

**OPTIMALIZACYJNA ANALIZA NUMERYCZNA ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ
I PRZEMIESZCZEŃ W PROCESIE WULKANIZACJI KUL DO ZAWORÓW ZWROTNYCH**

**AN OPTIMISING NUMERICAL ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF STRESSES AND
DISPLACEMENTS IN THE RUBBER CURING PROCESS OF CHECK VALVE BALLS**

Mieczysław Kuder¹⁾, Robert Żuczek²⁾

¹⁾ Instytut Odlewnictwa, Zakład Stopów Żelaza, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, ²⁾ Instytut Odlewnictwa, Centrum Projektowania i Prototypowania, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

¹⁾ Foundry Research Institute, Department of Ferrous Alloys, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, ²⁾ Foundry Research Institute, Design and Prototyping Center, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

E-mail: mieczyslaw.kuder@iod.krakow.pl

Streszczenie

Obniżenie gęstości kul tonących zaworów zwrotnych o prawie 30% jest związane ze znaczną redukcją grubości ścianek czasz, z których montowane są kule. Podczas operacji wulkanizacji, prowadzonej pod wysokimi naciskami, istnieje zagrożenie nadmiernego odkształcenia lub nawet uszkodzenia tych elementów. Analizy numeryczne, przeprowadzone na trzech wybranych wielkościach z typoszeregu, ujawniły występowanie takiego zagrożenia w przypadku najmniejszego nominalu, w którym maksymalne naprężenia są bliskie granicy plastyczności dla przyjętego żeliwa EN-GJS-400-15. Drogą do uzyskaniażądanego celu jest zastosowanie żeliwa o wyższej wytrzymałości i zapewnienie dużej dokładności odlewów czasz oraz precyzji ich połączenia (zamka), dla uniknięcia miejscowego spiętrzenia naprężeń i efektu karbu.

Słowa kluczowe: symulacja numeryczna, naprężenia, wulkanizacja, żeliwo sferoidalne, zawory zwrotne, armatura

Abstract

Decreasing the density of check valve dip balls by nearly 30% results in a significant decrease in the wall thickness of the domes from which the balls are assembled. During the high pressure curing process a risk occurs of excessive deformation or even damage of the elements. The numerical analyses conducted for three selected sizes of the type series revealed that a danger exists in the lowest size, where the maximum stresses are close to the yield point for the selected cast iron grade, i.e. EN-GJS-400-15. The way to achieve the desired goal is to use cast iron with higher strength, and to secure high precision of dome casts and their connection (lock) in order to avoid local stress concentration, resulting in the notching effect.

Keywords: numerical simulation, stress, rubber curing, spheroidal iron, check valves, fittings

Wstęp

Silna konkurencja na rynku europejskim wymusza na producentach działania, mające na celu obniżanie masy urządzeń, podwyższenie sprawności i wydłużenie żywotności. W przypadku żeliwnej armatury przemysłowej dotyczy to szczególnie „odchudzenia” elementów odlewanych. Obniżenie masy kul zamykających, stanowiących bardzo ważny element zaworów zwrotnych, jest działaniem w kierunku obniżenia masy zaworu, podwyższenia sprawności oraz umożliwienia ich zastosowania do mediów o

Introduction

The strong competition on the European market forces the manufacturers to act for reduction of equipment mass, enhancement of efficiency and increase of operating life. Considering industrial cast iron fittings, the trend specifically applies to leaning the cast iron elements. Reduction of mass in the sealing balls which are a critical component of check valves is an action towards reduction of the valve weight, increase of efficiency and enabling application in media with the density approximate to pure water. The sealing ball is

