

**KONSTRUKCJA PALETY PODSTAWOWEJ OPRZYRZĄDOWANIA
TECHNOLOGICZNEGO DO OBRÓBKİ CIEPLNEJ**

STRUCTURE OF GUIDE GRATE IN HEAT TREATMENT TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

Andrzej Drotlew¹, Małgorzata Garbiak¹, Jerzy Kubicki¹, Bogdan Piekarski¹, Paweł Siluk²

¹ Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki,
Instytut Inżynierii Materiałowej, Al. Piastów 17, 70-310 Szczecin

² Kabel-Technik-Polska Spółka z o.o., ul. Pławieńska 5, 78-550 Czaplinek

¹ West Pomeranian University of Technology Szczecin, Faculty of Mechanical Engineering and Mechatronics,
Institute of Material Engineering, 17 Piastów Ave., 70-310 Szczecin

² Kabel-Technik-Polska Spółka z o.o., ul. Pławieńska 5, 78-550 Czaplinek

E-mail: bpiekarski@ps.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono sposób postępowania umożliwiający ilościową ocenę porównawczą elastyczności różnych rozwiązań konstrukcyjnych odlewu palety podstawowej.

Paleta podstawowa jest głównym elementem wchodzącym w skład konstrukcji wszystkich typów oprzyrządowania technologicznego służącego do ułożenia i transportu wsadu w piecu podczas zabiegów obróbki cieplnej. Jest ażurową i cienkościenną konstrukcją.

Określono wartość sił i naprężeń tworzących się w zaproponowanych konstrukcjach palety wskutek ich odkształcenia o zadaną wartość. Na tej podstawie wskazano najkorzystniejsze rozwiązania jej konstrukcji.

Słowa kluczowe: żarowytrzymałe staliwo austenityczne, odlewy dla zakładów obróbki cieplnej, palety

Abstract

The paper presents a procedure that allows a quantitative comparative assessment of the flexibility of different design solutions of guide grate cast.

Guide grate is an essential component part in all types of technological equipment structures used for arranging and transporting charge in furnaces during heat treatment. It is an openwork and thin-walled construction element.

Values of forces and stresses created in the proposed guide grates due to deformation are specified. On this basis, the most advantageous structure solutions are indicated.

Keywords: creep resistant austenitic cast steel, castings for heat treatment plants, grates

Wprowadzenie

Żarowytrzymałe elementy wyposażenia pieców do obróbki cieplnej dzieli się na dwie grupy [1–4]:

1. Oprzyrządowanie technologiczne służące do uformowania i transportu wsadu. Zalicza się do niego: palety podstawowe (rys. 1) i pośrednie, kosze oraz zawieszki. Ich kształt zależy przede wszystkim od kształtu, wielkości i ilości części obrabianych cieplnie, a zewnętrzne wymiary dostosowane są do kształtu i rozmiarów komory roboczej pieca.
2. Elementy konstrukcyjne pieców. Są nimi zamontowane w piecu na stałe takie części, jak: wirniki, rury promieniujące czy tory rolkowe (rys. 1). Ich

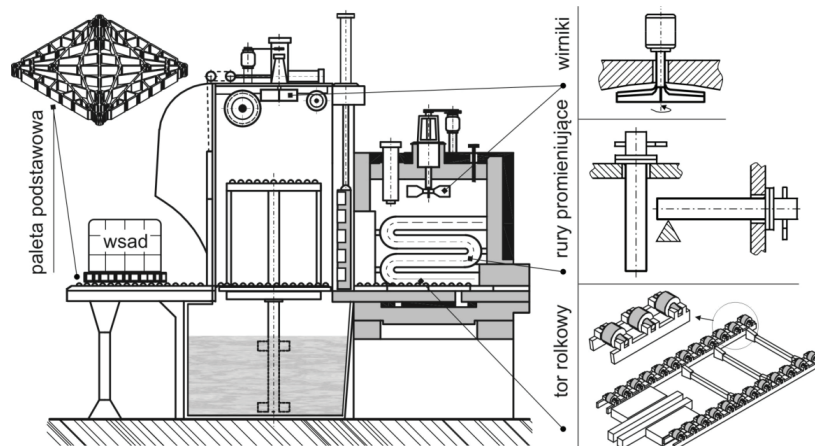
Introduction

The creep resistant elements of equipment of heat treatment furnaces can be divided into two groups [1–4]:

1. Technological equipment used to arrange and transport charge. It includes: guide grates (Fig. 1), intermediate grates, and baskets and hangers. Their shape depends primarily on the shape, size and number of heat treated parts, and the external dimensions are adjusted to the shape and size of the working chamber of the furnace.
2. Structural elements of furnaces. These are the elements permanently fixed in furnaces such as:

kształt wynika z pełnionych funkcji, a wymiary uzależnione są od wielkości komory pieca i jego typu.

rotors, radiant tubes or roller tracks (Fig. 1). Their shape results from their function, and the dimensions depend on the size of the chamber of the furnace and its type.



Rys. 1. Żarowytrzymałe elementy wyposażenia pieca komorowego do nawęglania

Fig. 1. Creep resistant equipment parts of a chamber furnace for carburising

Elementy wyposażenia pieców wykonuje się głównie z żarowytrzymałych stopów o osnowie austenitycznej, odlewniczych, jak i przerobionych plastycznie. Kształt większości elementów sprawia, że najprostszą i najtańszą techniką ich wytwarzania jest odlewanie [1–5].

Analiza trwałości żarowytrzymałego wyposażenia pieców pozwala na stwierdzenie, że trwałość oprzyrządowania technologicznego jest wielokrotnie niższa niż trwałość elementów konstrukcyjnych [1–5].

Odlewy elementów oprzyrządowania technologicznego, poza nielicznymi wyjątkami, wykonywane są metodą odlewania grawitacyjnego w formach piaskowych. Formowane są ręczne lub maszynowo [4].

Poprawne zaprojektowanie oprzyrządowania ma decydujące znaczenie dla kosztów eksploatacji pieców. Wynika to z następujących faktów [1, 4]:

- ukształtowanie oprzyrządowania zależy głównie od rodzaju i kształtu części obrabianych cieplnie, co powoduje, że w większości przypadków jest ono w części lub w całości projektowane indywidualnie,
- obecność oprzyrządowania w komorze pieca wpływa zarówno na wydajność, jak i przebieg procesu obróbki cieplnej, ponieważ jego masa stanowi nawet do 50% masy wsadu załadowywanego do pieca,
- awaria oprzyrządowania w piecu może spowodować bardzo duże straty. W przypadku, gdy jego uszkodzenie spowoduje zablokowanie pieca, zachodzi konieczność jego wyłączenia i ostudzenia w celu usunięcia wsadu. Zwykle też brakuje się części obrabiane cieplnie.

