

## STRESZCZENIA

Grzegorz DRUPKA<sup>1</sup>  
Andrzej MAJKA<sup>2</sup>  
Tomasz ROGALSKI<sup>3</sup>  
Leszek TRELA<sup>4</sup>

### AN AIRSPACE MODEL APPLICABLE FOR AUTOMATIC FLIGHT ROUTE PLANNING INSIDE FREE ROUTE AIRSPACE

The article is strongly related to the Single European Sky ATM Research (SESAR) project. The project's objective is the improvement of air transport above Europe 0. Since Air Traffic Management (ATM) is involved to obtain more effective approach to air traffic flow managing activities, the concept of Flexible Use Airspace (FUA) has arisen in result. ATM is a quite developed aviation's subdomain, therefore currently existing airspace state has been described briefly in the article, referring to the presented solution concept. The notion of Free Route Airspace (FRA) airspace model defined in this article relies on mathematical description. The selected approach clarifies airspace as a set of squares or cubes that have volumes with appointed values due to certain conditions in the considered time (i.e. traffic flow or weather). The model has to ensure facilitation of flight route planning and warrant aircrafts separation towards flight safety assurance. The concept assumes that this airspace model will provide assistance for airspace user to select essential flight plan criteria, such as economy, time, etc. The path will be appointed according to personal preferences, based on the model from which further elaborated algorithm will evaluate situation.

The presented solution is a response to air traffic growth. Therefore it supports the SESAR project through research and development activities. The description proves that airspace model would create enhancement in flight planning for airspace users.

**Keywords:** transport, navigation, air transport, flight planning, flight safety

### MODEL PRZESTRZENI POWIETRZNEJ UMOŻLIWIAJĄCY AUTOMATYCZNE PLANOWANIE LOTU WE FREE ROUTE AIRSPACE

#### Streszczenie

Artykuł przedstawia koncepcję zamodelowanej przestrzeni powietrznej w sposób umożliwiający automatyczne planowanie lotu w Przestrzeni Lotów Swobodnych (Free Route Airspace – FRA). Zaprezentowany model usprawnia czynności składania planu lotu przez użytkownika, jednocześnie gwarantując bezpieczną separację statków powietrznych. Tematyka artykułu jest związana z badaniami do projektu Jednolitej Europejskiej Przestrzeni Powietrznej (Single European ATM Research – SESAR), której podstawowe założenie stanowi poprawa efektywności i bezpieczeństwa operacji w transporcie lotniczym. Efektywniejsze Zarządzanie Ruchem Lotniczym (Air Traffic Management – ATM) jest możliwe przez wprowadzenie koncepcji Elastycznego Zarządzania Przestrzenią Powietrzną (Flexible Use of Airspace – FUA). Elastyczne Zarządzanie Przestrzenią Powietrzną pozwala na monitorowanie dostępności przestrzeni w różnych odstępach czasowych, w sposób umożliwiający uwzględnienie planowanego natężenia ruchu wobec innych warunków, np. atmosferycznych.

Przedstawiony w artykule opis przestrzeni powietrznej opiera się na opisie matematycznym. Przyjęte zostało założenie, że cała przestrzeń powietrzna składa się z jednakowej wielkości kwadratów (lub sześciątów w przypadku przestrzeni 3D). Każdy kwadrat lub sześciąt ma przydzieloną pojemność wraz z wartościami określającymi dostępność w ustalonym czasie. Dostępność jest uwarunkowana przez wiele czynników, np. zagęszczenie ruchu lotniczego.