gęstości zbliżonej do czystej wody. Kula zamykająca to konstrukcja złożona z dwóch półkul (czasz) odlewanych z żeliwa, połączonych zamkiem (i sklejonych), ze zawulkanizowaną na powierzchni warstwą gumy. Stosunek masy całkowitej do objętości jest jej gęstością (δ). Dotychczas w Fabryce Armatury JAFAR SA wykonywano kule o gęstości $\delta \geq 1,66 \text{ kg/dm}^3$. Planem modernizacji objęto typoszereg zaworów o średnicach nominalnych DN125 do DN300 mm (5 pozycji); badania symulacyjne przeprowadzono dla trzech wielkości kul: DN125, DN200 i DN300 mm. Nowaligicznym zabiegiem w produkcji kul tonących zaworów zwrotnych jest wulkanizacja warstwy gumy na powierzchni zmontowanych czasz, prowadzona w warunkach podwyższonej temperatury i dużych nacisków prasy hydraulicznej. W dolnej połowce formy wulkanizacyjnej, podgrzanej do odpowiedniej temperatury, umieszcza się odważoną ilość pasków surowej gumy, centrycznie umieszcza podgrzaną kulę, przykrywa drugą porcją surowej gumy i poddaje naciskowi górnej części formy, aż do momentu zamknięcia się obu połówek formy wulkanizacyjnej. Po odczekaniu niezbędnego do przebiegu wulkanizacji czasu, półwki formy są rozsuwane i gotowa kula usuwana jest z dolnej połowki formy. Proces ma charakter dynamiczny, a maksymalne wartości naprężeń w odlewie czaszy są zależne nie tylko od maksymalnego nacisku prasy wulkanizacyjnej, lecz również od średnicy kuli, grubości ścianki, właściwości wulkanizowanej gumy w temperaturze prowadzonego zabiegu oraz szybkości narastania nacisku.

Założenia i prace wstępne zmierzające do analizy numerycznej

Zmniejszenie gęstości kul stosowanych w zaworach zwrotnych pozwoli na obniżenie oporów przepływu cieczy i jednocześnie zredukuje koszt materiałowy ich wykonywania. Analiza techniczno-ekonomiczna wykazała, że jedyną drogą prowadzącą do tego celu jest obniżenie wagi części żeliwnej, tj. dwu cienkościennych czasz, z których zmontowana jest kula. Ingerencja w konstrukcję kul, związana ze zmniejszeniem grubości odlewanych ścianek, wymaga zachowania idealnych, założonych przez technologa warunków odlewania. Optymalne warunki odlewania czasz oraz rygorystyczna kontrola na każdym etapie wykonywania powinny zapewnić równomierną grubość ścianki odlewu. W badaniach numerycznych rozkładu naprężeń przyjęto założenie, że ścianka analizowanych czasz żeliwnych jest idealną sferą o równomiernej grubości. Rzeczywiste warunki wykonywania odlewów czasz często odbiegają od idealnych, a efektem ubocznym może być znaczna nierównomierność grubości ścianki w całej sferze. Należy więc przewidzieć, że zmianie ulegnie rzeczywisty rozkład naprężeń eksploatacyjnych oraz

a structure made of two hemispheres (domes) cast of iron, bound by a lock (and bonded) with a rubber layer cured on its surface. The ratio of total weight to volume is the ball's density (δ). The balls manufactured at Fabryka Armatury JAFAR SA so far had the density $\delta \geq 1.66 \text{ kg/dm}^3$. An upgrade project was launched for a type series of valves with the nominal diameter range from DN125 to DN300 mm (5 items); simulation tests were carried out for three ball sizes: DN125, DN200 and DN300 mm. The critical operation in the manufacturing of dip balls for check valves is the curing of rubber on the assembled domes' surface. The operation is performed in high temperature and under high pressure from a hydraulic press. The bottom half of the curing mould that is heated to the required temperature is where a batched amount of raw rubber strips is placed, followed by concentric placement of a preheated ball. The ball is covered by the second batch of raw rubber and subjected to the pressure from the top mould half until both curing mould halves meet and seal is made. After the required curing holding time, the mould halves are set apart and the finished ball is removed from the bottom mould half. The process is dynamic, whereas the maximum stress values in the dome cast not only depend on the maximum curing press pressure, but also on the ball diameter, wall thickness, cured rubber properties at the processing temperature and the pressure rise rate.