The elements of the equipment of furnaces are usually made of creep resistant alloys with austenitic matrix, cast as well as wrought. The shape of the majority of the elements makes casting the easiest and the cheapest method of manufacturing them [1–5].

The analysis of resistance of the creep resistant elements of equipment of furnaces leads to the conclusion that the durability of technological equipment is many times lower than the durability of structural elements [1–5].

Casts of the elements of technological equipment, with a few exceptions, are made by gravity casting in sand molds. They are manually or machine formed [4].

The correct design of the equipment is critical as far as the operating costs of furnaces are concerned. It results from the following facts [1, 4]:

- the shaping of the equipment depends mainly on the type and shape of the heat treated parts which results in it being partially or as a whole designed individually,
- the presence of the equipment in the chamber of a furnace influences both the performance as well as the course of the process of heat treatment, because its weight is up to 50% of the charge weight loaded to the furnace,
- failure of equipment in the furnace may result in very large losses. In the case when its damage causes blockage of the furnace it is necessary to turn it off and cool down to remove the charge. The heat-treated parts are also usually scraped.

Konstrukcja palety podstawowej

Paleta podstawowa jest bazowym elementem wchodzącym w skład konstrukcji oprzyrządowania technologicznego [1–6]. Ma masę od 8 kg do 120 kg i więcej.

Odlew palety podstawowej, ze względu na kształt należy zaliczyć do grupy odlewów płaskich typu rama/kratownica wytwarzanych z udziałem licznych, prostych rdzeni. Rozmiary oraz zwykle cienkościenna, ażurowa struktura geometryczna sprawiają jednak, że jest to odlew trudny zarówno konstrukcyjnie, jak i technologicznie. Wynika to głównie z faktu, że dla zapewnienia dobrej trwałości i niezawodności należy dostosować jego konstrukcję do warunków pracy w zmiennym polu temperatury, uwzględniając jednocześnie odpowiednią współpracę z innymi elementami oprzyrządowania technologicznego.

Paleta ma kształt prostokąta, kwadratu lub koła w wyniku dopasowania jej do kształtu podstawy komory pieca (np. pieca komorowego – rys. 1, przepychowego czy wgłębnego). Wnętrze palety jest wypełniane ściankami, których wzajemny układ może uwzględniać ilość, kształt i wymiary części obrabianych cieplnie. Stosuje się ścianki proste, bądź ścianki ukształtowane w proste figury. W takich konstrukcjach są obecne wszystkie rodzaje rozwiązań połączeń ścianek – typu X, T, Y, V, L oraz I (rys. 2). Przyjęcie określonego rozwiązania zależy od warunków eksploatacji oprzyrządowania [1–5].

Construction of guide grate

A guide grate is a basic element of the construction of the technological equipment [1–6]. It weighs from 8 kg to 120 kg and more.

The guide grate cast due to its shape is included in the group of flat casts of frame/truss type produced with the participation of numerous simple cores. The size and usually thin-walled and openwork construction make this cast a difficult type both in terms of construction and technology. It results mainly from the fact that in order to provide appropriate durability and reliability its construction should be adjusted to the conditions of work in variable temperature field, taking into account simultaneous appropriate cooperation with other elements of the technological equipment.

A grate can be rectangular, square or circular due to its adjustment to the shape of the base of the furnace (e.g. chamber furnace – Fig. 1, pusher furnace or pit furnace). The inside of the grate is filled with walls whose layout can take into account the number, shape and dimensions of the heat-treated parts. Straight walls are used or walls formed in simple shapes. In such constructions there are all types of joints between walls – of X, T, Y, V, L and I type (Fig. 2). The choice of the given solution depends on the conditions of use of the equipment [1–5].



Rys. 2. Typowe połączenia ścianek odlewu ażurowego wg [7]: a) „krzyżowe” – połączenie typu X, b) „plaster miodu” – Y, c) „faliste” – T

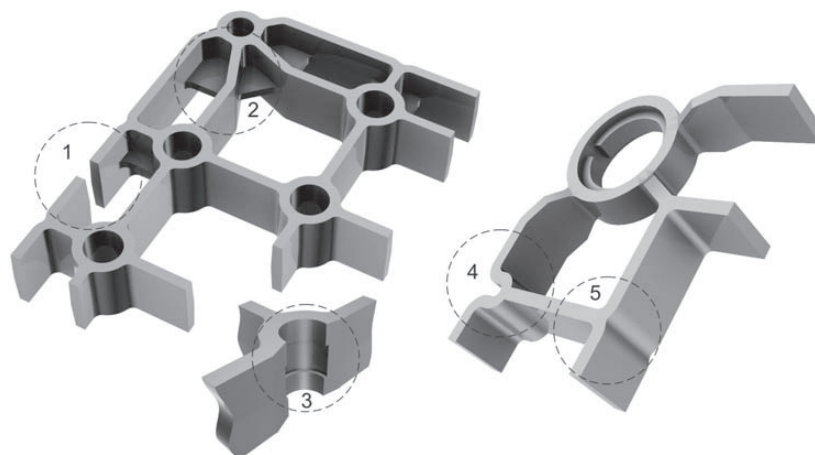
Fig. 2. Standard joints of the openwork cast walls acc. to [7]: a) “cross” X type joint, b) “honey comb” – Y, c) “wavy” – T

W obszarach łączenia ścianek odlewów, ze względu na większe skupienie masy metalu (węzły cieplne), wzrasta prawdopodobieństwo tworzenia się wad wewnętrznych – rzadzisz i jam usadowych. Ograniczenie objętości węzła cieplnego dokonuje się przez odpowiedni dobór promieni technologicznych i stosowanie wybrań w materiale odlewu (rys. 3). Zasady konstruowania odlewanych maszyn i urządzeń wskazują praktyczne przykłady sposobów zmniejszania objętości węzłów cieplnych w odlewach [4–8].

In the areas of joint of the walls of the cast, due to greater concentration of metal mass (hot spots) the likelihood of formation of internal defects – microshrinkages and shrinkage cavities – increases. Limiting the volume of the hot spot is accomplished by proper selection of radiation technology and applying recesses in the material of the cast (Fig. 3). The rules of construction of cast machines and equipment show practical methods of decreasing the volume of hot spots in casts [4–8].

Przykłady rozwiązań konstrukcji poszczególnych fragmentów palety zwiększających jej trwałość przedstawia rysunek 3.

The examples of construction of the individual elements of grates increasing its durability are presented in Figure 3.



