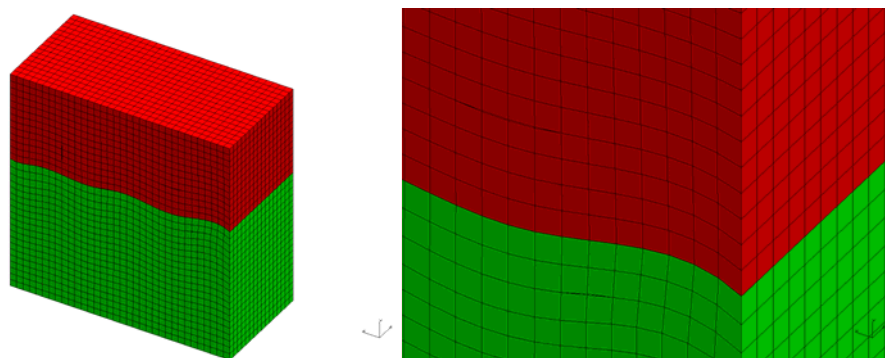
Rys. 10.38. Model dyskretny nr 14 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 15 – powłoka 1-warstwowa**

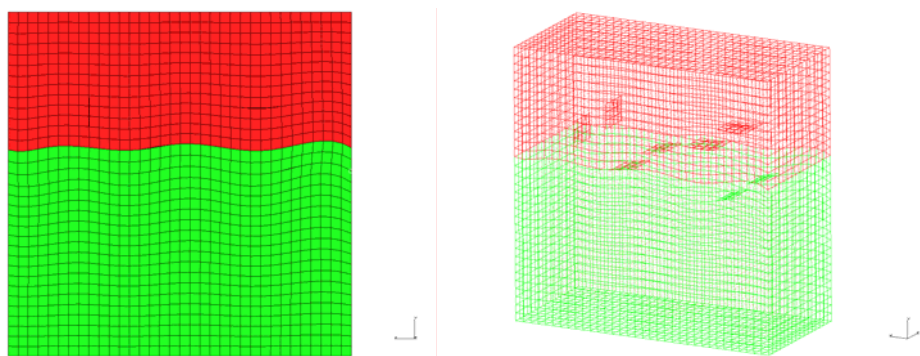
Rys. 10.39. Model dyskretny nr 15 – siatka MES widok szczegółowy



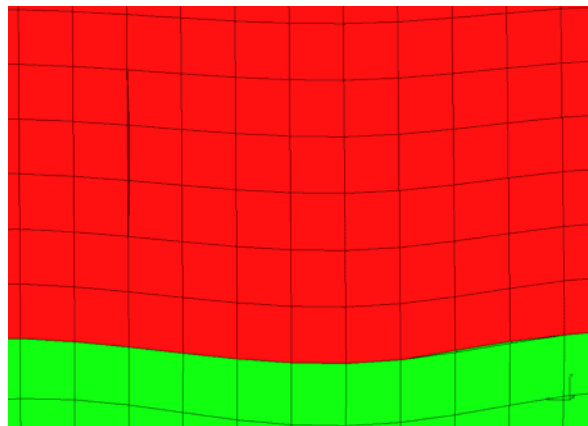
Rys. 10.40. Model dyskretny nr 15 – siatka MES widok ogólny

**MODEL 16 – powłoka 1-warstwowa z defektami (wprowadzone pęknięcia)**

Rys. 10.41. Model dyskretny nr 16 – siatka MES widok ogólny

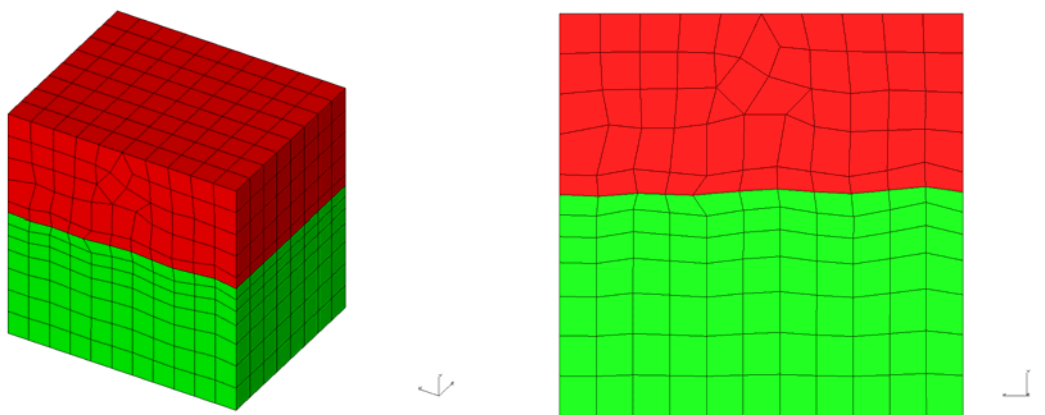


Rys. 10.42. Model dyskretny nr 16 – siatka MES widok szczegółowy

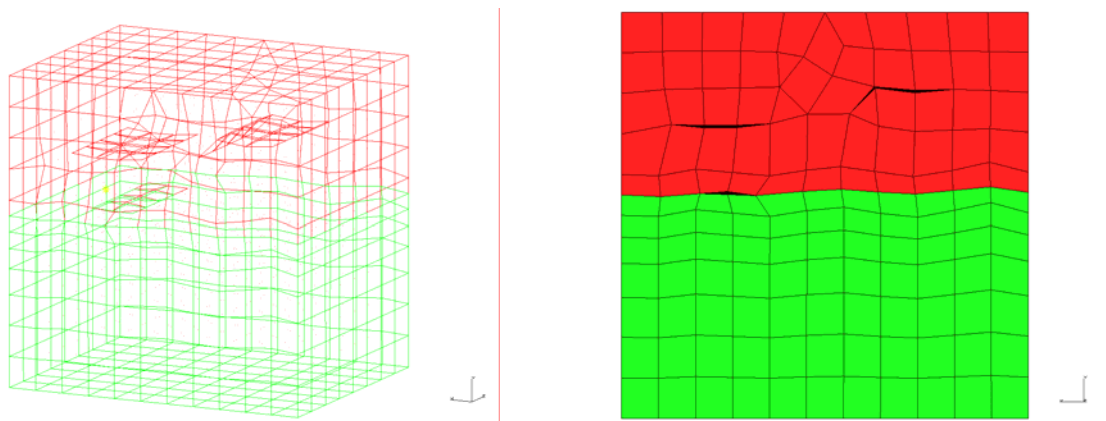


Rys. 10.43. Model dyskretny nr 16 – siatka MES widok szczegółowy

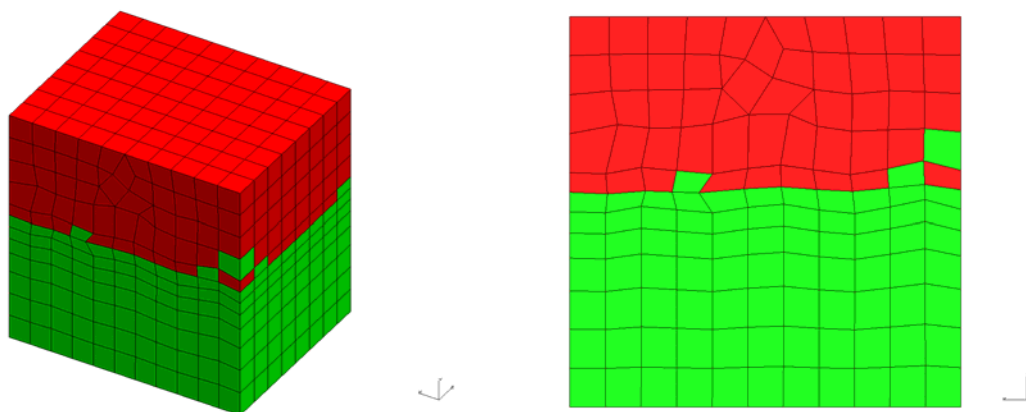
**MODEL 17 – powłoka 1-warstwowa z defektami (wprowadzone pęknięcia)**



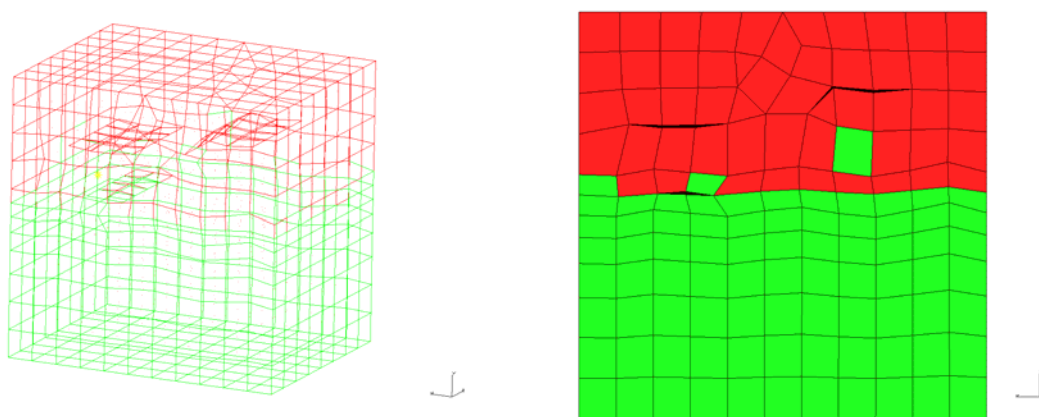
Rys. 10.44. Model dyskretny nr 17 – siatka MES widok ogólny



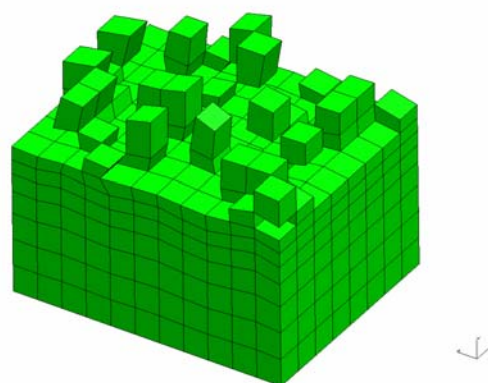
Rys. 10.45. Model dyskretny nr 17 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 18 – powłoka 1-warstwowa z defektami (wprowadzone pęknięcia)**

Rys. 10.46. Model dyskretny nr 18 – siatka MES widok szczegółowy

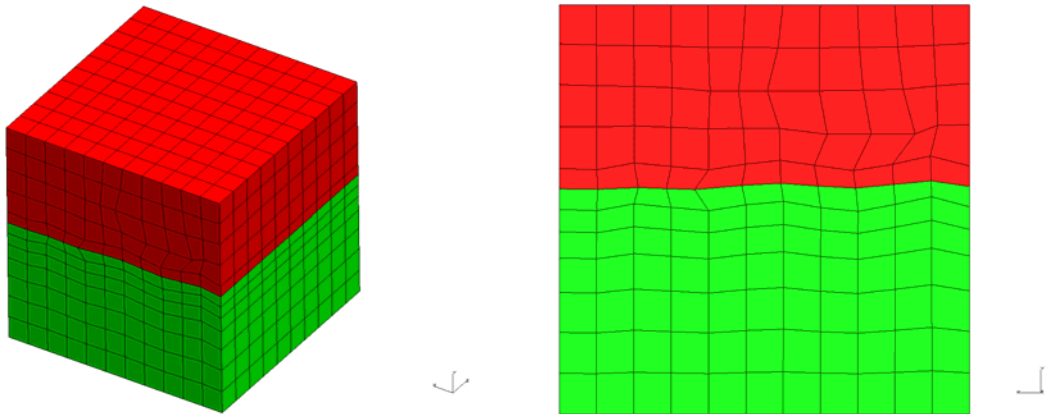


Rys. 10.47. Model dyskretny nr 18 – siatka MES widok ogólny

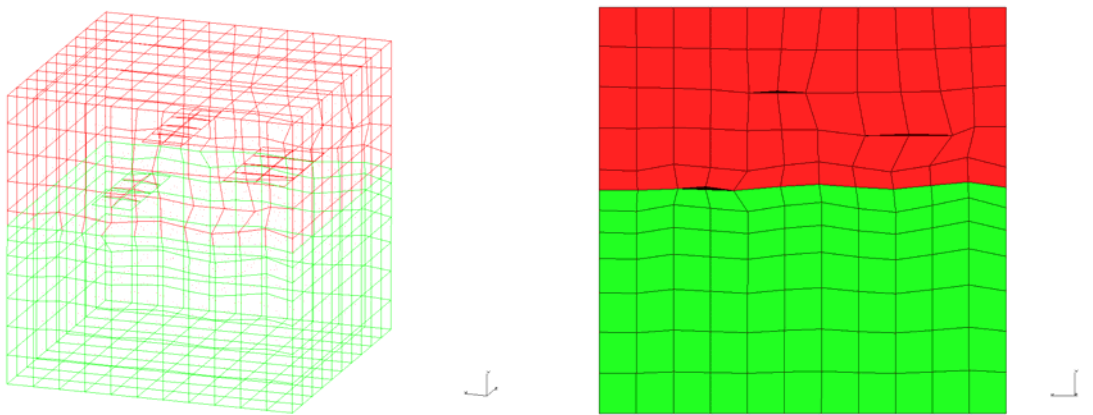


Rys. 10.48. Model dyskretny nr 18 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 19 – powłoka 1-warstwowa z defektami (wprowadzone pęknięcia)**

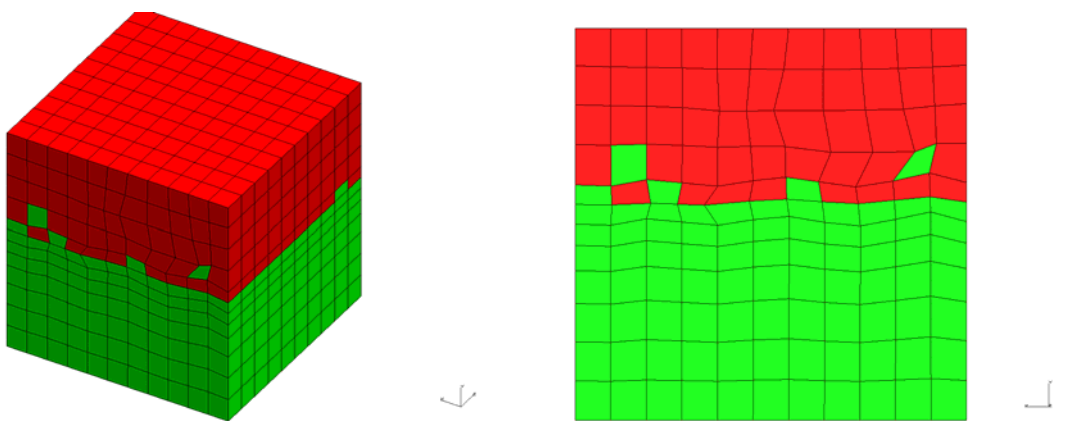


Rys. 10.49. Model dyskretny nr 19 – siatka MES widok szczegółowy



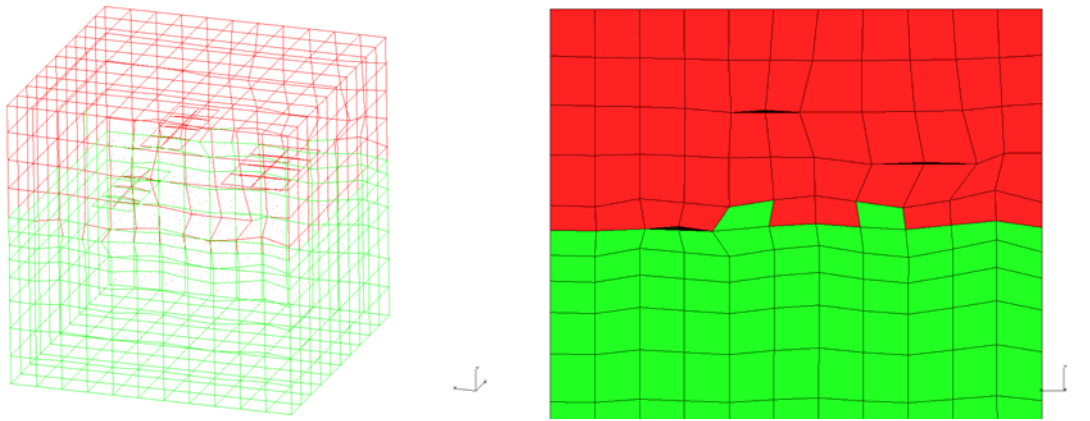
Rys. 10.50. Model dyskretny nr 19 – siatka MES widok szczegółowy

**MODEL 20 – powłoka 1-warstwowa z defektami (wprowadzone pęknięcia)**

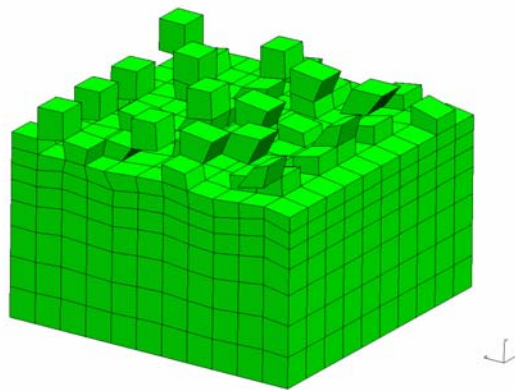


Rys. 10.51. Model dyskretny nr 20 – siatka MES widok ogólny





Rys. 10.52. Model dyskretny nr 20 – siatka MES widok szczegółowy



Rys. 10.53. Model dyskretny nr 20 – siatka MES widok szczegółowy



## 10.2. Charakterystyka materiałów powłoki TBC

Na przedstawionych modelach przeprowadzono analizę dla materiałów o właściwościach zależnych od temperatury. Charakterystyki materiałowe przyjęto z danych z przeprowadzonych badań z prac [26], [41], [58], [79] i [82].

### 10.2.1. Charakterystyka podłoża – Stopu Aluminium AA 1100

Materiałem użytym na podłożę był stop aluminium AA 1100 o właściwościach materiałowych podanych w tabeli 10.1.

Tabela 10.1. Właściwości materiału podłoża przyjęte do analizy [40], [58] i [79]

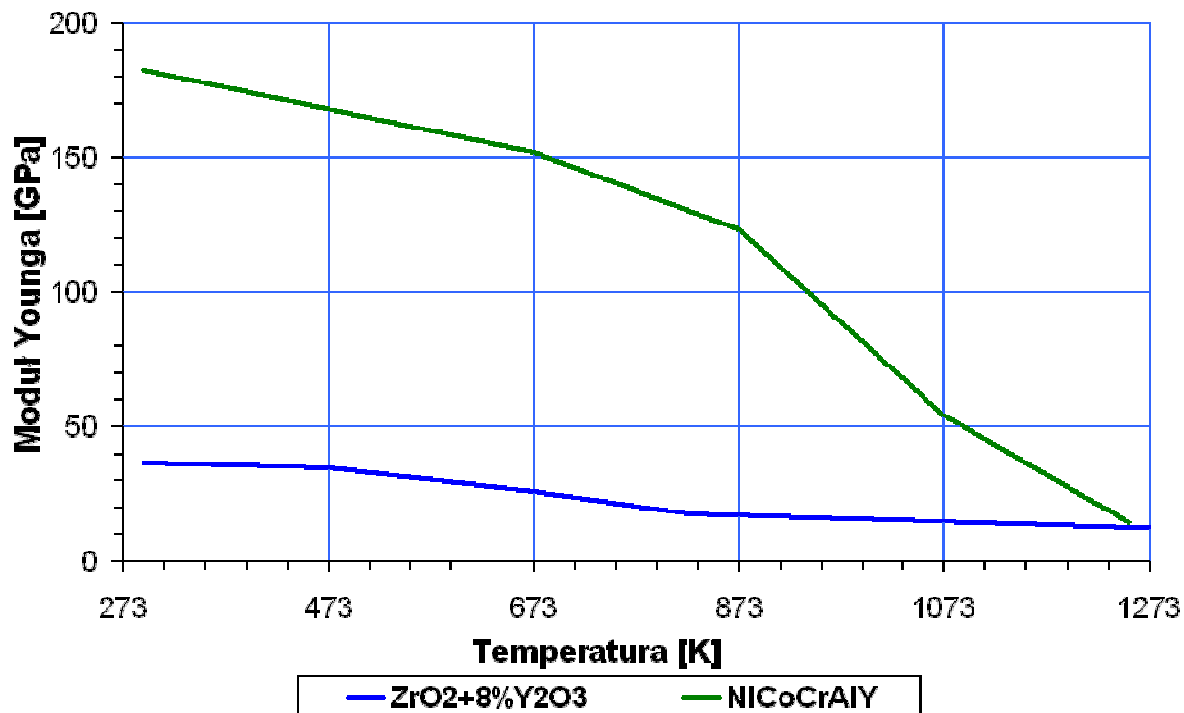
Materiał	Moduł Younga $E$ [GPa]	Współczynnik Poissona $\nu$	Ciepło właściwe $C$ [J/kg K]	Gęstość $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Przewodność cieplna $\lambda$ [W/m K]	Rozszerzalność cieplna $\alpha$ [10 <sup>-6</sup> /K]
Podłożę Stop Al	68,9	0,33	921	2715	221,5	23,6

### 10.2.2. Charakterystyki warstw – BC i TBC

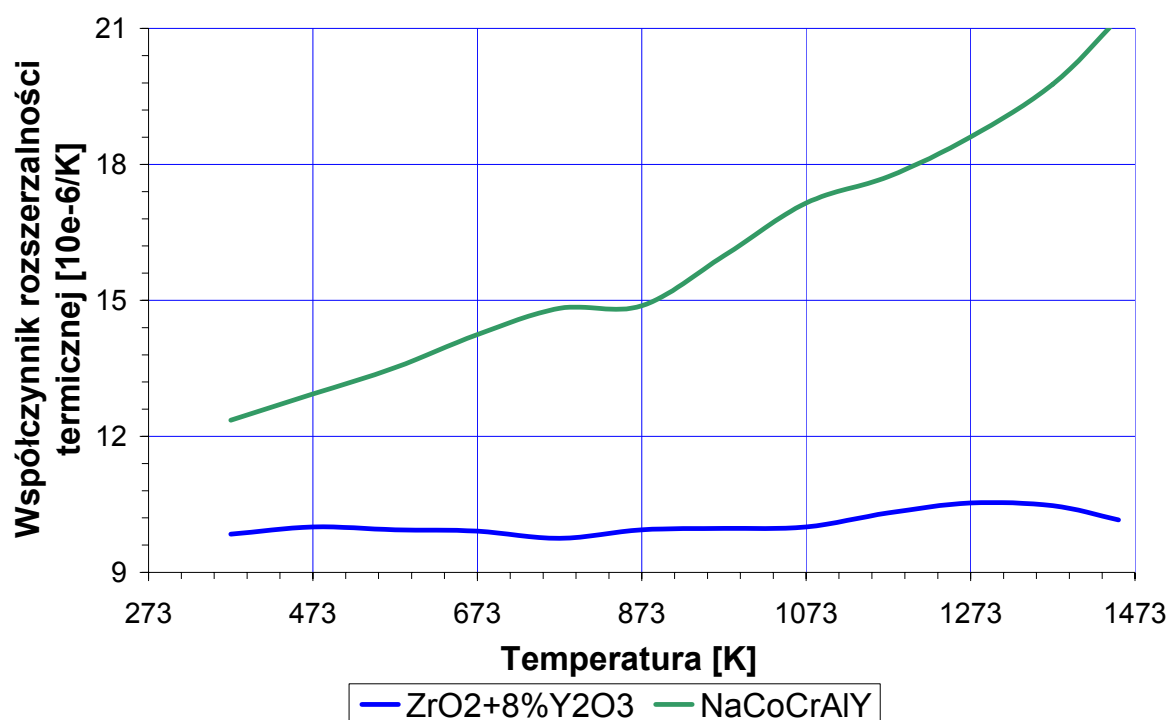
Dla warstw podkładowej NiCoCrAlY oraz warstwy wierzchniej ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> przyjęto materiał o właściwościach zależnych od temperatury. Na rysunkach od 10.54 do 10.57 w postaci wykresów przedstawiono główne właściwości materiałów warstw BC i TBC oraz w tabeli 10.2 przedstawiono pozostałe własności nie zmienne w temperaturze.

Tabela 10.2. Właściwości powłoki warstw BC oraz TBC nie zależne od temperatury

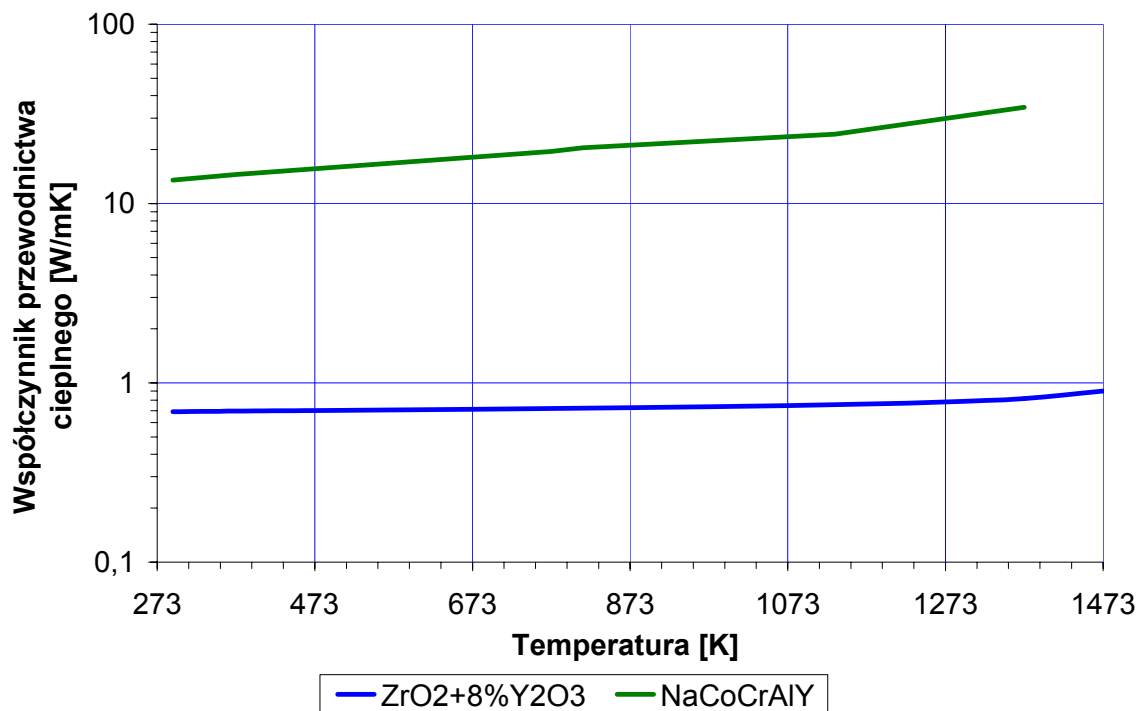
Materiał	Współczynnik Poissona $\nu$	Gęstość $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Powłoka ceramiczna ZrO <sub>2</sub> - 7Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	6037
Powłoka wiążąca NiCoCrAlY	0,3	7320



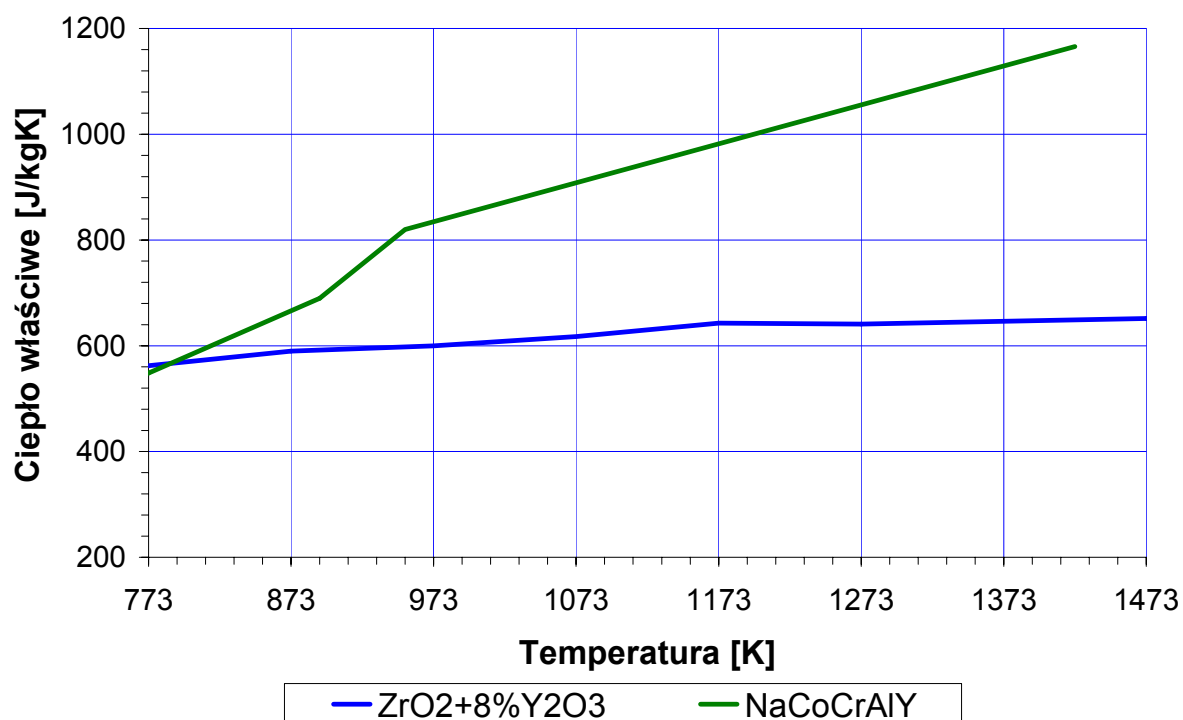
Rys. 10.54. Wykres zależności modułu Younga od temperatury dla TBC oraz BC



Rys. 10.55. Wykres zależności rozszerzalności termicznej od temperatury dla TBC oraz BC



Rys. 10.56. Wykres zależności przewodnictwa cieplnego od temperatury dla TBC oraz BC



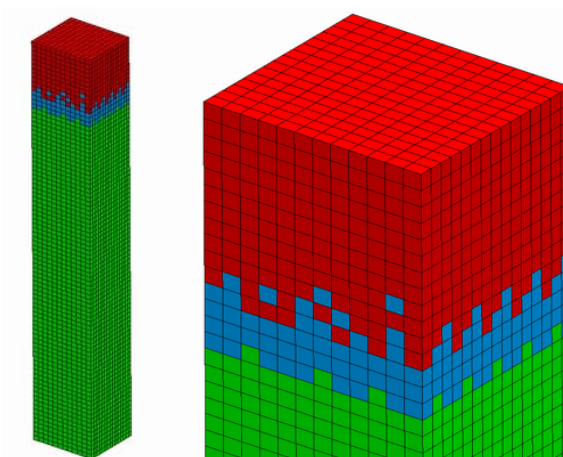
Rys. 10.57. Wykres zależności ciepła właściwego od temperatury dla TBC oraz BC

### 10.3. Wyznaczanie przestrzennego pola temperatury

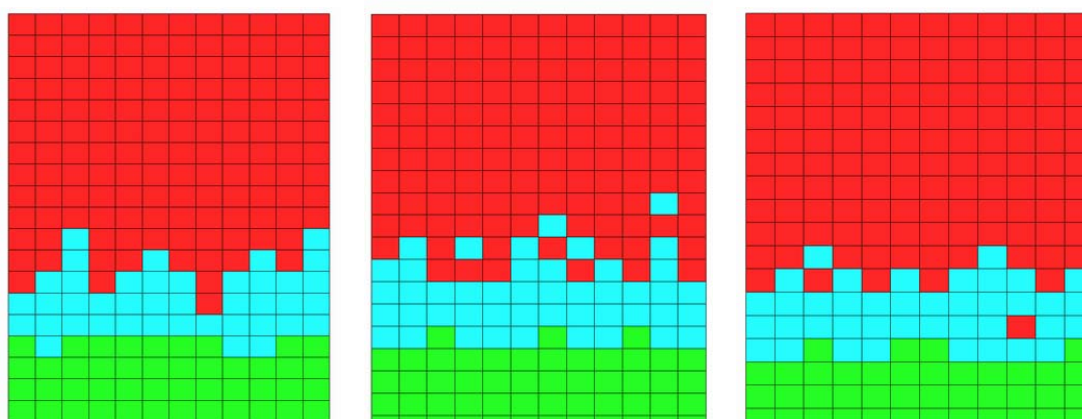
#### – analiza termiczna

W pracy przedstawiono sposób oraz wyniki wyznaczania na drodze symulacji przestrzennego pola temperatury dla wybranego rodzaju próbki. W tym przypadku była to próbka z powłoką typu „duplex” o grubości warstwy wierzchniej 400 $\mu\text{m}$  oraz grubości warstwy relaksacyjnej 100 $\mu\text{m}$ . Do symulacji wybrany został model nr 4 z losowym mieszanym siatki odwzorowującym mieszanie się materiałów o różnych właściwościach.

Na rysunkach 10.58 i 10.59 przedstawiono widok ogólny modelu dyskretnego nr 4 oraz widoki na losowe rozmieszczenie elementów w różnych płaszczyznach elementów.



Rys. 10.58. Model dyskretny nr 4 próbki typu „duplex”

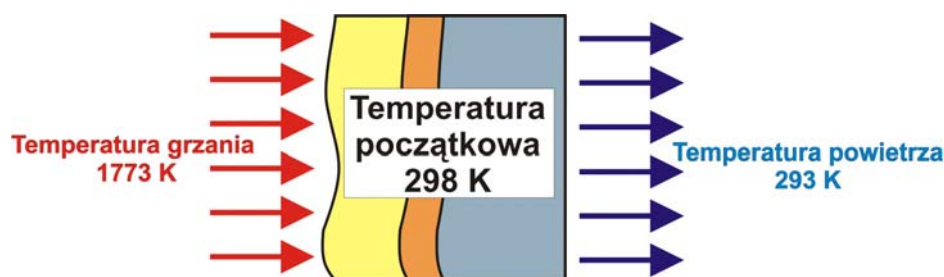


Rys. 10.59. Widok na losowe rozmieszczenie elementów o różnych właściwościach materiałowych

Tak zbudowany model dyskretny został poddany dalszej analizie numerycznej z wykorzystaniem metody elementów skończonych

### 10.3.1. Warunki brzegowe

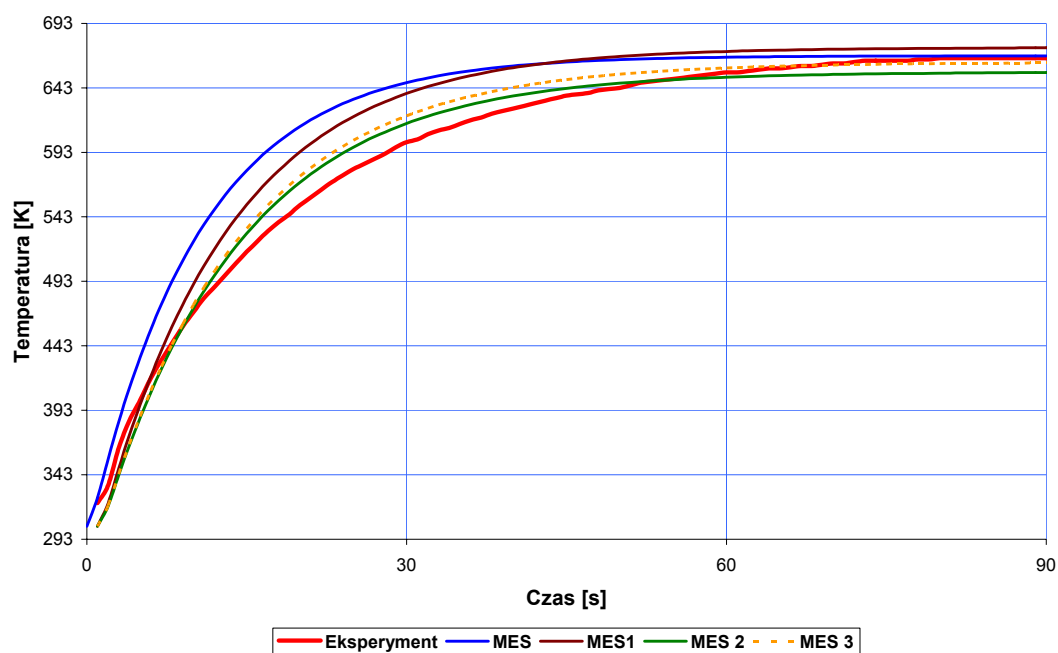
Próbkę w analizie termicznej przy użyciu numerycznej metody obliczeń MES poddano nagrzewaniu o różnych parametrach. Opisana poniżej analiza przedstawia wyniki dla wybranego procesu nagrzewania w czasie 30s odpowiadającemu w procesie dostrajania modelu etapowi grzania w badaniach eksperymentalnych. Badana próbka, była od strony powłoki TBC nagrzewana poprzez dostarczanie ciepła do powierzchni oraz w sposób ciągły nieustannie chłodzona od strony podłoża poprzez odbieranie ciepła od powierzchni. Na rysunku 10.60 pokazano schematycznie warunki analizy termicznej przeprowadzonej na wybranym modelu.