<sup>1</sup> Grzegorz Drupka, Rzeszow University of Technology, e-mail: g.drupka@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Andrzej Majka, Rzeszow University of Technology, e-mail: andrzej.majka@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Tomasz Rogalski, Department of Avionics and Control Systems, Rzeszow University of Technology, tel.: 607973672, e-mail: orakl@prz.edu.pl

<sup>4</sup> Leszek Trela, Rzeszow University of Technology, e-mail: ltrela@prz.edu.pl

Wykonane badania wskazują, że zamodelowana w ten sposób przestrzeń powietrzna stwarza potencjał do planowania lotu. W konsekwencji wprowadzenia przez użytkownika dwóch punktów lotu – początkowego i końcowego, przeszukana w następstwie przestrzeń pozwala na przeanalizowanie i zaproponowanie przez system trasy według przyjętego kryterium.

**Słowa kluczowe:** transport, nawigacja, transport lotniczy, planowanie lotu, bezpieczeństwo lotnicze

DOI: 10.7862/rm.2018.01

*Otrzymano/received:* 5.01.2018

*Zaakceptowano/accepted:* 8.03.2018

**Paweł GIL**<sup>5</sup>

**Maria TYCHANICZ**<sup>6</sup>

## INVESTIGATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF HEAT-INSULATING BARRIER MANUFACTURED BY INCREMENTAL RAPID PROTOTYPING METHOD

This paper presents the results of experimental investigation of thermophysical properties of material manufactured with 3D printing technology with the use of fused deposition modelling (FDM) method. Cylindrically shaped samples with a diameter of 50.8 mm and with various fill density (from 10 to 100%) were prepared. The investigated material was PLA (polylactic acid, polylactide). The investigation was carried out in order to determine the density, thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat of tested material. The main aim of this paper was to determine the influence of fill density on thermal conductivity. The results can be useful in designing thermal insulation manufactured with rapid prototyping methods, operating in relative low temperature conditions (< 100°C).

**Keywords:** rapid prototyping, FDM technology, thermal conductivity, 3D printing

## BADANIE WŁAŚCIWOŚCI TERMOFIZYCZNYCH PRZEGRÓD IZOLACYJNYCH WYTWARZANYCH PRZYROSTOWĄ METODĄ SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA

### Streszczenie

W pracy zaprezentowano wyniki pomiarów parametrów termofizycznych przegród izolacyjnych wytwarzanych w technologii druku 3D metodą osadzania topionego materiału FDM (ang. fused deposition modelling), która jest jedną z metod przyrostowych szybkiego prototypowania. Wytworzono próbki walcowe o średnicy 50,8 x 10 mm o różnym współczynniku wypełnienia od 10 do 100%. Próbki zostały wydrukowane z poliaktydu PLA (ang. polylactic acid, poly-lactide). Dokonano pomiaru gęstości, współczynnika przewodzenia ciepła, współczynnika dyfuzyjności cieplnej oraz ciepła właściwego. Celem eksperymentu było określenie wpływu współczynnika gęstości wypełnienia, a pośrednio gęstości na współczynniki przewodzenia ciepła. W szczególności zastosowanie pustych przestrzeni wypełnionych powietrzem (porów) znacząco wpływa na zmianę współczynnika przewodzenia ciepła w stosunku do pełnego materiału. Wyniki badań mogą być przydatne do projektowania wszelkiego rodzaju przegród i obudów termoizolacyjnych wytwarzanych metodą szybkiego prototypowania, pracujących w stosunkowo niskich temperaturach (< 100°C).

**Słowa kluczowe:** szybkie prototypowanie, metoda FDM, przewodność cieplna, druk 3D

DOI: 10.7862/rm.2018.02

*Otrzymano/received:* 22.11.2017

*Zaakceptowano/accepted:* 25.01.2018

---

<sup>5</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Paweł Gil, Rzeszow University of Technology, 12 Powstańców Warszawy Ave., 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 7432299, e-mail: gilpawel@prz.edu.pl

<sup>6</sup> Maria Tychanicz, Rzeszow University of Technology, e-mail: mtychanicz@prz.edu.pl

## WIELOMODALNE PODEJŚCIE DO OPISU STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI

W artykule przedstawiono nowe wielomodalne podejście do opisu struktury geometrycznej powierzchni. Dokonano analizy istniejących w tym zakresie rozwiązań, zwracając szczególną uwagę na zalety i wady każdego z nich. Przedstawiono także przykłady wykorzystania nowego modelu do analizy powierzchni modelowanych komputerowo. Przykłady te dowodzą, że model sprawdza się dla powierzchni zawierających tekstury składowe zarówno o okresowym, jak i losowym charakterze rozkładu rzędnych. Naznaczono kierunki dalszych badań i możliwości wykorzystania wprowadzonego modelu.