Rys. 3. Rozwiązania konstrukcyjne zwiększające trwałość palety: 1 – rozcięcie w pasie zewnętrznym, 2 – żebra wzmacniające, 3 i 5 – wybrania w materiale odlewu zmniejszające objętość węzła cieplnego, 4 – wygięcie odpężające
Fig. 3. Design solutions increasing grate durability: 1 – outer wall cut, 2 – strengthening ribs, 3 and 5 – recess of cast material diminishing the volume of hot spot, 4 – stress relieving camber

Konstrukcja oprzyrządowania technologicznego odpowiada warunkom krzepnięcia jednoczesnego, dlatego podczas jego projektowania należy unikać rozwiązań sprzyjających tworzeniu się w odlewach wad wewnętrznych oraz nadmiernych naprężeń odlewniczych. Mogą one stwarzać niebezpieczeństwo powstawania odkształceń i pęknięć w konstrukcji palety w czasie stygnięcia [8].

Usunięcie lokalnego zwiększenia objętości i masy odlewu sprzyja jednocześnie poprawie równomierności jego nagrzewania się/chłodzenia podczas obróbki cieplnej. Zmniejsza to prawdopodobieństwo powstawania dużej koncentracji naprężeń w tych obszarach konstrukcji w porównaniu do obszarów sąsiednich (wartości naprężeń cieplnych w grubych i cienkich ściankach odlewu są odwrotnie proporcjonalne do pola powierzchni przekrojów ścianek).

Charakterystyka obiektu badań. Cel pracy i jej zakres

Artykuł przedstawia sposób postępowania w trakcie opracowania skutecznych procedur umożliwiających rzetelną ocenę rozwiązań konstrukcyjnych na etapie ich projektowania. Przemysł został wywołany koniecznością zaprojektowania dla jednej z dużych firm samochodowych na terenie Polski, nowej palety podstawowej wykorzystywanej w budowie różnych wariantów oprzyrządowania służącego do formowania wsadu podlegającego obróbce cieplno-chemicznej.

Programy komputerowe do symulacji różnego rodzaju procesów są w stanie wskazać miejsca,

The construction of the technological equipment meets the requirements of simultaneous coagulation, thus during the process of designing it solutions facilitating formation of internal defects in castings and excessive stresses should be avoided. They may pose a danger with the creation of deformations and cracks in the construction of grates during cooling [8].

Removing the local increase of volume and weight of the cast at the same time facilitates the improvement of its uniformity of heating/cooling during heat treatment. It decreases the probability of large concentration of stresses in these areas of a construction compared to neighbouring areas (values of thermal stresses in thick and thin-walled castings are inversely proportional to the surface area of the wall sections).

Characteristics of the object of the research. The aim of the work and its scope

The article presents the procedure relating to the development of effective procedures for the reliable assessment of construction solutions when designing. The reflections have been caused by the need to design a new basic grate used in the construction of various elements of equipment used for the formation of the charge being subject to heat and chemical treatment in one of the large Polish car companies.

Computer programmes simulating various processes are able to point to the areas where most probably problems will occur. However, in most cases they do not inform how to solve these problems. One

w których najprawdopodobniej pojawią się problemy. W większości przypadków nie informują jednak, jak te problemy rozwiązać. Można oczywiście działać na zasadzie prób i błędów, powoli zbliżając się do właściwego rozwiązania. Takie działanie jest jednak bardzo pracochłonne. W podejmowaniu właściwych decyzji z całą pewnością pomaga doświadczenie. Im większa wiedza i umiejętności projektanta, tym szybciej można opracować właściwe rozwiązanie konstrukcji danej palety.

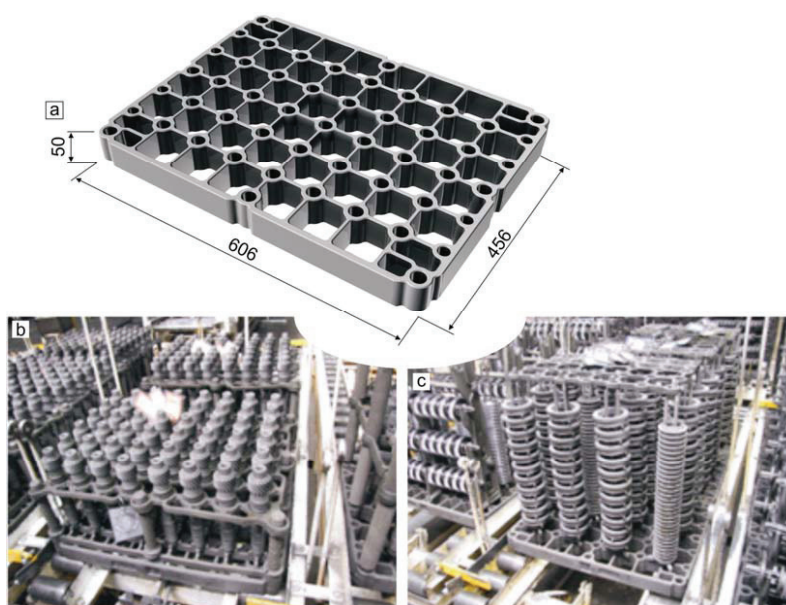
Proponowana analiza ma służyć poszerzeniu świadomości konstruktorów, którzy stawiają sobie za zadanie projektowanie elementów eksploatowanych w warunkach szybkich zmian temperatury.

Obiekt badań – paletę – przedstawiono na rysunku 4a. Wchodzi ona w skład oprzyrządowania technologicznego (rys. 4b–c). Elementami oprzyrządowania są jeszcze palety pośrednie, przekładki czy zawieszki w zależności od asortymentu części obrabianych cieplnie. Wsad układa się bądź zawiesza wewnątrz oprzyrządowania. Wprowadzenie dodatkowych elementów zwiększa stabilność załadowanego wsadu, gwarantuje bardziej równomierny przepływ strumienia atmosfery piecowej, ale też jest czynnikiem podwyższającym ładowność oprzyrządowania [1–4].

can of course operate on the principle of trial and error, slowly approaching the appropriate solution. However, such a method is very labour-intensive. In making the right decisions experience certainly helps. The greater the knowledge and the skills of the designer, the faster the correct solution for the construction of a given grate can be developed.

The proposed study is designed to expand the manufacturers' awareness to set themselves the task of designing elements operating in conditions of rapid changes of temperature.

The subject of the research – the grate – is presented in Figure 4a. It is one of the elements of the technological equipment (Fig. 4b–c). The equipment also includes intermediate grates, dividers and hangers depending on the assortment of the heat treated parts. The charge is arranged or suspended inside the equipment. Introducing additional elements increases the stability of the loaded charge, guarantees more even flow of furnace atmosphere, but it is also a factor of increasing the loading capacity of the equipment [1–4].