Rys. 10.60. Schemat przedstawiający warunki grzania próbki – analiza termiczna

Dostrajanie modelu, porównywanie wyników z badaniami eksperymentalnymi pozwoliło na odwzorowanie rzeczywistych warunków w symulacji komputerowej.

Na rysunku. 10.61 przedstawiono kolejne kroki procesu dostrajania modelu numerycznego w celu uzyskania zbieżności z wynikami z eksperymentu.

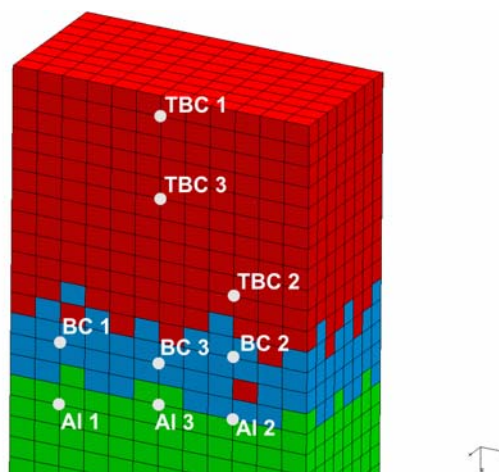


Rys. 10.61. Dostrajanie modelu MES do eksperymentu – kolejne kroki dostrajania

### 10.3.2. Wyniki analizy termicznej

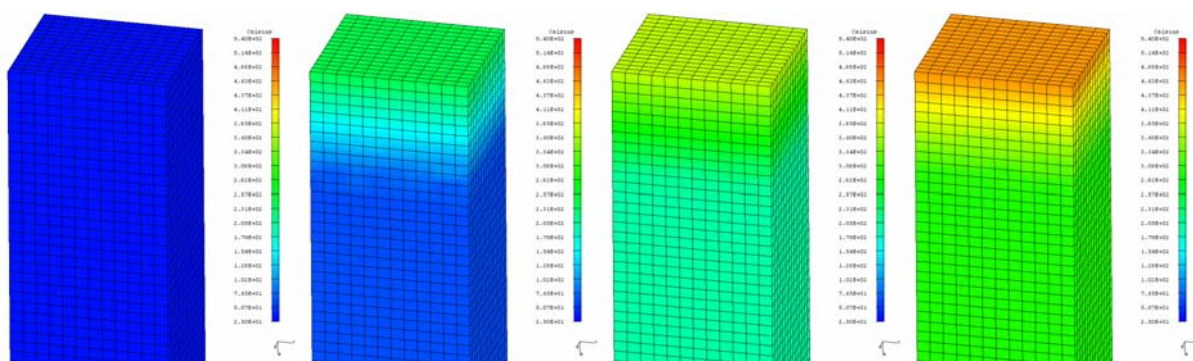
Wyznaczone przestrzenne pole temperatury pozwala na określenie temperatury w dowolnym miejscu badanej próbki dla danej warstwy.

Wyniki obliczeń numerycznych przedstawiono dla wybranych 3 punktów pomiarowych w warstwach wierzchniej TBC, łączącej BC oraz podłożu (rys. 10.62).

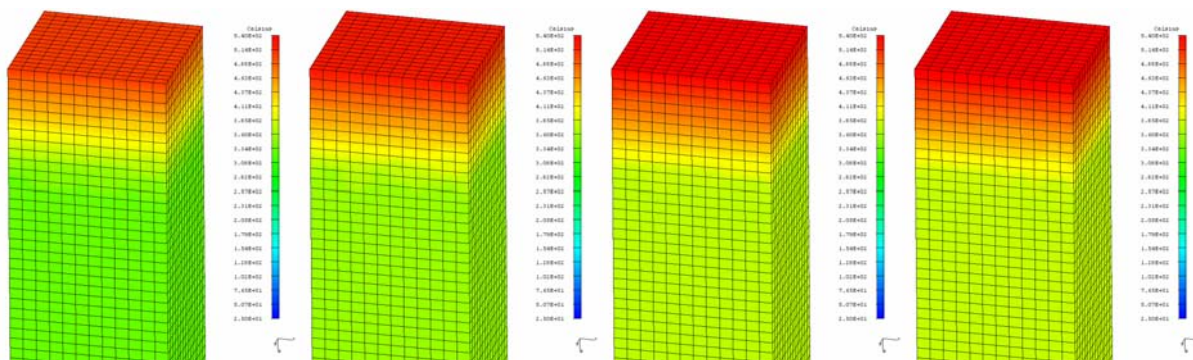


Rys. 10.62. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na przekroju modelu dyskretnego

Rozkład temperatury przedstawiony może być w postaci warstw temperatur jak na rysunkach 10.63 i 10.64 dla przykładowego procesu grzania, lub w postaci wykresów temperatury w czasie dla wybranych punktów obiektu.

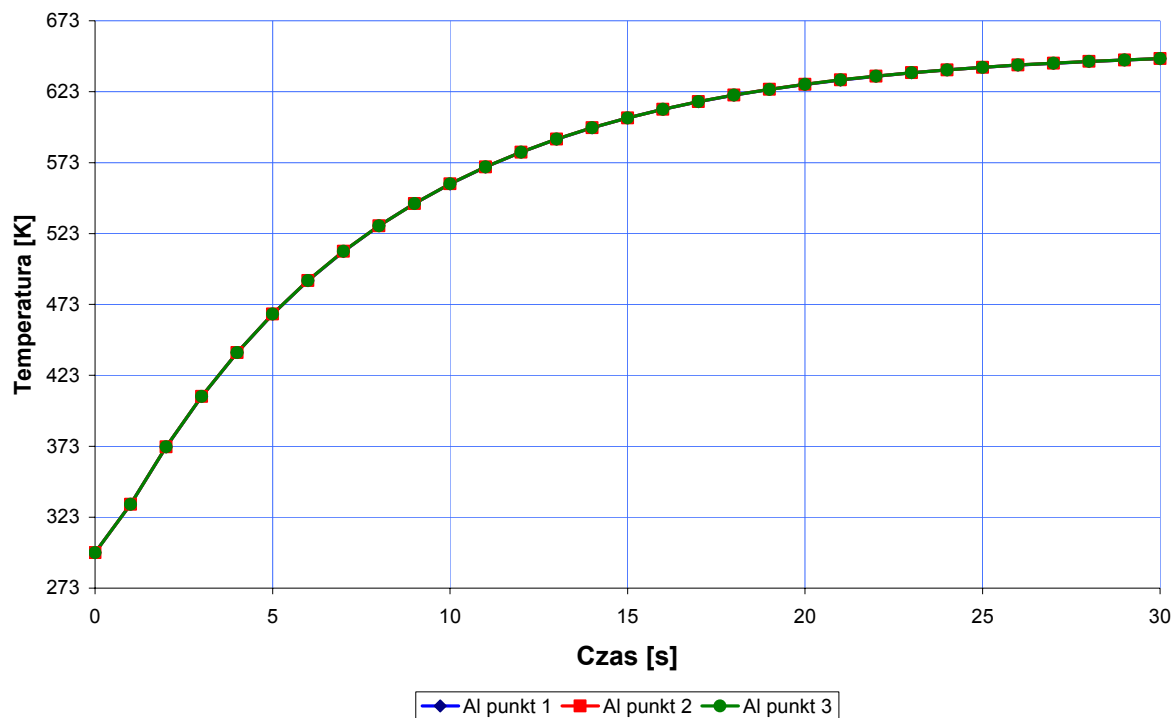


Rys. 10.63. Rozkład temperatury podczas nagrzewania po czasie 0s, 1s, 5s i 10s

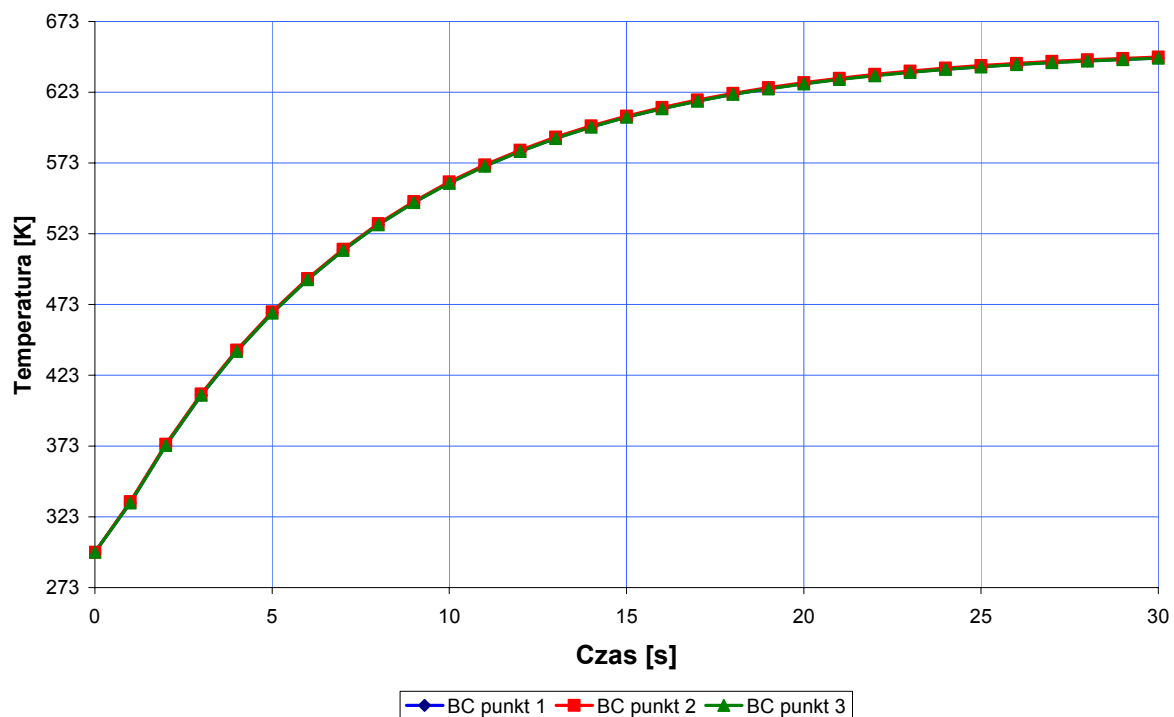


Rys. 10.64. Rozkład temperatury podczas nagrzewania po czasie 15s, 20s, 25s i 30s

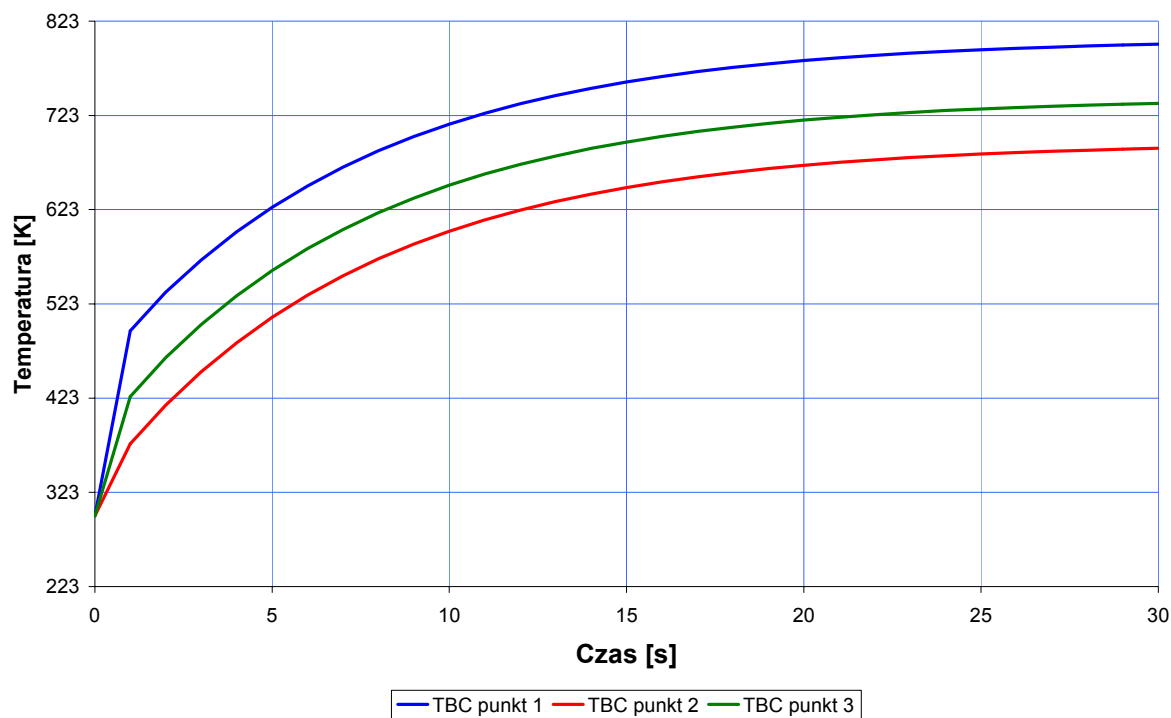
Na rysunkach od 10.65 do 10.68 przedstawiono wykresy temperatur w czasie dla poszczególnych punktów w danej warstwie próbki.



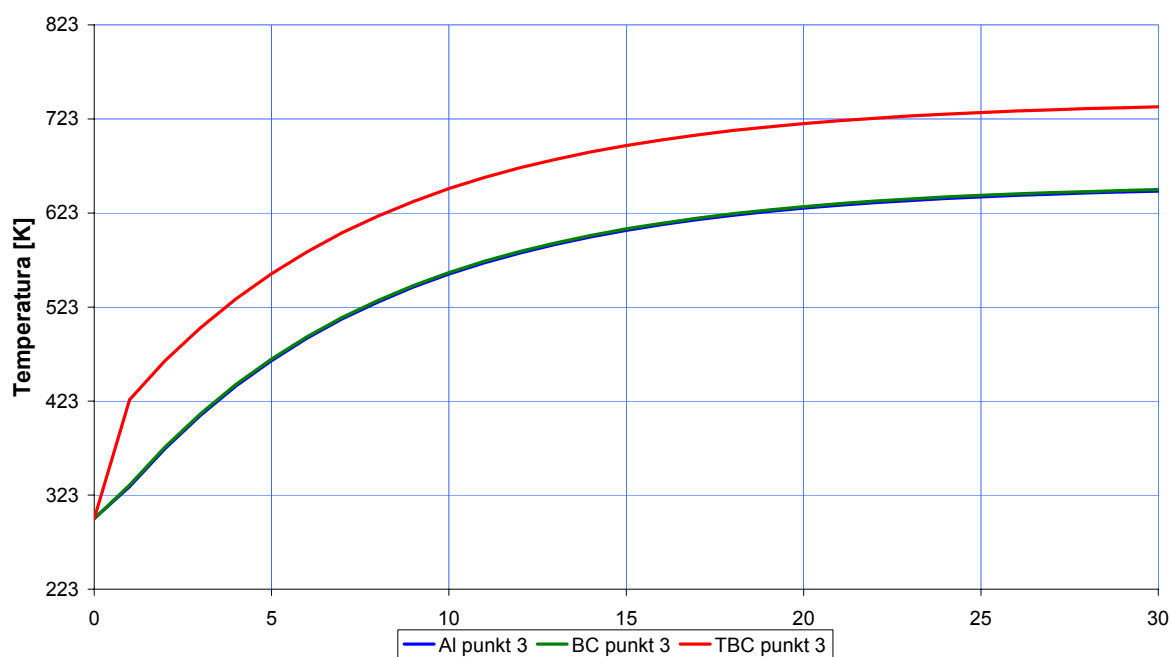
Rys. 10.65. Wykres temperatury w czasie dla 3 punktów w podłożu Al



Rys. 10.66. Wykres temperatury w czasie dla 3 punktów w warstwie BC



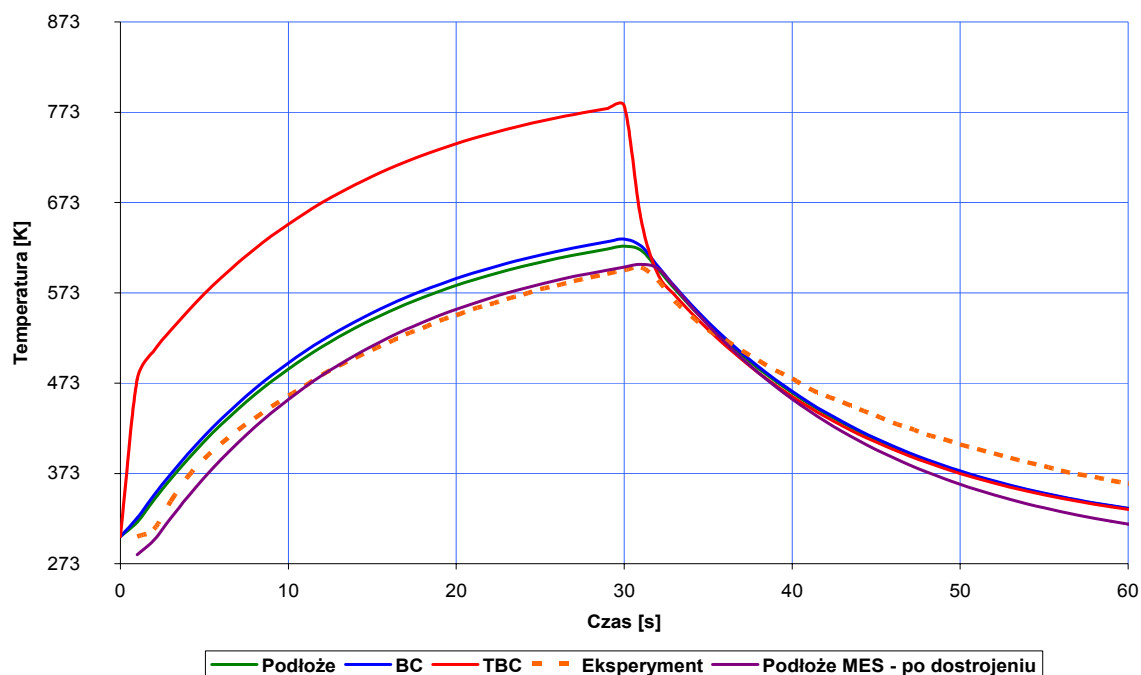
Rys. 10.67. Wykres temperatury w czasie dla 3 punktów w warstwie TBC



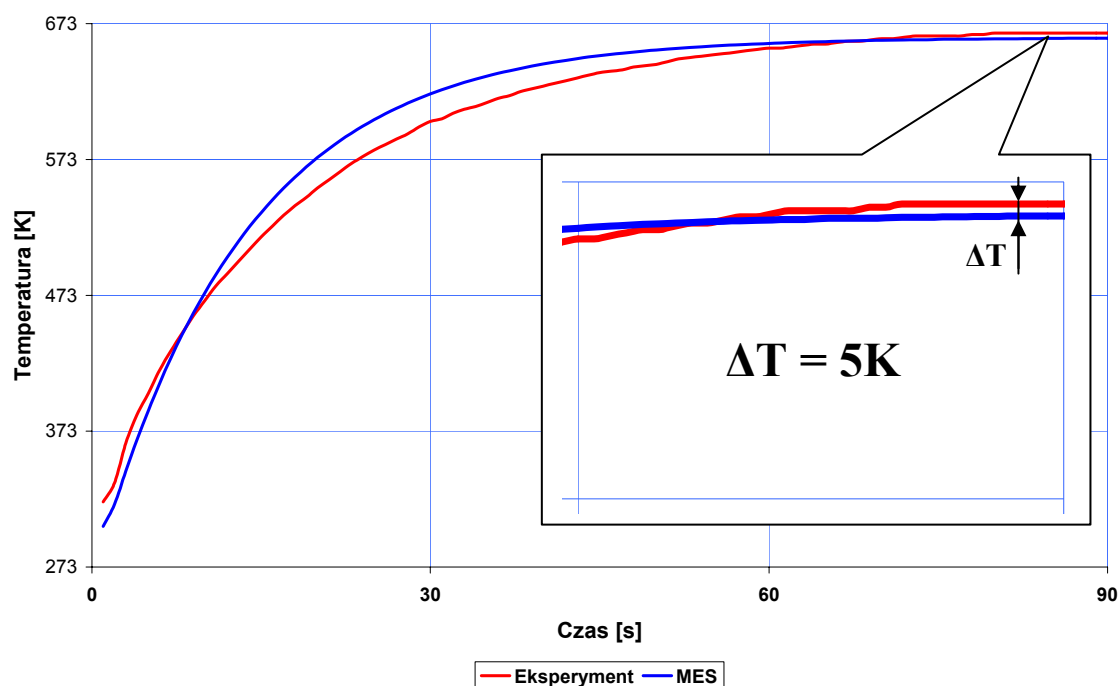
Rys. 10.68. Wykres temperatury w czasie w 3 punkcie dla poszczególnych warstw

Na rysunku 10.69 przedstawiono wykres temperatur w czasie dla jednego cyklu termicznego, w którym próbka poddawana była symulacji grzania przez 30s oraz chłodzenia również przez 30s. Analiza numeryczna pozwoliła na uzyskanie rozkładu temperatur w warstwie wierzchniej TBC dla dowolnego punktu płytki z powłoką ceramiczną. Rysunek również przedstawia wykres temperatury dla podłoża po dostrojeniu modelu.





Rys. 10.69. Cykl termiczny – temperatury warstw TBC i BC oraz podłoża podczas cyklu grzania przez 30s i chłodzenia przez 30s, dostrajanie modelu



Rys. 10.70. Dostrajanie modelu MES do eksperymentu

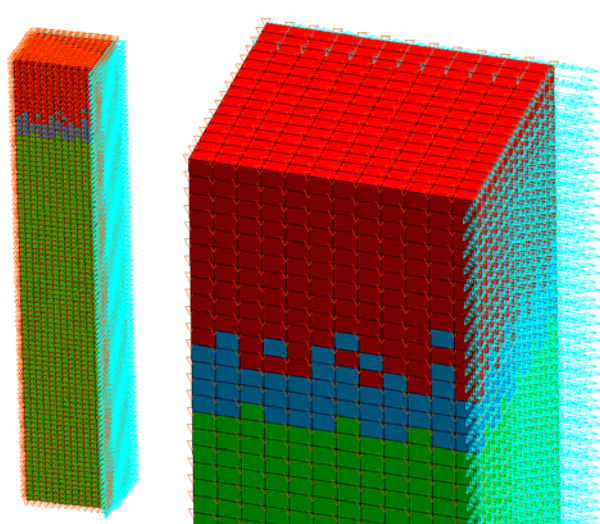
Badania eksperymentalne pozwalają na dostrajanie modelu numerycznego poprzez porównanie wyników symulacji z wynikami eksperymentu.

Rysunek 10.70 przedstawia ostatni krok procesu dostrajania modelu, w którym krzywa temperatury uzyskanej podczas symulacji jak najbardziej zbieżna jest z krzywą z eksperymentu.

#### 10.4. Analiza wytrzymałościowa

W pracy przedstawiono sposób oraz wyniki wyznaczania na drodze symulacji stanu wyężenia dla wybranego rodzaju próbki. W tym przypadku jak w analizie termicznej była to próbka z powłoką typu „duplex” o grubości warstwy wierzchniej  $400\mu\text{m}$  oraz grubości warstwy relaksacyjnej  $100\mu\text{m}$ . Do symulacji wybrany został model nr 4 z losowym mieszaniami siatki odwzorowujący mieszanie się materiałów o różnych właściwościach.

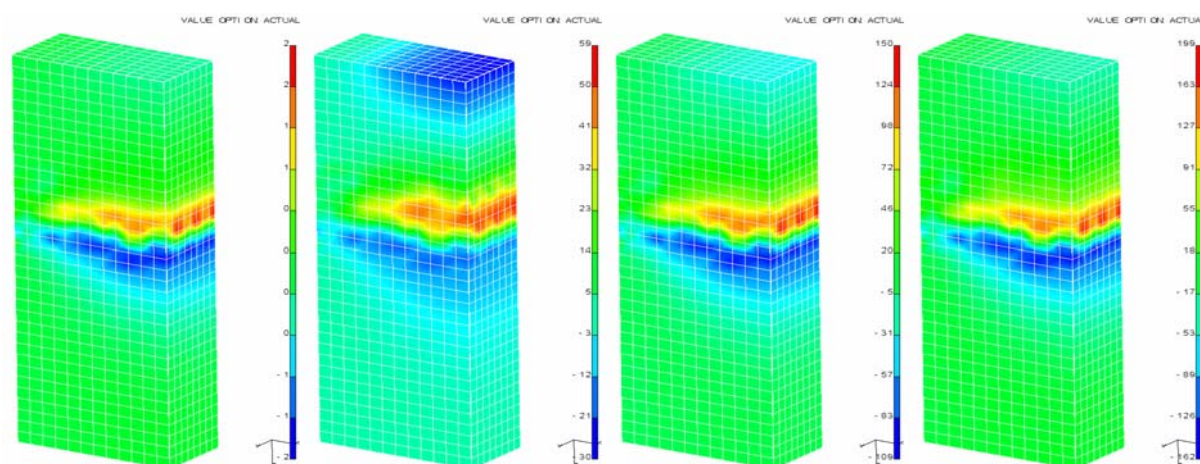
Na rysunku. 10.71 przedstawiono model dyskretny nr 4 próbki z powłoką TBC użyty do analizy wytrzymałościowej. W modelu tym uwzględniono warunek symetrii pozwalający na skrócenie czasu obliczeń ze względu na symetryczność badanej próbki. Model został obciążony przez uzyskane w wyniku analizy termicznej *przestrzenne pole temperatury* w postaci pól temperatur dla kolejnego kroku czasowego.



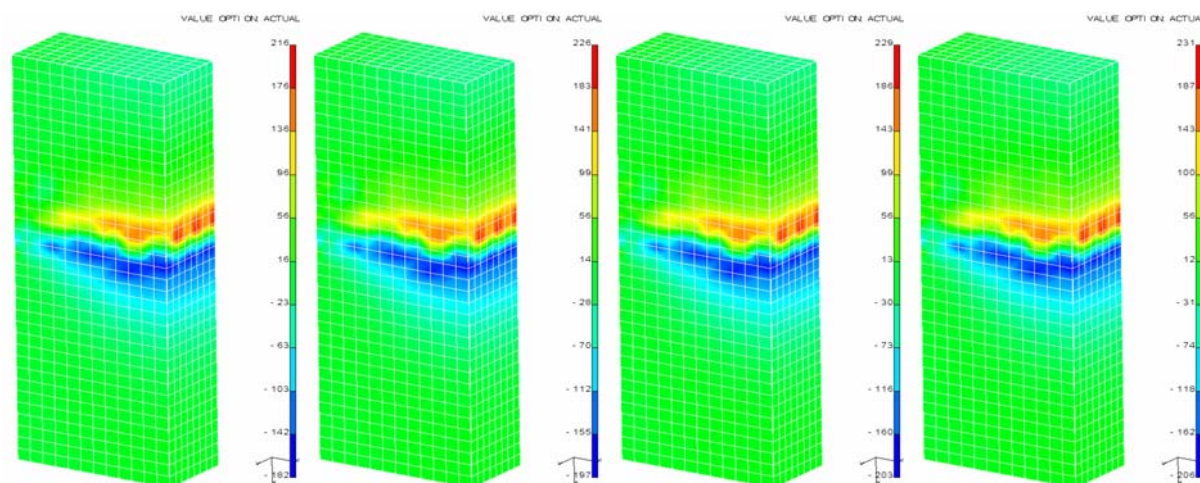
Rys. 10.71. Model dyskretny z warunkami brzegowymi użyty do analizy wytrzymałościowej

### 10.4.1. Wyniki analizy wytrzymałościowej

W wyniku przeprowadzenia obliczeń dla dowolnego kroku czasowego procesu grzania z analizy termicznej uzyskano przestrzenne pole naprężeń oraz odkształceń w badanej płytce z powłoką TBC. Tak uzyskane pole odkształceń i naprężeń pozwala na określenie stanu wyężenia dla dowolnego punktu obiektu dla dowolnego kroku czasowego oraz temperatury podczas np. procesu grzania. Na rysunkach 10.72 i 10.73 przedstawiono rozkład naprężeń w płaszczyźnie XY (równoległej do płaszczyzny powłoki TBC) dla kolejnych kroków czasowych odpowiadających kolejnym krokom nagrzewania.



Rys. 10.72. Rozkład naprężeń [MPa] podczas nagrzewania po czasie 0s, 1s, 5s i 10s



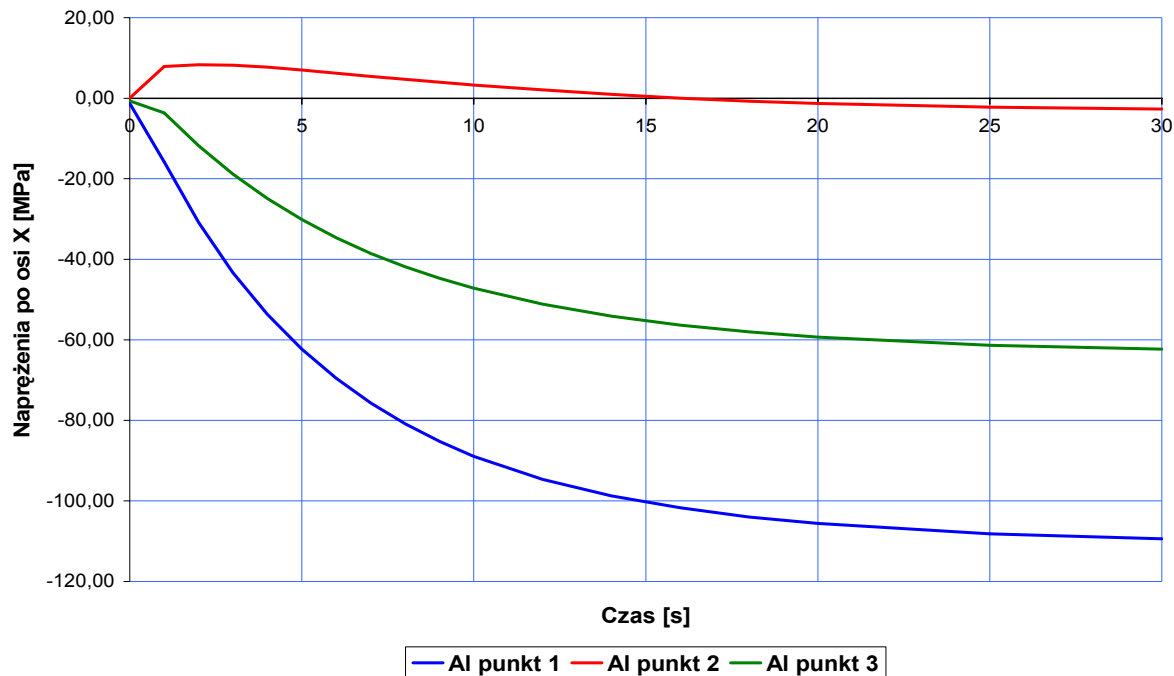
Rys. 10.73. Rozkład naprężeń [MPa] podczas nagrzewania po czasie 14s, 20s, 25s i 30s

Stan naprężenia został określony w postaci wykresów naprężeń w kolejnych krokach czasowych procesu nagrzewania dla tych samych punktów, co w analizie termicznej, przedstawionych na rysunku 10.62.

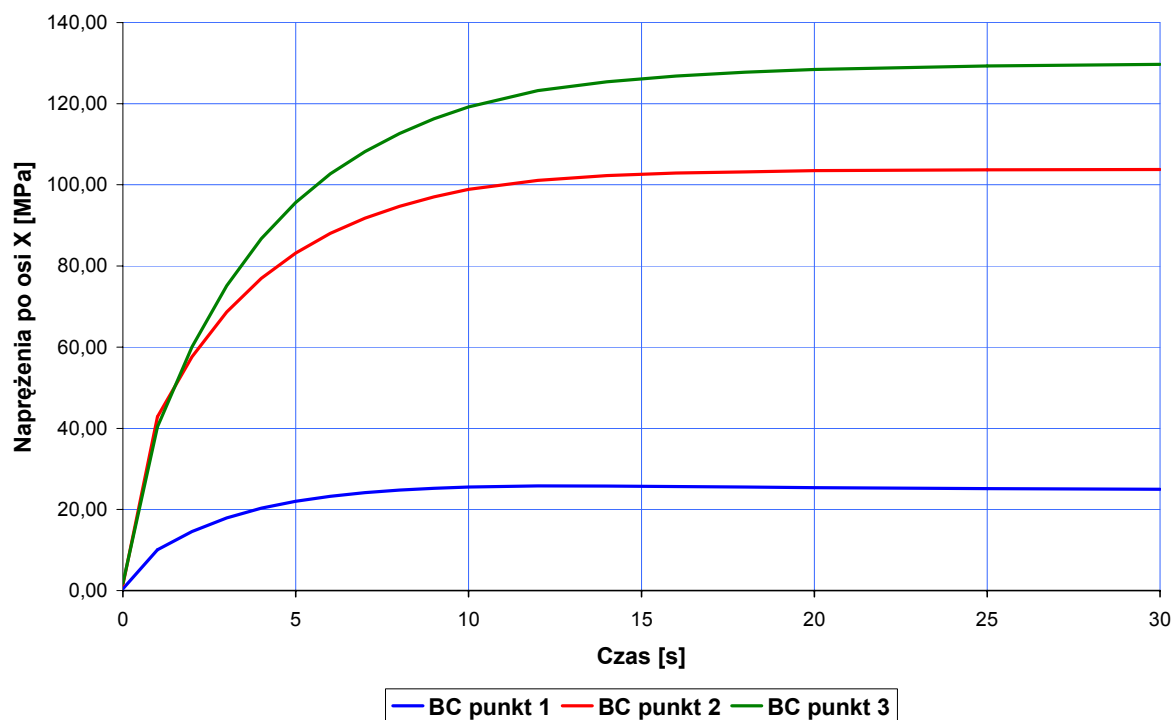
Na rysunkach od 10.74 do 10.81 przedstawiono wykresy naprężeń wzdłuż osi X w funkcji czasu, jak również w funkcji temperatury nagrzewania próbki z powłoką TBC.