Assumptions and preliminary work for numerical analysis

Reduction of density in the balls used in check valves will reduce the flow resistances of liquids and reduce the material costs of manufacturing. A technical and economic analysis demonstrated that the only way to reach this goal is to reduce the weight of the cast iron part, i.e. the two thin-walled domes from which the ball is assembled. Interference with the ball design as related to reduction in the cast wall thickness requires retention of perfect casting conditions set by the process engineer. The optimum conditions of dome casting and strict inspection at every manufacturing stage should assure a homogeneous thickness of the cast wall. The numerical tests of stress distribution have the assumption that the wall of studied cast iron domes is a perfect sphere of homogeneous thickness. The actual dome casting conditions frequently deviate from the ideal, with the possible side effect being high heterogeneity of the wall thickness in the entire sphere. It should be assumed then that the actual distribution of service stress and dome cast deformation diagram studied under ideal conditions will change.

schemat odkształcania odlewu czasz, analizowanych dla warunków idealnych.

Przeprowadzone analizy numeryczne rozkładu naprężeń w czaszach kul wybranych wielkości zaworów DN125, DN200 oraz DN300 obejmowały określenie maksymalnych wartości naprężeń i przemieszczeń, występujących w odlewach w trakcie procesu wulkanizacji warstwy gumy na połączonych zamkiem półczaszach żeliwnych. W procesie wulkanizacji kul tonących do zaworów kulowych, wykorzystywana jest guma EPDM lub NBR, a jej grubość, uzyskana po procesie wulkanizacji, dla wszystkich analizowanych przypadków wynosi około 6 mm. Proces wulkanizacji prowadzi się przy użyciu 2-częściowej formy stalowej, zamontowanej w prasie hydraulicznej o wysokim nacisku. Zarówno forma, jak i kula są podgrzane do temperatury właściwej dla prawidłowej wulkanizacji tego rodzaju gumy. Część gumy surowej w postaci pasów umieszczana jest w dolnej części formy wulkanizacyjnej, następnie umieszczany jest odpowiednio przygotowany odlew kuli, a na nim druga część gumy. W trakcie dociskania górną częścią formy, następuje płynięcie materiału wokół kuli żeliwnej, aż do momentu zamknięcia formy i uzyskania równomiernej grubości warstwy zwulkanizowanej gumy, pokrywającej całą sferę kuli.

Na podstawie dostarczonych rysunków konstrukcyjno-wykonawczych przygotowano w programie CAD model wirtualny do przeprowadzenia symulacji pozwalających, poprzez określenie maksymalnych wartości naprężeń występujących w odlewach w trakcie procesu wulkanizacji, zweryfikować wstępnie dobrane parametry dotyczące zmniejszenia grubości ścianek odlewów i zoptymalizować szacowaną grubość. Dla przyjętych analiz numerycznych, ze względu na symetrię osiową zakładanego przypadku, przygotowano do wstępnej dyskretyzacji model płaski, gwarantujący otrzymanie dokładnych wyników obliczeń, a jednocześnie pozwalający znacznie zmniejszyć zapotrzebowanie na moc obliczeniową i skrócić analizę kolejnych przypadków rozkładu naprężeń w trakcie procesu wulkanizacji. Przykład założonego modelu wymiarowego, wraz z fragmentem komory prasy wulkanizacyjnej, opracowanego w programie CAD, przedstawiono na rysunku 1, a charakterystyczne wymiary czasz żeliwnych zaprezentowano w tabeli 1.

Analiza obejmowała określenie oczekiwanych naprężeń w odlewach, dla których założono aktualnie stosowaną grubość ścianki odlewów żeliwnych oraz dla odlewów, w których przyjęto zoptymalizowaną grubość ścianki czasz żeliwnych. Symulacje numeryczne rozkładu naprężeń i przemieszczeń w czaszach, których wymiary są stosowane obecnie, pozwoliły określić rozkład pól naprężeń w trakcie procesu wulkanizacji, a otrzymane wielkości naprężeń maksymalnych przyjęto jako wartości bazowe dla