Rys. 4. Paleta (a) i oprzyrządowanie technologiczne złożone z jej użyciem (b–c)

Fig. 4. Grate (a) and technological equipment with use of base grate (b–c)

Początkowe, dobre właściwości użytkowe oprzyrządowania ulegają degradacji podczas eksploatacji w piecu wskutek procesów [4]:

- starzenia,
- korozji wysokotemperaturowej oraz
- zmęczenia cieplnego.

The initial, good performance characteristics of the equipment are subject to degradation during exploitation in the furnace due to the processes of [4]:

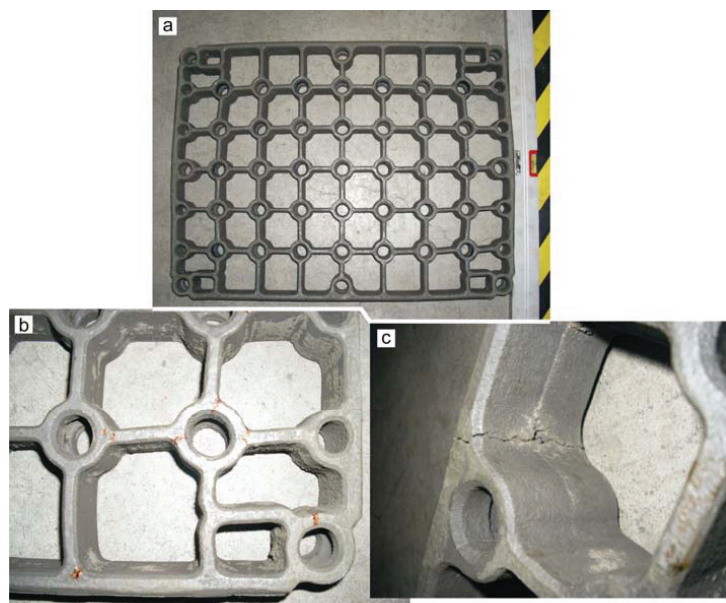
- aging,
- high temperature corrosion and
- thermal fatigue.

Końcowy efekt zniszczenia oprzyrządowania technologicznego wynika ze współdziałania ze sobą bądź nakładania się ww. procesów. W efekcie ich oddziaływania, w warstwie wierzchniej i we wnętrzu materiału, zachodzą przemiany fizykochemiczne niekorzystne dla jego właściwości, a następnie deformacja i/lub pękanie ścianek oprzyrządowania oraz ubytki jego fragmentów [4].

Uszkodzenia tworzące się w badanej palecie przedstawia rysunek 5.

The final effect of damage of the technological equipment results from interaction or overlap of the mentioned processes. As a result of their impact on the surface and inside the material physical-chemical changes detrimental to its properties occur. Then deformation and/or cracking of the walls of the equipment as well as the loss of its fragments also occur [4].

The failures occurring in the researched grate are presented in Figure 5.



Rys. 5. Paleta podstawowa (rys. 4) po roku eksploatacji: a) widok ogólny, b–c) fragmenty
Fig. 5. Base grate (Fig. 4) after 1-year exploitation: a) general view, b–c) fragments

Oprzyrządowanie technologiczne / paleta podstawowa podlega w piecu w trakcie eksploatacji gwałtownemu oddziaływaniu temperatury, co generuje duże gradienty temperatury w konstrukcji. Przy dużej ich wartości i sztywnej konstrukcji palety, może dochodzić do jej pęknięcia. Proces ten może zostać przyspieszony wskutek korozyjnego oddziaływania atmosfery piecowej – na przykład nawęglającej, co prowadzi do zmian właściwości materiału (rys. 6).

Gdy wytrzymałość na rozciąganie materiału palety zostaje przekroczona podczas nagrzewania, wówczas dochodzi do pęknięć żeber wewnątrznych – nagrzewający się szybko obrys zewnętrzny powoduje powstanie naprężeń rozciągających w wewnętrznych rejonach palety, a sam podlega ściskaniu. Kiedy taka sytuacja nastąpi podczas chłodzenia, wówczas dochodzi do tworzenia się pęknięć w obrysie zewnętrznym, ponieważ podlegał on rozciąganiu wskutek gwałtownego zmniejszania się wymiarów liniowych. Taki proces niszczenia palety można poprzeć wieloma przykładami pochodzącymi z praktyki inżynierskiej [4].

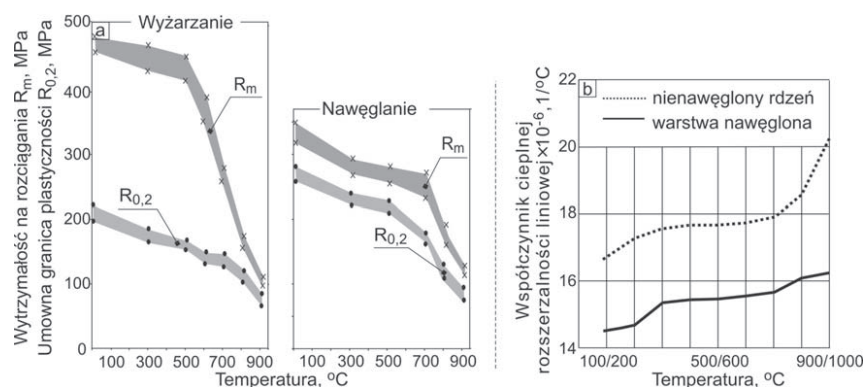
W warunkach rzeczywistych stan naprężeń jest inny wskutek zmiany właściwości fizycznych

Instrumentation technology and the guide grate during operation in the furnace are subject to rapid thermal effects which generate large temperature gradients in the construction. When their values are high and the construction of the grate is stiff, cracks may occur. This process may be facilitated due to the corrosive impact of the furnace atmosphere – for example carburising, which leads to change of the characteristics of the material (Fig. 6).

When the tensile strength of the material is exceeded during heating it causes cracking of the internal ribs – the fast heating outer contour causes tensile stresses in the internal areas of the material, while it is subject to compression. When such a situation occurs during cooling it causes cracks in the outer contour because it was subject to tension due to the rapid decrease in the linear dimensions. This process of grate degradation can be supported with many examples from engineering experience [4].

In real conditions the status of stress is different as a result of changes in the physical and mechanical properties of cast steel as a function of temperature (Fig. 6). The difference between the value of tensile stress, causing only plastic deformation ($R_{0.2}$), and

i mechanicznych staliwa w funkcji temperatury (rys. 6). Różnica pomiędzy wartością naprężeń rozciągających, powodującą tylko odkształcenie plastyczne ($R_{0,2}$), a wartością naprężeń, powodującą zerwanie ciągłości materiału (R_m) jest bardzo duża w zakresie do 600°C dla materiału poddanego tylko oddziaływaniu temperatury (rys. 6a – wyżarzanie). Natomiast już po 340 godzinach pracy w atmosferze nawęglającej (rys. 6a – nawęglanie) różnice między wartościami tych naprężeń stają się minimalne i niezależne od wartości temperatury. Wynika to zarówno ze spadku wartości wytrzymałości na rozciąganie, jak również ze wzrostu granicy plastyczności dla materiału nawęglonego.