**Słowa kluczowe:** struktura geometryczna powierzchni, model wielomodalny

### MULTI-MODAL APPROACH TO DESCRIPTION OF SURFACE TEXTURE

#### Summary

This paper presents a new multi-modal approach to the description of the surface texture. An analysis of the existing in these scope solutions was done, paying special attention to the advantages and disadvantages of each of them. The examples of the use of a new model for the analysis of computer-modelled surface texture were presented. These examples prove that the model works well for surfaces containing textures with periodic and random nature of the distribution of ordinates. The directions of further research and the possibilities of using the introduced model were specified.

**Keywords:** surface texture, multi-modal model

DOI: 10.7862/rm.2018.03

*Otrzymano/received: 14.11.2017*

*Zaakceptowano/accepted: 20.12.2017*

Irena NOWOTYŃSKA<sup>8</sup>

Łukasz BĄK<sup>9</sup>

Tomasz TRZEPIECIŃSKI<sup>10</sup>

Sergei BOSIAKOW<sup>11</sup>

## WPLYW ODKSZTAŁCENIA BLACHY STALOWEJ NA ZMIANĘ STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI W WARUNKACH KONTAKTU POWIERZCHNI SFERYCZNEJ Z POWIERZCHNIĄ PŁASKĄ

W artykule przedstawiono eksperymentalną i numeryczną analizę wpływu odkształcenia na zmianę struktury geometrycznej powierzchni blachy stalowej głębokotłocznej w warunkach kontaktu sztywnej powierzchni kulistej z powierzchnią blachy. Zmianę struktury geometrycznej powierzchni przeanalizowano dla różnych wartości obciążenia. Wyniki symulacji numerycznych kontaktu powierzchni sferycznej z chropowatą powierzchnią blachy wykazały, że wraz ze wzrostem siły nacisku strefa odkształceń plastycznych ulega powiększeniu. Początkowo odkształceniom plastycznym ulegają jedynie

<sup>7</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Wiesław Graboń, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 8651832, e-mail: wgrabon@prz.edu.pl

<sup>8</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Irena Nowotyńska, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 8651894, e-mail: i\_nowot@prz.edu.pl

<sup>9</sup> Łukasz Bąk, Politechnika Rzeszowska, e-mail: lbak@prz.edu.pl

<sup>10</sup> Tomasz Trzepieciński, Politechnika Rzeszowska, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl

<sup>11</sup> Sergei Bosiakow, Belarusian State University, e-mail: bosiakov@bsu.by

wzniesienia struktury geometrycznej powierzchni. Umocnienie odkształceniowe w warstwie wierzchniej wraz ze zwiększaniem obciążenia skutkuje wystąpieniem odkształcenia blachy w obszarach podpowierzchniowych.

**Słowa kluczowe:** blacha głębokotłoczna, metoda elementów skończonych, chropowatość powierzchni

## **THE INFLUENCE OF DEFORMATION OF STEEL SHEET ON THE CHANGE OF THE SURFACE TEXTURE IN CONTACT BETWEEN A SPHERE AND A FLAT SURFACE**

### **S u m m a r y**

This article presents an experimental and numerical analysis of the influence of deformation on the change of surface texture of the deep-drawing steel sheet under contact between a rigid spherical surface against the flat sheet surface. The change in the surface texture was analyzed for different load values. The results of numerical simulations of the contact of the sphere with the rough sheet surface shown that the zone of plastic deformation increases with an increase of the pressure force. Initially, only asperities of surface roughness were plastically deformed. Work hardening of material in the surface layer and increasing of the load result in the deformation of the sheet in the subsurface area.