The completed numerical analyses of the stress distribution in the ball domes of the selected valve sizes, i.e. DN125, DN200 and DN300 covered the determination of maximum stress and displacement values as present in casts during the rubber layer curing on the cast iron domes coupled by locks. The dip ball curing process uses EPDM or NBR, and the rubber thickness after the curing process is approx. 6 mm in all analysed cases. The curing process is effected by using a split 2-sectional steel mould installed on a high performance hydraulic press. Both the mould and the ball are heated to the temperature required for correct curing of the input rubber type. A part of raw rubber in the form of strips is placed in the curing mould bottom half; next, the properly prepared ball cast is placed on the strips and the second part of the raw rubber batch, also in strips, covers the ball. When the top mould half is pressed down, the material around the cast iron ball flows until the mould is sealed and a homogeneous cured rubber layer is obtained as covering the entire ball sphere.

Based on the provided design and workshop drawings, the CAD software was used to prepare a virtual model for simulations used to verify the preselected parameters of reduced cast wall thickness by determination of the maximum stresses in the casts during the curing process. The simulations served to optimise the estimated thickness. Due to the axial symmetry of the assumed case, a flat model was prepared for preliminary discretization in the adopted numerical analyses. The model guarantees production of precise calculation results; it also significantly reduces the computing power and shorten the analysis of successive cases of stress distribution during the curing process. An example of the assumed dimensional model with the fragment of the curing press chamber is shown in Figure 1 as developed in CAD, whereas Table 1 presents the characteristic dimensions of the cast iron domes.

The analysis included the determination of stresses expected in the casts for which the current cast iron wall thickness was assumed and in the casts with the assumed optimised thickness of ball dome walls. The numerical simulations of stress distribution and displacements in the domes with current dimensions allowed defining the distribution of stress fields during the curing process; the resulting maximum stress values were adopted as baseline values for the further process of optimising the cast iron sphere wall thickness.

The preliminary numerical simulations of loading the cast iron domes during the curing process were carried out with the design optimisation modulus with the assumption of determining the maximum generalised stress values and maximum displacement values for specific wall thickness values. For the optimisation process a model was prepared in the DesignModeler

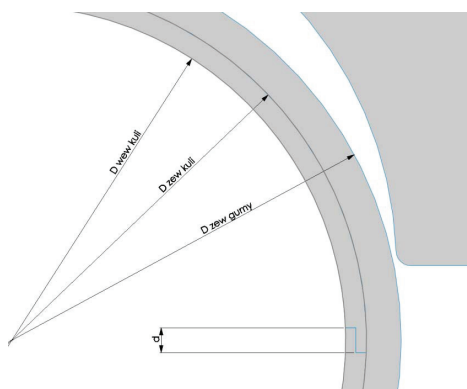
dalszego procesu optymalizacji grubości ścianek sfer żeliwnych.

Wstępnie przeprowadzone symulacje numeryczne obciążania czasz żeliwnych w trakcie procesu wulkanizacji przeprowadzono z wykorzystaniem modułu optymalizacji konstrukcji, przy założeniu określenia maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych oraz przemieszczeń maksymalnych, dla określonych wartości grubości ścianek. Dla procesu optymalizacji przygotowano model w edytorze graficznym *Design-Modeler* programu ANSYS, który opracowano, zakładając uproszczenia konstrukcji oryginalnej i uproszczenia dotyczące procesu dyskretyzacji modelu MES. Opracowany model wraz z założoną siatką elementów skończonych zaprezentowano na rysunku 2.

W przyjętym modelu dyskretnym założono stałą grubość warstwy gumowanej na całej powierzchni odlewu oraz konstrukcję połączenia dwóch czasz, jako dopełnienie reszty sfery, choć w oryginalnym modelu jest to obszar obrabiany mechanicznie, a ścianki są równoległe do osi głównej czaszy. Pozostałe ograniczenia dotyczą modelowania siatki elementów skończonych (gdzie wykorzystano 8-węzłowe elementy dostosowane) oraz samego sposobu określania warunków brzegowych i ustalania kontaktu, sztywności elementów kontaktowych czy rodzaju połączenia, zakładającego klejenie czasz żeliwnych.

graphical editor of the ANSYS software. The model was developed by assuming simplification of the original design and simplification concerning the FEM model discretisation process. Figure 2 presents the developed model with the superimposed grid of finite elements.