Rys. 6. Wpływ temperatury na właściwości mechaniczne staliwa G-X35NiCrSi36-18 (a) [9] oraz zmianę współczynnika rozszerzalności liniowej warstwy nawęglonej i nienawęglonym rdzeniu w staliwie G-X40CrNiSi25-20 (b) [10]

Fig. 6. Influence of temperature on mechanical properties of cast steel G-X35NiCrSi36-18 (a) [9] and on the change of linear expansion coefficient of carburised zone and non carburised core of G-X40CrNiSi25-20 cast steel (b) [10]

Prawidłowa konstrukcja palety powinna charakteryzować się dużą możliwością odkształceń sprężystych w płaszczyźnie poziomej i dużą sztywnością w kierunku pionowym.

Plan badań, by możliwie szeroko przeanalizować to zagadnienie, podzielono na trzy etapy:

1. Ocenę zasadności zastępowania prostych ścianek żeber wewnętrznych – prostymi figurami w celu zmniejszenia sztywności konstrukcji palety.
2. Uelastyczniania większych fragmentów konstrukcji palety poprzez zastępowanie łączenia ścianek pod kątem prostym, ściankami zakrzywionymi.
3. Analizę całej struktury geometrycznej palety przy różnym ukształtowaniu połączenia ścianek.

Struktura geometryczna nowych rozwiązań palety, w porównaniu do jej wyjściowej postaci (rys. 4a) musiała zachować wymiary zewnętrzne oraz rozstaw otworów, z uwagi na współpracę z innymi elementami oprzyrządowania (rys. 4b–c).

W pierwszym etapie, który miał charakter jedynie poznawczy przeprowadzono analizę kształtu ścianek konstrukcji palety ze względu na możliwość sprężystego jej odkształcania pod wpływem powstających naprężeń (tab. 1).

the value of stress causing material discontinuity (R_m) is very large in the temperature range to 600°C for the material subject only to temperature (Fig. 6a – annealing). However, after 340 hours of operation in the carburising atmosphere (Fig. 6a – carburising) those differences between the values of these stresses become minimal and irrespective of temperature. It results both from the decrease of tensile strength and from the increase of the yield point for the carburised material.

The correct construction of the grate should be characterized with high horizontal elasticity and high vertical stiffness.

The plan of the research was divided into three stages to address the issue as widely as possible:

1. The assessment of the merits of replacing the straight walls – internal ribs – with simple shapes to decrease stiffness of the grate.
2. Flexibilisation of larger fragments of the grate structure by replacing wall joints at right angles with curved walls.
3. Analysis of the whole geometric structure of the grate with different shaping of the walls joints.

The geometric structure of the new solutions for grates, compared to its initial form (Fig. 4a) had to maintain the outer dimensions and hole spacing due to integration with other elements of equipment (Fig. 4b–c).

In the first stage, which was only of a purely cognitive nature, the analysis of the shape of the walls of the grate construction was performed due to the possibility of plastic deformations because of occurring tensions (Table 1).

Tabela 1. Figury proste składające się na wewnętrzną konstrukcję palety (1–6) oraz wartości siły F wymuszającej odkształcenie $\Delta L = 0,25 \text{ mm}^{\text{a}}$ [11, 12]

Table 1. Simple figures made up an inner structure of grate (1–6) and values of F force giving deformation $\Delta L = 0.25 \text{ mm}^{\text{a}}$ [11, 12]

Rozmiar obrysu elementu / Size of the contour of the element, mm	Figury proste / Simple figures					
	1	2	3	4	5	6
	F, MN					
50 × 50						
	85	12,5	11,5	10,2	8,9	0,75
75 × 50						
	57	10,5	9,3	7,5	7,5	0,65
50 × 75						
	85	3,8	3,6	3,3	2,7	0,19

^a Dla porównania poszczególnych elementów (1–6) przyjęto ujednolicone ich wymiary w osi X i Y – 50 mm. Grubość ścianek i wymiary w osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku (oś Z) przyjęto – 7 mm. Symulację odkształcania wykonano za pomocą programu *SolidWorks Simulation*. Obciążenie przyłożono wzdłuż osi pionowej elementów (oś Y) / For comparison between the different elements (1–6) standardised dimensions on axis X and Y were adopted – 50 mm. Thickness of walls and dimensions on the axis perpendicular to the surface of the drawing (axis Z) assumed – 7 mm. The simulation of the deformation performed with the *SolidWorks Simulation* software. The load is applied along the vertical axis of the elements (axis Y)

Określono wartość siły F wprowadzającej ich odkształcenie $\Delta L = 0,25 \text{ mm}$ (tab. 1) – ustalono wpływ zmiany wartości proporcji i rozmiarów różnych prostych figur na ich sprężystość. Dodatkowo uwzględniono również zmiany ich kształtu – zwiększono wymiar o 50% w osi Y , następnie w osi X (tab. 1).

Przyjęto, że czynnikiem zwiększającym trwałość konstrukcji jest element o większej sprężystości/podatności – ponieważ wymaga zastosowania mniejszej siły F dla odkształcenia o tą samą wartość. W warunkach rzeczywistych taki mechanizm odkształcenia palety odpowiada zablokowaniu rozszerzania się określonego elementu jej konstrukcji wskutek zmiany wartości temperatury. Reakcją jest odpowiednia wartość siły F , większa dla większej sztywności elementu zablokowanego i większej wartości temperatury.

Analiza wartości siły F (tab. 1) wskazuje, że konstruktor może prognozować sprężystość projektowanej palety w szerokim zakresie poprzez wprowadzanie do konstrukcji elementów składowych o różnym kształcie geometrycznym zamiast ścianek prostych. Ponadto dobór smukłości elementów umożliwia dalszą poprawę tej cechy użytkowej palety. Na przykład, dla figur zamkniętych (kształt 3–6, tab. 1) wydłużenie ich wymiaru (obrys 75 × 50 mm, tabe-

The value of force F causing the deformation $\Delta L = 0.25 \text{ mm}$ (Table 1) was determined – the impact of changes in the proportions and sizes of various simple shapes on their flexibility was also determined. Additionally, changes to their shape were also taken into account – the dimension on the Y axis was enlarged by 50%, and then on the X axis (Table 1).