**Keywords:** deep-drawing sheet, finite element method, surface roughness

DOI: 10.7862/rm.2018.04

*Otrzymano/received: 05.12.2017 r.*

*Zaakceptowano/accepted: 20.12.2017 r.*

**Jan SLOTA**<sup>12</sup>  
**Marek ŚISER**<sup>13</sup>

## **INFLUENCE OF FRICTION CONDITION ON FAILURE LOCATION OF AA5754 ALUMINIUM SHEET IN NAKAJIMA TEST**

This paper presents the results of numerical and experimental investigations on the influence of friction on failure location in Nakajima formability tests. Finite element (FE) simulations were performed using commercial explicit dynamic FE code. The numerical results obtained from the FE simulation were compared with experimental data from Nakajima tests. A 3D digital image correlation system ARAMIS was used in experiments. The location of failure on the sample was detected depending on friction conditions. The studies confirmed that the crack location near the centre of the specimen as required by the ISO standard could be obtained for low values of the friction coefficient. The numerical simulation combined with the inverse analysis was used to estimate a real value of the friction coefficient in the Nakajima formability test.

**Keywords:** Nakajima test, friction, strain paths, failure, FE simulation

## **WPLYW WARUNKÓW TARCIA NA LOKALIZACJĘ USZKODZENIA BLACHY ALUMINIOWEJ AA5754 W TEŚCIE NAKAJIMA**

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono numeryczne i eksperymentalne badania wpływu tarcia na lokalizację uszkodzeń w teście Nakajima. Symulację numeryczną testu przeprowadzono przy użyciu komercyjnego jawnego dynamicznego kodu FE. Wyniki uzyskane z symulacji FE porównano z danymi doświadczalnymi. W badaniach eksperymentalnych wykorzystano system ARAMIS do optycznej korelacji obrazu 3D. Lokalizacja uszkodzenia próbki wykazała zależność od warunków tarcia. Badania potwierdziły, że położenie pęknięcia w pobliżu środka próbki, zgodnie z wymaganiami normy ISO, można uzyskać dla niskich

---

<sup>12</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Jan Slota, Technical University of Košice, Mäsiarska 74, 040 01 Košice, Slovakia, e-mail: jan.slota@tuke.sk

<sup>13</sup> Marek Šiser, Technical University of Košice, e-mail: marek.siser@tuke.sk

wartości współczynnika tarcia. Do oszacowania rzeczywistej wartości współczynnika tarcia w teście odkształcalności według Nakajima zastosowano symulację numeryczną połączoną z analizą odwrotną.

**Słowa kluczowe:** test Nakajima, tarcie, droga odkształcenia, uszkodzenie, symulacja FE

DOI: 10.7862/rm.2018.05

*Otrzymano/received: 20.04.2017*

*Zaakceptowano/accepted: 12.12.2017*

**Robert SMUSZ**<sup>14</sup>

**Joanna WILK**<sup>15</sup>

**Paweł GIL**<sup>16</sup>

**Maria TYCHANICZ-KWIECIEŃ**<sup>17</sup>

**Paweł BAŁON**<sup>18</sup>

## **BADANIA TERMOFIZYCZNE MATERIAŁÓW ZMIENNOFAZOWYCH W ASPEKTCIE ICH ZASTOSOWAŃ W UKŁADACH DO ODZYSKU CIEPŁA ODPADOWEGO**

W artykule zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych właściwości termofizycznych wybranych materiałów zmiennofazowych PCM (ang. *Phase Change Material*). Znajomość właściwości cieplnych materiałów zmiennofazowych jest niezbędna przy projektowaniu urządzeń akumulujących ciepło lub układów do odzysku ciepła odpadowego. Opracowywana koncepcja takiego urządzenia pracującego dodatkowo w układzie z odzyskiem ciepła odpadowego była podstawą do prowadzonych badań. W ramach pracy zostały wykonane pomiary przewodności, dyfuzyjności cieplnej, ciepła właściwego oraz gęstości. Badane materiały to: wosk plastyczny, cerezyna niskotopliwa oraz ksylitol i erytrytol. Do badań właściwości cieplnych materiałów zastosowano metodę gorącego drutu.