Natomiast na rysunkach od 10.82 do 10.89 przedstawiono wykresy naprężeń wzdłuż osi Y w funkcji czasu, jak również w funkcji temperatury nagrzewania próbki z powłoką TBC

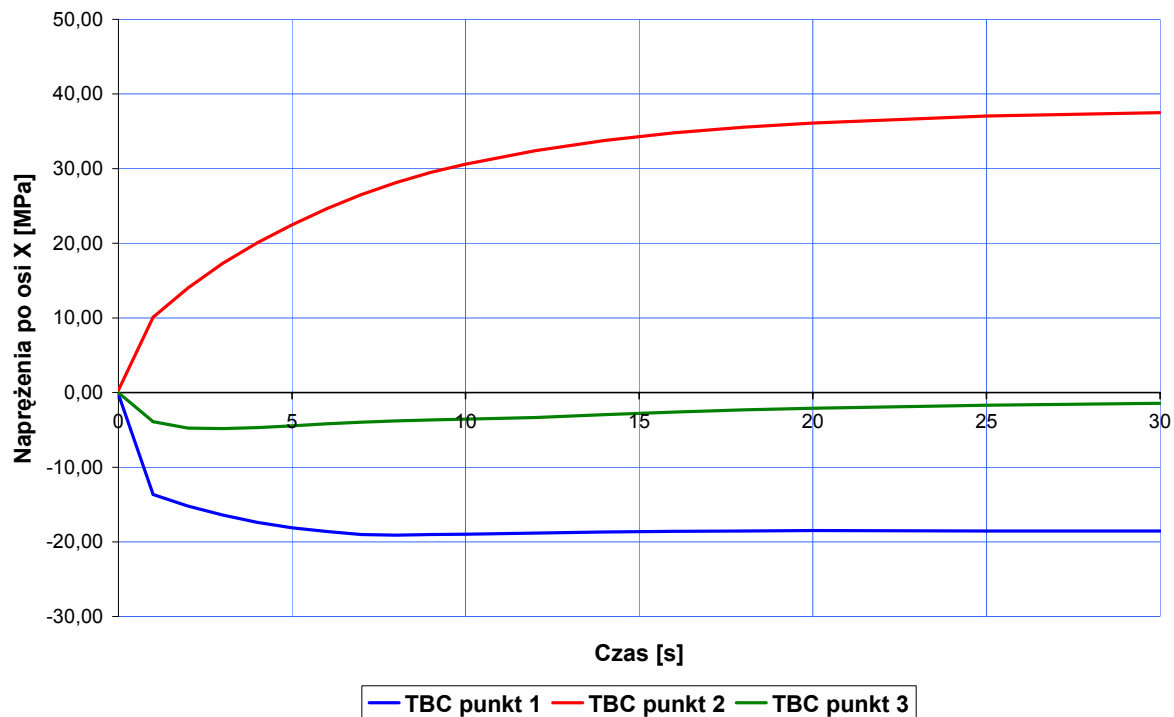
## WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ WZDŁUŻ OSI X



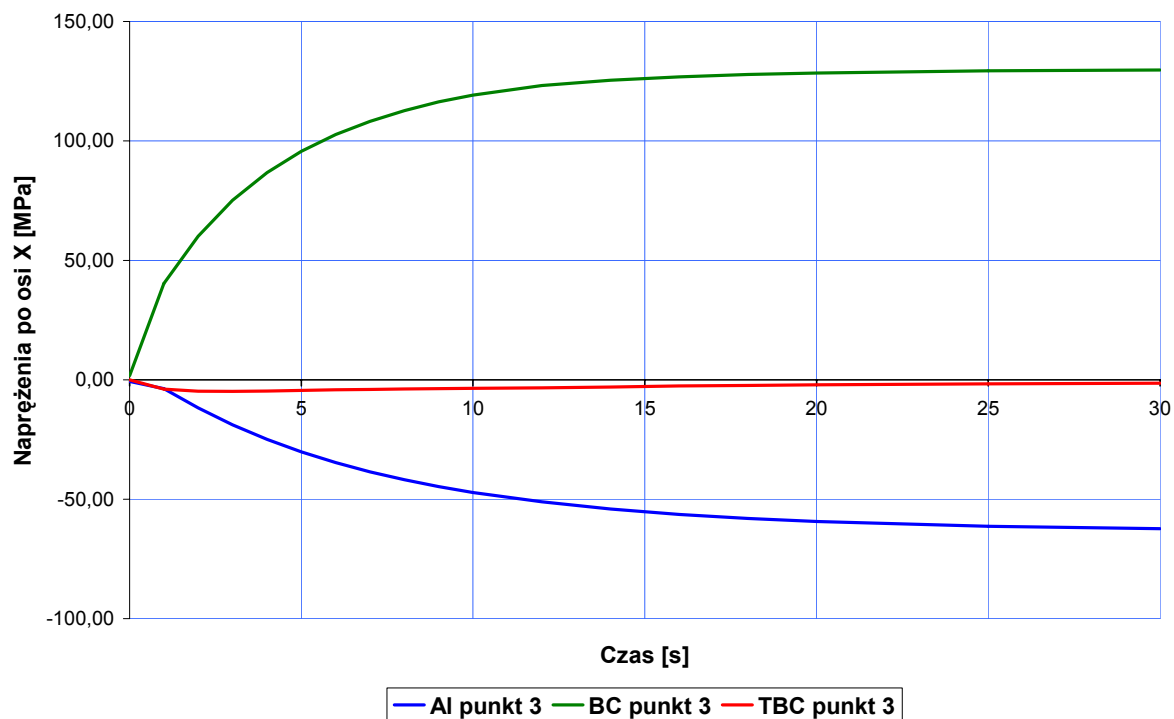
Rys. 10.74. Wykres naprężeń w funkcji czasu dla 3 punktów w podłożu Al



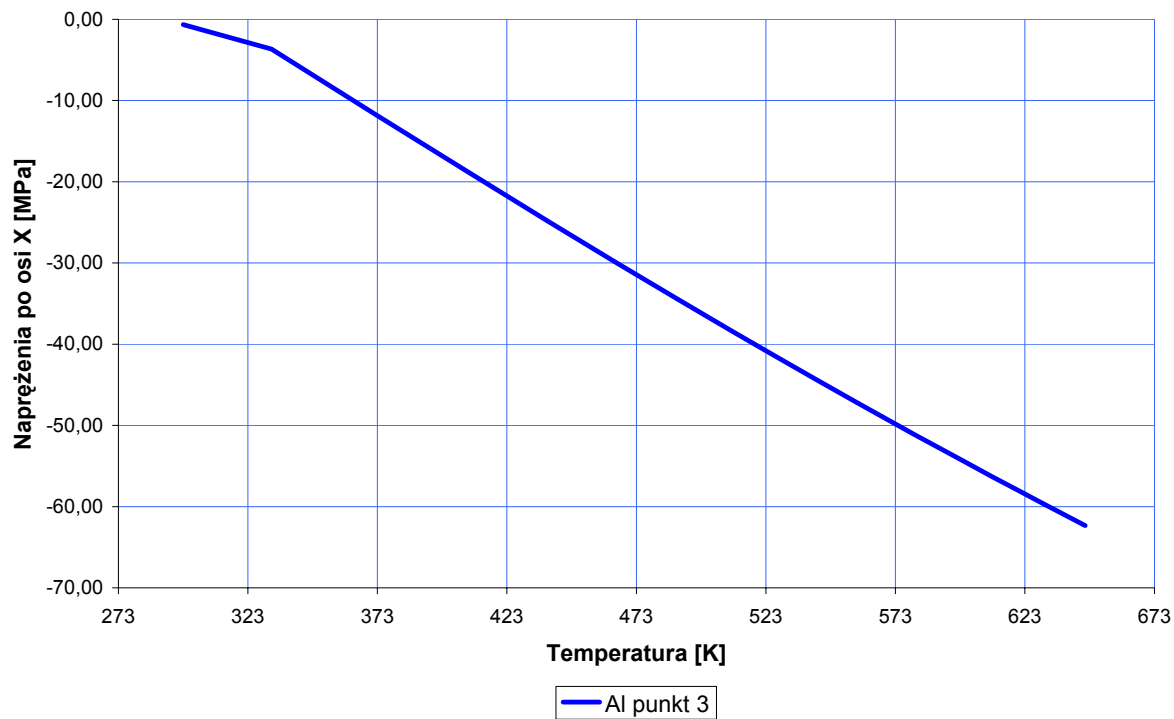
Rys. 10.75. Wykres naprężeń w funkcji czasu dla 3 punktów w warstwie BC



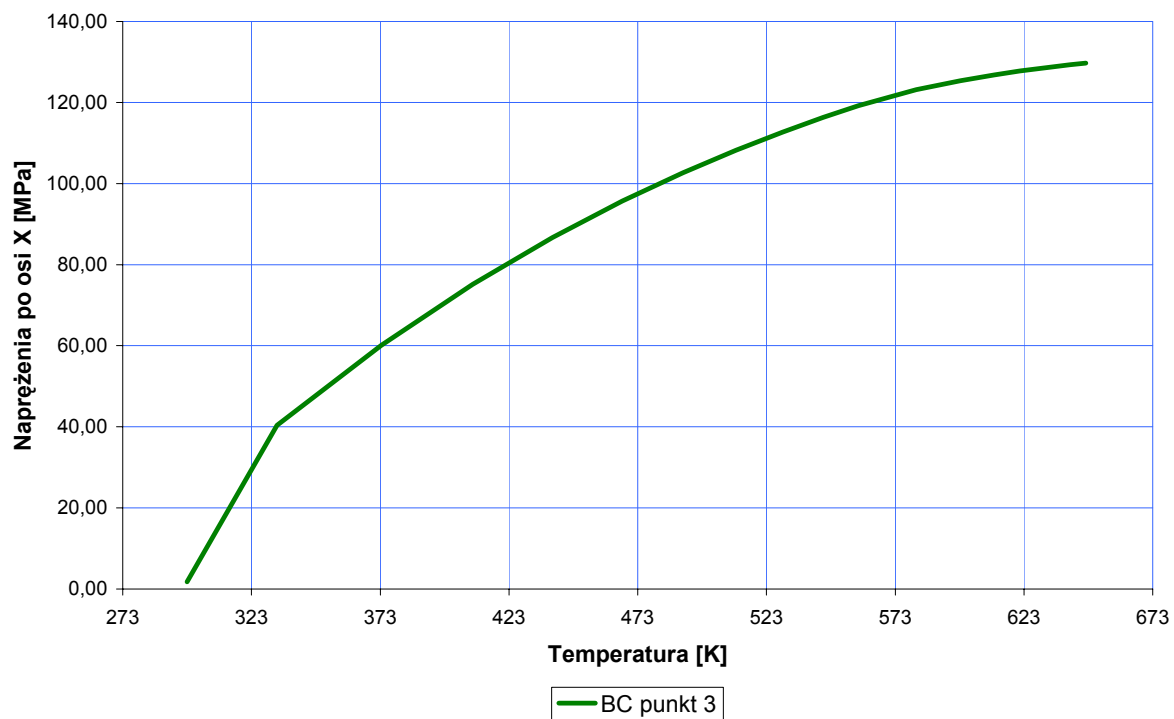
Rys. 10.76. Wykres naprężeń w funkcji czasu dla 3 punktów w warstwie TBC



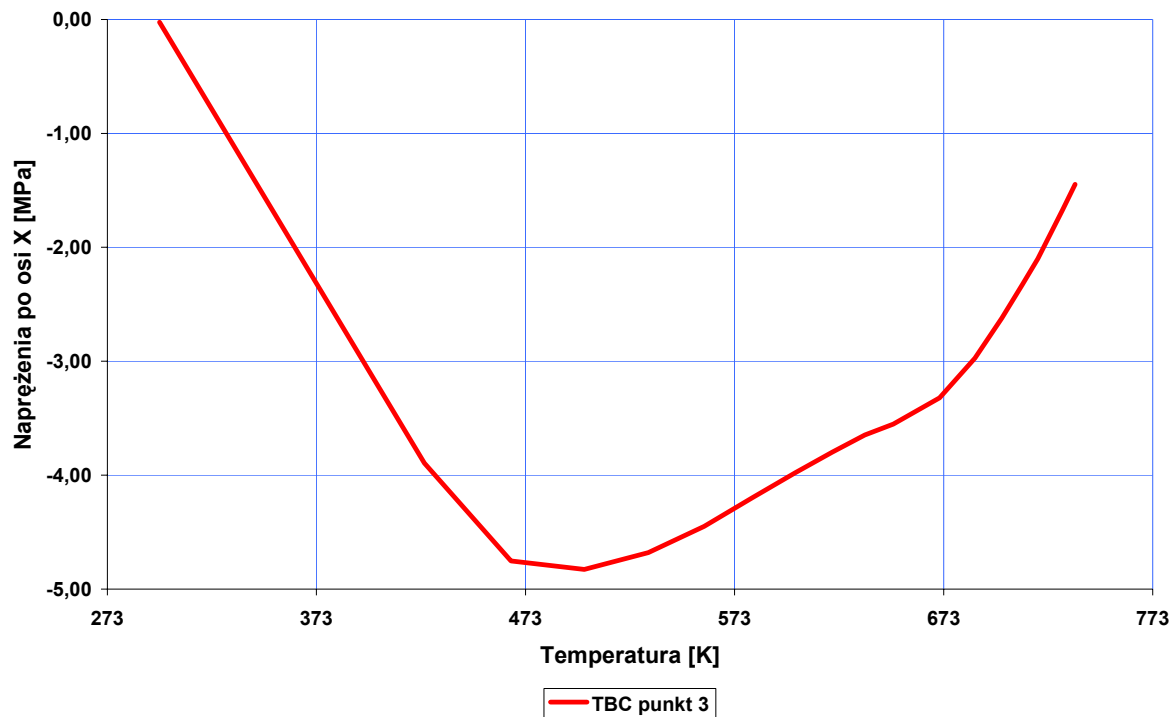
Rys. 10.77. Wykres naprężeń w funkcji czasu w 3 punkcie dla poszczególnych warstw



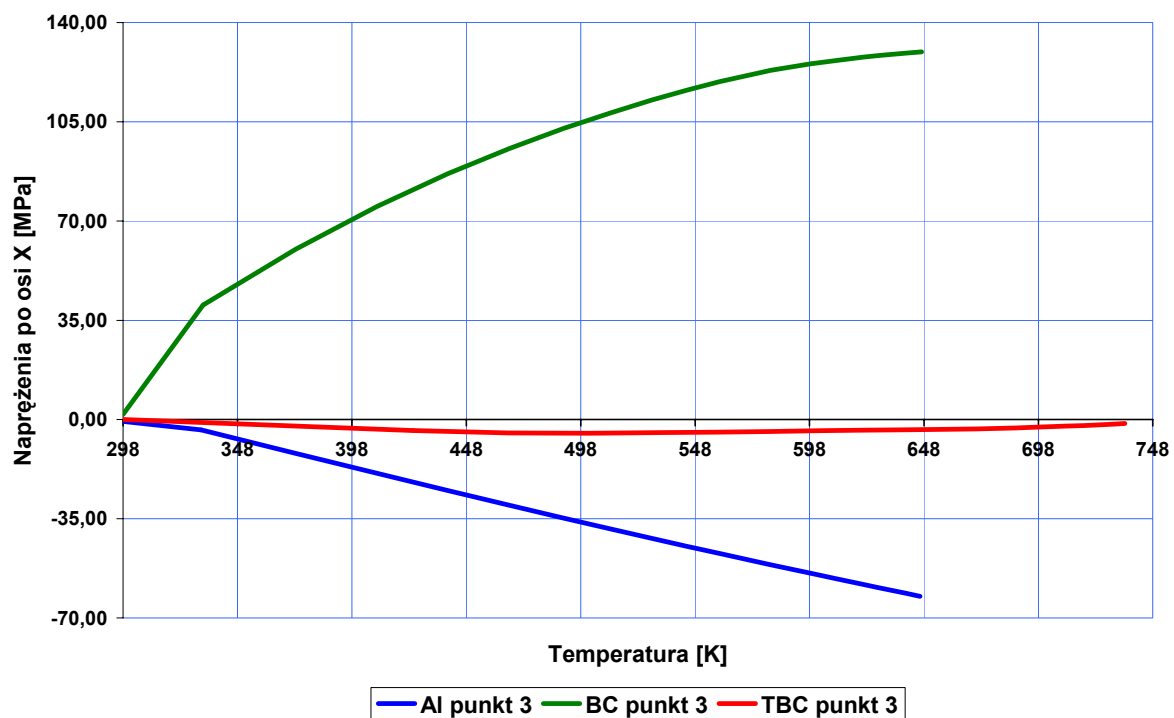
Rys. 10.78. Wykres naprężeń w funkcji temperatury dla 3 punktu w poszczególnych warstwach



Rys. 10.79. Wykres naprężeń w funkcji temperatury dla 3 punktu w warstwie BC

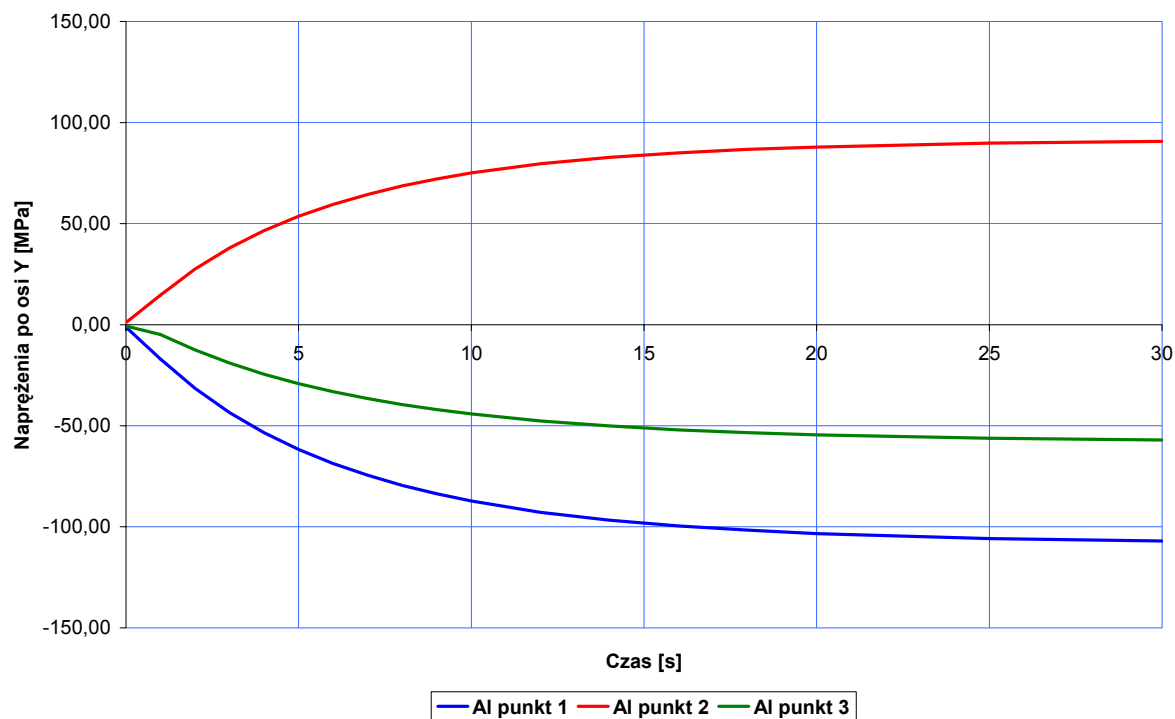


Rys. 10.80. Wykres naprężeń w funkcji temperatury dla 3 punktu w warstwie TBC

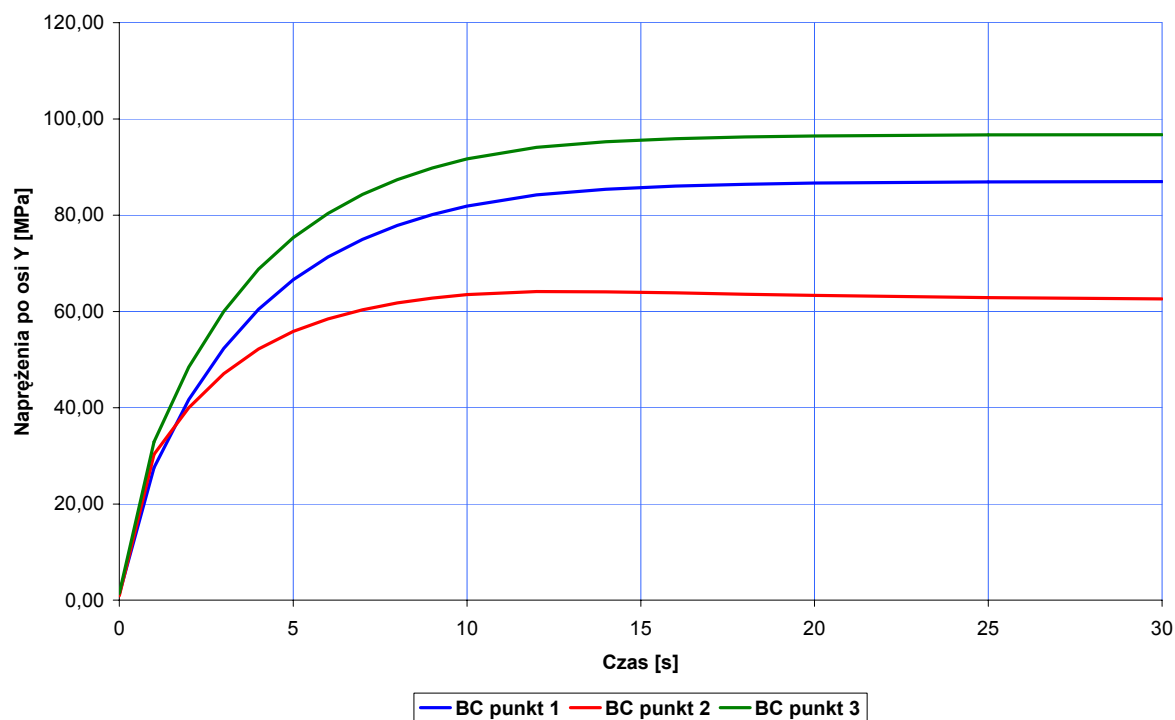


Rys. 10.81. Wykres naprężeń w funkcji temperatury dla 3 punktu w poszczególnych warstwach

## WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ WZDŁUŻ OSI Y

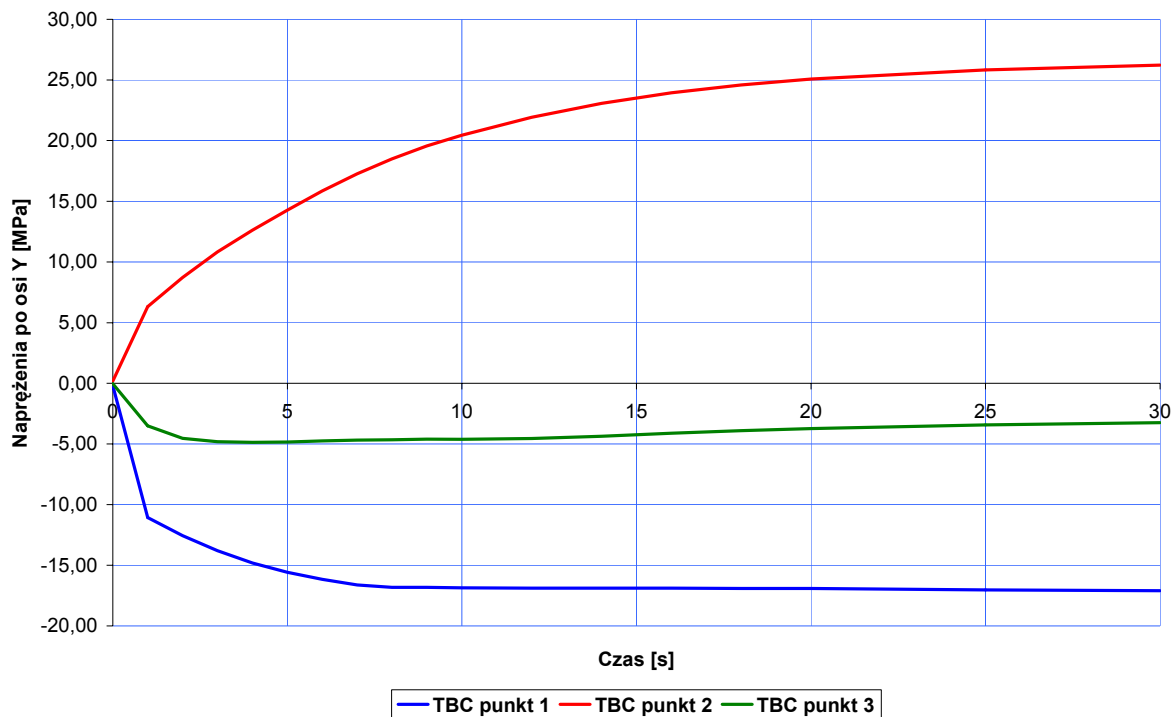


Rys. 10.82. Wykres naprężeń w funkcji czasu dla 3 punktów w podłożu Al

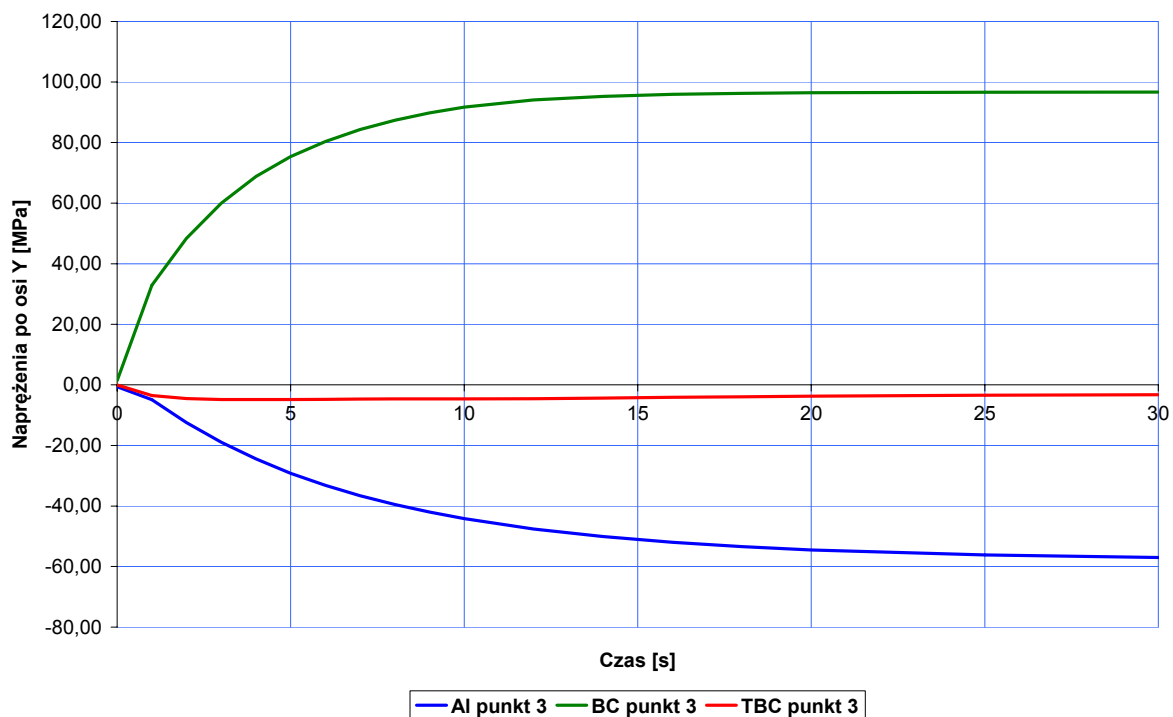


Rys. 10.83. Wykres naprężeń w funkcji czasu dla 3 punktów w warstwie BC

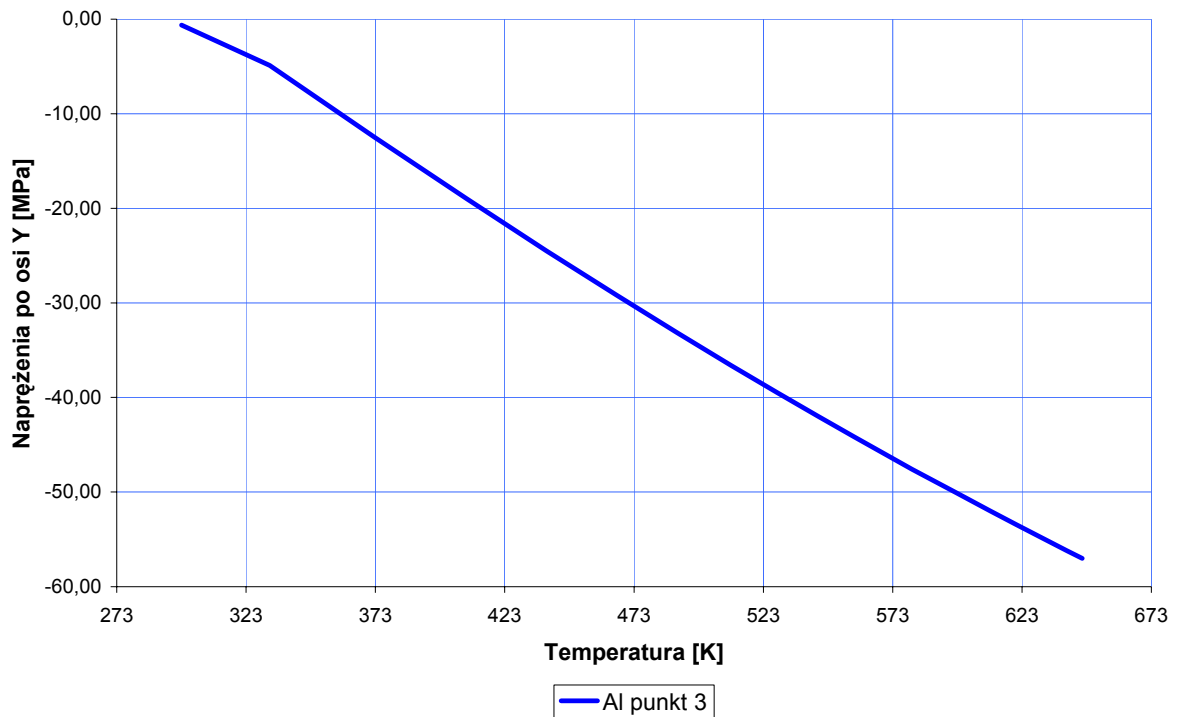




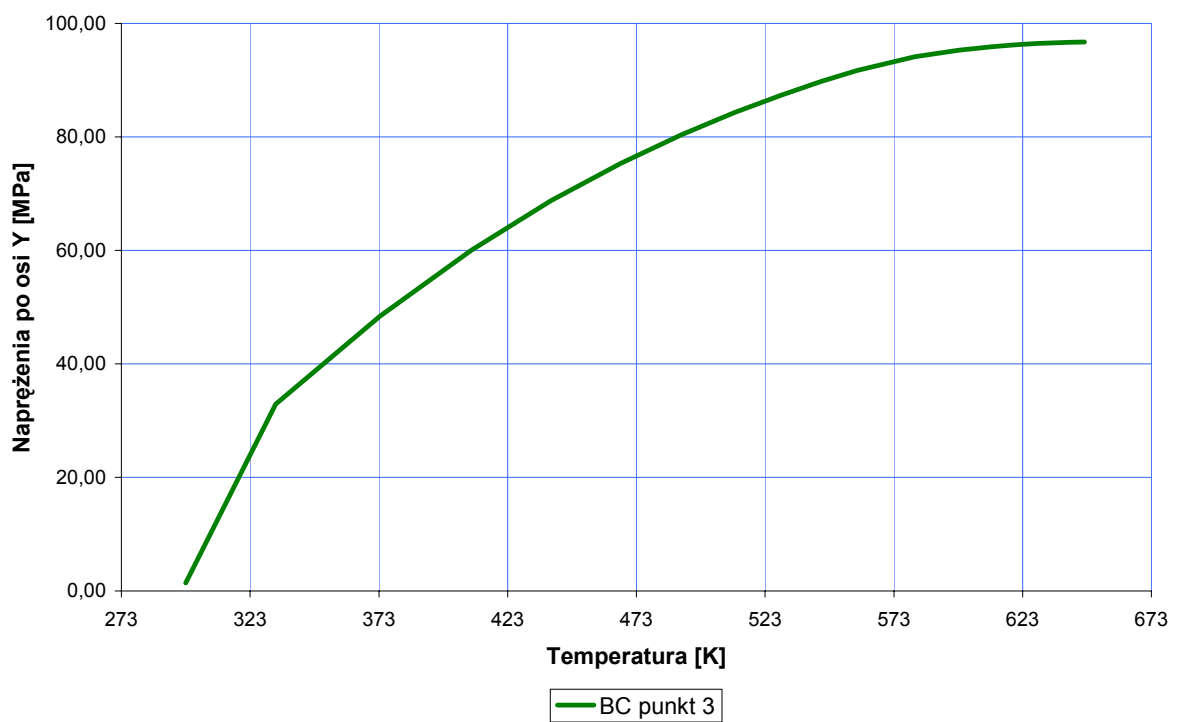
Rys. 10.84. Wykres naprężeń w funkcji czasu dla 3 punktów w warstwie TBC



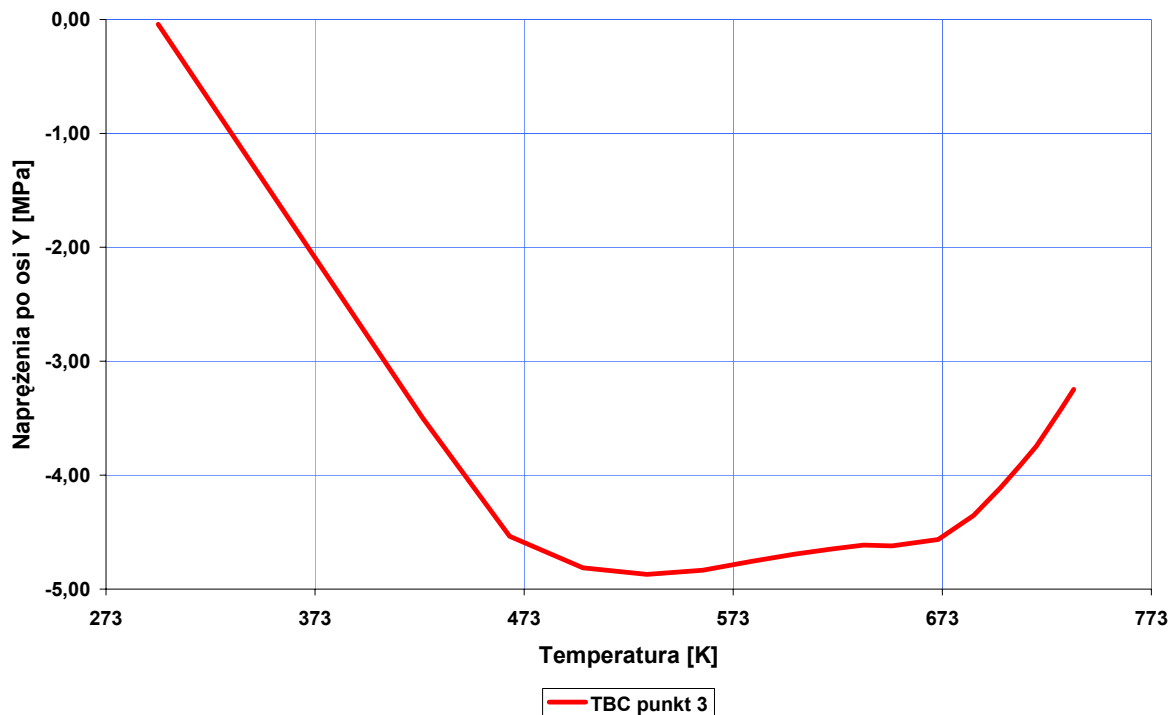
Rys. 10.85. Wykres naprężeń w funkcji czasu w 3 punkcie dla poszczególnych warstw



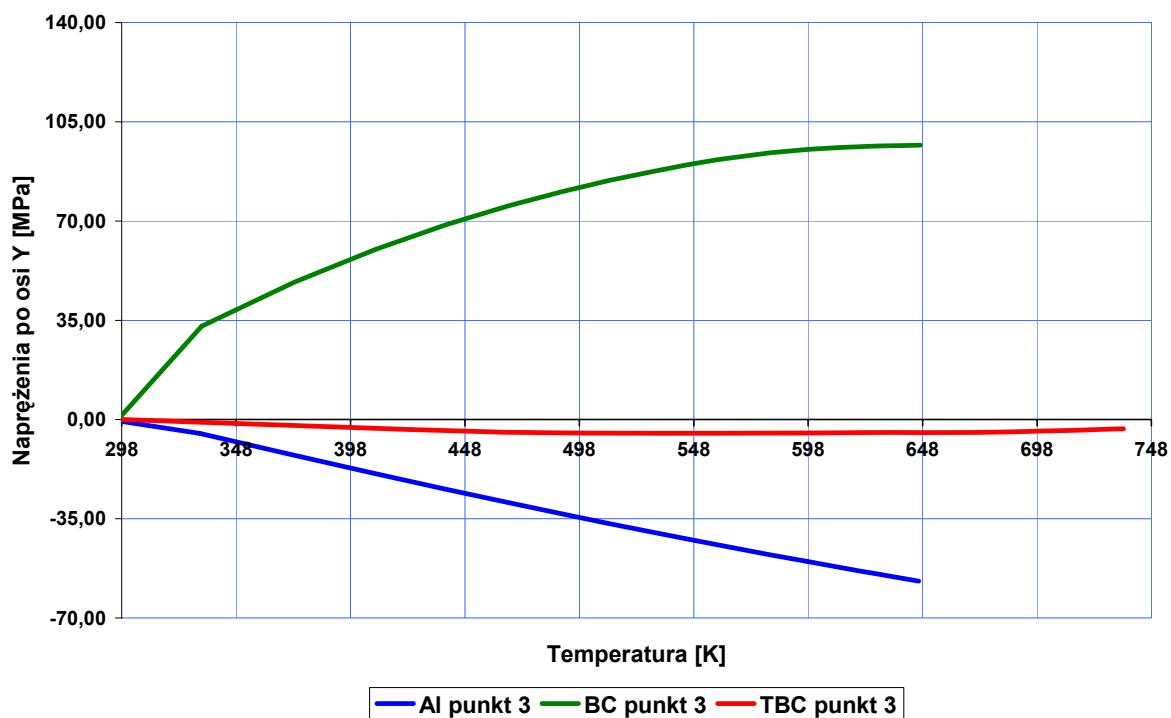
Rys. 10.86. Wykres naprężeń w funkcji temperatury dla 3 punktu w podłożu Al