It was assumed that the factor increasing the stability of the structure is an element with greater resilience/compliance – because it requires less force F for the deformation of the same value. In real conditions such a mechanism of grate deformation refers to blocking the expansion of a given element of its construction due to the change of temperature. The reaction is the appropriate value of force F , which is higher to provide better stiffness of the blocked element and a higher temperature.

The analysis of the value of force F (Table 1) shows that the designer can predict the resilience of the designed grate to a great extent by introducing to the construction new elements of various geometrical shapes instead of straight walls. In addition the choice of slenderness of the elements further improves this functional feature of grates. For example, for closed figures (shape 3–6, Table 1) lengthening their dimension (contour 75 × 50 mm, Table 1) causes a decrease

la 1) powoduje zmniejszenie wartości siły koniecznej do odkształcenia $\Delta L = 0,25$ mm w zakresie od 6,7% do 26,5% w porównaniu do kształtu wyjściowego (obrys 50×50 mm, tab. 1).

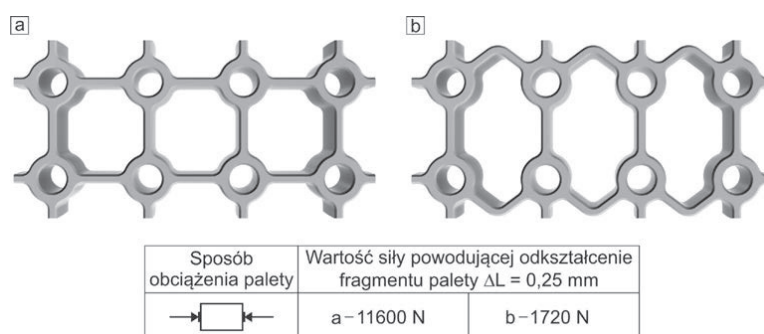
Stosowana analiza porównawcza jest wystarczająca dla wstępnej oceny podatności/sprężystości elementów konstrukcyjnych palety, pomimo przyjęcia wielu uproszczeń. W warunkach rzeczywistych stan naprężeń jest inny wskutek zmiany właściwości fizycznych i mechanicznych staliwa w funkcji temperatury, jak już wcześniej to wykazano.

W drugim etapie prowadzonych analiz wykazano, że zmiana kształtu pojedynczych elementów konstrukcji wewnętrznej palety przekłada się na podatność większych jej fragmentów (rys. 7). Wyniki przeprowadzonych obliczeń [11] wskazują, że segment palety z prostymi ściankami (rys. 7a) będzie oddziaływał siłą o wartości 6–7 razy większą na współzależne elementy jej konstrukcji niż segment, w którym zakrzywiono ścianki w płaszczyźnie wymuszonego odkształcenia (rys. 7b). Stwierdzić więc można, że drugie rozwiązanie konstrukcyjne (rys. 7b) jest korzystniejsze ze względu na trwałość odlewu stosowanego w zmiennym polu temperatury.

in the force needed for deformation $\Delta L = 0.25$ mm in the range from 6.7% to 26.5% compared to the initial shape (contour 50×50 mm, Table 1).

The applied comparable analysis is sufficient for the initial assessment of the compliance/resilience of the elements of the grate, despite the adoption of a number of simplifications. In real conditions the status of stress is different as a result of changes in the physical and mechanical properties of cast steel as a function of temperature, as shown previously.

During the second stage of the performed analyses it was shown that the change of shape of individual elements of the internal construction of the grate results in a greater compliance of its bigger fragments (Fig. 7). The results of the calculations [11] show that the segment of the grate with straight walls (Fig. 7a) affected the interdependent elements of its construction with a force 6–7 times greater than the segment in which the walls in the area of forced deformation were curved (Fig. 7b). It can be thus concluded that the second constructional solution (Fig. 7b) is more favourable due to the durability of the casting used in a variable temperature field.



Rys. 7. Segment konstrukcji palety oraz wartości siły F powodującej odkształcenie $\Delta L = 0,25$ mm [11, 12]: a) wyjściowy, b) zmodyfikowany

Fig. 7. Segment of grate structure and values of F force giving deformation $\Delta L = 0.25$ mm [11, 12]: a) initial, b) modified

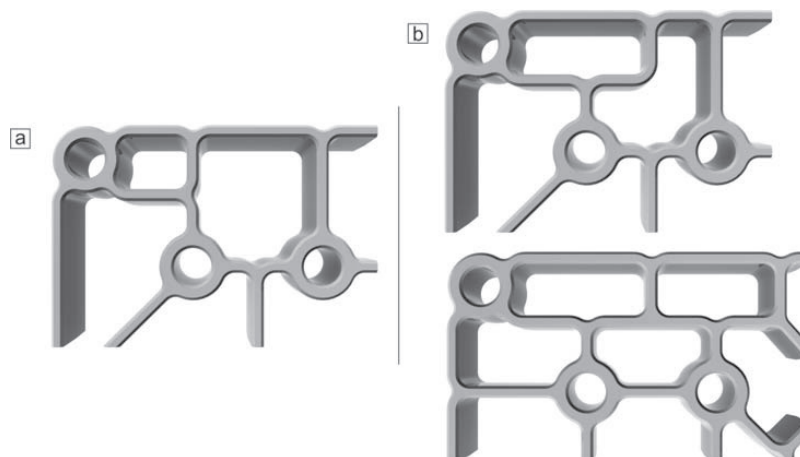
Przyjmując do analizy wartość odkształcenia $\Delta L = 0,25$ mm, założono, że odpowiada ono w warunkach rzeczywistych eksploatacji palety przyrostowi jej wymiarów spowodowanemu chwilową różnicą temperatury rzędu 300°C pomiędzy jej fragmentami, na przykład na początku procesu grzania. Założenie takie daje możliwość analizy zagadnienia, przy wykorzystaniu do obliczeń właściwości materiału w temperaturze otoczenia. Łatwiej i wygodniej jest ją przeprowadzić w takich warunkach dla wymuszeń siły i wydaje się, że takie postępowanie jest wystarczające do wstępnej oceny podatności konstrukcji. Jednocześnie można zaakceptować niewielkie odstępstwa od warunków rzeczywistych. Dlatego też do dalszych rozważań przyjęto taką wartość przyrostu długości jako wystarczającą do scharakteryzowania sztywności/elastyczności różnych konstrukcji palety. Zasto-

Taking into account the analysis for the value of deformation $\Delta L = 0.25$ mm it was assumed that it corresponds to the actual operating conditions to the increase of its dimensions caused by the instantaneous temperature difference of 300°C between its fragments, for example, at the beginning of the heating process. Such an assumption provides the possibility to analyse the issue with the use of properties of the material at ambient temperature for the calculations. It is easier and more convenient to conduct it in such conditions as for extortions of strength and it seems that such a procedure is sufficient for the initial assessment of compliance of the construction. At the same time, slight deviations from the real conditions can be accepted. Thus, for the remaining considerations such a value of increase in length was assumed as sufficient for characterising stiffness/flexibility of various