The adopted discrete model assumes a constant thickness of the rubber layer over the entire cast area and the both domes connection design as the complementation of the remaining sphere volume, although in the original model, the area is mechanically processed and the walls are in parallel to the dome main axis. Other constraints apply to the modelling of the finite elements grid (where 8-node adapted elements are used) and to the method of defining the boundary conditions, contact, rigidity of contact elements or connection type, where the latter assumes chemical bonding of the cast iron domes.



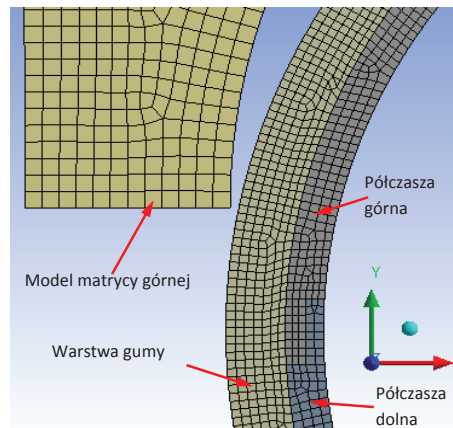
Rys. 1. Schemat wymiarowy modelu CAD przygotowanego na potrzeby analiz numerycznych

Fig. 1. Dimensional diagram of the CAD model prepared for numerical analyses

Tabela 1. Wymiary czasz żeliwnych oraz grubości ścianek po optymalizacji wymiarowej

Table 1. Dimensions of cast iron domes and wall thickness values following dimensional optimisation

Wymiary charakterystyczne, mm Characteristic dimensions, mm	Oznaczenie zaworu / Valve designation		
	DN125	DN200	DN300
$D_{wew.kuli} / D_{int}$ of ball	131	218	316
$D_{wew.kuli}$ – optymalizacja / D_{int} of ball – optimised	134,6	224	327,5
Grubość sfery – oryginał / Sphere thickness – original	6	10	16
Grubość sfery – optymalizacja / Sphere thickness – optimised	4,2	7,0	10,3
$D_{zew.kuli} / D_{ext}$ of ball	143	238	348
$D_{zew.gumy} / D_{ext}$ of rubber	155	250	360
d	8	10	16
Zmniejszenie masy sfery / Sphere mass reduction, %	28,17	28,16	33,73



Rys. 2. Uproszczony model z założoną siatką MES przygotowany dla potrzeb optymalizacji grubości ścianki odlewu czaszy żeliwnej

Rys. 2. The simplified model with the superimposed FEM grid prepared for optimisation of the cast iron dome cast wall thickness

Do analiz przyjęto modele materiałowe dostępne w bazie programu ANSYS, rozszerzonej dodatkowo o modele materiałów silnie nieliniowych z bazy IDAC oraz modele opracowane na podstawie literaturowych i własnych danych dla materiałów odlewanych.

W prowadzonych symulacjach przyjęto model gumy zaimportowany z bazy *Non-Linear* i *Hyperelastic* materiałów IDAC, na podstawie danych literaturowych dla gumy wulkanizacyjnej EPDM, zawierającej eksperymentalnie wyznaczone krzywe naprężenie-odkształcenie, dla różnych sposobów odkształcania.

Jako model materiału odlewu czasz żeliwnych, przyjęto dane opracowane dla żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15 na podstawie danych literaturowych i własnych badań wytrzymałościowych prowadzonych w Instytucie Odlewnictwa. Zarówno model materiałowy żeliwa, jak i gumy po modyfikacjach zaimportowano jako materiał przyjęty w symulacjach. Podstawowe właściwości materiałów użytych w symulacji przedstawiono w tabeli 2.

The analyses adopted the material models available from the ANSYS database, which had been expanded by highly non-linear material models of the IDAC database and by the models developed from reference literature and proprietary data for casting materials. The simulations also adopted the rubber model imported from the Non-Linear and Hyperelastic material databases of IDAC, and based on the reference literature for curable EPDM, which contains experimentally plotted stress/deformation charts for different methods of deformation.