Rys. 10.87. Wykres naprężeń w funkcji temperatury dla 3 punktu w warstwie BC



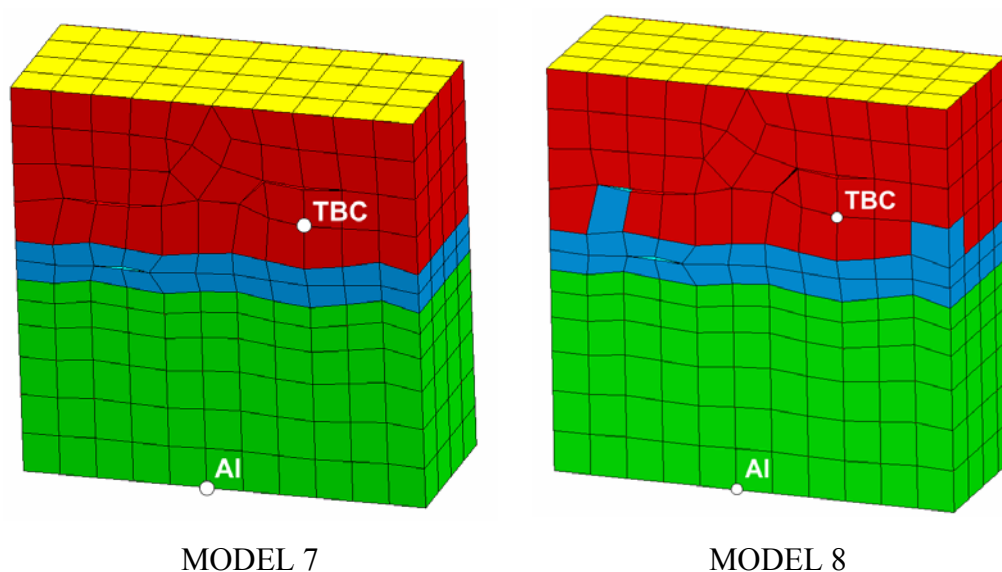
Rys. 10.88. Wykres naprężeń w funkcji temperatury dla 3 punktu w warstwie TBC



Rys. 10.89. Wykres naprężeń w funkcji temperatury dla 3 punktu w poszczególnych warstwach

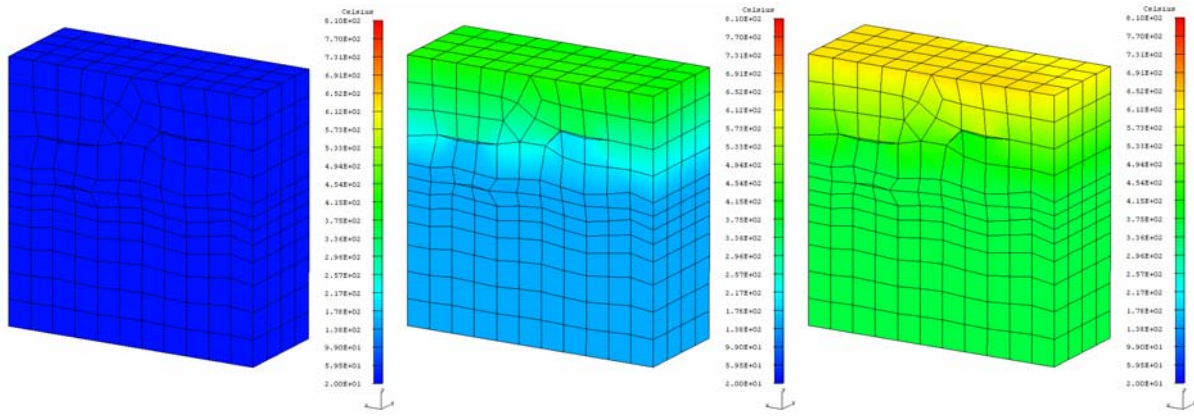
## 10.5. Ocena wpływu mikropęknięć struktury powłok TBC na rozkład temperatury

Analiza termiczna przeprowadzona według przedstawionego własnego algorytmu pozwoliła na uzyskanie przestrzennego pola temperatury wybranego obiektu, w tym przypadku płytki aluminiowej z naniesioną powłoką ceramiczną TBC. Uwzględnienie w modelu obliczeniowym występujących defektów np. w postaci nieciągłości mikrostruktury warstw – mikropęknięć pozwoliło na oszacowanie wpływu tych defektów na rozkład pola temperatury na całej objętości płytki z powłoką TBC. Uwzględnione defekty mikrostruktury zostały umieszczone w przestrzennym modelu dyskretnym w sposób losowy, a ich wielkość wynosi ok.  $1\mu\text{m}$ . Analiza numeryczna została przeprowadzona dla dwóch przypadków w celach porównawczych, dla płytki z powłoką TBC z uwzględnieniem defektów jak i bez uwzględnienia defektów. Na rysunku. 10.90 przedstawiono dwa wybrane modele nr 7 i 8 oraz wybrane punkty pomiarowe.

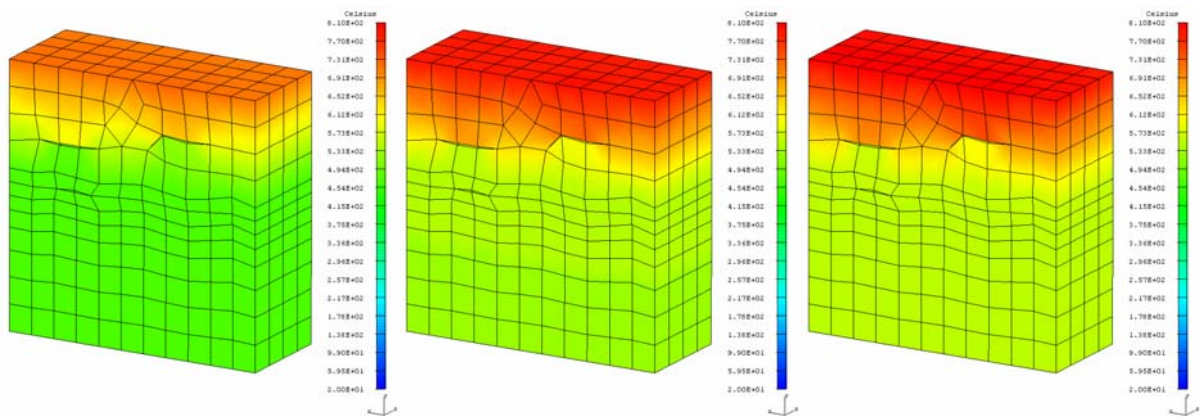


Rys. 10.90. Punkty pomiaru temperatury warstwy wierzchniej TBC i podłoża Al w modelach 7 i 8 z defektami

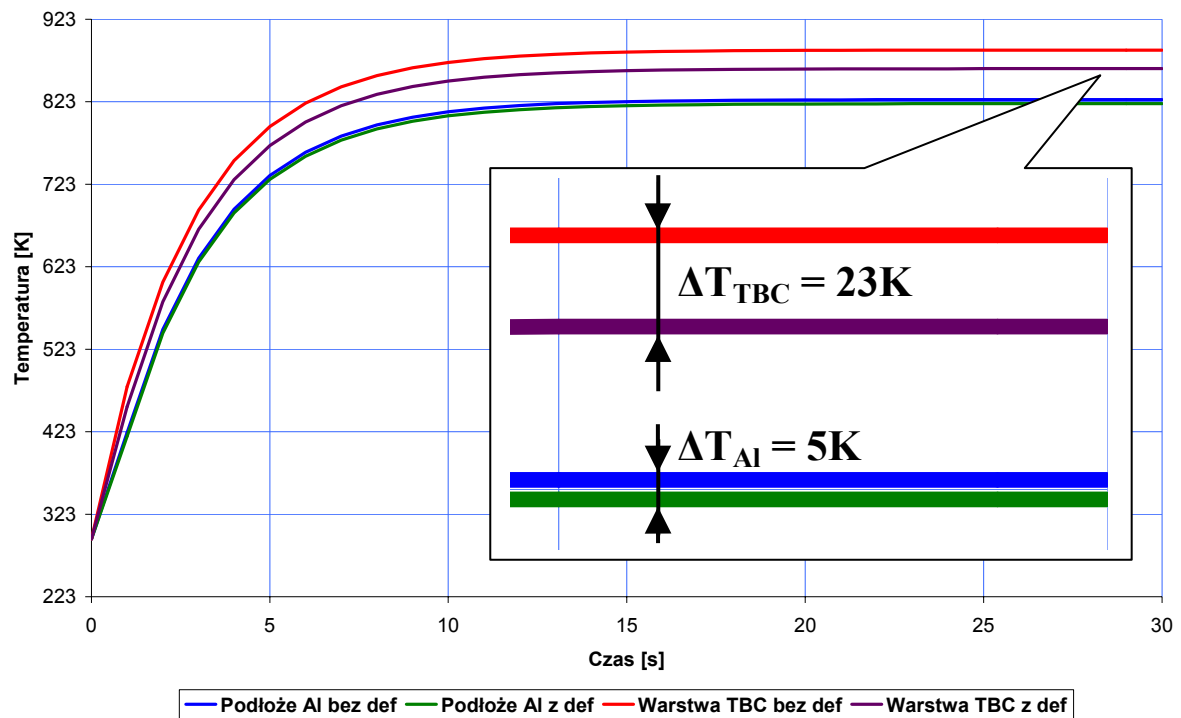
Wyniki uzyskane w postaci przestrzennego pola temperatury na całej objętości badanego modelu zostały przedstawione w postaci warstwic temperatur na rysunkach 10.91 oraz 10.92 dla kolejnych kroków nagrzewania oraz w postaci wykresów porównawczych różnic temperatur w podłożu aluminiowym oraz warstwie wierzchniej TBC dla wybranych punktów w modelu z defektami jak i bez uwzględnienia defektów. Rysunki 10.93 i 10.94 przedstawiają owe porównanie z zaznaczeniem różnic temperatur porównywanych modeli.



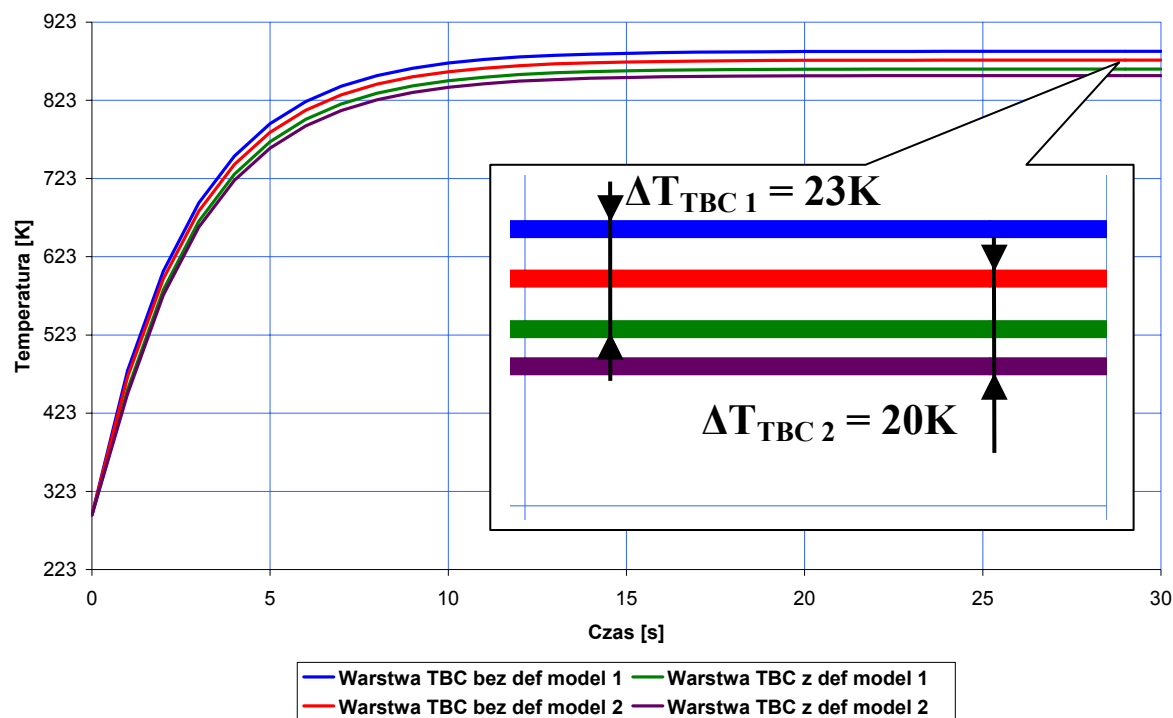
Rys. 10.91. Kolejne kroki nagrzewania płytki – czas 0s, 1s i 5s



Rys. 10.92. Kolejne kroki nagrzewania płytki – czas 10s, 20s i 30s



Rys. 10.93 Porównanie temperatur warstw TBC oraz podłoża w modelach z uwzględnieniem defektów oraz bez uwzględnienia defektów



Rys. 10.94 Porównanie temperatur warstw TBC w modelach 1 i 2 z uwzględnieniem defektów oraz bez uwzględnienia defektów

Tak uzyskane wyniki oraz przeprowadzone oszacowanie wpływu defektów na rozkład temperatur w warstwach powłoki ceramicznej pozwalają określać zakres temperaturowy stosowania danych warstw ceramicznych oraz określać jakość badanej powłoki pod względem zastosowania powłok na bariery termiczne elementów maszyn i urządzeń, jakimi mogą być łopatki turbin gazowych bądź elementy silnika spalinowego.

## **11. Badania eksperymentalne powłok ceramicznych poddanych obciążeniom cieplnym**

Przegląd literaturowy pozwolił na wybranie odpowiednich materiałów na powłoki ceramiczne poddawane obciążeniom cieplnym, technologii nanoszenia ich na wybrane podłoże oraz wybranie sposobu ich badania. Ze względu na szerokie zastosowanie materiałów ceramicznych, skupiając uwagę na przemyśle samochodowym i lotniczym do badań eksperymentalnych został wybrany tak samo jak w przypadku symulacji materiał opisany w rozdziale 2, którym jest tlenek cyrkonu stabilizowany tlenkiem itru stosowany na powłoki TBC.

Badania eksperymentalne w przypadku wyznaczenia przestrzennego pola temperatury i oceny stanu wyężenia badanej powłoki przy użyciu opracowanego własnego algorytmu są niezbędnym źródłem informacji potrzebnych w procesie dostrajania modelu. Dlatego został opracowany plan badań eksperymentalnych w celu uzyskania niezbędnej bazy danych pomiarowych.

W plan badań eksperymentalnych wchodziło:

- wykonanie 4 rodzajów próbek z natryskiwana na podłożu aluminiowym metodą APS powłoką ceramiczną TBC o zróżnicowanych grubościach i ilościach warstw,
- wykonanie zglądów próbek oraz przeprowadzenie badania metalograficznych,
- zaprojektowanie oraz budowa stanowiska pomiarowego do poddawania próbek obciążeniom cieplnym oraz badania odporności powłok ceramicznych na szok termiczny,
- przeprowadzenie badań eksperymentalnych – prób, poddawanie próbek obciążeniom cieplnym oraz badań odporności na szok termiczny wybranych próbek.

Wyniki badań eksperymentalnych w postaci krzywych temperatur w funkcji czasu posłużą do porównania wyników symulacji dla takich samych prób, w celu poprawienia ich dokładności – dostrojenia ich.

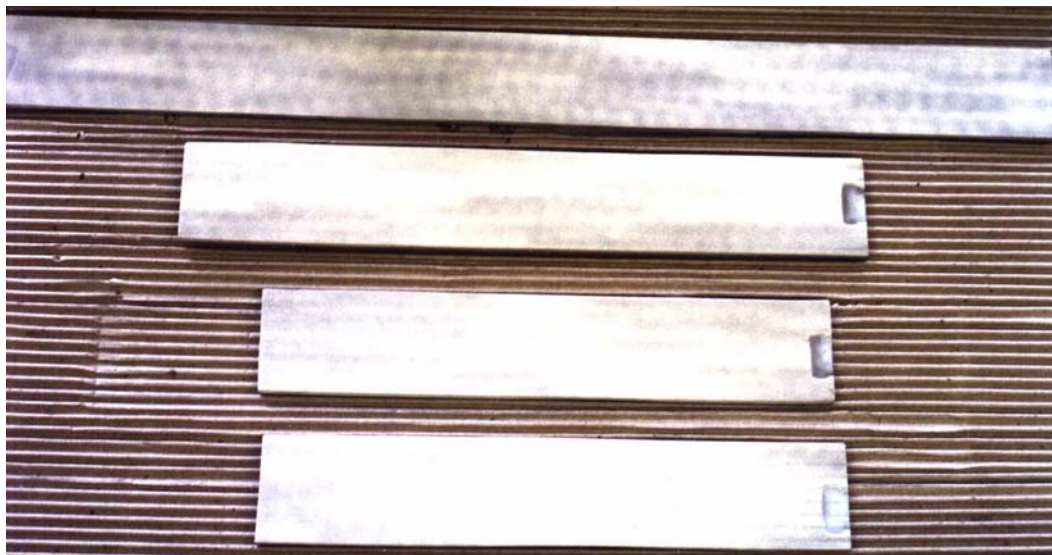
### 11.1. Próbki przeznaczone do badań eksperymentalnych

Do badań metalograficznych oraz badań na stanowisku do badania odporności na szok termiczny zostały wykonane cztery rodzaje próbek. Materiał użyty do wykonania próbek został dostarczony przez firmę H.C. Starck, która również wykonała próbki poprzez automatyczne natryskiwanie plazmowe - APS. Zautomatyzowanie procesu natryskiwania plazmowego pozwoliło na uzyskanie próbek o dokładnej grubości warstw.

Zostały wykonane 4 rodzaje próbek o określonych cechach:

1. Próbka ze stopu aluminium pokryta warstwą TBC –  $ZrO_2 - 7\%Y_2O_3$  o grubości  $400\mu m$  bez warstwy relaksacyjnej,
2. Próbka ze stopu aluminium pokryta warstwą TBC –  $ZrO_2 - 7\%Y_2O_3$  o grubości  $500\mu m$  bez warstwy relaksacyjnej,
3. Próbka ze stopu aluminium pokryta warstwą TBC –  $ZrO_2 - 7\%Y_2O_3$  o grubości  $400\mu m$  z warstwą relaksacyjną NiCoCrAlY o grubości  $100\mu m$ ,
4. Próbka ze stopu aluminium pokryta warstwą TBC –  $ZrO_2 - 7\%Y_2O_3$  o grubości  $500\mu m$  z warstwą relaksacyjną NiCoCrAlY o grubości  $100\mu m$ .

Na rysunku. 11.1 przedstawiono zdjęcie próbek (płytek aluminiowych) z natryskiwanyimi powłokami ceramicznymi. Do dalszych badań próbki zostały pocięte na wymiar  $50 \times 50 mm$ .



Rys. 11.1. Zdjęcie próbek wykonanych do badań



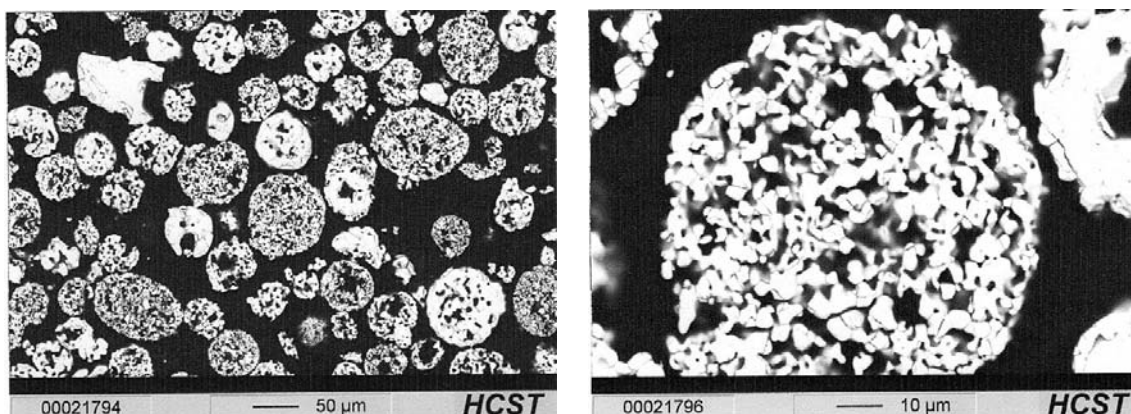
### 11.1.1. Dane producenta proszku – firmy H.C. Starck

Firma H.C. Starck dostarczyła oraz wykonała naniesienie głównego materiału ceramicznego na próbki, którym był tlenek cyrkonu stabilizowany 7% (wagowo) tlenkiem itru –  $ZrO_2-7\%Y_2O_3$  o nazwie producenta AMPERIT 827.7 [54]. W tabeli 11.1 przedstawiono podstawowe cechy charakterystyczne proszku AMPERIT<sup>®</sup> 827.7 wraz ze składem chemicznym oraz rozkładem wielkości ziaren.

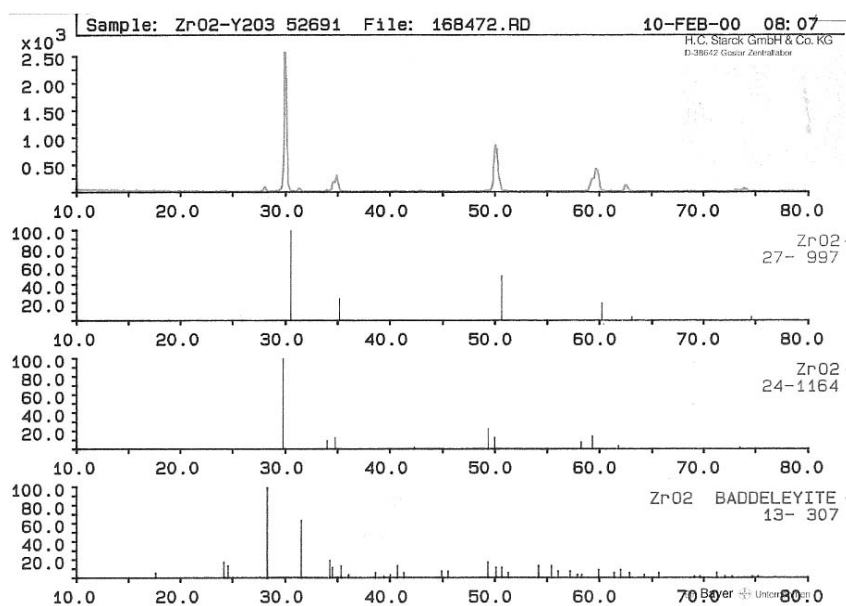
Tabela 11.1. Właściwości proszku AMPERIT 827.7 [54]

Produkt		AMPERIT <sup>®</sup> 827.7			
		Skład chemiczny:		Rozkład wielkości ziaren:	
Chemicznie:	$ZrO_2 - Y_2O_3$	Składnik	Waga [%]	Wielkość [ $\mu m$ ]	[%]
Proporcje:	93/7	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,59	-125	100
		HfO <sub>2</sub>	1,81	-88	89,3
		Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	983 ppm	-62	65,1
Typ proszku:	Aglomerowany spiekany	CaO	210 ppm	-44	37,1
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	243 ppm	-31	14,4
		MgO	8 ppm	-22	5,2
Wielkość ziaren:	90/16 $\mu m$	SiO <sub>2</sub>	1605 ppm	-16	2,1
		TiO <sub>2</sub>	868 ppm	-11	0,4
		U	220 ppm	-7,8	0,0
		Th	51 ppm		

Na rysunkach 11.2 oraz 11.3 przedstawiono zdjęcie metalograficzne oraz rozkład fazowy proszku Amperit 827.7.



Rys. 11.2. Zdjęcia metalograficzne proszku AMPERIT 827.7 [54]



Rys. 11.3. Rozkład fazowy proszku AMPERIT 827.7 [54]

## 11.2. Badania metalograficzne próbek z powłokami TBC

W dalszej części pracy zostały wykonane badania metalograficzne natrykiwanych próbek przy użyciu elektronowego mikroskopu skanującego – SEM.

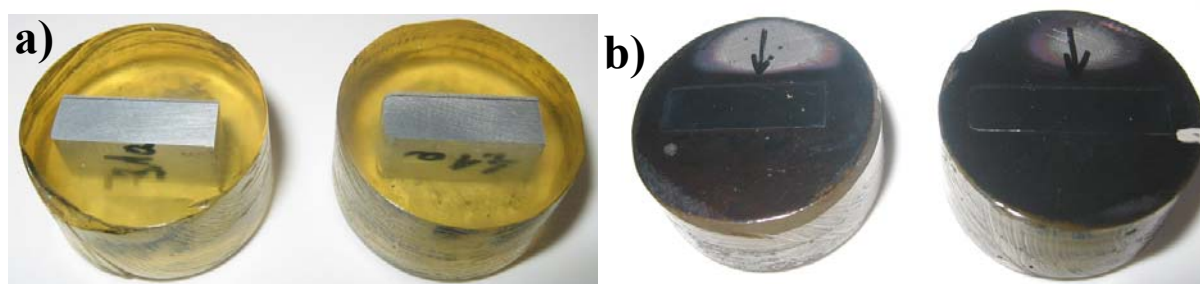
W mikroskopach skaningowych wiązka elektronów bombarduje próbkę, skanując jej powierzchnię linia po linii. Pod wpływem wiązki elektronów próbka emituje różne sygnały (m. in. elektrony wtórne, elektrony wstecznie rozproszone, charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie), które są rejestrowane za pomocą odpowiednich detektorów, a następnie przetwarzane na obraz próbki lub widmo promieniowania rentgenowskiego.

Zastosowanie w tym przypadku elektronowego mikroskopu skaningowego do badań metaloznawczych uzasadnione było tym, że duża głębia ostrości tego mikroskopu czyni go szczególnie przydatnym do badań faktograficznych, czyli do badań topografii przełomów. Polegają one na obserwacji powierzchni przedmiotów utworzonych w wyniku działania naprężeń prowadzących do rozdzielania materiału. Pozwala to poznać mechanizmy: procesu pęknięcia, ciągliwy, transkrystaliczny, zmęczeniowy. Ponieważ pęknięcie rozwija się najczęściej w najbardziej osłabionych obszarach próbki, na przełomie mogą być ujawnione różne szczegóły strukturalne, np. wydzielenia obcych faz, wady materiałowe w postaci porów, pustek i mikropęknięć. Próbki do badań nie wymagają specjalnego przygotowania, stawiane są tylko ograniczenia, co do ich wielkości.

Zastosowanie SEM bardzo przydatne jest do badań morfologii powierzchni czyli:

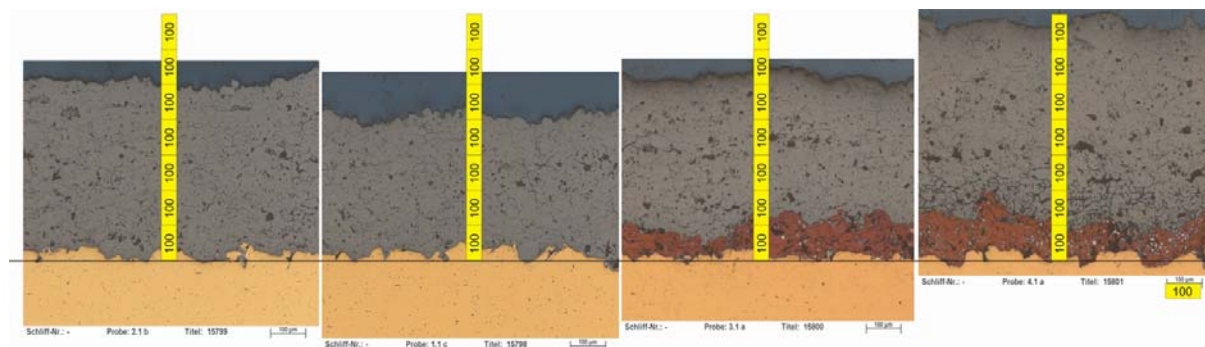
- badanie jakości powierzchni powłok ochronnych,
- badanie uszkodzeń warstwy wierzchniej różnych elementów,
- do diagnozowania zniszczeń korozyjnych – ogniska i produkty korozji.

Badania próbek z natryskiwanyymi plazmowo powłokami ceramicznymi zostały wykonane przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego **JEOL JMS-5800LV** znajdującego się w Zakładzie Materiałoznawstwa w Instytucie Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. W tym celu zostały wykonane zglądy próbek. Próbki zostały pocięte na małe kawałki o wymiarach 15x15mm, zalane w żywicy, przeszlifowane i spolerowane przy użyciu maszyn polerskich oraz wytrawione w specjalnej komorze próżniowej na Uniwersytecie w Dortmundzie w Niemczech. Na rysunku. 11.4 przedstawiono zdjęcia próbek przygotowanych do badań metalograficznych przy użyciu mikroskopu elektronowego skaningowego z ciekłą warstwą węgla .



Rys. 11.4. Próbki przygotowane do badań metalograficznych  
a) przed naniesieniem warstwy węgla b) przed samym badaniem z warstwą węgla

Tak przygotowane zglądy czterech próbek zostały poddane badaniom metalograficznym.

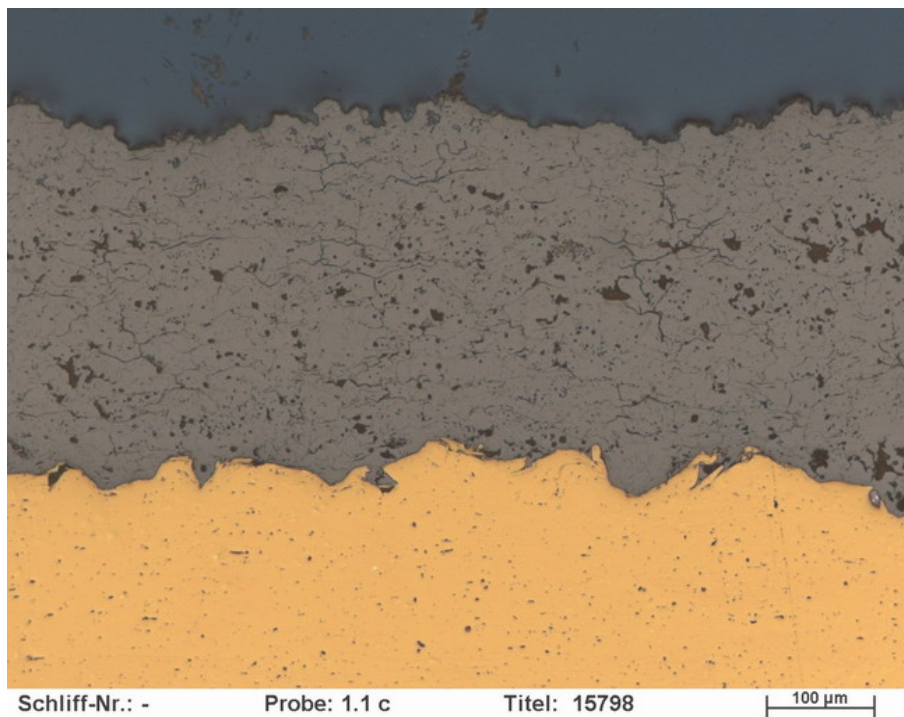


Rys. 11.5. Zróżnicowanie grubości i warstwowości powłok ceramicznych TBC

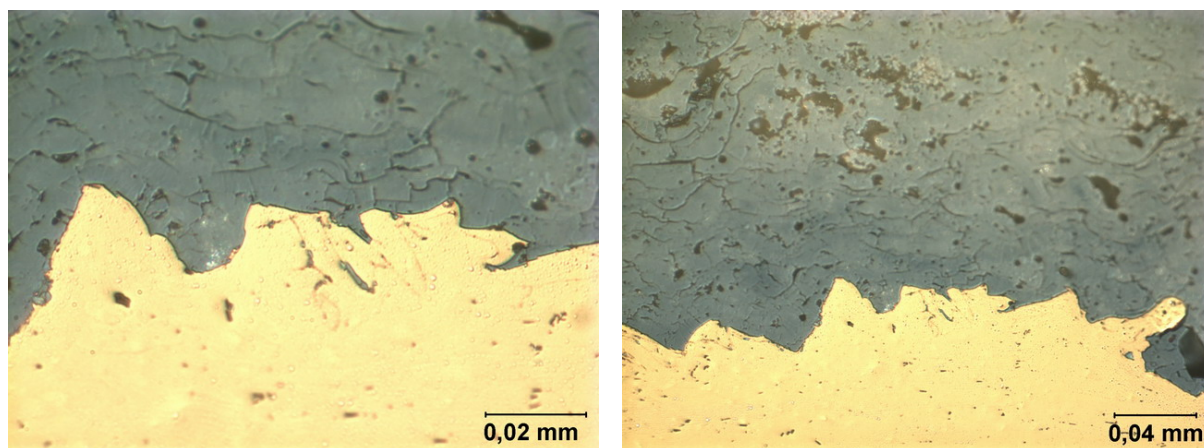
Na rysunku 11.5 przedstawiono zróżnicowanie grubości badanych próbek oraz ich warstwowość.

### 11.2.1. Próbka nr 1

Rysunek 11.6 oraz 11.7 przedstawiają zdjęcie zglądu próbki nr 1 z natrykiwaną warstwą ceramiczną  $ZrO_2-Y_2O_3$  bez warstwy relaksacyjnej. Materiał ceramiczny jest tu bezpośrednio natrykiwany na podłoże aluminiowe.



Rys. 11.6. Zdjęcie przedstawiające przekrój próbki nr 1



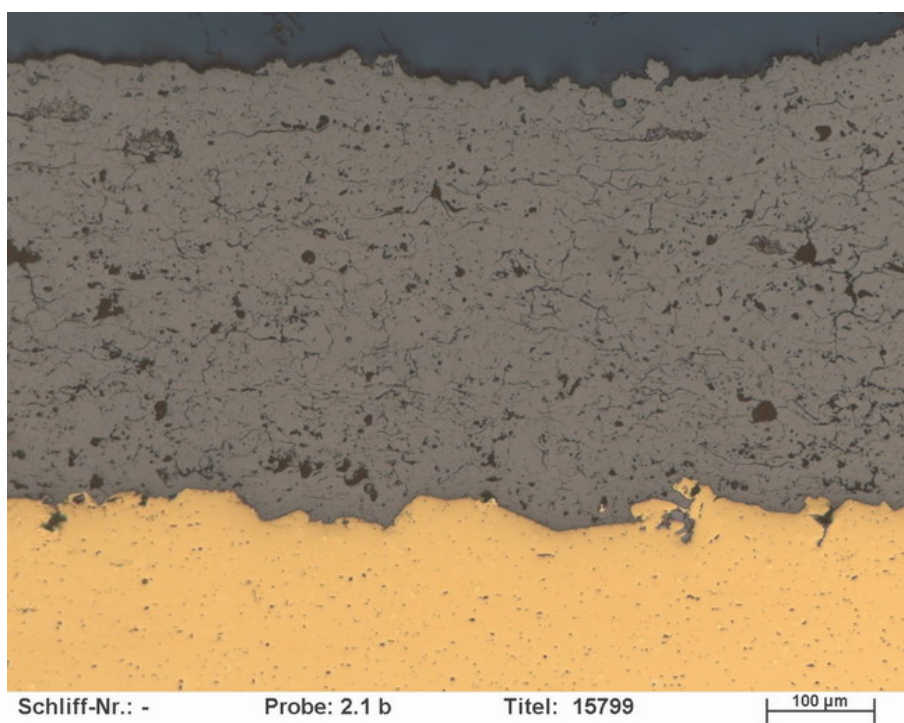
Rys. 11.7. Zdjęcia przedstawiające przekrój próbki nr 1 – widoki szczegółowe

Na zdjęciach widoczne są różne wady – defekty struktury powłoki powstałe po procesie natrykiwania.