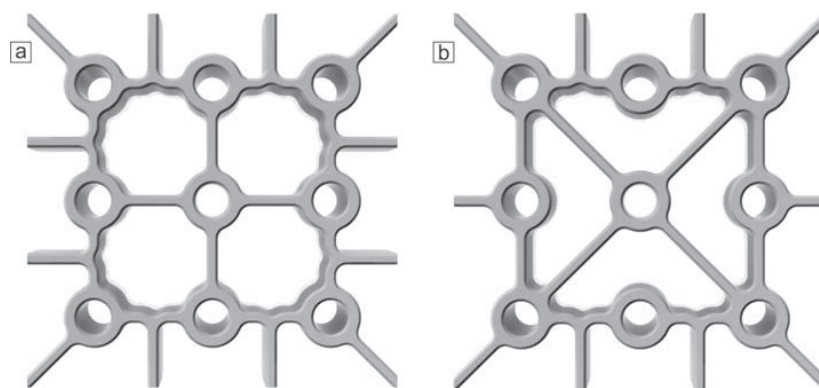
sowano metodę porównawczą, tzn. wyniki pomiarów charakteryzujących podatność do odkształcania się palety o różnej strukturze geometrycznej odniesiono do konstrukcji palety wyjściowej (rys. 4a), dotychczas stosowanej. W trzecim etapie badań projektowano różne struktury palety. Zastępowano dotychczasowe jej fragmenty, które uznano za sztywne, elementami podatnymi. Takie postępowanie przedstawiają rysunki 8 i 9.

constructions of the grate. A comparative method was used i.e. the results of the measurements showing the susceptibility to deformation of grates of various geometric structures were referenced to the construction of the initial grate (Fig. 4a), used up to now.

In the third stage of the study there were designed a range of different grates. The fragments assumed to be stiff were replaced with compliant parts. Figures 8 and 9 show such a procedure.



Rys. 8. Konstrukcja naroża palety wg [12]: a) o dużej sztywności, b) po modyfikacji
Fig. 8. Structure of grate corner acc. to [12]: a) of high stiffness, b) after modification



Rys. 9. Konstrukcja segmentu środkowego palety wg [12]: a) o dużej sztywności, b) po modyfikacji
Fig. 9. Structure of inner part of grate acc. to [12]: a) of high stiffness, b) after modification

Analizowano 21 struktur geometrycznych. Przykładowe zestawiono na rysunku 10. Porównano sztywność wyjściowej konstrukcji (rys. 10a) ze sztywnością konstrukcji projektowanych z użyciem różnego typu elementów podatnych (rys. 10b-e). Wartość siły F potrzebnej do odkształcenia palety $\Delta L = 0,25$ mm jest zawsze największa dla konstrukcji wyjściowej, niezależnie od sposobu obciążenia – dłuższa lub krótsza ścianka konstrukcji (patrz rys. 10a, tab. 2).

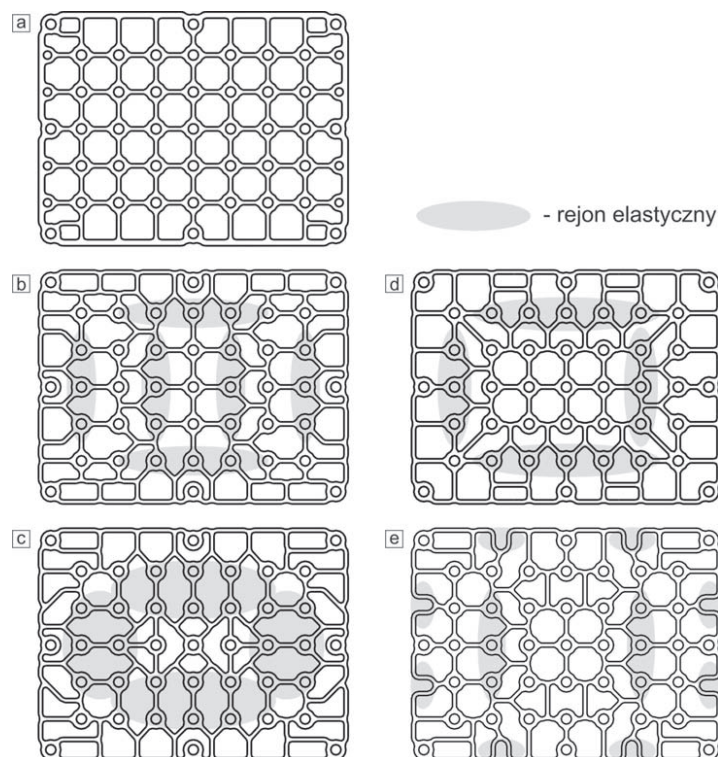
Zmiana ukształtowania ścianek wewnętrznych palety, przy zachowaniu rozstawu otworów niezbędnych do mocowania wsadu, umożliwia

Twenty-one geometric structures were analyzed. The examples are presented in Figure 10. The stiffness of the initial construction (Fig. 10a) was compared to the stiffness of the constructions designed with the use of various types of compliant elements (Fig. 10b-e). Value of force F necessary for deformation of the grate $\Delta L = 0.25$ mm is always the largest for the initial construction, irrespective of the localisation of the load – longer or shorter wall construction (see Fig. 10a, Table 2).

The change in the internal shaping of the walls of the grate, while maintaining the necessary spacing

znaczące zmniejszenie wartości siły koniecznej do jej odkształcenia.

of holes for fixing the charge, allows for a significant decrease of the value of force necessary for deformation.



Rys. 10. Konstrukcja palety wg [11, 12]: a) wyjściowa, „sztywna” konstrukcja, b–e) po modyfikacji; zaznaczone pola szare konstrukcji uznano za podatne (rejonny elastyczne)

Fig. 10. The structure of the grate; initial "stiff" structure (a) and modified (b–e) (acc. to [11, 12]); the marked grey fields are acknowledged as elastic regions

Obliczona wartość siły F (tab. 2) dla poszczególnych rozwiązań konstrukcji palety określa reakcję konstrukcji oprzyrządowania na ograniczanie swobody odkształceń cieplnych zarówno podczas nagrzewania, jak i chłodzenia wraz ze wsadem.

The calculated value of force F (Table 2) for the individual solutions for the construction of the grate defines the reaction of the construction of the equipment to limiting the ease of thermal deformations both during heating and cooling with the charge.