**Słowa kluczowe:** materiał zmiennofazowy, ciepło właściwe, przewodność cieplna, dyfuzyjność cieplna

## **THERMO-PHYSICAL INVESTIGATIONS OF PHASE CHANGE MATERIALS IN THE ASPECT OF THEIR APPLICATION IN SYSTEMS OF WASTE HEAT RECOVERY**

### **S u m m a r y**

This paper presents the results of experimental investigation of thermophysical properties of selected phase change materials (PCM). It is essential for design heat-storage devices which utilize such materials. The basis of presented investigation was the concept of heat-storage device in cooperation with waste heat recovery unit. The investigated parameters were: thermal conductivity, diffusivity, specific heat and density. The following materials were tested: plastic wax, ceresin, xylitol and erythritol. Thermophysical parameters were obtained with the use of transient hot wire method. To investigate the thermal properties of materials the hot wire method was used.

**Keywords:** phase change material, specific heat, thermal conductivity, thermal diffusivity

DOI: 10.7862/rm.2018.06

*Otrzymano/received: 10.01.2018*

*Zaakceptowano/accepted: 23.02.2018*

---

<sup>14</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Robert Smusz, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów, tel.: (17) 8651288, e-mail: robsmusz@prz.edu.pl

<sup>15</sup> Joanna Wilk, Politechnika Rzeszowska, e-mail: wilkjoan@prz.edu.pl

<sup>16</sup> Maria Tychanicz-Kwiecień, Politechnika Rzeszowska, e-mail: mtychanicz@prz.edu.pl

<sup>17</sup> Paweł Gil, Politechnika Rzeszowska, e-mail: gilpawel@prz.edu.pl

<sup>18</sup> Paweł Bałon, SZEL-TECH, Mielec, e-mail: balonpawel@gmail.com

**Tomasz TRZEPIECIŃSKI<sup>19</sup>**  
**Romuald FEJKIEL<sup>20</sup>**  
**Andrzej KUBIT<sup>21</sup>**

## **EXPERIMENTAL EVALUATION OF VALUE OF FRICTION COEFFICIENT IN THE DRAWBEAD REGION**

Drawbeads are supposed to change the stress state of sheets in specific areas of the sheet material, or compensate for material flow at the periphery of the drawpiece, especially when forming complex shaped thin-walled products. The article presents the results of frictional resistance testing of a DC04 steel sheet using a drawbead simulator test. Experimental investigations were carried out using a special device that allows a change in the degree of deformation of the sheet metal on the drawbead. Specimens were tested for: (i) three degrees of sheet deformation; (ii) three countersamples' surface roughness; and (iii) three lubrication conditions: dry friction, machine oil lubrication and paint lubrication. The test specimens were cut out along, and transversely to, the direction of rolling of the sheet metal. The basic relations between technological parameters of friction test and coefficient of friction were determined.

**Keywords:** coefficient of friction, drawbead, drawbead simulator, friction

## **EKSPERYMENTALNE WYZNACZANIE WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA W OBSZARZE PRUGU CIĄGOWEGO**

### **Streszczenie**

Zadaniem progów ciągowych jest zmiana stanu naprężenia materiału w określonych obszarach blachy lub wyrównanie płynięcia materiału na obwodzie wytłoczki, szczególnie podczas kształtowania wytłoczek o złożonym kształcie. W artykule przedstawiono wyniki badań oporów tarcia blachy stalowej DC04. Badania eksperymentalne zrealizowano za pomocą specjalnego przyrządu umożliwiającego zmianę stopnia odkształcenia blachy na progu ciągowym. Blachy testowano dla trzech stopni odkształcenia, trzech chropowatości rolek oraz trzech warunków smarowania: tarcie suche, smarowanie olejem maszynowym oraz smarowanie żywicą metakrylową. Próbkę do badań wycięto wzdłużnie i poprzecznie względem kierunku walcowania arkusza blachy. Wyznaczono podstawowe zależności pomiędzy parametrami technologicznymi próby tarcia a wartością współczynnika tarcia.