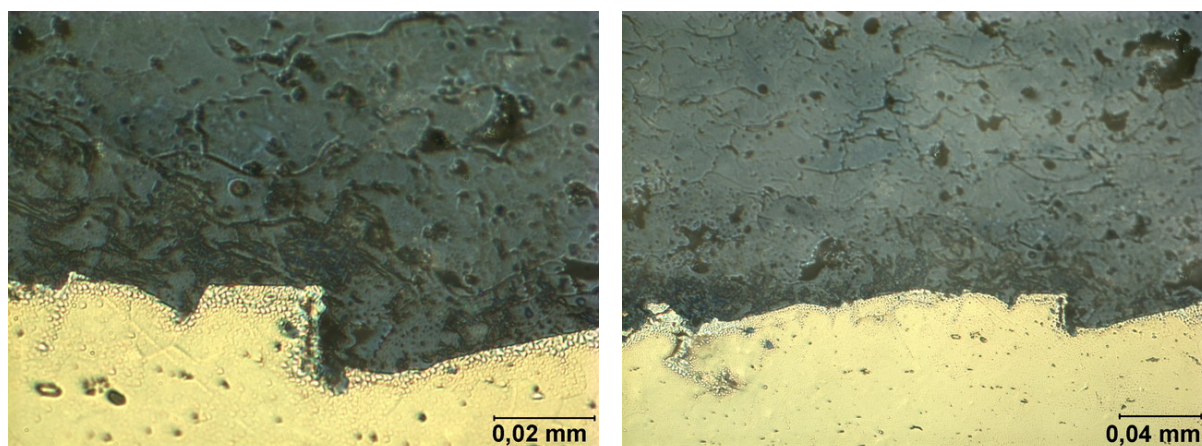


### 11.2.2. Próbka nr 2

Rysunek 11.8 oraz 11.9 przedstawia zdjęcie zglądu próbki nr 2 z natrykiwaną warstwą ceramiczną  $ZrO_2-Y_2O_3$  bez warstwy relaksacyjnej. Materiał ceramiczny jest tu również bezpośrednio natrykiwany na podłoże aluminiowe lecz warstwa wierzchnia jest o  $100\mu m$  grubsza.



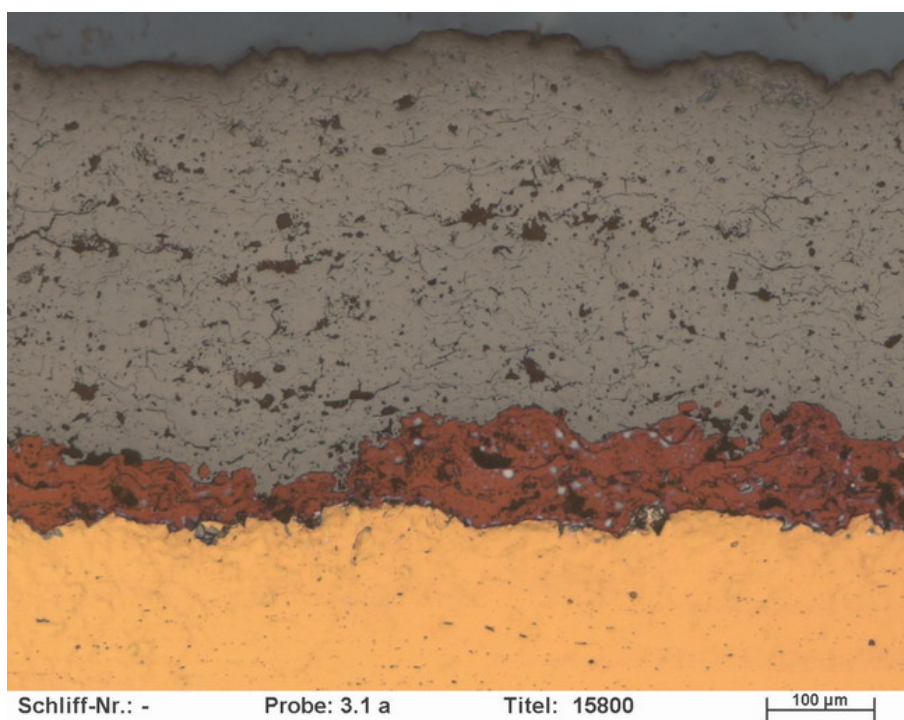
Rys. 11.8. Zdjęcie przedstawiające przekrój próbki nr 2



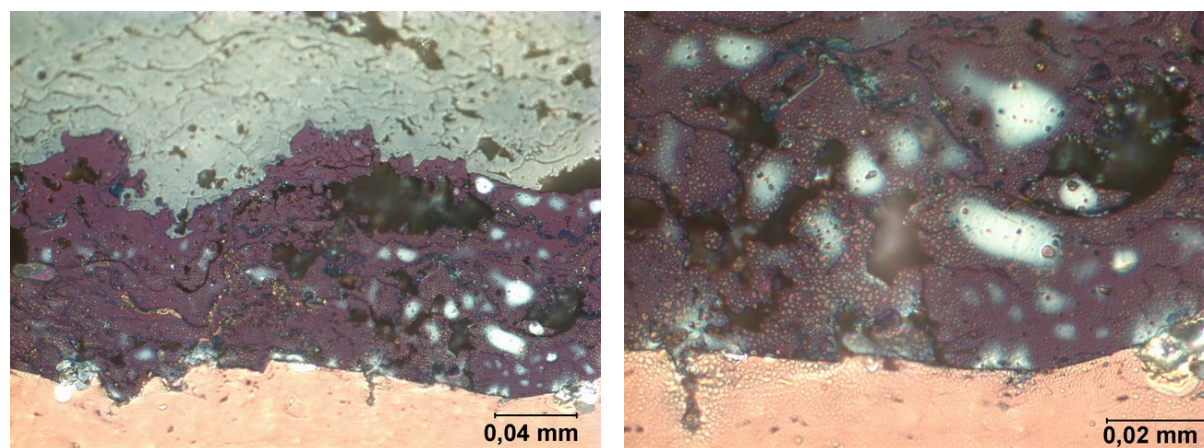
Rys. 11.9. Zdjęcia przedstawiające przekrój próbki nr 2 – widoki szczegółowe

### 11.2.3. Próbka nr 3

Rysunek 11.10 przedstawia zdjęcie zglądu próbki nr 3 z natrykiwaną warstwą ceramiczną  $ZrO_2-Y_2O_3$  oraz wcześniej natrykiwaną warstwą relaksacyjną NiCoCrAlY. W tym przypadku na podłoże aluminiowe została natrykiwana najpierw warstwa podkładowa o grubości  $100\mu m$ , a następnie na tą warstwę została natrykiwana warstwa wierzchnia – główna o grubości  $400\mu m$ .



Rys. 11.10. Zdjęcie przedstawiające przekrój próbki nr 3



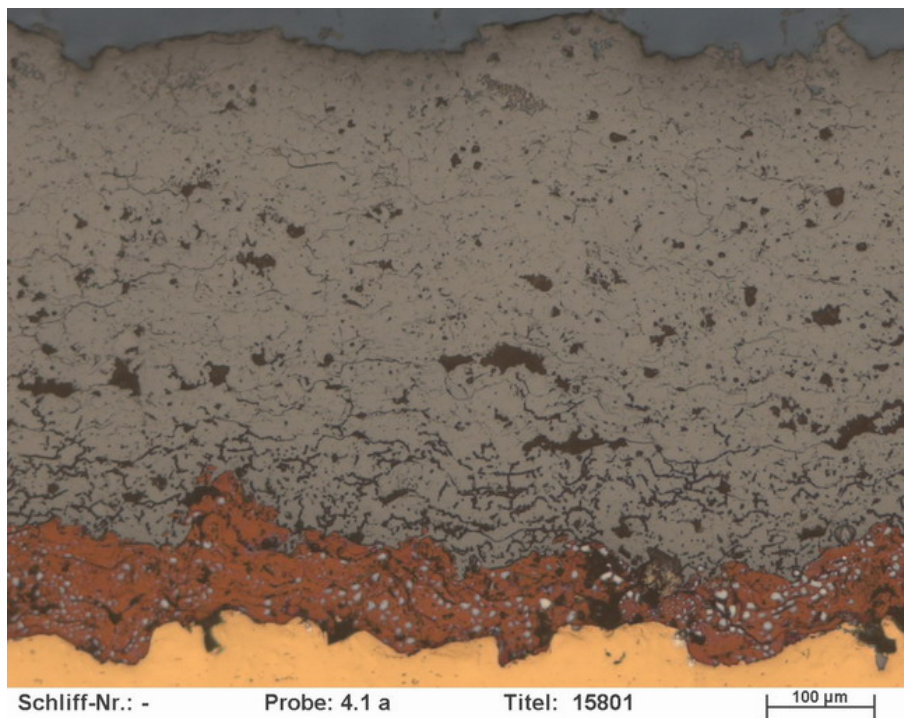
Rys. 11.11. Zdjęcie przedstawiające przekrój próbki nr 3 – widoki szczegółowe

Rysunek 11.11 przedstawia dokładniejsze zdjęcie warstwy relaksacyjnej z widocznymi mikroporami na styku materiału z podłożem, jak i z warstwą wierzchnią.

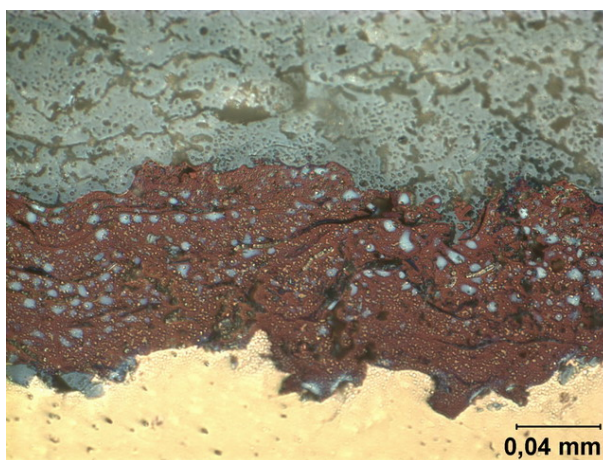


#### 11.2.4. Próbka nr 4

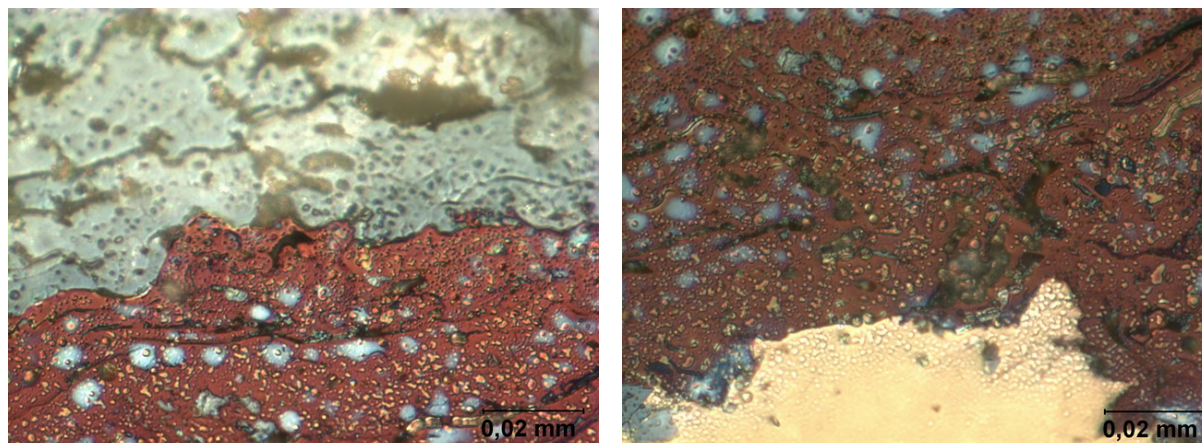
Rysunek 11.12 przedstawia zdjęcie zglądu próbki nr 4 z natrykiwaną warstwą ceramiczną  $ZrO_2-Y_2O_3$  oraz wcześniej natrykiwaną warstwą relaksacyjną NiCoCrAlY. W tym przypadku na podłoże aluminiowe również została natrykiwana najpierw warstwa podkładowa o grubości  $100\mu m$ , a następnie na tą warstwę została natrykiwana warstwa wierzchnia – o zwiększonej grubości  $500\mu m$ .



Rys. 11.12. Zdjęcie przedstawiające przekrój próbki nr 4



Rys. 11.13. Widok na warstwę relaksacyjną NiCoCrAlY

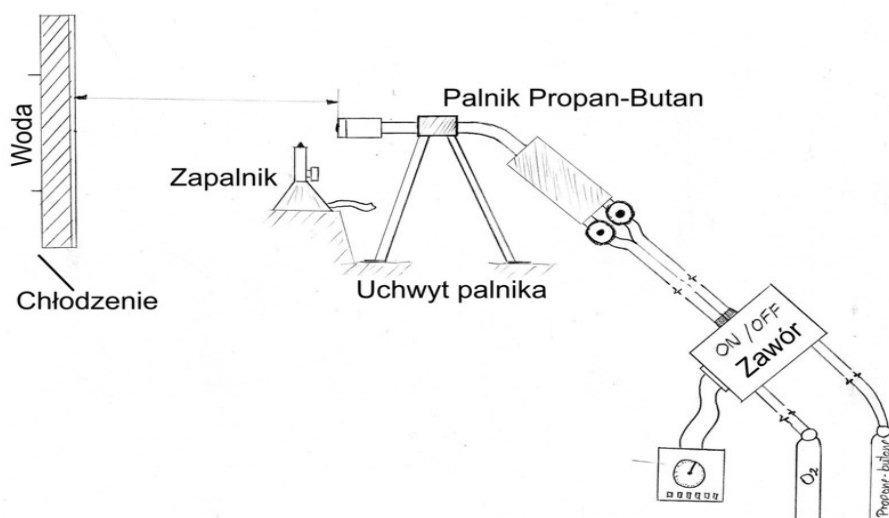


Rys. 11.14. Zdjęcia przedstawiające przekrój próbki nr 4 – widoki szczegółowe

Na rysunkach 11.13 i 11.14 przedstawiono dokładniejszy widok połączenia warstwy wierzchniej i podłoża z warstwą relaksacyjną. Można również dostrzec istniejące wady struktury.

### 11.3. Stanowisko badawcze

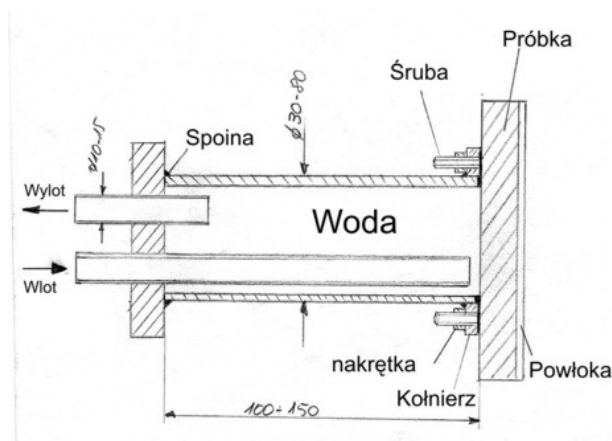
Biorąc pod uwagę przegląd istniejących stanowisk do badania odporności na szok termiczny powłok ceramicznych, został wykonany projekt własnego stanowiska z ciągłym chłodzeniem badanej próbki (rys. 11.15). Badana próbka będzie tu w sposób ciągły chłodzona zarówno podczas etapu grzania, jak i chłodzenia przy użyciu sprężonego powietrza lub wody, zamocowana w specjalnym uchwycie będącym integralną częścią układu chłodzenia przedstawionym na rys. 11.16. Według wstępnego projektu oraz dokumentacji technicznej zostało wykonane stanowisko wraz z systemem chłodzenia.



Rys. 11.15. Projekt stanowiska do badania odporności na szok termiczny



System chłodzenia w pewnym sensie ma symulować proces chłodzenia w silniku spalinowym, gdzie powłoki TBC mają największe zastosowanie. W przypadku chłodzenia wodą w systemie tym integralną częścią jest uchwyt mocujący próbkę, który od drugiej strony połączony jest z rurą o profilu kwadratowym. Rura ta jest zaślepiona płytką z przymocowanymi dwoma rurkami o różnej długości. Rurka dłuższa dostarcza wodę zimną do elementu mocującego próbkę, gdzie następnie woda odbierająca ciepło od uchwytu wydostaje się na zewnątrz do kanalizacji krótszą rurką. System ten nie jest obiegiem zamkniętym, dlatego nie wymagało to zastosowania chłodzenia czynnika chłodzącego.



Rys. 11.16. Projekt układu chłodzącego próbkę

Na rysunku 11.17 przedstawiono poszczególne elementy na które się składa układ chłodzenia. Elementy te zostały ze sobą połączone metodą MAG w całość tworząc zintegrowany system chłodzenia przedstawiony również na rys. 11.17.

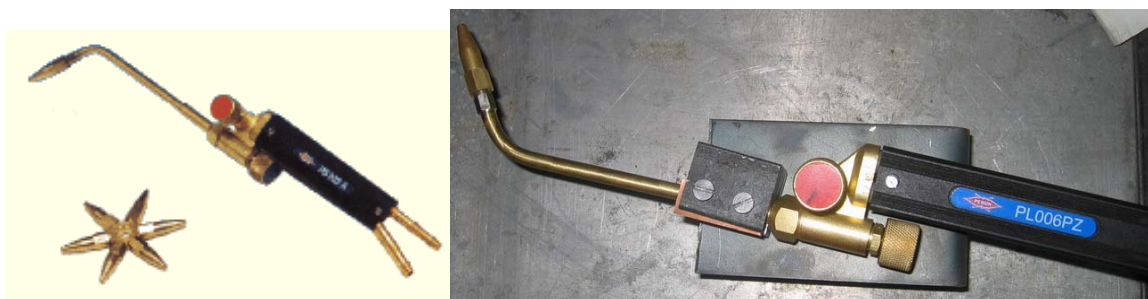


Rys. 11.17. Elementy układu chłodzenia oraz całkowity system chłodzący



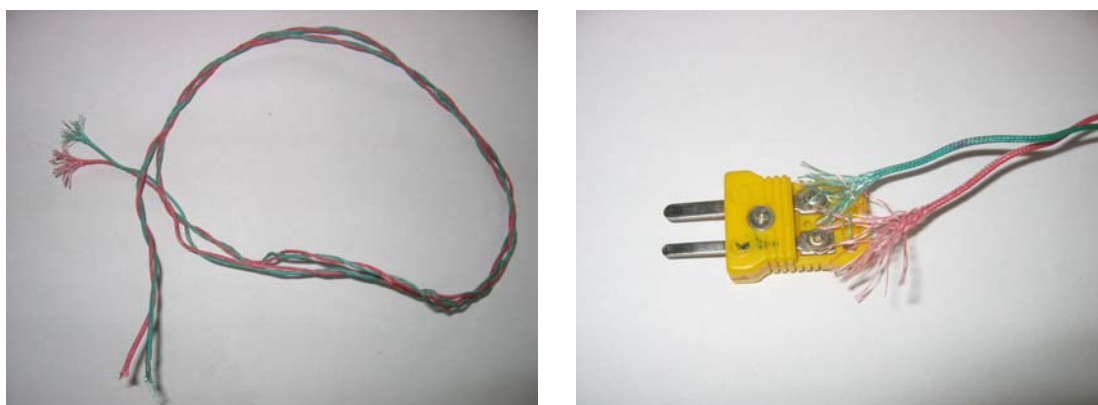
Rys. 11.18. układ chłodzenia podłączony do sieci wodnej

Źródłem ciepła w tym przypadku był płomień gazu propan – butan + tlen. Płomień gazowy uzyskiwano przy pomocy palnika do lutowania typ PL-006PZ przedstawionego na rys. 11.19.



Rys. 11.19. Widok palnika do lutowania typ PL-006PZ firmy PERUN (z uchwytem)

Do pomiaru temperatury zostały wykorzystane przedstawione na rys. 11.20 termopary typu K (NiCr-NiAl).



Rys. 11.20. Termopary typu K – grubość 0,5mm oraz złączka podłączenia termopary

Urządzeniem wykorzystywanym w pomiarze temperatury był miernik firmy METEX typu M-3850 (rys.11.21) z gniazdem do podłączania termopar typu K. Miernik ten przez złącze USB z przejściami RS32 i LPT podłączony był do Laptopa (rys. 11.22) z zainstalowanym systemem pomiarowym ScopeView wersja 1.03 firmy Metex wykorzystywanym do pomiaru.



Rys. 11.21. Miernik firmy METEX M-3850

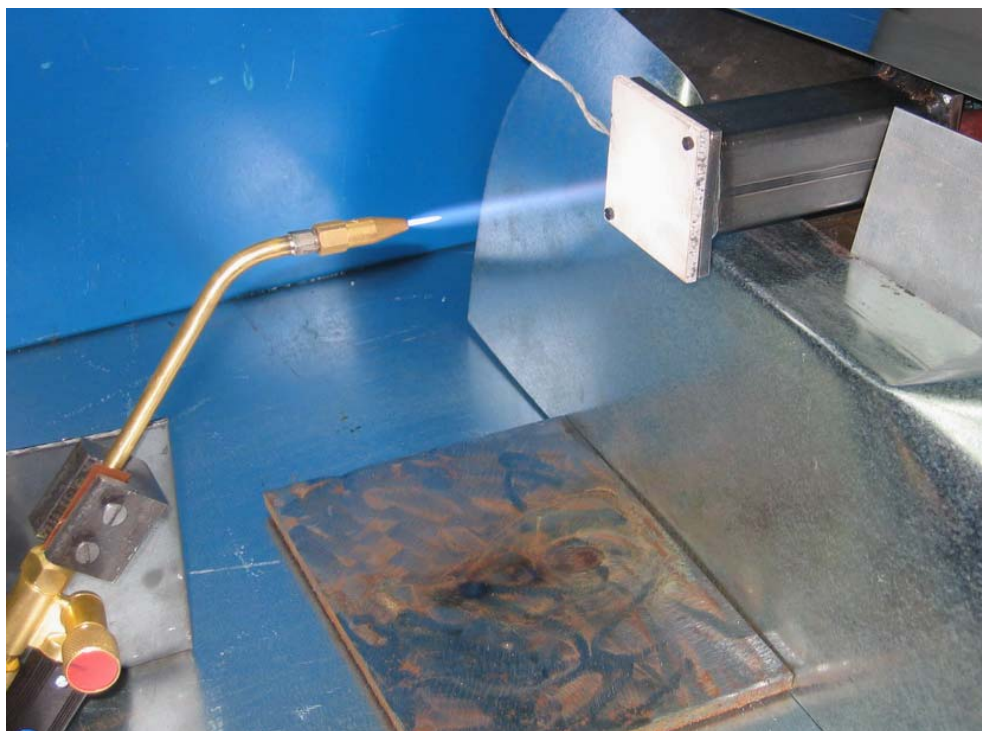
Program ScopeView pozwalał na rejestrowanie przebiegów czasowych temperatury podczas procesu grzania i chłodzenia w postaci wykresu, jak i w postaci tabelarycznej. Pomiar wykonywany był z częstotliwością 1 Hz.



Rys. 11.22. Laptop z systemem pomiarowym ScopeView – METEX

Na rysunku. 11.23 przedstawiono widok na gotowe stanowisko pomiarowe przygotowane do testów. Przygotowane próbki do badań zostały zamocowane w uchwycie w odległości 100mm od palnika, z wcześniej przytwierdzonymi termoparami. Termopary typu K zostały przytwierdzone do dolnej powierzchni próbki – podłoża aluminiowego przy użyciu punktowej zgrzewarki TWU firmy Standard pokazanej na rys 11.24.





Rys. 11.23. Widok na stanowisko pomiarowe

Końcówki termopar zostały przygrzane do powierzchni aluminiowej w odległości 3÷4mm od siebie w celu zapewnienia najlepszych warunków pomiaru (rys. 11.25). Do badań zostały użyte dwie grubości termopar 0,5mm i 0,7mm.



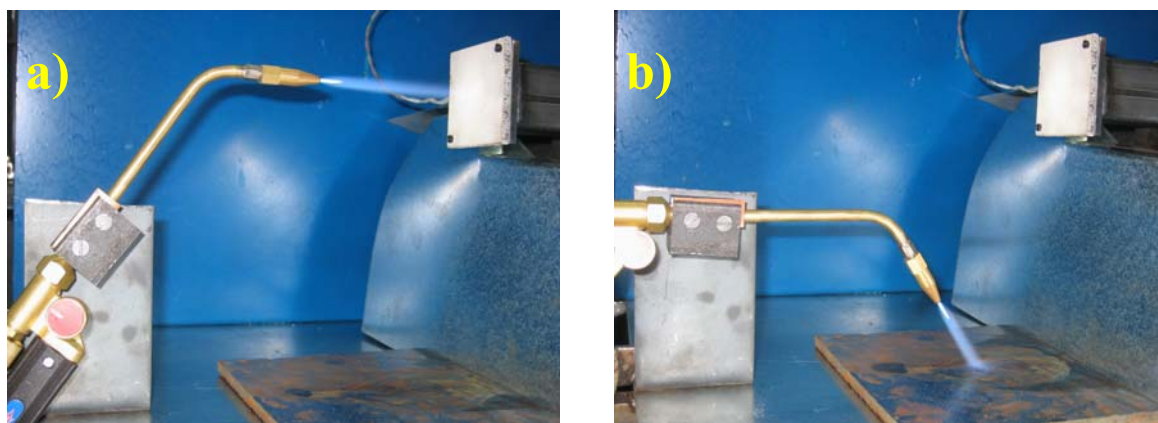
Rys. 11.24. Punktowa zgrzewarka TWU firmy Standard

Położenie termopar uzależnione było od obszaru grzania palnika po stronie powłoki ceramicznej, tak aby znajdowały się w centrum obszaru nagrzewanego.

Wykorzystywany palnik zamocowany był w specjalnym uchwycie, co pozwalało na ustawienie go w dwóch pozycjach (rys. 11.26), podczas grzania i chłodzenia .



Rys. 11.25. Mocowanie termopar do próbek a) chłodzenie powietrzem b) chłodzenie wodą



Rys. 11.26. Pozycja palnika a)grzanie, b)chłodzenie

Wszystkie badane próbki poddawane były procesowi nagrzewania i chłodzenia o takich samych parametrach, tzn. sile płomienia palnika, odległości palnika od próbek oraz wydajności dyszy chłodzącej sprężonego powietrza. Stabilizacja tych warunków umożliwiała poddanie różnych próbek tym sam warunkom w zależności od przeprowadzanej próby. Rysunek 11.27 przedstawia widok badanej próbki podczas podgrzewania płomieniem palnika.



Rys. 11.27. Podgrzewanie płomieniem palnika próbki chłodzonej powietrzem

Można zauważyć tu jak próbka – warstwa ceramiczna rozgrzewa się do czerwoności poddając się wysokiej temperaturze palnika rzędu  $1573 \div 1773^\circ\text{K}$ .

## 11.4. Badania eksperymentalne – próby na wybranych próbkach

Plan eksperymentu obejmował siedem prób na pięciu rodzajach próbek. Do badań użyto cztery próbki z powłoką TBC oraz jedną próbkę aluminiową podłoża bez powłoki ceramicznej (dla porównania). Następnie na wytypowanych próbkach z warstwami TBC przeprowadzono próby cykli termicznych o takich samych parametrach dla każdego rodzaju próbki.

Ze względu na wyższe temperatury cykli termicznych w pracy przedstawiono wyniki prób dla chłodzenia próbek sprężonym powietrzem. Dla porównania w rozdziale 11.4.8 zamieszczono dla wybranych próbek wyniki cykli termicznych w postaci wykresów porównawczych temperatur dla próbek chłodzonych wodą lub powietrzem.

Została wykonana również próba pomiaru temperatury płomienia palnika gazowego na powierzchni próbki, z wykorzystaniem nawierconej płytki aluminiowej.

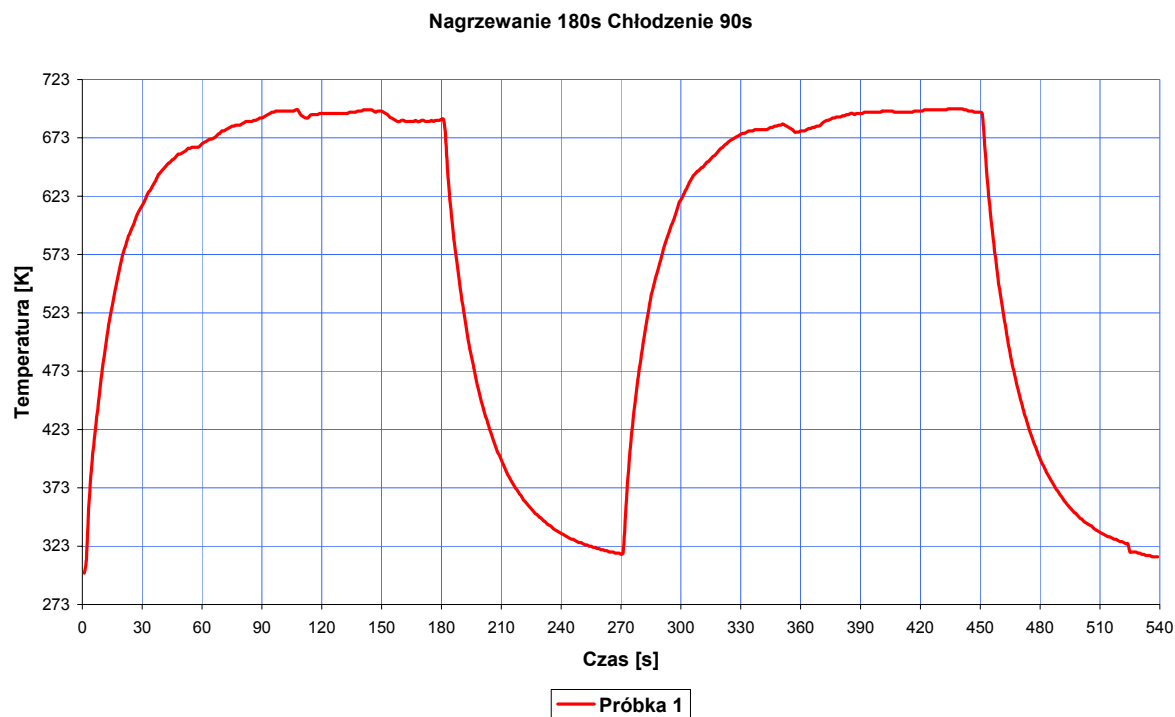
Każda z prób cyklu termicznego charakteryzowała się następującymi parametrami:

- I. próba – nagrzewanie próbki w sposób ciągły przez 180s, następnie palnik przechodził do pozycji chłodzenia i próbka chłodzona była przez 90s, (chłodzenie sprężonym powietrzem odbywało się od tyłu próbki, zarówno dla procesów grzania jak, i chłodzenia), natomiast strona powłoki TBC podczas chłodzenia poddawana była działaniu otaczającego ją powietrza (od rys. 11.28 do 11.33),
- II. próba – nagrzewanie próbki w sposób ciągły przez 30s, następnie palnik przechodził do pozycji chłodzenia i próbka chłodzona była przez 60s, (chłodzenie powietrzem odbywało się od tyłu próbki, zarówno dla procesów grzania, jak i chłodzenia), natomiast strona powłoki TBC podczas chłodzenia poddawana była działaniu otaczającego ją powietrza (od rys. 11.34 do 11.39),
- III. próba – nagrzewanie próbki w sposób ciągły przez 30s, następnie palnik przechodził do pozycji chłodzenia i próbka chłodzona była przez 30s, (chłodzenie powietrzem odbywało się od tyłu próbki, zarówno dla procesów grzania, jak i chłodzenia), natomiast strona powłoki TBC podczas chłodzenia poddawana była działaniu otaczającego ją powietrza (od rys. 11.40 do 11.45),
- IV. próba – nagrzewanie próbki w sposób ciągły do temperatury 673K, następnie palnik przechodził do pozycji chłodzenia i próbka chłodzona była do temperatury 323K, (chłodzenie powietrzem odbywało się od tyłu próbki,

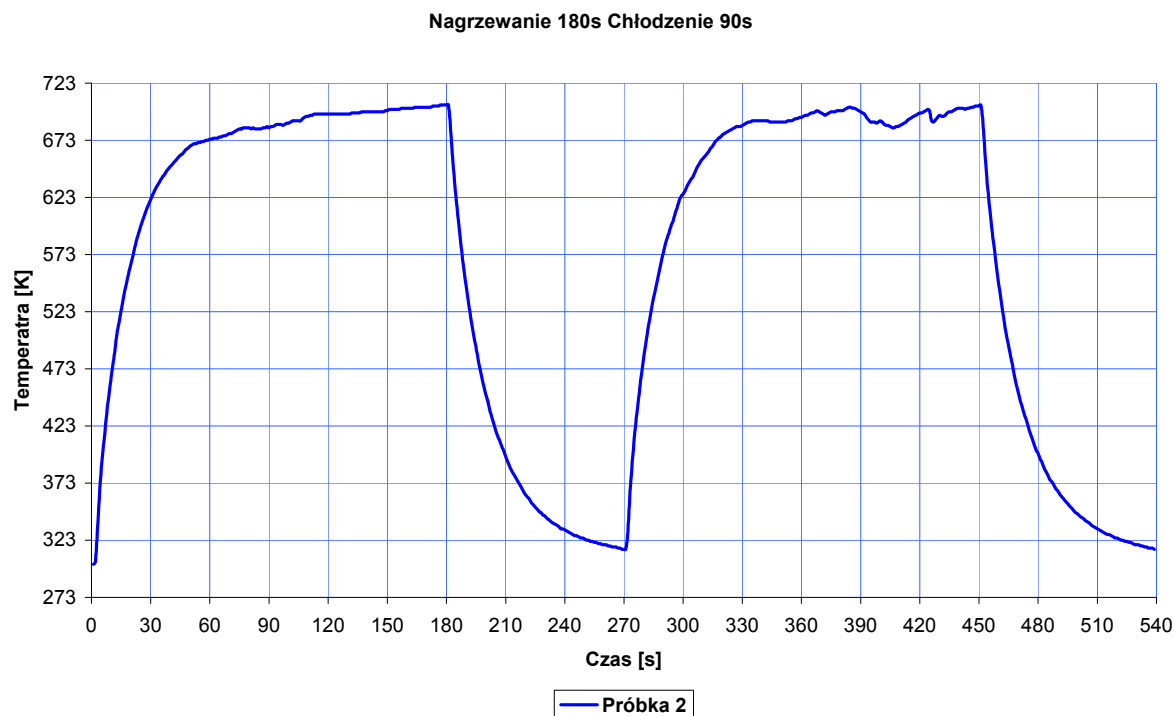
zarówno dla procesów grzania, jak i chłodzenia), natomiast strona powłoki TBC podczas chłodzenia poddawana była działaniu otaczającego ją powietrza, w próbie tej zostały określone czasy nagrzewania poszczególnych próbek do ustalonej temperatury (od rys. 11.46 do 11.51),

- V. próba – nagrzewanie 2 rodzajów próbek, płytki Al. oraz próbki nr 4 w sposób ciągły przez 30s, następnie palnik przechodził do pozycji chłodzenia i próbka chłodzona była przez 30s, chłodzenie powietrzem odbywało się od tyłu próbki tylko w momencie gdy palnik przechodził do pozycji chłodzenie, natomiast strona powłoki TBC podczas chłodzenia poddawana była działaniu otaczającego ją powietrza (od rys. 11.52 do 11.54),
- VI. próba – nagrzewanie próbki nr 4 w sposób ciągły do temperatury 673K, następnie palnik przechodził do pozycji chłodzenia i próbka chłodzona była do temperatury 323K, chłodzenie powietrzem odbywało się od tyłu próbki tylko w momencie gdy palnik przechodził do pozycji chłodzenie, natomiast strona powłoki TBC podczas chłodzenia poddawana była działaniu otaczającego ją powietrza (rys. 11.55),
- VII. próba – pomiar temperatury płomienia przy użyciu nawierconej płytki aluminiowej bez pokrycia TBC (rys. 11.56).

Na rysunkach od 11.57 do 11.59 przedstawiono porównanie temperatur dla prób I, II i III dla próbki 4 chłodzonej wodą i powietrzem.