Tabela 2. Wartość siły F wymuszające odkształcenie palet (rys. 10) w zależności od sposobu ich obciążenia wg [12]

Table 2. The value of F force giving deformation of grate (Fig. 10) depending on the way of loading acc. to [12]

Sposób obciążenia palety / Method of loading the grate	Konstrukcje palety (rys. 10) / Constructions of the grate (Fig. 10)				
	a	b	c	d	e
	Wartość siły F powodująca odkształcenie palety $\Delta L = 0,25$ mm / Value of force F causing deformation of the grate $\Delta L = 0.25$ mm, MN				
	287	122	152	165	155
	175	95	65	89	92

Wnioski

1. Zaproponowany tok postępowania przy ocenie podatności struktury geometrycznej palety do odkształceń umożliwia ilościowe scharakteryzowanie tego zagadnienia, uniezależniając ją od oceny subiektywnej.
2. Powszechnie dostępny program *SolidWorks Simulation* jest narzędziem wystarczającym do wyznaczenia parametrów charakteryzujących elastyczność elementów konstrukcji palety. Jego zastosowanie znajduje uzasadnienie, gdy konstruktor nie dysponuje bardziej złożonymi narzędziami do oceny zachowania konstrukcji stosowanych w zmiennym polu temperatury [13, 14].
3. Zastępowanie prostych elementów konstrukcji palety figurami także o prostej geometrii oraz odpowiedni dobór ich proporcji jest postępowaniem skutecznym, prowadzącym do zmniejszenia sztywności całej jej konstrukcji.
4. Zastąpienie czterosegmentowego, sztywnego fragmentu konstrukcji palety, czterosegmentowym fragmentem elastycznym powoduje prawie siedmiokrotne zmniejszenie sił powstających podczas szybkich zmian temperatury.
5. W skrajnych warunkach możliwe jest ponad czterystukrotne zwiększenie elastyczności elementów palet, co daje bardzo duże możliwości podczas ich konstruowania.
6. Dalsze badania powinny prowadzić do:
 - a) ilościowego określenia elastyczności skomplikowanych, powtarzalnych fragmentów konstrukcji palety oraz proporcji prostych jej elementów składowych na zmianę jej charakterystyk,
 - b) ilościowego określenia wpływu położenia różnych elastycznych elementów konstrukcji na elastyczność całej konstrukcji,
 - c) opracowania równań regresji wiążących wartości siły powodującej zadane odkształcenie z ilością, rodzajem i sposobem rozłożenia elementów elastycznych w konstrukcji.
7. Opracowanie biblioteki rozwiązań konstrukcyjnych elementów elastycznych wraz z ich charakterystykami będzie bardzo pomocne przynajmniej dla tych projektantów konstrukcji stosowanych w wysokiej temperaturze, którzy dopiero gromadzą własne doświadczenia w tym zakresie.

Conclusions

1. The proposed procedures of assessing the susceptibility of a geometric structure to deformation, allows for quantitative characterisation of this issue, freeing it from subjective evaluation.
2. Widely available SolidWorks Simulation software is a tool sufficient to determine the parameters characterising the flexibility of structural components of the grate. Its use is justified when the designer does not have access to more complex tools assessing the behaviour of constructions used in a variable temperature field [13, 14].
3. Replacing simple elements of the grate with figures of simple geometry and appropriate choice of their proportions is an effective treatment, leading to reduction in the stiffness of the whole structure.
4. Replacing the 4-segment fragment of the construction of the grate with a 4-segment elastic fragment causes almost sevenfold reduction in the forces generated during rapid temperature changes.
5. In extreme conditions, it is possible to increase the flexibility of the elements of the grates over 400 times, which offers greater opportunities during construction.
6. Further research should lead to:
 - a) quantitative assessment of flexibility of complex, repeated fragments of the construction of the grate and the proportions of its simple elements to the change of its features,
 - b) quantitative assessment of the influence of the localisation of various elastic elements of the construction to the flexibility of the whole construction,
 - c) developing regression equations involving the force causing the set deformation, the type and the pattern of elastic elements in the design.
7. Developing a library of solutions for the elastic construction elements along with their characteristics would be very helpful at least for those designers who are gathering their own experience in this field.

Literatura/References

1. Lai G.Y. (1991). Heat-Resistant Materials for Furnace Parts, Trays, and Fixtures. *ASM Handbook*, 4, 510–518.
2. Dossett J.L., Boyer H.E. (2006). *Practical Heat Treating*. ASM International, 2nd ed.
3. Grzyb J., Trzciałkowski J. (1975). *Urządzenia do obróbki cieplnej w atmosferach regulowanych*. Warszawa: Wydawnictwo WNT.
4. Piekarski B. (2012). *Odlewy ze stopów żarowytrzymałych w piecach do obróbki cieplnej*. Szczecin: Wydawnictwo Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.
5. Piekarski B., Drotlew A. (2008). Konstruowanie odlewów pracujących w warunkach cyklicznej zmiany temperatury. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 3(28), 95–102.
6. Steinkusch W. (1987). Hitzebeständiger Stahlguß für Wärmebehandlungsanlagen. *Gas Wärme Inter.*, 6, 340–346.
7. Píšek F. (1956). *Konstrukce otlitků*. Praha: SNTL.
8. Skarbiński M. (1968). *Zasady konstruowania odlewanych części maszyn*. Warszawa: Wydawnictwo WNT.
9. Gutowski P., Piekarski B. (1988). *Zmiana własności mechanicznych staliwa typu 17/36 w zakresie temperatur 293–1173 K*. Materiały XIV Sympozjum Naukowego ITMO AGH, Kraków, 123.
10. Yoshikawa K., et al. (1986). The Relation between Carburization Resistance and Surface Oxide Film of Heat Resistant Steels for Petrochemical Plants. *Sumitomo Search*, 33, 45.
11. Siluk P., Drotlew A., Piekarski B. (2011). *Projektowanie odlewów palet stosowanych w piecach do obróbki cieplnej*. Prezentacja na VII Seminarium Studenckiego Koła Naukowego Odlewników „SFEROID” w Katedrze Odlewnictwa WM–T Polit. Śląskiej w Gliwicach, Ustronie Jaszowiec, 2–4 czerwca 2011 r.
12. Siluk P. (2012). *Analiza naprężeń występujących w nośnikach wsadu pracujących w piecach do obróbki cieplnej*. Szczecin: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie (praca magisterska).
13. Nandwana D., et al. (2010). Design, Finite Element analysis and optimization of HRC trays used in heat treatment process. *Proceedings of the World Congress on Engineering WCE 2010*, (II), 1149–1154.
14. Piekło J., Pysz S. (2000). Kształtowanie wytrzymałościowe odlewu palety transportowej stosowanej w piecach tunelowych na podstawie analizy numerycznej pola temperatury i stanu naprężenia. *Biuletyn Instytutu Odlewnictwa*, 1(3), 3–13.