**Słowa kluczowe:** współczynnik tarcia, próg ciągowy, symulator progu ciągowego, tarcie

DOI: 10.7862/rm.2018.07

*Otrzymano/received: 19.09.2017*

*Zaakceptowano/accepted: 20.12.2017*

---

<sup>19</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Tomasz Trzepieciński, Rzeszow University of Technology, 12 Powstańców Warszawy Ave., 35-959 Rzeszow, tel.: (17) 8651714, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl

<sup>20</sup> Romuald Fejkiel, State School of Higher Vocational Education in Krosno, e-mail: rfejkiel@wp.pl

<sup>21</sup> Andrzej Kubit, Rzeszow University of Technology, e-mail: akubit@prz.edu.pl

**Tomasz TRZEPIECIŃSKI**<sup>22</sup>  
**Bogdan KRASOWSKI**<sup>23</sup>  
**Andrzej KUBIT**<sup>24</sup>  
**Dawid WYDRZYŃSKI**<sup>25</sup>

## **POSSIBILITIES OF APPLICATION OF INCREMENTAL SHEET-FORMING TECHNIQUE IN AIRCRAFT INDUSTRY**

The article includes the characteristics of incremental forming of the sheet using the following two methods: Single Point Incremental Forming and Two Point Incremental Forming. The factors influencing the possibility of method application and the phenomena that limit the use of incremental forming of the sheet are presented. Based on the conducted experimental test, the disadvantages and advantages of single point incremental forming are specified. Possibilities for the use of the presented incremental forming technique for manufacturing elements in the aircraft industry are also included.

**Keywords:** aerospace industry, incremental forming, sheet metal forming

## **MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA METOD KSZTAŁTOWANIA PRZYROSTOWEGO BLACH W PRZEMYSŁE LOTNICZYM**

### **Streszczenie**

Artykuł zawiera charakterystykę metod kształtowania przyrostowego blach z wykorzystaniem dwóch odmian: kształtowania jedno- i dwupunktowego. Zaprezentowano czynniki wpływające na możliwość zastosowania omawianej metody oraz zjawiska ograniczające zastosowanie kształtowania przyrostowego blach. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentalnych badań pilotażowych przedstawiono również wady i zalety jednopunktowego kształtowania przyrostowego. Zawarto również wybrane przykłady zastosowania technik kształtowania przyrostowego do wytwarzania wyrobów dla przemysłu lotniczego.

**Słowa kluczowe:** przemysł lotniczy, kształtowanie przyrostowe, kształtowanie blach

DOI: 10.7862/rm.2018.08

*Otrzymano/received: 19.09.2017*  
*Zaakceptowano/accepted: 20.12.2017*

---

<sup>22</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Tomasz Trzepieciński, Rzeszow University of Technology, 12 Powstańców Warszawy Ave., 35-959 Rzeszow, tel.: (17) 8651714, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl

<sup>23</sup> Bogdan Krasowski, State School of Higher Vocational Education in Krosno, e-mail: b\_krasowski@wp.pl

<sup>24</sup> Andrzej Kubit, Rzeszow University of Technology, e-mail: akubit@prz.edu.pl

<sup>25</sup> Dawid Wydrzyński, Rzeszow University of Technology, e-mail: dwydrzynski@prz.edu.pl