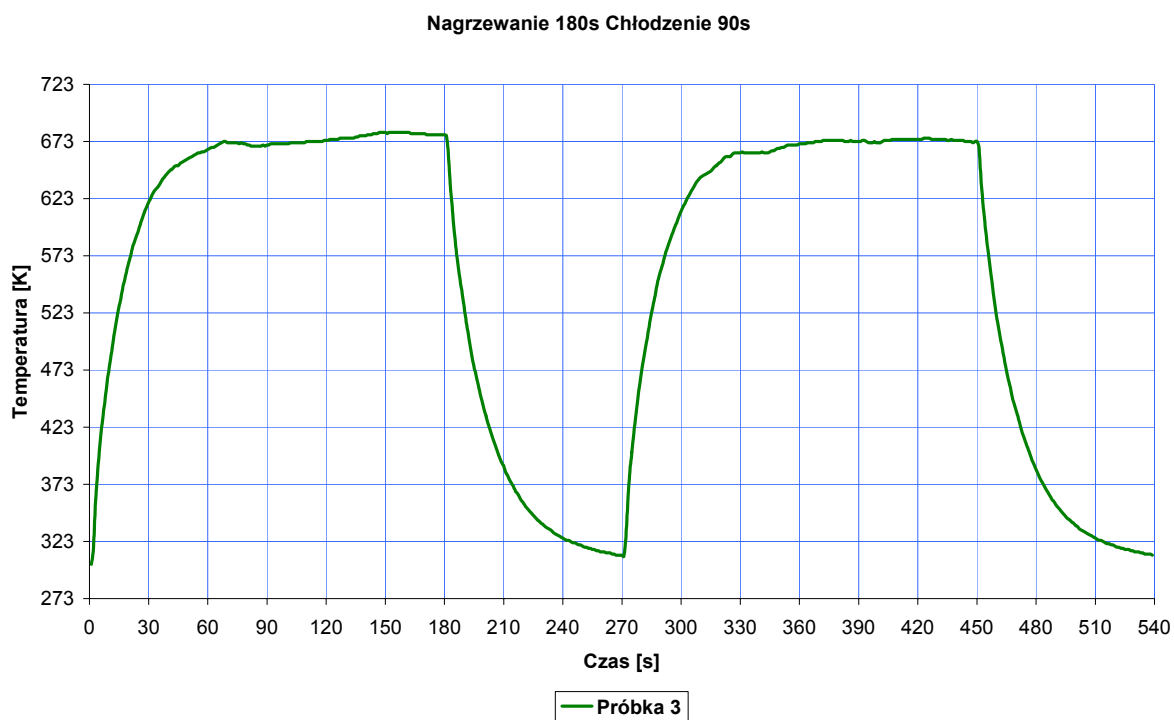
**11.4.1. Próba 1 – proces nagrzewania – czas 180s, chłodzenie 90s**

Rys. 11.28. Wykres temperatury w czasie dla próbki 1

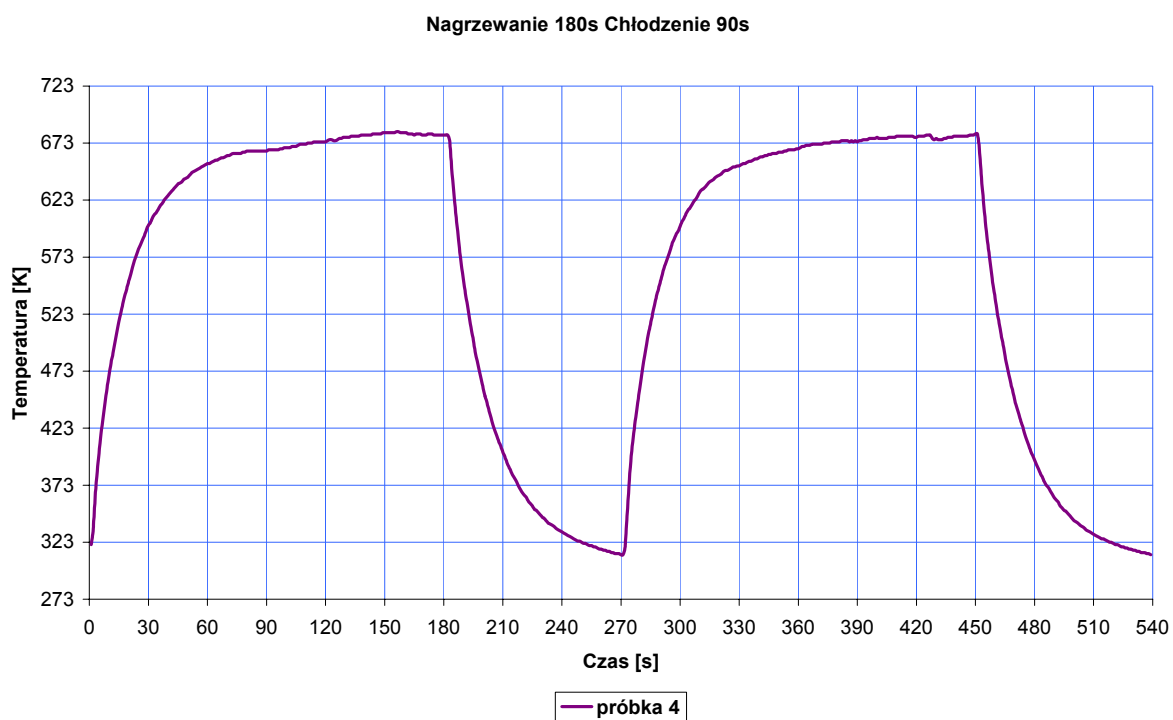


Rys. 11.29. Wykres temperatury w czasie dla próbki 2

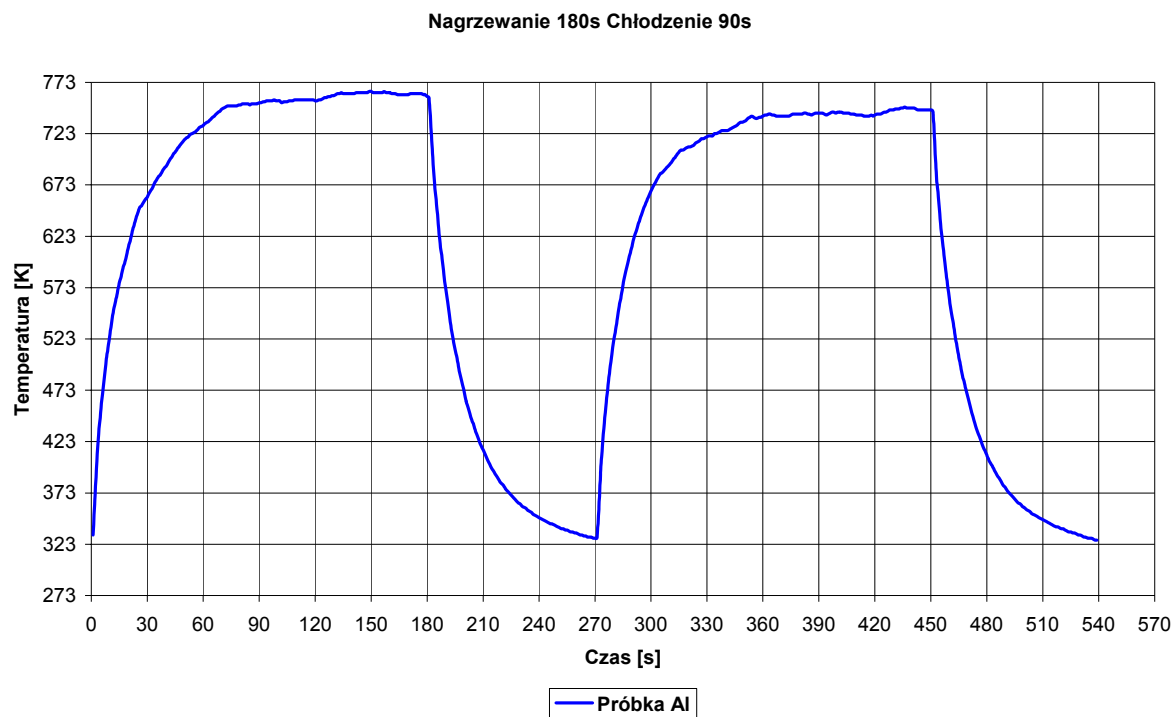




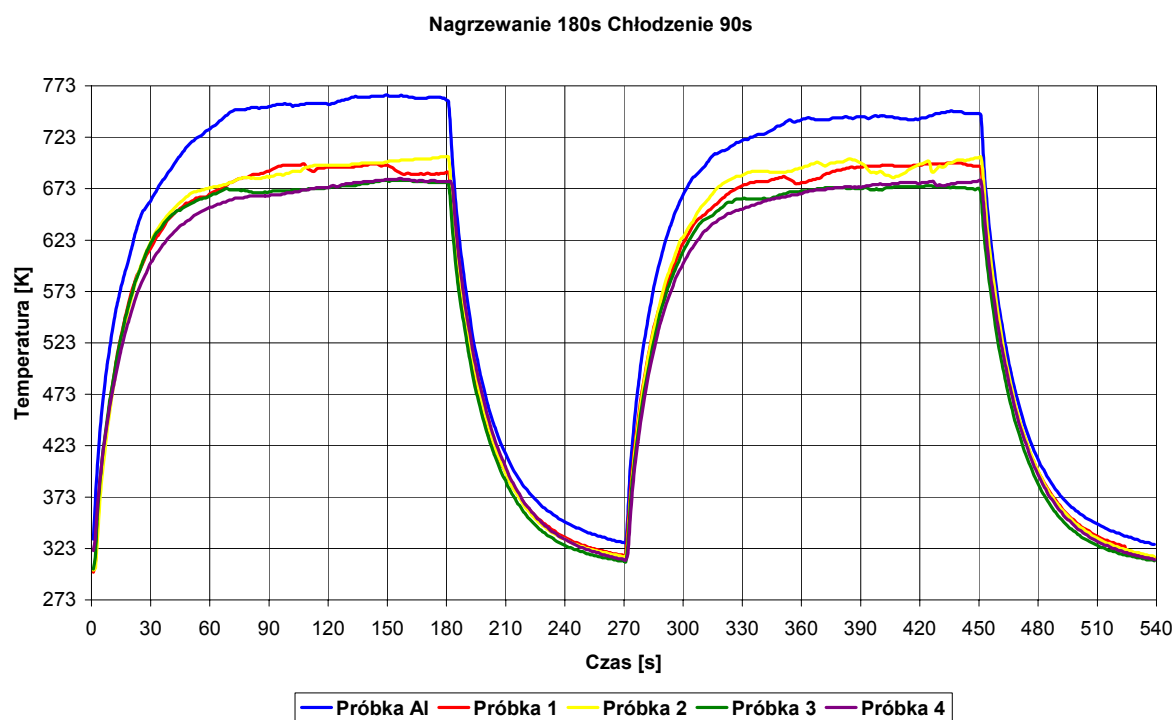
Rys. 11.30. Wykres temperatury w czasie dla próbki 3



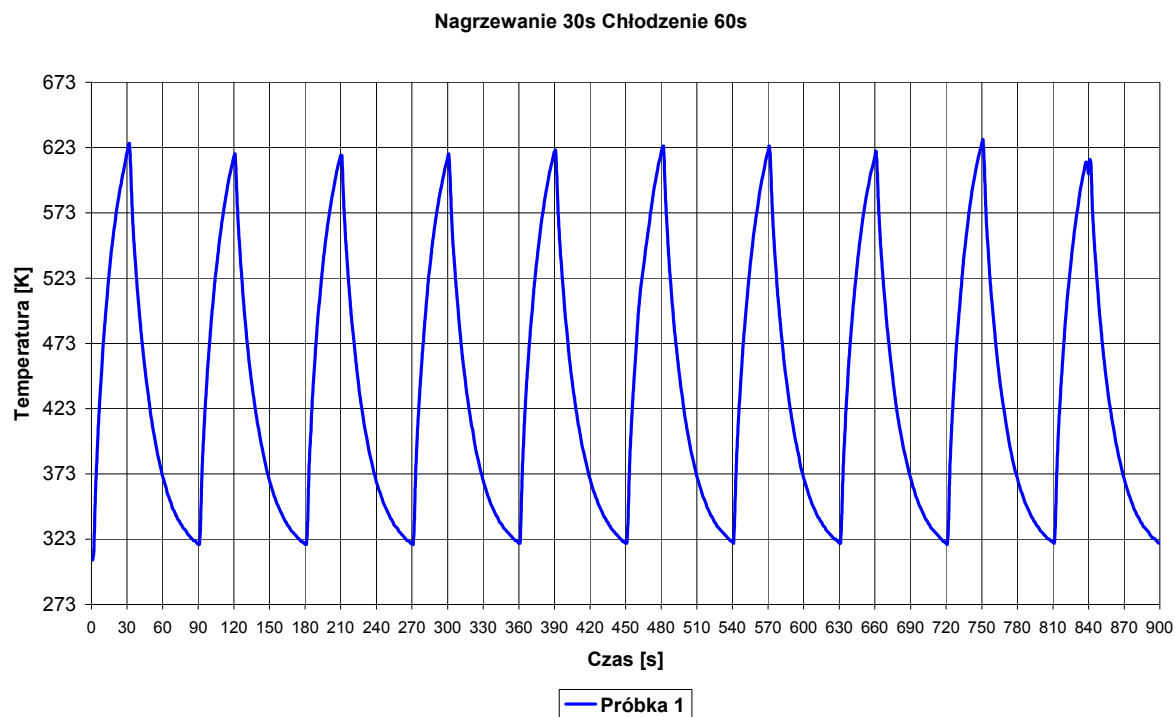
Rys. 11.31. Wykres temperatury w czasie dla próbki 4



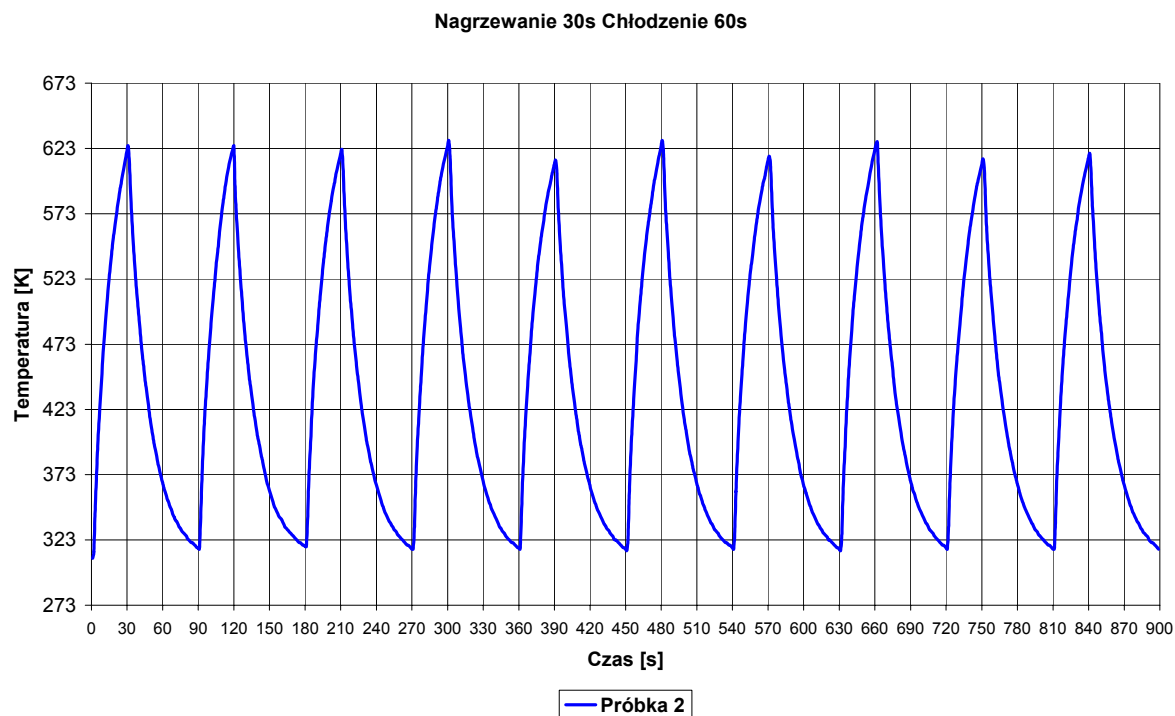
Rys. 11.32. Wykres temperatury w czasie dla próbki Al



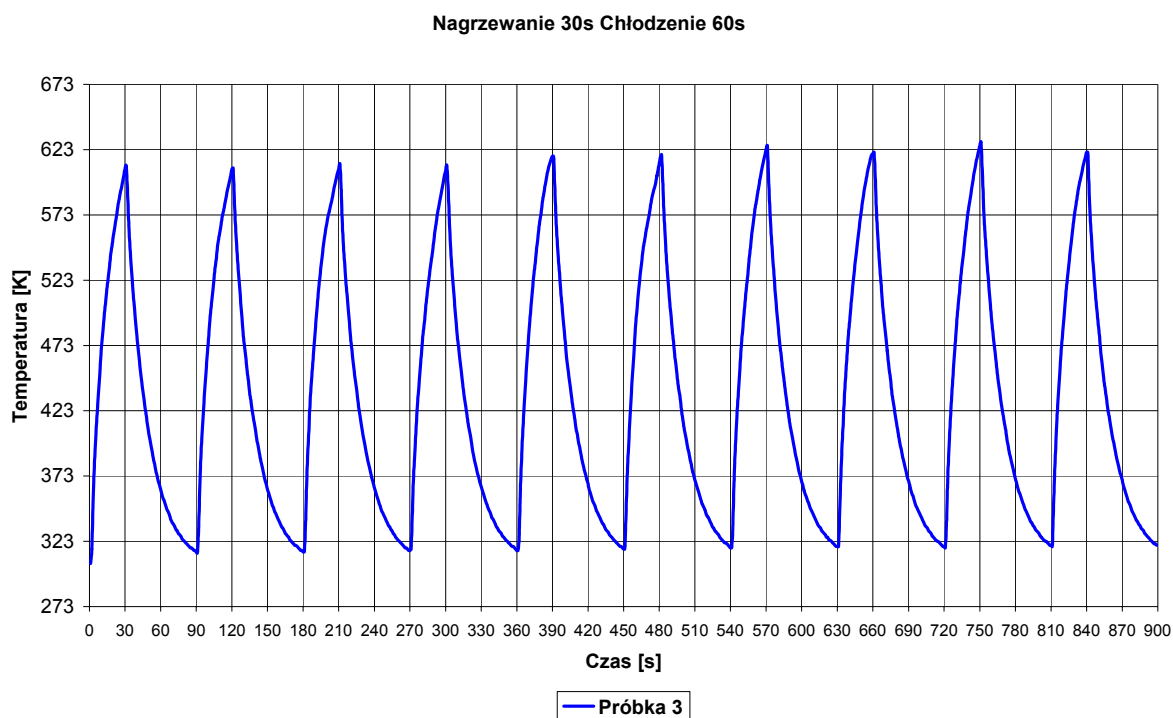
Rys. 11.33. Wykres temperatury w czasie – porównanie wszystkich próbek

**11.4.2. Próba 2 – proces nagrzewania – czas 30s, chłodzenie 60s**

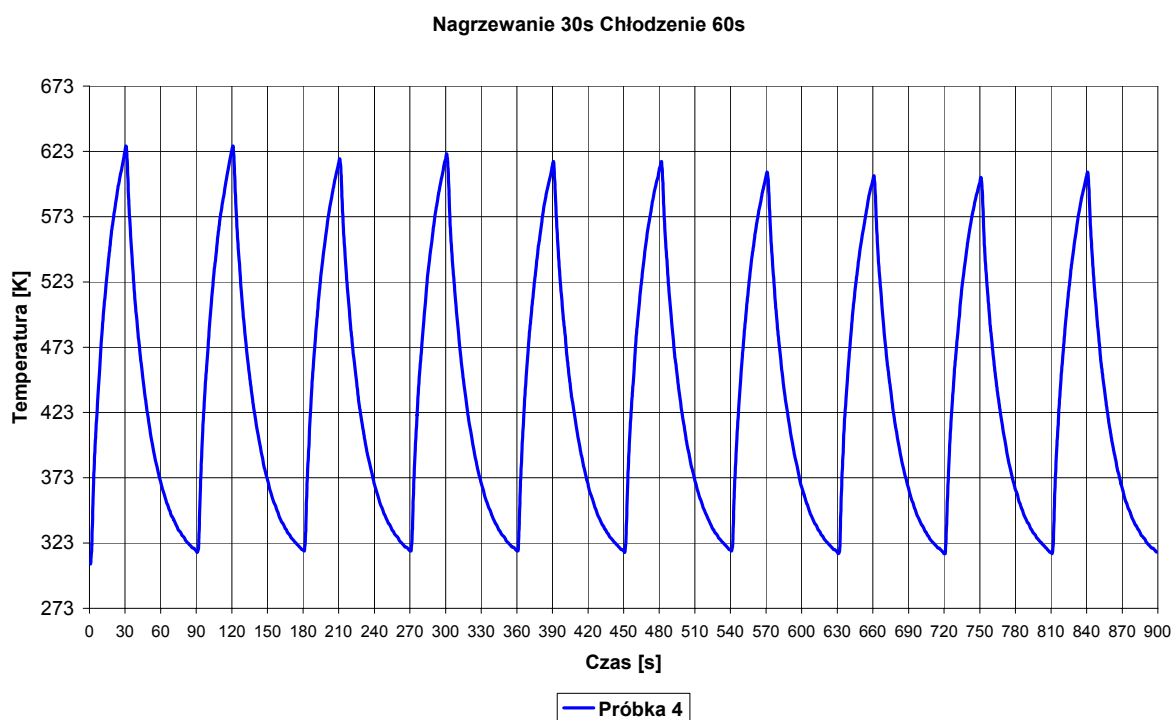
Rys. 11.34. Wykres temperatury w czasie dla próbki 1



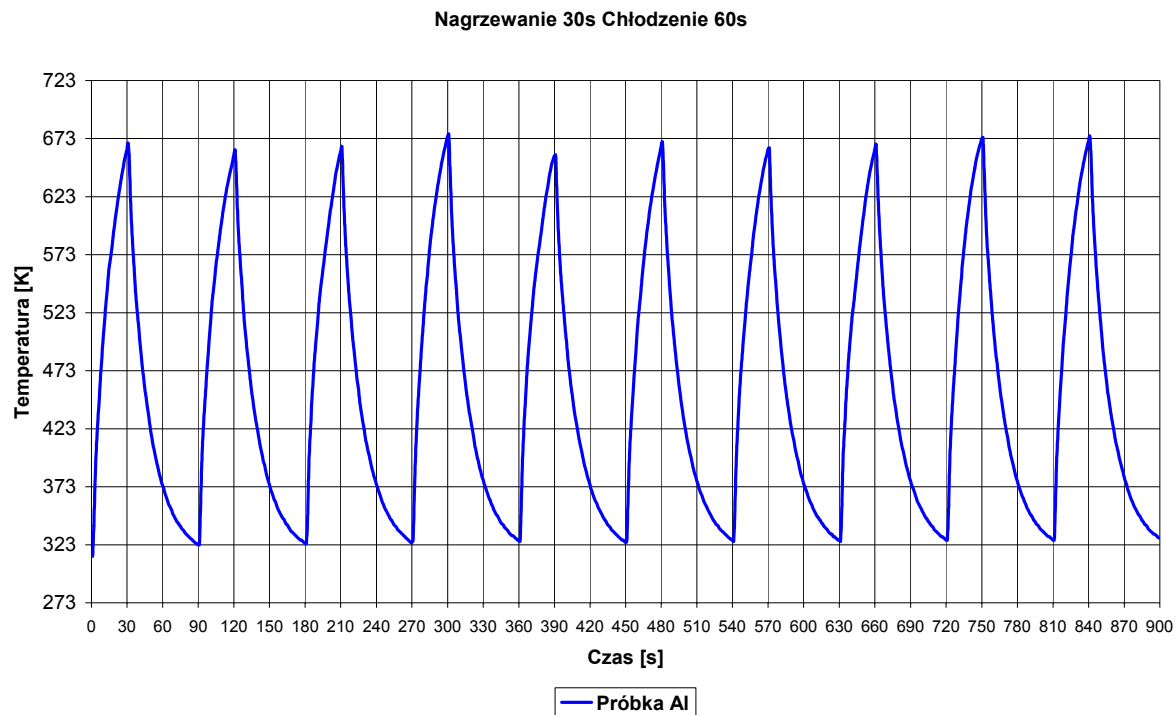
Rys. 11.35. Wykres temperatury w czasie dla próbki 2



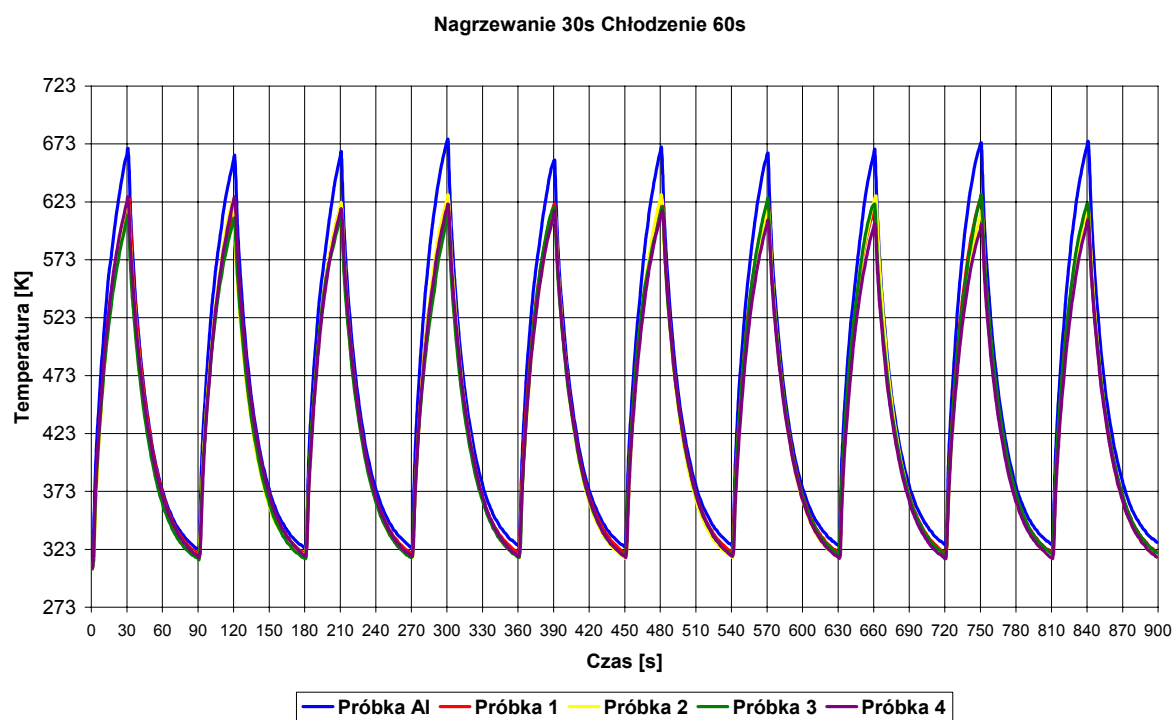
Rys. 11.36. Wykres temperatury w czasie dla próbki 3



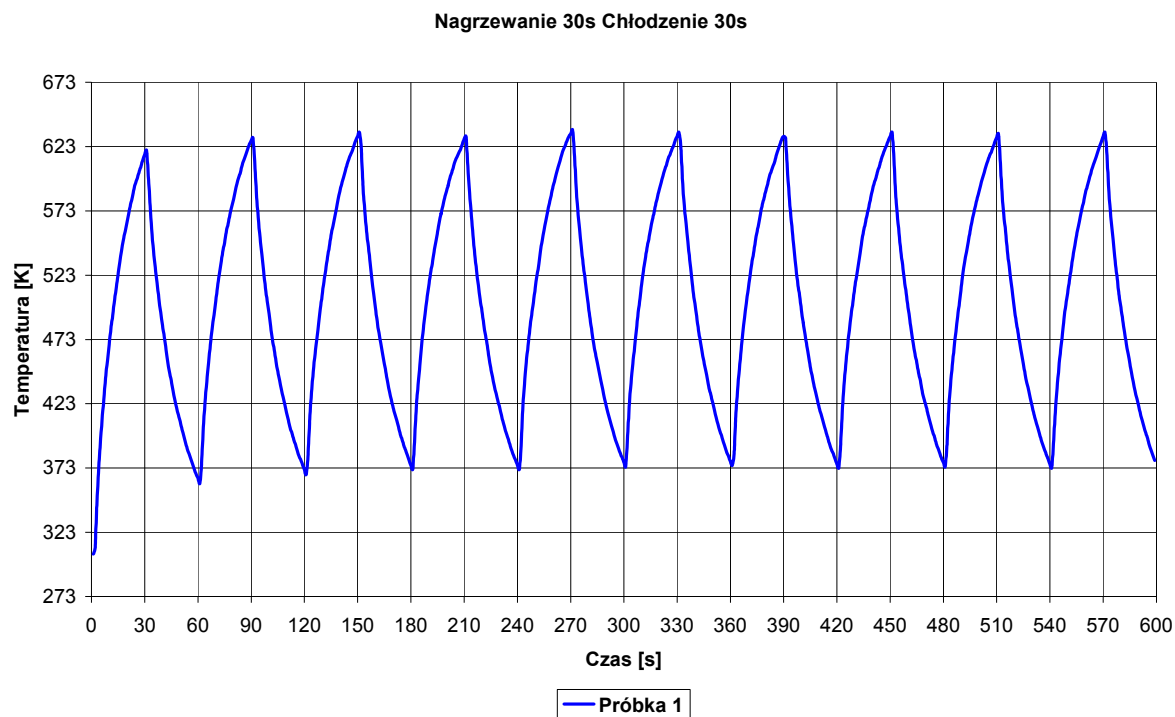
Rys. 11.37. Wykres temperatury w czasie dla próbki 4



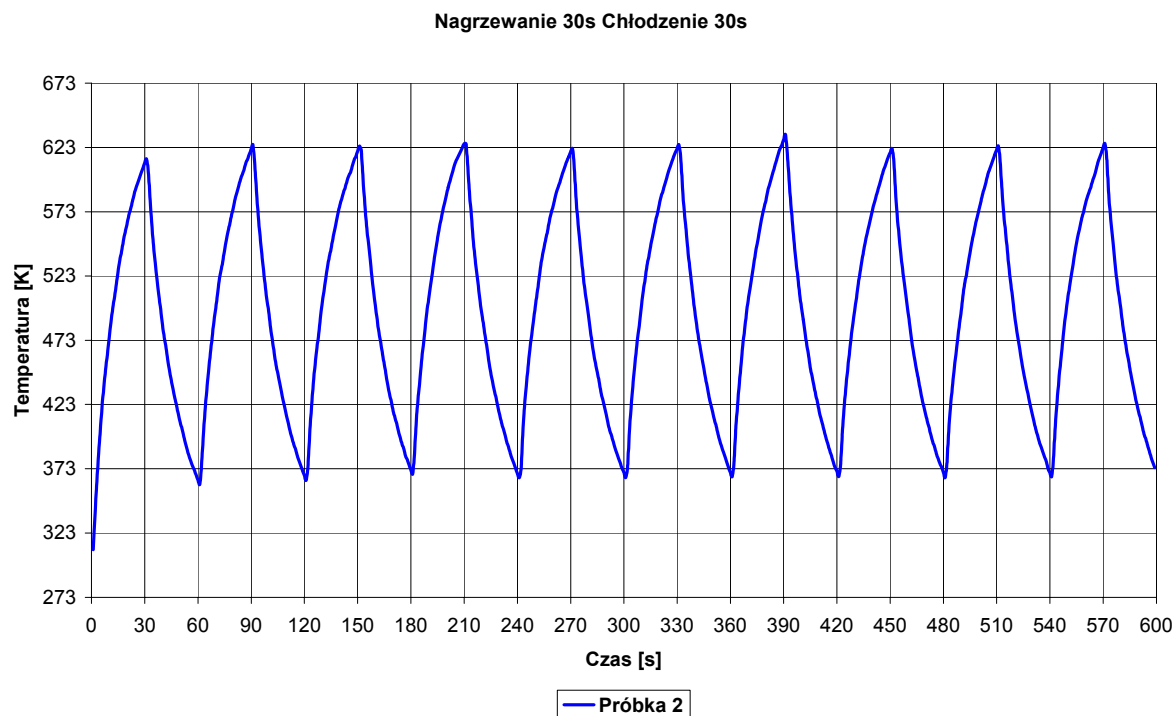
Rys. 11.38. Wykres temperatury w czasie dla próbki Al



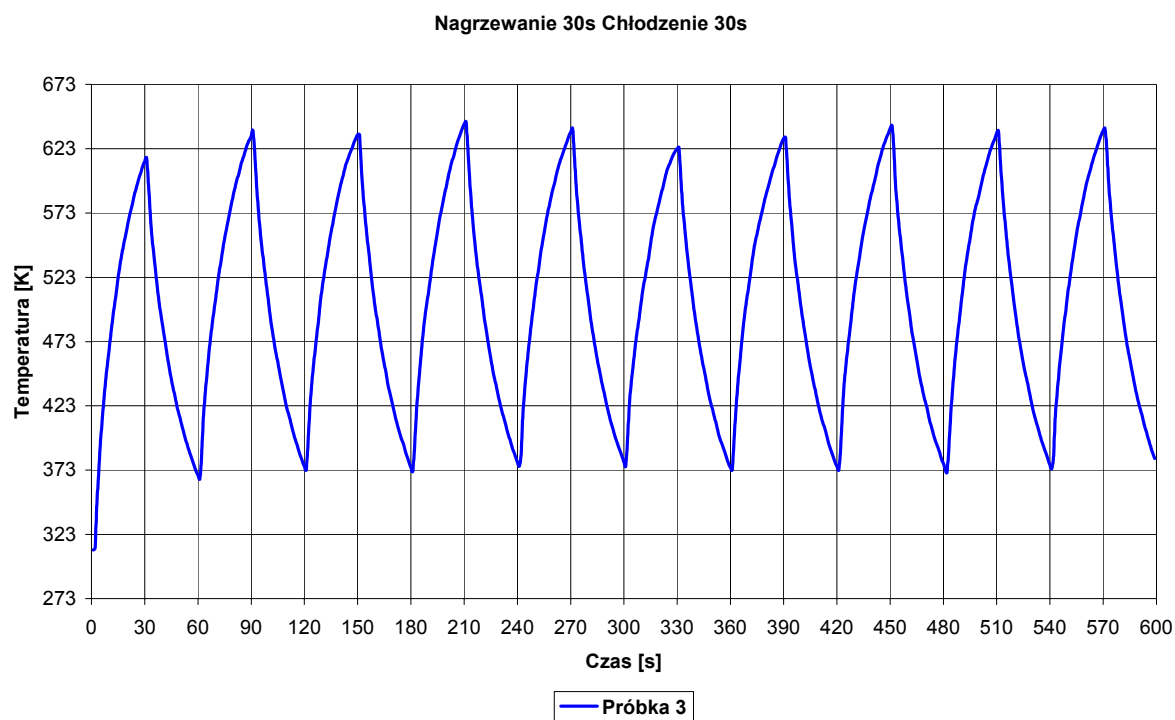
Rys. 11.39. Wykres temperatury w czasie – porównanie wszystkich próbek

**11.4.3. Próba 3 – proces nagrzewania – czas 30s, chłodzenie 30s**

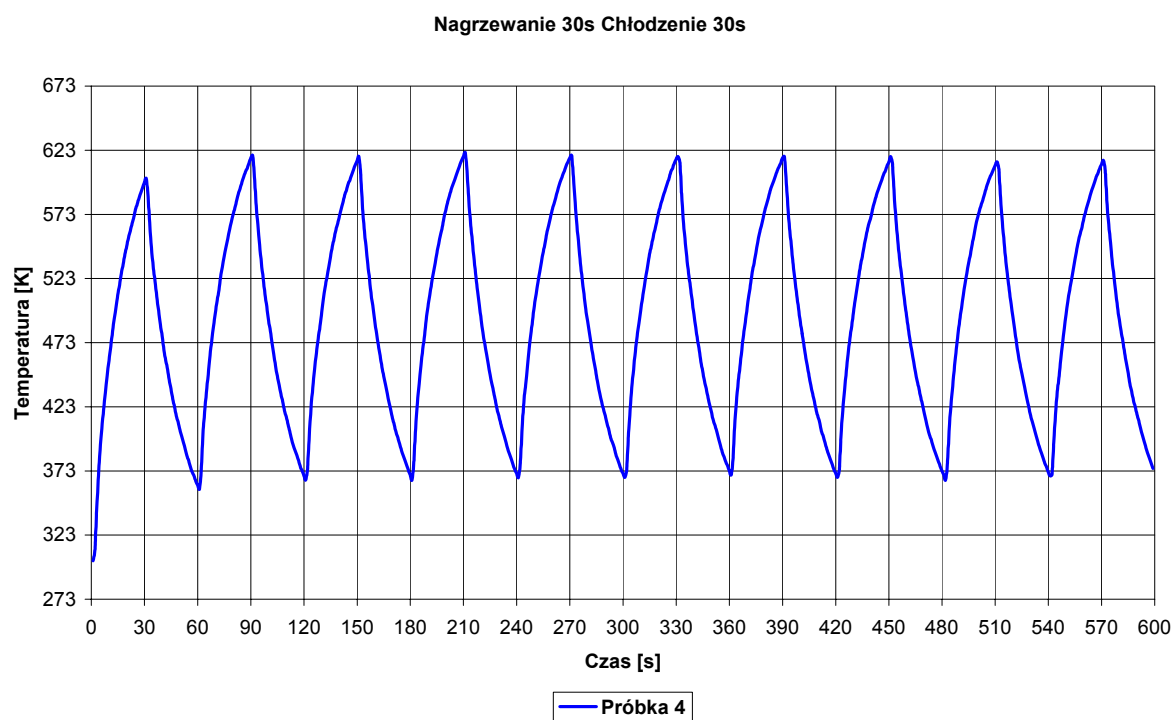
Rys. 11.40. Wykres temperatury w czasie dla próbki 1



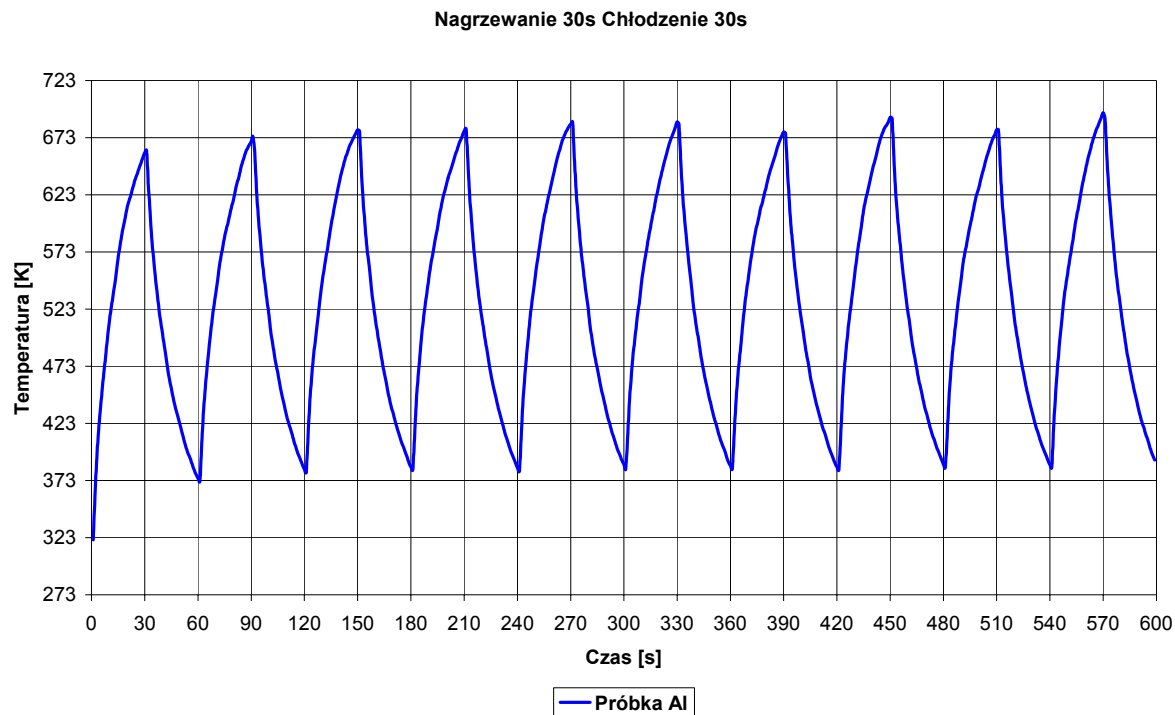
Rys. 11.41. Wykres temperatury w czasie dla próbki 2



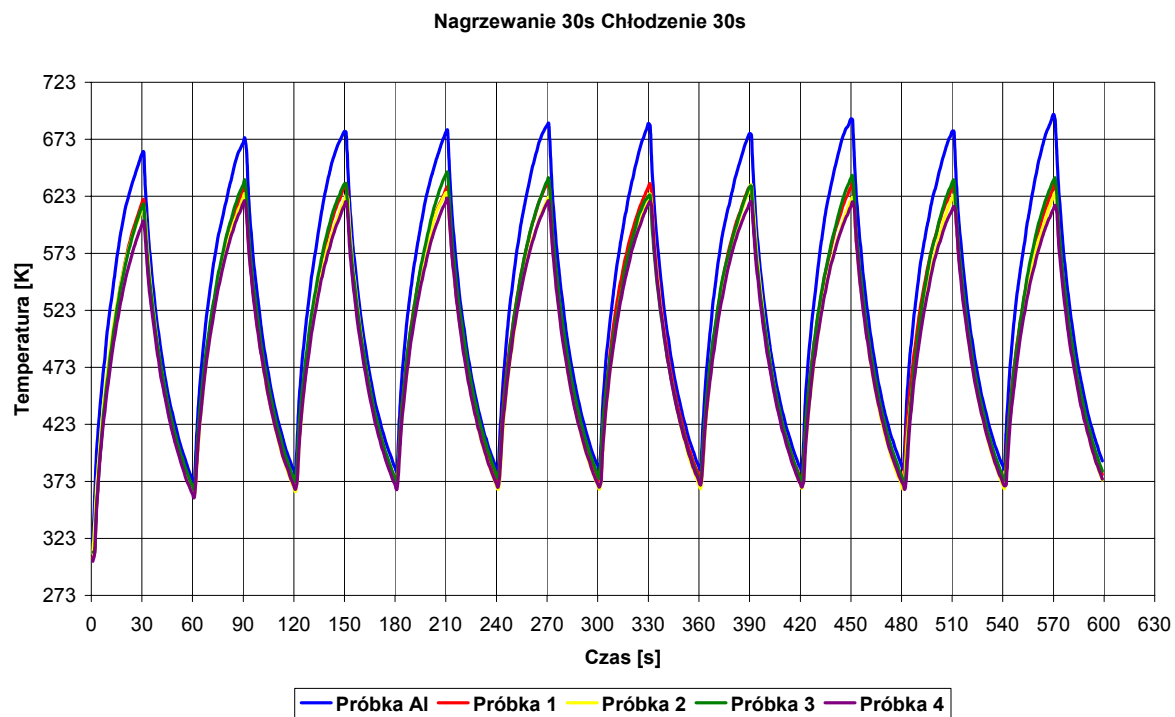
Rys. 11.42. Wykres temperatury w czasie dla próbki 3



Rys. 11.43. Wykres temperatury w czasie dla próbki 4



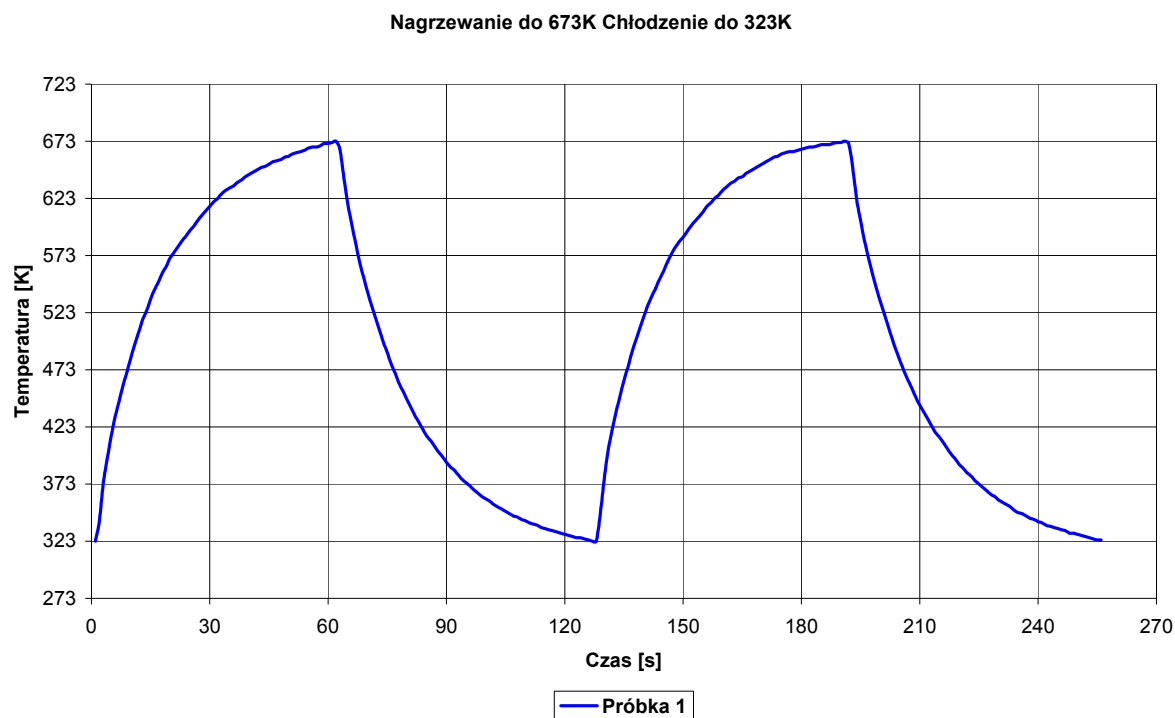
Rys. 11.44. Wykres temperatury w czasie dla próbki Al



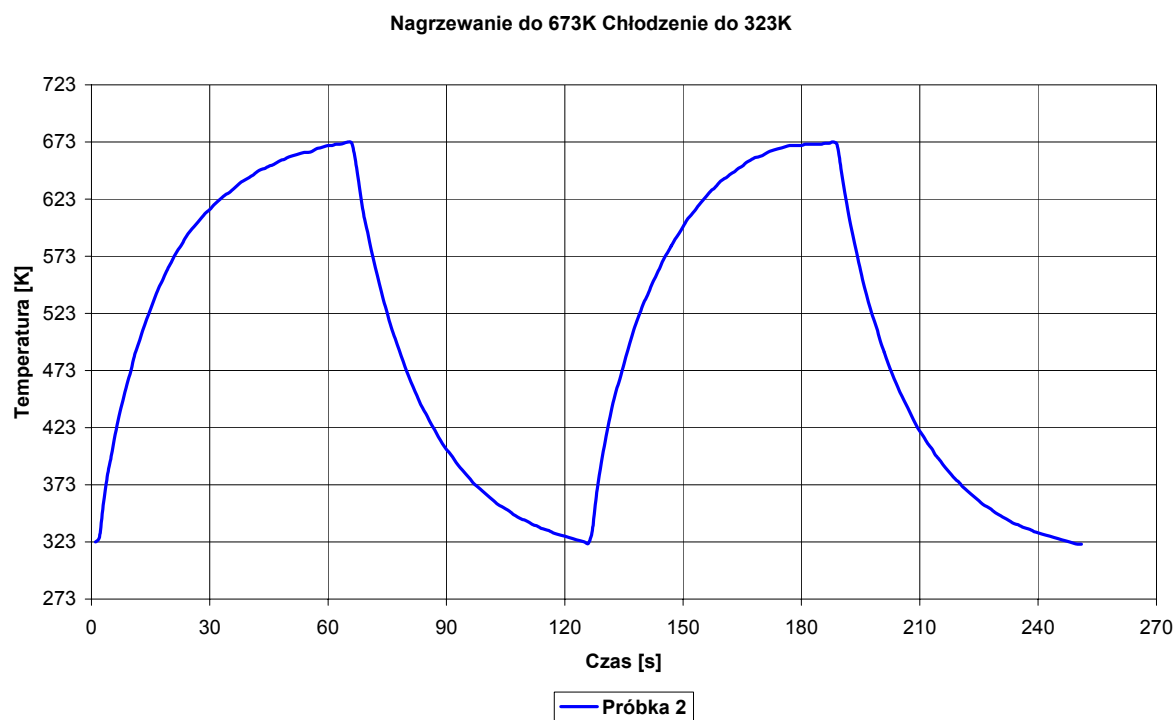
Rys. 11.45. Wykres temperatury w czasie – porównanie wszystkich próbek



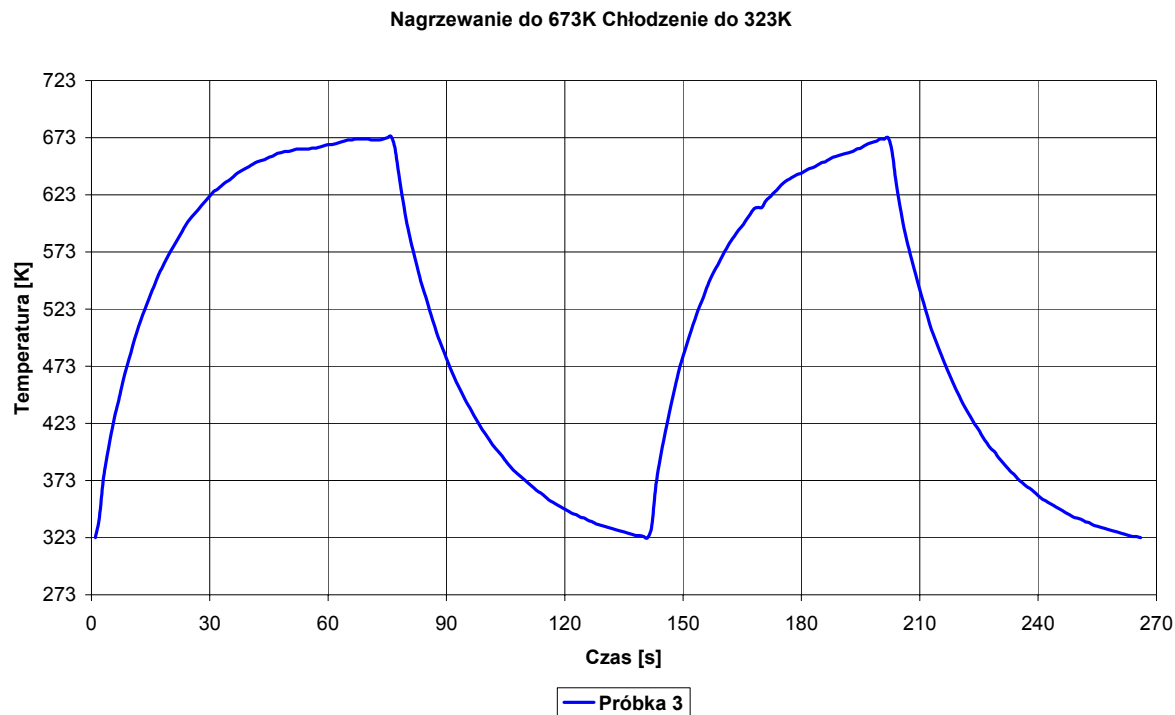
#### 11.4.4. Próba 4 – proces nagrzewania do temperatury 673K, chłodzenie do temperatury 323K



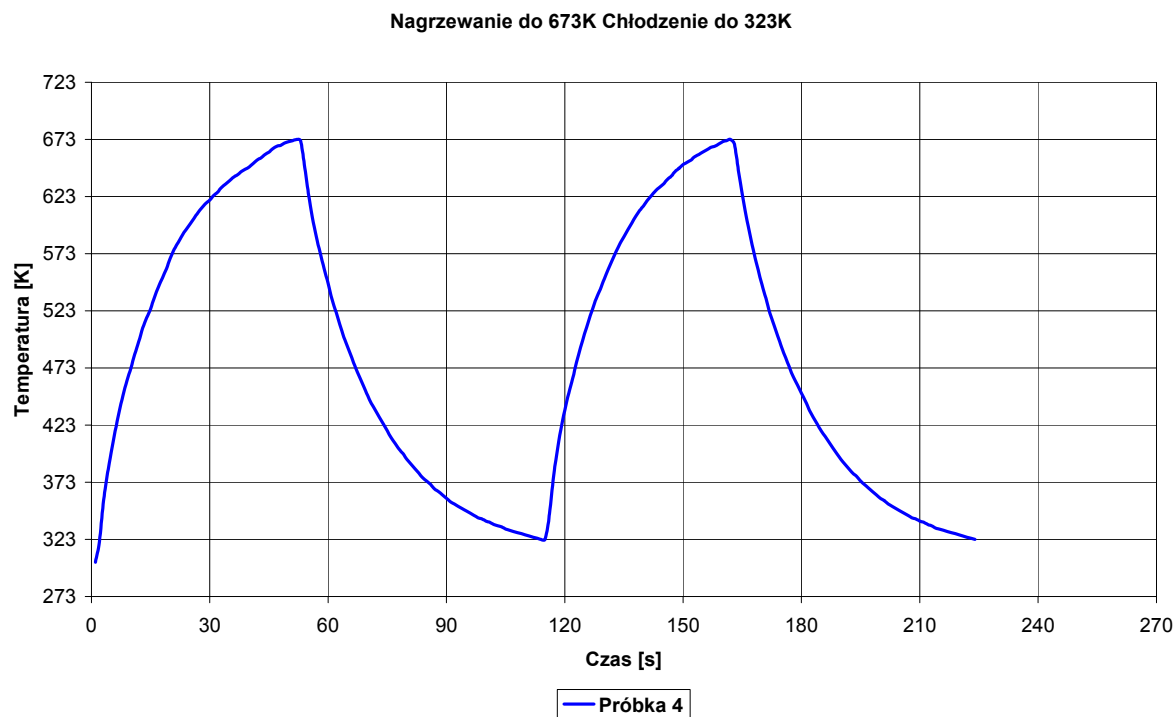
Rys. 11.46. Wykres temperatury w czasie dla próbki 1



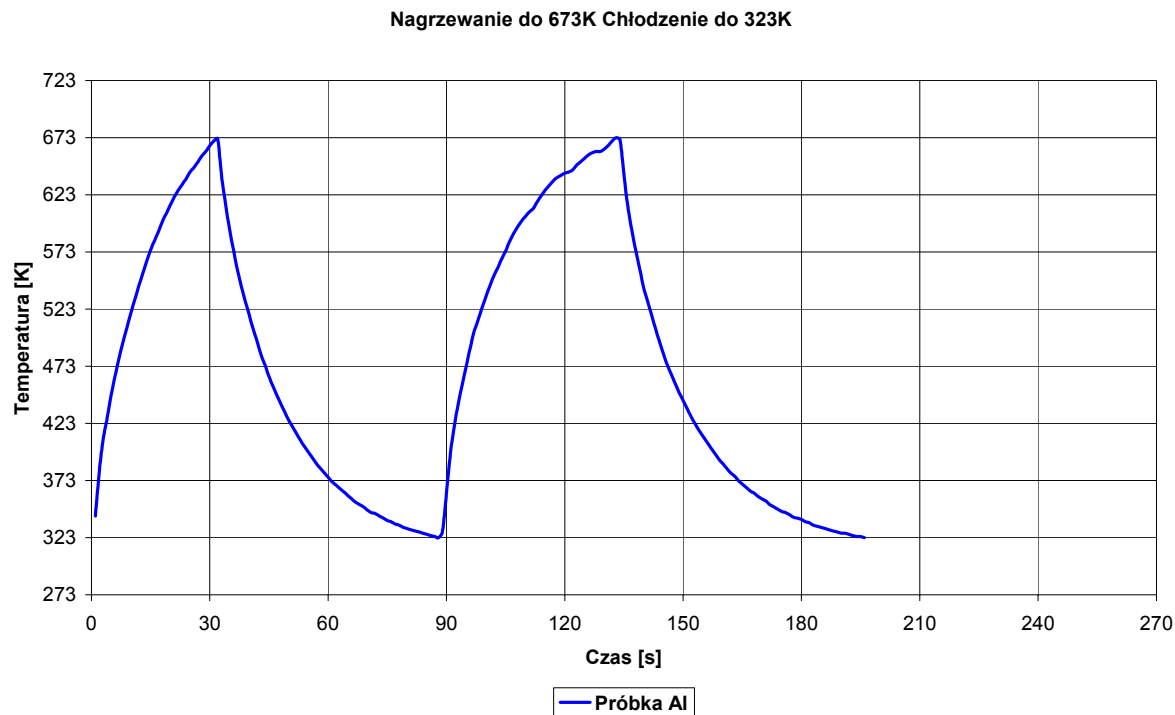
Rys. 11.47. Wykres temperatury w czasie dla próbki 2



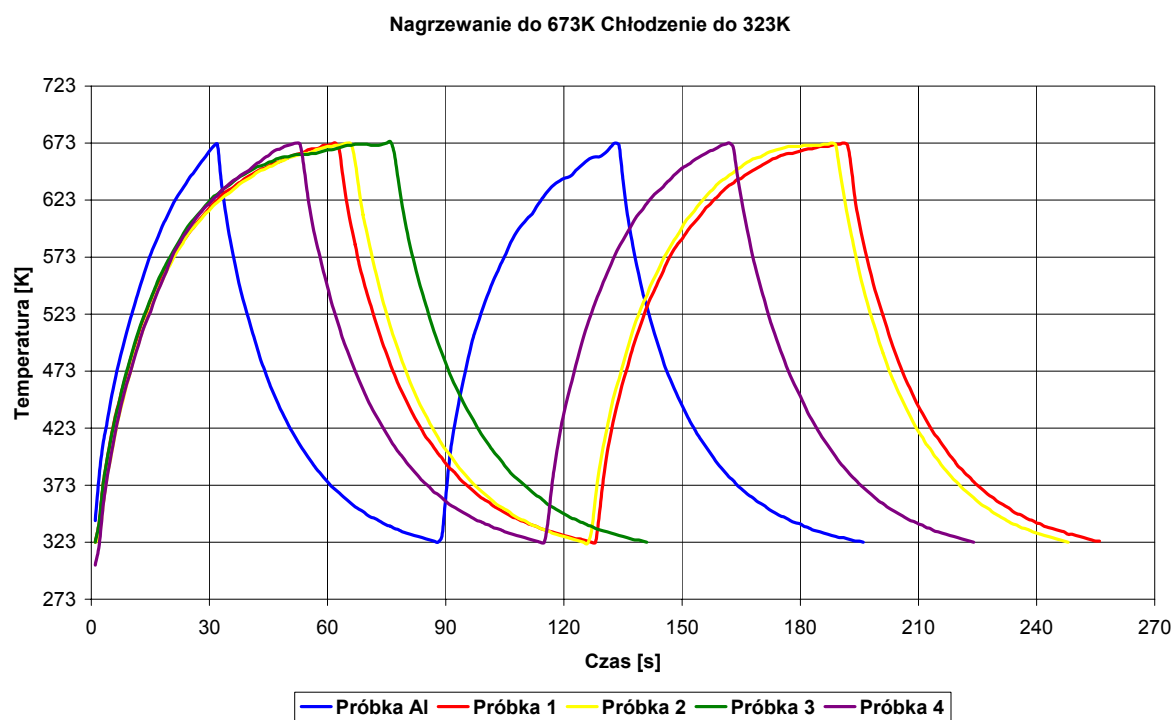
Rys. 11.48. Wykres temperatury w czasie dla próbki 3



Rys. 11.49. Wykres temperatury w czasie dla próbki 4

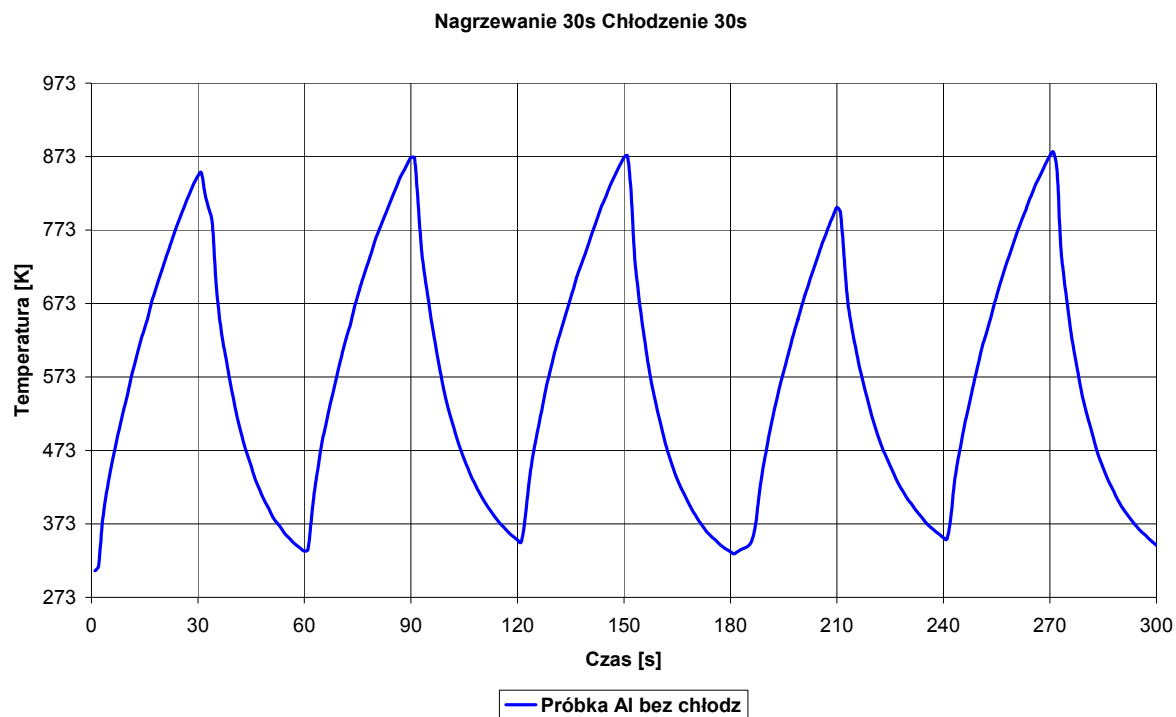


Rys. 11.50. Wykres temperatury w czasie dla próbki Al

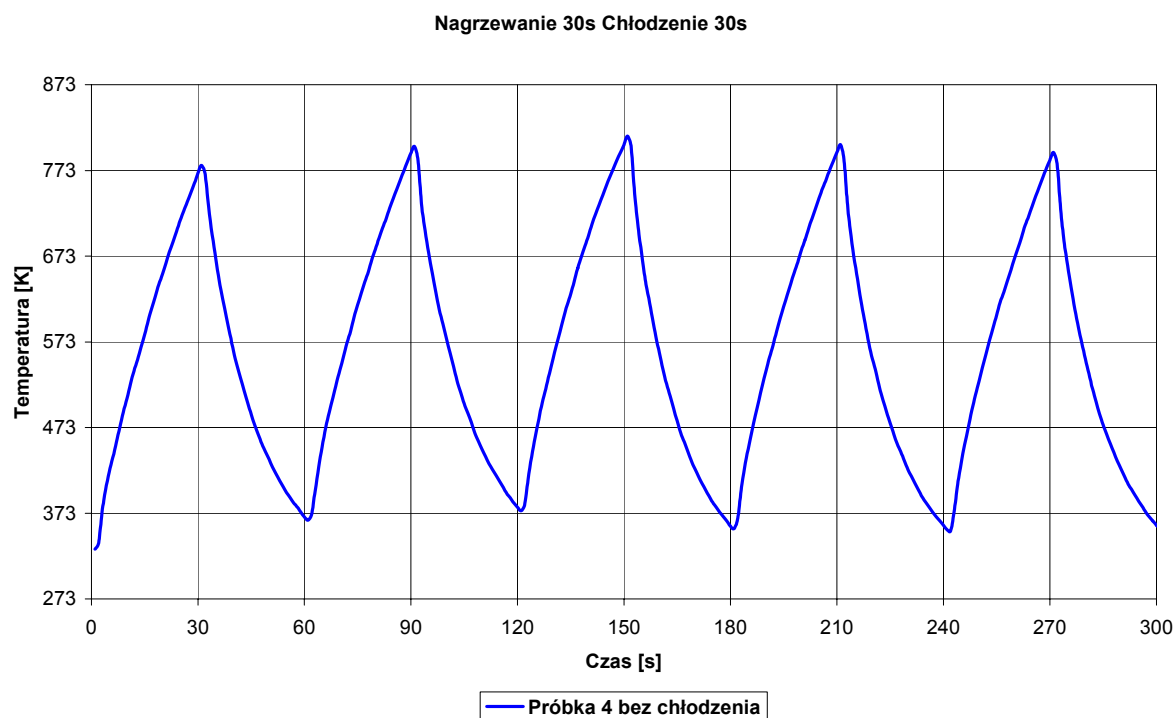


Rys. 11.51. Wykres temperatury w czasie – porównanie wszystkich próbek

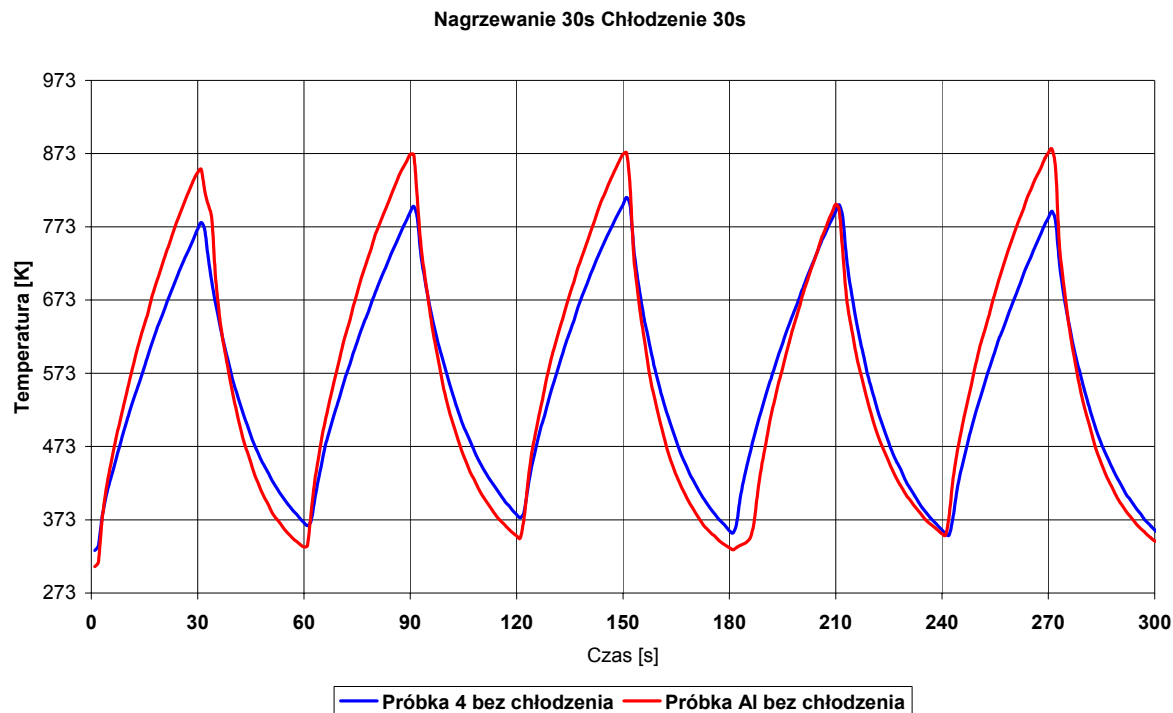
### 11.4.5. Próba 5 – proces nagrzewania –czas 30s, chłodzenie 30s bez chłodzenia z tyłu próbki



Rys. 11.52. Wykres temperatury w czasie dla próbki Al

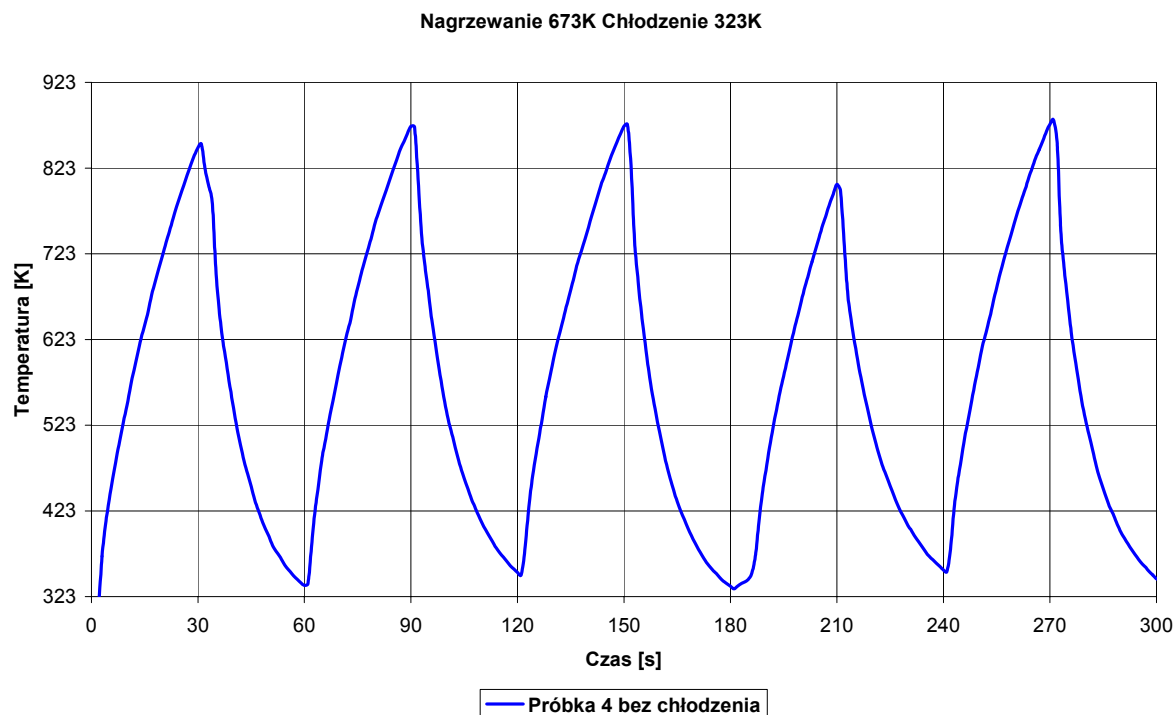


Rys. 11.53. Wykres temperatury w czasie dla próbki 4



Rys. 11.54. Wykres temperatury w czasie dla próbek 4 i Al.