## MODELOWANIE WPLYWU PARAMETRÓW EKSPLOATACYJNYCH NA STAN NAPRĘŻENIA RUR GRUBOŚCIENNYCH W KOTŁACH O PARAMETRACH NADKRYTYCZNYCH

W pracy przedstawiono przykłady modelowania procesów cieplno-mechanicznych zachodzących w rurach grubościennych podczas uruchamiania bloków energetycznych. Rozpatrzono przykłady elementów wykonanych ze stopu HR6W przeznaczonego na elementy urządzeń energetycznych o podwyższonych parametrach pracy. Omówiono zagadnienie wyznaczania pól temperatury i składowych stanu naprężenia na przykładzie rury grubościennej o średnicy zewnętrznej wynoszącej 540 mm i grubości ściany równej 127 mm, która reprezentuje elementy bloków o nadkrytycznych parametrach pracy, projektowane z uwagi na kryterium wytrzymałości na pełzanie. Ciśnienie wewnątrz rury w warunkach pracy ustalonej wynosiło 31,4 MPa, a temperatura 610°C. Skoncentrowano się na zagadnieniu oceny wpływu krótkotrwałych zmian temperatury podczas cykli uruchamiania bloku energetycznego na rozkłady zmiennej w czasie temperatury i związane z nimi naprężenia cieplne. Przedstawiono sposób modelowania uwzględniający możliwość oceny wpływu czasu rozruchu i niestabilności parametrów pary w tym okresie na przebieg lokalnych charakterystyk procesu odkształcania materiału. Ważne dla symulacji numerycznej właściwości materiałowe przyjmowano jako zależne od temperatury. Wyznaczono lokalne charakterystyki odkształcania wybranych punktów na powierzchni rury w postaci zależności pomiędzy odkształceniem i naprężeniem obwodowym. Wykazano istotny wpływ oscylacji temperatury występujących w warunkach rozruchu na zmienne w czasie pola naprężeń i odkształceń, sprzyjające powstawaniu zjawisk o zmęczeniu charakterze.

**Słowa kluczowe:** zmęczenie cieplno-mechaniczne, symulacja numeryczna, rozruch kotłów energetycznych

## MODELING OF RELATION BETWEEN OPERATION PARAMETERS OF SUPER-CRITICAL POWER BOILERS AND STRESS FIELDS OF THICK-WALLED TUBES

### Summary

The examples of simulation of thermo-mechanical processes which undergo during start-up of commercial power boilers in thick-walled tubes have been presented. The tubes were made of nickel alloy HR6W. This material will be used for thick-walled elements of future boilers with raised operation parameters. The determination of temperature distribution and components of stress state was carried out for the tube with an outer diameter of 540 mm and wall thickness of 127 mm. The analysed heavy wall tube represents the elements of super-critical unit designed due to creep strength. The pressure inside the tube, under steady-state conditions, was 31.4 MPa and temperature was equal to 610°C. The investigations were focused on assessment of the effect of transient changes in temperature during start-up cycles of power unit on distributions of time-dependent temperature and thermal stresses. The method of modeling that allows to assess the effect of start-up time and instability of steam parameters on the local characteristics of the material deformation. The important material properties for the numerical simulation were assumed in relation to the temperature. The local characteristics of deformation of selected points lying on tube surface in a form of relations between strain and circumferential stress were determined. It has been shown that temperature change oscillations under start-up of boiler has an important effect on the time-dependent stress and strain distributions, intensifies the fatigue phenomena.

**Keywords:** thermomechanical fatigue, numerical simulation, start-up of power boilers

DOI: 10.7862/rm.2018.09

*Otrzymano/received:* 07.01.2018

*Zaakceptowano/accepted:* 22.01.2018

---

<sup>26</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Krzysztof Wacławiak, Politechnika Śląska, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, tel.: (32) 6034284, e-mail: krzysztof.waclawiak@polsl.pl

<sup>27</sup> Jerzy Okrajni, Politechnika Śląska, e-mail: jerzy.okrajni@polsl.pl