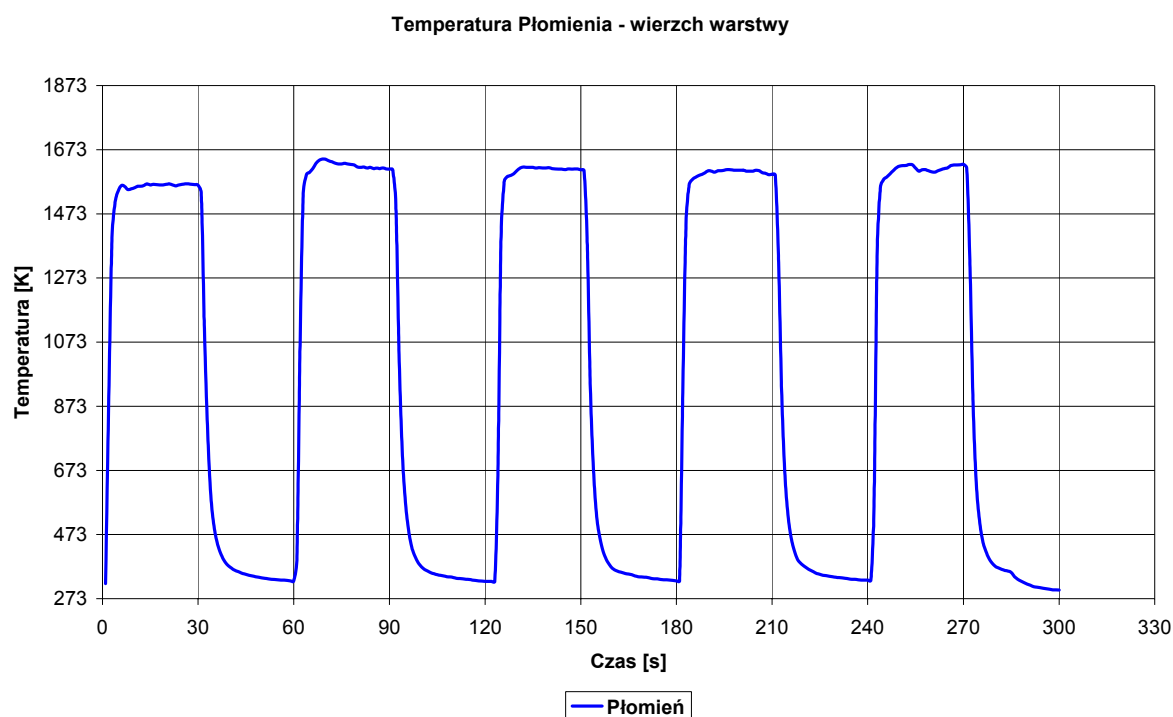
#### 11.4.6. Próba 6 – nagrzewania do temperatury 673K bez chłodzenia, chłodzenie do temperatury 323K dla próbki 4



Rys. 11.55. Wykres temperatury w czasie dla próbki 4 bez chłodzenia

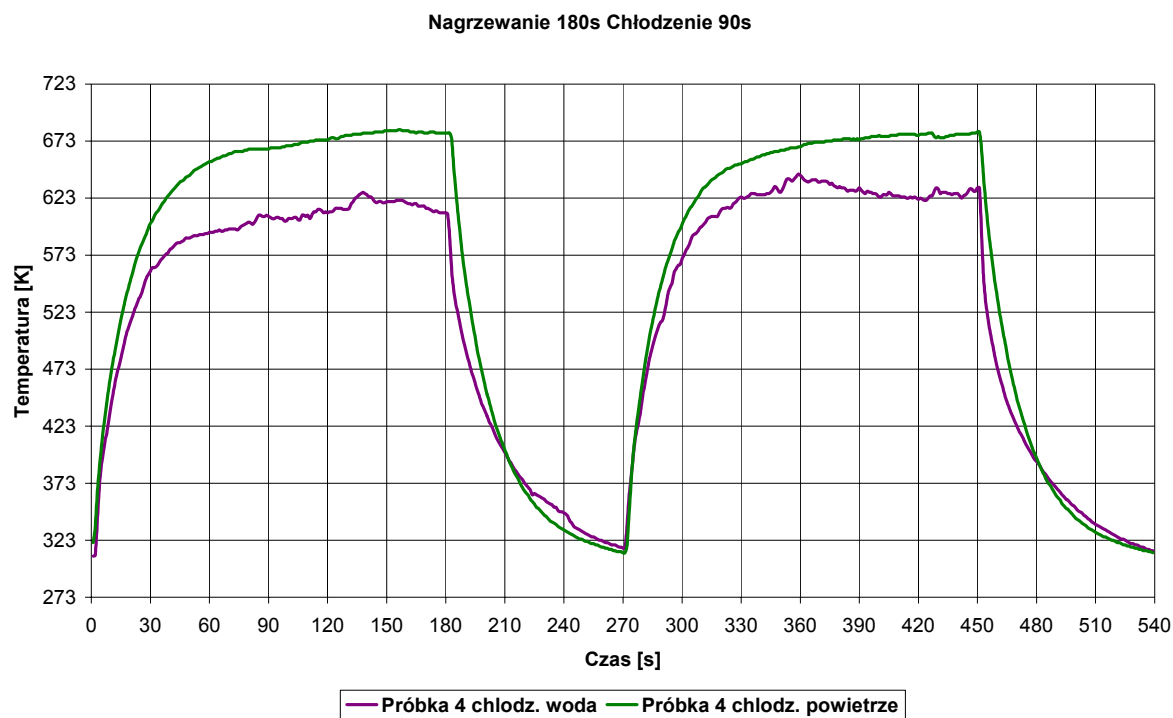
### 11.4.7. Próba 7 – temperatura płomienia dla warstwy wierzchniej

Podczas pomiaru temperatury płomienia palnika gazowego wykorzystano termoparę typu K o grubości 0,5mm. Termopara została ciepłnie złączona końcówkami na końcu tworząc kulkę, która wprowadzona została przez wywiercony otwór w płytce aluminiowej na wylot i zrównana z warstwą wierzchnią próbki. Płytkę aluminiową podczas grzania chłodzona była od tyłu sprężonym powietrzem w celu zapobieżenia jej stopienia (stop Al topi się w 920K).

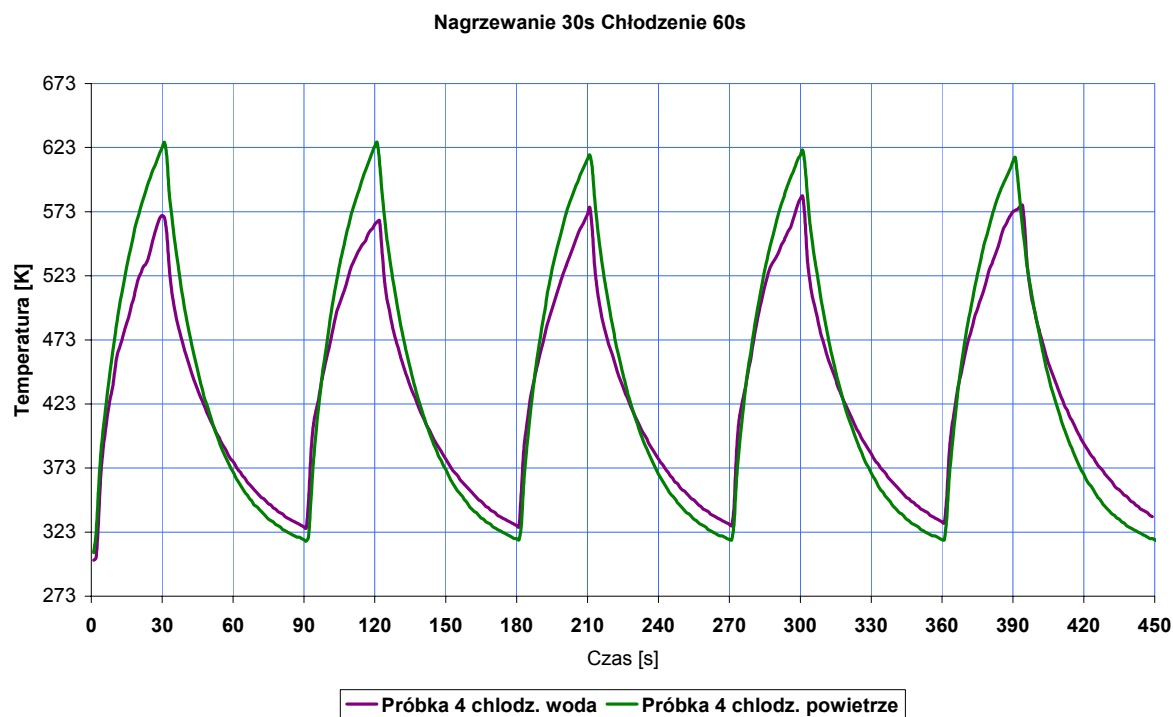


Rys. 11.56. Wykres temperatury w czasie dla płomienia

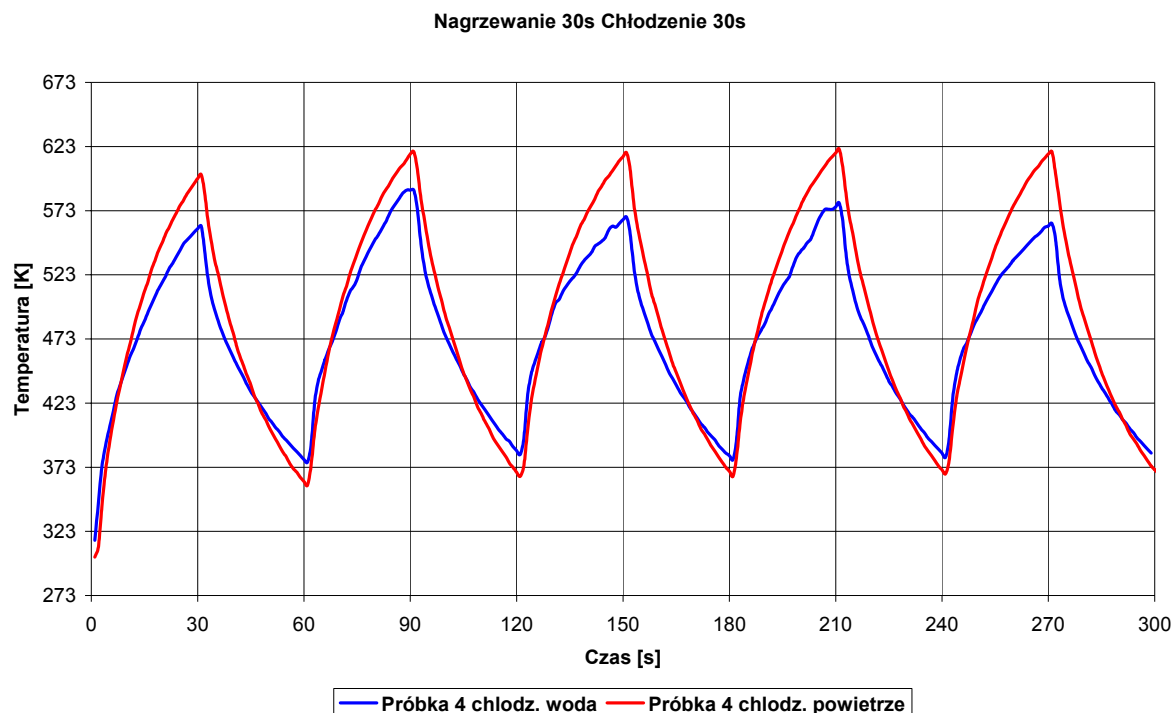
### 11.4.8. Porównanie temperatur wybranych próbek podczas nieustannego chłodzenia powietrzem lub wodą dla próbki 4



Rys. 11.57. Porównanie temperatur dla próbki 4 chłodzonej wodą i powietrzem – Próba 1



Rys. 11.58. Porównanie temperatur dla próbki 4 chłodzonej wodą i powietrzem – Próba 2



Rys. 11.59. Porównanie temperatur dla próbki 4 chłodzonej wodą i powietrzem – Próba 3

## 11.5. Błędy pomiarów temperatury

Pomiar temperatury w badaniach eksperymentalnych dokonywany był przy użyciu termoelementów – termopar typu *K* (*NiCr-NiAl*), których dokładność - dopuszczalne odchyłki opisuje norma PN-81/M-53854 (IES 584) dotycząca charakterystyki termoelementów. W tabeli 11.2 przedstawiono dla odpowiednich zakresów temperatur dopuszczalne odchyłki dla użytej termopary.

Tabela 11.2. Tabela przedstawiająca dopuszczalne odchyłki dla termopary typu *K*

Klasa	Termopara typ K NiCr-NiAl	
	Temperatura [K]	$\Delta T$
1	273 do 673	1.5 K
	673 do 1573	0,4%
2	73 do 173	(3·0.01T) K
	173 do 673	4 K
	673 do 1573	(1·0.0075T) K

Dla miernika uniwersalnego M-385 firmy METEX, do którego podłączone były termopary dokładność pomiaru dla zakresu od 223K do 1573K wynosi  $3\% \pm 5K$ .



## **12. Podsumowanie i wnioski końcowe**

Przedstawiona w pracy problematyka związana z oceną stanu wyężenia warstwowych powłok ceramicznych poddanych działaniu obciążeń cieplnych jest zagadnieniem coraz częściej spotykanym podczas obliczeń inżynierskich. Zarówno w nowych projektach jak również obiektach będących w trakcie eksploatacji istnieje potrzeba opracowania uniwersalnej metodyki do oceny wpływu temperatury na stan jakości powłoki – bariery termicznej. Potrzeba ta jest szczególnie widoczna przy obiektach o złożonej i rozbudowanej geometrii.

Stąd też biorąc pod uwagę obecny stan wiedzy i dotychczasowe metody stosowane w obliczeniach inżynierskich opisane w rozdziałach 4, 5, 6 i 7 zaprezentowano własną metodykę prowadzenia obliczeń. Opiera się ona na pełnej integracji nowoczesnych metod pomiarowych wartości temperatury na obiektach rzeczywistych oraz numerycznych metod obliczeniowych.

Metodyka ta przedstawiona w rozdziale 9 składa się z dwóch etapów. Pierwszy z nich zawiera opis przestrzennego pola temperatury w całej objętości obiektu bazując na zbudowanym modelu numerycznym oraz punktowych pomiarach temperatury. W drugim etapie wyznaczone przestrzenne pole temperatury jest deklaruwane w opracowanym modelu numerycznym do obliczeń wytrzymałościowych. Zawiera on również wszystkie niezbędne parametry materiałów z uwzględnieniem ich zmienności z temperaturą.

Zastosowanie opracowanej metodyki zostało przedstawione na przykładach wielu zbudowanych modeli obliczeniowych. Otrzymane wyniki obliczeń pozwoliły wykazać, że poprzez zastosowanie monitoringu przebiegu wartości temperatury w określonych punktach pomiarowych elementu pokrytego powłoką ceramiczną można ocenić stan naprężeń nawet bardzo złożonego geometrycznie obiektu.

W rozdziale 10 przedstawiono przykłady obliczeniowe z zastosowaniem opracowanej metodyki w analizie termicznej i wytrzymałościowej elementów z powłokami ceramicznymi o złożonej strukturze. Równoległe do analiz numerycznych wykonano badania doświadczalne na obiektach rzeczywistych polegające na pomiarze temperatury. Badania te stworzyły bazę danych pomiarowych niezbędną do definicji warunków początkowych i brzegowych w numerycznych obliczeniach przestrzennego rozkładu temperatury. Jednocześnie pomiary temperatury jak i odkształceń pozwoliły na ocenę poprawności zastosowanej metodyki.

Tak więc główny cel pracy został zrealizowany i poparty przedstawionymi przykładami liczbowymi.

Reasumując, do najistotniejszych wartości poznawczych i praktycznych stanowiących cele i tezę niniejszej pracy można zaliczyć:

- opracowanie własnego algorytmu numeryczno-doświadczalnego modelowania warstwowych powłok ceramicznych poddanych obciążeniom cieplnym z uwzględnieniem imperfekcji w strukturze powłoki, takich jak: chropowatość, mieszanie się materiału na granicy warstw oraz mikropęknięcia,
- wykazanie na podstawie przeprowadzonych analiz, że wg opracowanego algorytmu możliwe jest wyznaczenie pola temperatury w poszczególnych warstwach powłoki ceramicznej poprzez wykorzystanie wyników badań doświadczalnych (pomiarów temperatury),
- zbudowanie własnej funkcji opisanej równaniem (9.4), opartej na wielomianie Lagrange'a, przedstawiającej zależność naprężeń od temperatury w dowolnym punkcie modelu rzeczywistego
- wykazanie, że możliwa jest ocena stanu wyężenia warstwowych powłok ceramicznych poprzez wykorzystanie opracowanego algorytmu oraz wyników badań doświadczalnych,
- wykazanie, że zastosowanie zaprezentowanej metodyki umożliwia wyznaczenie pola temperatury oraz weryfikację wytrzymałościową powłok ceramicznych obciążonych cieplnie w miejscach niedostępnych z punktu widzenia badań doświadczalnych,
- wykazanie, że poprzez analizę wielu modeli numerycznych elementów pokrytych powłokami ceramicznymi obciążonych cieplnie, zastosowanie zaprezentowanej metodyki umożliwia ocenę wpływu mikropęknięć na rozkład temperatury w tych elementach,
- przeprowadzenie wielu analiz numerycznych oceny stanu wyężenia elementów pokrytych powłokami ceramicznymi w celu weryfikacji metody,
- przeprowadzenie szeregu badań doświadczalnych na obiektach rzeczywistych w celu utworzenia bazy danych pomiarowych niezbędnych w opracowanej metodyce oraz w celu weryfikacji badań przeprowadzonych analiz numerycznych.

### **13. Kierunki dalszych badań**

Na podstawie uzyskanych wyników w pracy wytyczono następujące kierunki dalszych badań:

- zastosowanie zaprezentowanej metodyki do oceny wpływu mikropęknięć na stan wyężenia powłok ceramicznych poddanych obciążeniom cieplnym,
- zastosowanie opracowanej metodyki do szacowania trwałości zmęczeniowej powłok ceramicznych poddanych zmiennym obciążeniom cieplnym,
- analiza doświadczalna obiektów pokrytych powłokami ceramicznymi typu TBC pod względem wpływu struktury ( występowania defektów) na stan wyężenia obiektu.

## 14. Literatura

- [1] Ashby Michael F., Johnes David R.H., *Materiały inżynierskie, Kształtowanie struktury i właściwości, dobór materiałów 2*, WNT Warszawa 1996.
- [2] Bach Fr. W., Babiak Z., Duda T., Copitzky T., Josefiak L. A., *Thermal Barrier Coatings with Enhanced properties – A Chance for Thermal Spraying*, United Thermal Spray Conference, Düsseldorf, Germany 1999.
- [3] Bach Fr.W., Babiak Z., Unterberg W., Duda T., *Thermal Comparison of Vacuum and Atmospheric Plasma Sprayed  $ZrO_2-7Y_2O_3$  Thermal Barrier Coatings*, United Thermal Spray Conference, Düsseldorf, Germany 1999, p. 561-564.
- [4] Bakinowska K. i inni.: *Pomiary cieplne*. WNT, Warszawa 1995
- [5] Bonnet P., Abboudi S., Normand B., *Study of Damage Processes in Plasma Sprayed Bond Coat Under Thermal Cycling*, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference, Nice, France 1998, p. 1607-1611.
- [6] Borkowski W., Konopka S., Prochowski L., *Dynamika maszyn roboczych*, WNT, Warszawa 1996
- [7] Bratton R.J., Lau S.K., *Zirconia Thermal Barrier Coatings*, Advances in Ceramics, Vol. 3, 1981, p. 226-240.
- [8] Brzezinski T., Cavasin A., Grenier S., Kharlanova E., Kim G., Tsantrizos P., *Vacuum Plasma Sprayed  $ZrO_2$  – Based Thermal Barrier Coatings for Aerospace Applications*, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference, Nice, France 1998, p. 1645-1650.
- [9] Cao X.Q., Vassen R., Stoeber D., *Ceramic materials for thermal barrier coatings*, Journal of the European Ceramic Society 24 (2004) 1–10.
- [10] Chan S.H., Khor K.A., *The Effect of Thermal Barrier Coated Piston Crown on Engine Characteristics*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 9(1), 2000, p. 103-109.
- [11] Ciałkowski M., *Zagadnienie proste i odwrotne pól temperatur, przemieszczeń i naprężeń z uwzględnieniem sprzężenia termomechanicznego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej Nr 26. Mechanika. 1980.
- [12] Derlukiewicz D., Górski A., Rusiński A., *Wybrane zagadnienia z numerycznych metod wyznaczania stanu wyężenia ceramicznych dwuwarstwowych powłok natryskiwanych metodą APS*, Systems 2004 vol. 9

- [13] Dobrociński S., *Modelowanie zagadnień obliczania naprężeń cieplnych*, WNT, Warszawa 2000.
- [14] Drake J. T., Williamson R. L., Rabin B. H., *Finite element analysis of thermal residual stresses at graded ceramic metal interfaces. Part II. interface optimization for residual stress reduction*, J. Appl. Phys., Vol. 74, No. 2, 15 July 1993.
- [15] Drake J. T., Williamson R. L., Rabin B. H., *Finite element analysis of thermal residual stresses at graded ceramic metal interfaces. Part I. Model description and geometrical effects*, J. Appl. Phys., Vol. 74, No. 2, 15 July 1993.
- [16] Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z.: *Wytrzymałość materiałów*”. WNT, Warszawa 1997.
- [17] Filipczyk J., *Badanie warstw ceramicznych stosowanych do izolacji komór spalania*, Materiały konferencyjne KONMOT’96
- [18] Fodemski T.R. i inni, *Pomiary cieplne, część I, podstawowe pomiary cieplne*, WNT, Warszawa 2001.
- [19] Fogarassy P., Turquier F., Lodini A., *Residual stress in plasma sprayed zirconia on cylindrical components*, Mechanics of Materials 35 (2003) p. 633–640.
- [20] Funke C., Mailand J.C., Siebert B., Vaßen R., Stöver D., *Characterization of ZrO<sub>2</sub>-7 wt.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coatings with different porosities and FEM analysis of stress redistribution during thermal cycling of TBCs*, Surface and Coatings Technology 94 –95 (1997) p. 106–111.
- [21] Gan Zhenghao, Heong Wah Ng , *Experiments and inelastic finite element analyses of plasma sprayed graded coatings under cyclic thermal Shock*, Materials Science and Engineering A 385 (2004) 314–324
- [22] Giannopoulos Georgios I., Anifantis Nick K., *Finite element analysis of crack closure in two-dimensional bodies subjected to heating*, Computers and Structures 83 (2005) 303–314.
- [23] Golański D., *Temperature distribution in a cylindrical Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – steel joint during the vacuum brazing cycle*, Journal of Materials Processing Technology 56 (1996) p. 945-954.
- [24] Goubot N., Dhers J., Ducos M., *Comparison of TBC Coatings Obtained by Conventional and High Velocity Plasma Spraying*, United Thermal Spray Conference, Düsseldorf, Germany, 1999, p. 556-560.

- [25] Górski A., Rusiński E., *Ocena wyężenia konstrukcji poddanej długotrwałemu działaniu wysokich temperatur*. IV Konferencja Naukowa Metody Doświadczalne w Budowie i Eksploatacji Maszyn.. Wrocław-Szklarska Poręba, 1999
- [26] Granlich Michael Rainer, *Beitrag zur Simulation des Versagensverhaltens thermisch gespritzter Wärmedämmschichten mittels der Finite Elemente methode*, Shaker Verlag, Dortmund 1997.
- [27] Gugel E., Woetting G. G., *Materials Selection for Ceramics Components in Automobiles*, Industrial Ceramics, Vol. 19, 1999, p. 196-199.
- [28] Guillemot J.M., Dehaut P., Ducos M., *Diesel Engine Combustion Chamber Insulation by Ceramic Plasma Spraying*, Advances in Thermal Spraying, ITSC, Canada 1986, p. 513-521.
- [29] Guo H.B., Vaßen R., Stöver D., *Thermophysical properties and thermal cycling behavior of plasma sprayed thick thermal barrier coatings*, Surface & Coatings Technology 192 (2005) p. 48-56.
- [30] Haubold T., Wigren J., Gualco C., *Comparison of Thermal Cycling Experiments on Thick Thermal Barrier Coatings*, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference, Nice, France 1998, p. 1617-1622.
- [31] Hejwowski T., A. Weroński, *Wytwarzanie powłok odpornych na zużycie*, Politechnika Lubelska Wydawnictwa Uczelniane 2000.
- [32] Hejwowski T., Weroński A., *The effect of thermal barrier coatings on diesel engine performance*. Vacuum (2002) p. 427-432.
- [33] Hobbs M.: *Thermal Barrier Coatings for Diesel Engines*, Surfacing Journal, Vol. 16 No.4, 1985.
- [34] Huber J., Heinrich J.. *Materiały ceramiczne w silnikach spalinowych*, AUTO-Technika Motoryzacyjna 7/89.
- [35] Ichinose Noboru, *Introduction to Fine Ceramics, Applications in Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- [36] I-DEAS Master Series, Exploring I-DEAS Design, Vol. I and II Copyright © Structural Dynamics Research Corporation 1998.
- [37] Incropera Frank P., De Witt David P., *Fundamentals of heat and mass transfer*, Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [38] Kaczmarek R., *Kompozyty włókniste otrzymywane przez natryskiwanie plazmowe*., Oficyna Wydawnicza PWr, Wrocław 1996.

- [39] Kerkhoff G., Vaßen R., Stöver D., *Numerically calculated thermal stresses in thermal barrier coatings on cylindrical substrates*, United Thermal Spray Conference, Düsseldorf, Germany 1999, p. 787-792.
- [40] Khor K.A. , Gu Y.W., *Effects of residual stress on the performance of plasma sprayed functionally graded ZrO<sub>2</sub>/NiCoCrAlY coatings*, Materials Science and Engineering A277 (2000) p. 64–76.
- [41] Khor K.A., Gu Y.W., Dong Z.L., *Plasma spraying of functionally graded ZrO<sub>2</sub>/NiCoCrAlY coating system using composite powders.*, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference, Nice, France 1998, p. 1543-1548.
- [42] Kim G.E., Tsantrizos P.G., Grenier S., Cavasin A., Brzezinski T., *Near Net-Shape Forming of Thermal Barrier Coated Components for Gas Turbine Engine Applications*, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference, Nice, France 1998, p. 1229-1232.
- [43] Kimpel A., *Napawanie i natryskiwanie cieplne – technologie*, WNT, Warszawa 2000.
- [44] Kingery W. D., *Introduction to ceramics*, John Wiley & Sons, Inc., New York 1960.
- [45] Kleiber M. , *Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice*, PWN Warszawa 1985.
- [46] Kokini K., Choules B.D., Takeuchi Y.R., *Thermal Fracture Mechanisms in Ceramic Thermal barrier Coatings*, J. of Thermal Spray Tech. Vol.6(1) 1997-43.
- [47] Kostowski E., *Promieniowanie cieplne*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [48] Kvernes I., Fartum P., Henriksen R., *Powder Selection for Plasma Sprayed Coatings in Diesel Engine Applications*, Modern Developments in Powder Metallurgy, Vol. 14, 1980, p. 397-411.
- [49] Lang E. , *Coatings for high temperature applications*, Applied Science Publishers, London and New York, 1983.
- [50] Liu Aiguo, Wei Yanhong, *Finite analysis of anti-spallation thermal barrier coatings*, Surface and Coating Technology 165 (2003) 154-162.
- [51] Lugscheider E., Nickel R., *Finite element simulation of a coating formation on a turbine blade during plasma spraying*, Surface and Coatings Technology 174 –175 (2003) p. 475–481.
- [52] M.G. Nicholas, *Joining Processes, Introduction to brazing and diffusion bonding* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht /Boston/ London 1998

- [53] Madejski Jan, *Teoria wymiany ciepła*, Wyd. uczelni. Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1998.
- [54] Materiały ofertowe firmy H.C. Starck company, powders properties. Oferta proszków ceramicznych.
- [55] Mesratia N., Saif Q. , Treheuxb D., Moughilc A., Fantozzic G., Vincent A., *Characterization of thermal fatigue damage of thermal barrier produced by atmospheric plasma spraying.* , Surface & Coatings Technology 187 (2004) p. 185–193
- [56] Miller R. A., *Thermal Barrier Coatings for Aircraft Engines: History and Directions*, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 6, March 1997.
- [57] Multi-author work, *Mały Poradnik Mechanika*, WNT, Warszawa 1970.
- [58] Ng H.W., Gan Z., *A finite element analysis technique for predicting as-sprayed residual stresses generated by the plasma spray coating process*, Finite Elements in Analysis and Design 41 (2005) p. 1235–1254.
- [59] Niezgoda T., Małachowski J., Boniecki M., *Finite element simulation of Vickers microindentation on alumina ceramics*, Journal of Ceramic International, Italy, vol.24, no.5,1998.
- [60] Niezgoda T., Małachowski J., Szymczyk W., „*Modelowanie numeryczne mikrostruktury ceramiki*” WNT Warszawa 2005
- [61] Niezgoda T., Szymczyk W., Małachowski J., *Numeryczne wyznaczanie obszarów koncentracji naprężeń resztkowych w zaworze tłokowego silnika spalinowego z warstwą powierzchniową*, Przegląd Mechaniczny, Zeszyt 3/2005.
- [62] *Nowa Encyklopedia powszechna*, PWN, Warszawa 1997.
- [63] Nowicki W., *Termosprężystość*, Wyd. PAN 1972.
- [64] Nowicki W., *Zagadnienia termosprężystości*, PWN, PAN, Warszawa 1960.
- [65] Orłoś Z. , *Naprężenia cieplne*, Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa 1991.
- [66] Pandaa P.K., Kannana T.S., Duboisb J., Olagnonb C., Fantozzib G., *Thermal shock and thermal fatigue study of alumina*. Journal of the European Ceramic Society 22 (2002) p. 2187–2196.
- [67] Park J.-W., Mendez P.F., Eagar T.W., *Strain energy distribution in ceramic-to-metal joints*, Acta Materialia 50 (2002) p. 883–899.
- [68] Pawłowski Lech, *The science and engineering of thermal spray coatings*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.



- [69] Polat Ahmet, Sarikaya Ozkan, Celik Erdal, *Effects of porosity on thermal loadings of functionally graded  $Y_2O_3-Zr_2O/NiCoCrAlY$  coatings*, Materials and Design 23 (2002) 641–644.
- [70] Rakowski G., Kacprzyk Z., *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
- [71] Ramaswamy P., Seetharamu S., K.B.R. Varma, K.J. Rao,  *$Al_2O_3-ZrO_2$  Composite Coatings for Thermal Barrier Applications*, Composites Science and Technology, Vol. 57, 1997, p.81-89.
- [72] Richerson David W., *Modern Ceramic Engineering: properties, processing, and use in design*, Marcel Dekker, Inc., New York 1992.
- [73] Roliński Z., *Tensometria oporowa: podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań*, WNT, Warszawa 1981.
- [74] Rusiński E., Czmochowski J., Smolnicki T., *Zaawansowana metoda elementów skończonych w urządzeniach nośnych maszyn*, Oficyna Wydawnicza PWR, 1999r.
- [75] Rusiński E., Derlukiewicz D., Moczko P., *Use of Finite Element Method In designing and operation of Basic machines of open-cast mining –Proceedings, Faculty of Mechanical Engineering - Vol.23 - No.2–* Skopje, Republic of Macedonia 2004
- [76] Rusiński E., Dudek D. i inni: *Badania doświadczalne i symulacyjne konstrukcji nośnej kotła nr 6 w Elektrowni TURÓW*. Raport serii Sprawozdania nr 027/97 Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechnika Wroclawska, Wrocław 1997.
- [77] Rusiński E., Górski A.: *Stan naprężeń przegrzewacza grodziowego obciążonego zmiennym polem temperatury*. V Konferencja naukowo-techniczna: Problemy i innowacje w remontach energetycznych. Jugowice 2002.
- [78] Rusiński E.: *Metoda elementów skończonych*. System COSMOS/M. WKŁ, Warszawa 1994.
- [79] Sarikaya Ozkan, Islamoglu Yasar, Celik Erdal, *Finite element modeling of the effect of the ceramic coatings on heat transfer characteristics in thermal barrier applications*, Materials and Design 26 (2005) p. 357–362.
- [80] Schindler K.P., *The Future of Diesel Engine in Passenger Cars*, 7<sup>th</sup> Diesel Engine Emission Reduction Workshop, Portsmouth, Virginia, USA.
- [81] Schmitt-Thomas Kh.G., Haindl H., Fu D., *Modification of thermal barrier coatings*, Surface and Coatings Technology 94-95 (1997) p. 149-154.

- [82] Sfar K., Aktaa J., Munz D., *Numerical investigation of residual stress fields and crack behavior in TBC systems*, Materials Science and Engineering A333 (2002) p. 351–360.
- [83] Singhal S.C., Bratton R.J., *Stability of a  $ZrO_2(Y_2O_3)$  Thermal Barrier Coating in Turbine Fuel with Contaminants*, Journal of Engineering for Power, Transaction of the ASME, Vol. 102, 1980, p. 770-775.
- [84] Soechting F. O.: *A Design Perspective on Thermal Barrier Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 8, Dec. 1999
- [85] Sonoya K., Li C.J., Tobe S., *Thermal Fatigue Characteristics of the Membrane Formed by the Plasma Spraying of  $ZrO_2-NiCrAlY$* , United Thermal Spray Conference, Düsseldorf, Germany, 1999, p. 571-576.
- [86] Stecura S., *Two-Layer Thermal Barrier Coatings for High Temperature Components*, Ceramic Bulletin, Vol. 56, 1977, p.1082-1085, 1889
- [87] Stecura S., *Effects of Compositional Changes on the Performance of a Thermal Barrier Coating System*, NASA TM-78976, National Aeronautics and Space Administration, 1978
- [88] Steffens H. D., Gramlich M.: “Herstellung Dicker Plasmagespritzter Wärmedämmschichten zum Einsatz in der Chemischen Industrie”, Schweißen und Schneiden, Vol. 48, 1992, Heft 2
- [89] Stevens R., *Introduction to zirconia, Zirconia and zirconia ceramics*, Magnesium Elektron Publications, no 113, 1986.
- [90] Strona internetowa firmy: FLUKE [www.fluke.pl](http://www.fluke.pl)
- [91] Strona internetowa firmy: Gordon England, *Independent Metallurgist & Consultant to the Thermal Spray Coating Industry*.
- [92] Strona internetowa firmy: *PraxAir Surface Technologies*.
- [93] Szargut Jan, *Modelowanie numeryczne pól temperatury*, WNT, Warszawa 1992.
- [94] Takahashi M., Saitoh M., Takaishi K., Kawasaki T., *Fracture Mechanism of Thick Thermal Barrier Coating*, United Thermal Spray Conference, Düsseldorf, Germany 1999, p. 565-570.
- [95] Teixeira V., Andritschky M., Fischer W., Buchkremer H.P., Stöver D., *Analysis of residual stresses in thermal barrier coatings*, Journal of Materials Processing Technology 92-93 (1999) 209-216.

- [96] Teixeira Vasco, *Numerical analysis of the influence of coating porosity and substrate elastic properties on the residual stresses in high temperature graded coatings*, Surface and Coatings Technology 146–147 (2001) 79–84.
- [97] Timoshenko S., Goodier J.N., *Teoria sprężystości*. ARKADY, Warszawa 1962.
- [98] Topolska Katarzyna, *Koncepcja przyspieszonych badań trwałości powłok ceramicznych na elementach silnika spalinowego*, KONES 2005
- [99] Traeger F., Ahrens M., Vaßen R., Stöver D., *A life time model for ceramic thermal barrier coatings*, Materials Science and Engineering A358 (2003) 255-265.
- [100] Tvergaard V., Hutchinson J.W., *Mikrocracking in Ceramics Induced by Thermal Expansion or elastic Anisotropy*, J. Am. Ceram. Soc., 71(3), 1988.
- [101] Ucar V., Ozel A., Mimaroglu A., Taymaz I., Callı I., Gur M., *Use of the finite element technique to analyze the influence of coating materials, material phase state and the purity on the level of the developed thermal stresses in plasma coating systems under thermal loading conditions*, Surface and Coatings Technology 142-144(2001) 950-953.
- [102] Uzun A., Çevik İ., Akçıl M., *Effect of Thermal Barrier Coating on a Turbocharged Diesel Engine Performance*, Surface & Coatings Technology 116-119, 1999, p. 505-507.
- [103] Vaßen R., Kerkhoff G., Stöver D., *Development of a micromechanical life prediction model for plasma sprayed thermal barrier coatings*, Materials Science and Engineering A303 (2001) 100–109.
- [104] Vittal M., Borek J.A., Marks D.A., Boehman A.L., Okrent D.A., Bentz A.P., *The Effects of Thermal Barrier Coatings on Diesel Engine Emissions*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 121, 1999, p. 218-225.
- [105] Wajand J.A., Wajand J.T., *Tłokowe silniki palinowe, średnio- i szybkoobrotowe*, WNT, Warszawa, 2000.
- [106] *What is thermal spray?*, Strona internetowa firmy Plasma Coatings Company,
- [107] Wigren J., Pejryd L., *Thermal barrier Coatings – Why, How, Where and Where to*, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference, Nice, France, 1998, p. 1531-1542.
- [108] Wilden J., Wank M., Steffens H.D., Brune M., *New Thermal Barrier Coating System for High Temperature Applications*, Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Thermal Spray Conference, Nice, France, 1998, p. 1669-1673.

- [109] Wiśniewski S.: *Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych*. WNT, Warszawa 1983.
- [110] Xu Huibin, Gong Shengkai, Zhang Yue, Zhang Chunxia, *Experimental and computational study on hot fatigue process of thermal barrier coatings by EB-PVD*, *Intermetallics* 13 (2005) 315–322.
- [111] Zhua Z.Y., Lee H.P. , Cheokb B.T., *Finite element analysis of thermal shock tests of RF connectors.*, *J. of Materials Processing Technology* 168 (2005) 291–295.
- [112] Zienkiewicz O.C.: *Metoda elementów skończonych*. Arkady, Warszawa 1972.