The model of dome cast material was adopted as the data developed for EN-GJS-400-15 spheroidal iron from reference literature and proprietary strength tests carried out at the Foundry Research Institute. Both the cast iron material model and the rubber model were modified and imported as the material for the simulations. The primary properties of the materials used in the simulation are listed in Table 2.

Tabela 2. Podstawowe właściwości wytrzymałościowe żeliwa i gumy przyjęte w przeprowadzonych symulacjach rozkładu naprężeń w trakcie procesu wulkanizacji

Table 2. Primary strength properties of cast iron and rubber adopted in the simulations of stress distribution during the rubber curing process

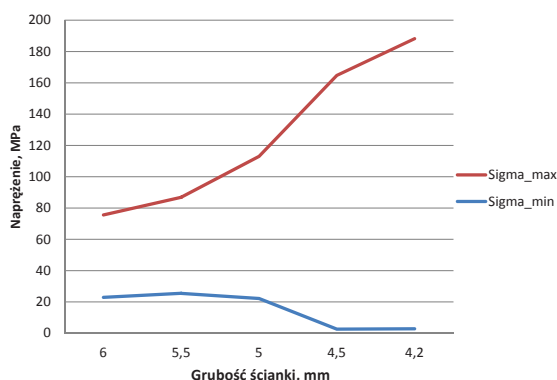
Wymiary charakterystyczne, mm Characteristic dimensions, mm	Materiał modelowy przyjęty w symulacjach Model material for the simulations	
	Żeliwo / Sferoidal iron EN-GJS-400-15	Guma / Rubber EPDM
R_m , MPa	> 400	5–11
R_e , MPa	> 250	–
Gęstość/Density, kg/m ³	7250	1120
Wydłużenie/Elongation, %	15	400–500

Optymalizacja naprężeń i przemieszczeń

Dla przyjętego modelu przeprowadzono pięć iteracji procesu optymalizacji dla zmniejszającej się grubości ścianki odlewu czaszy, zakładając zmianę grubości ścianki co 0,5 mm, od standardowej grubości 6 mm, aż do grubości 4,2 mm. Symulacje, przeprowadzone dla wstępnie opracowanego modelu czaszy serii DN125, pozwoliły określić charakter oczekiwanych zmian wartości naprężeń maksymalnych istniejących w odlewie czaszy oraz przemieszczeń węzłowych w trakcie procesu wulkanizacji. Wyniki maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych, określonych wg hipotezy H-M-H (Huber-Mises-Hencky), występujących w odlewie czaszy zaprezentowano na rysunku 3.

Optimisation of stress and displacements

Concerning the adopted model, five iterations were completed for the optimisation process to reduce the dome cast wall thickness with the assumed change of wall thickness in 0.5 mm increments from the standard 6 mm to 4.2 mm. The simulations carried out for the preliminary model of the DN125 series dome allowed to determine the nature of expected changes in the maximum stress values existing in the dome cast and of the node displacements during the rubber curing process. The results of maximum generalised stress values defined following the H-M-H (Huber-Mises-Hencky) hypothesis and present in the dome cast are shown in Figure 3.



Rys. 3. Maksymalne i minimalne wartości naprężeń uogólnionych, występujących w odlewie czaszy uzyskane w trakcie procesu optymalizacji grubości ścianki odlewu

Fig. 3. Maximum and minimum values of generalised stresses present in the dome cast as produced during the cast wall thickness optimisation process

Analiza rozkładu naprężeń w trakcie procesu optymalizacji wykazała znaczny wzrost naprężeń maksymalnych w obszarze zamka, łączącego odlewy dwóch półczasz. W obszarze tym, zaprezentowanym na rysunku 4, dla ostatniego punktu optymalizacyjnego zmniejszenia ścianki odlewu czaszy, zaobserwować można silną koncentrację pola naprężeń maksymalnych na wewnętrznej powierzchni sfery oraz na górnej powierzchni, po wewnętrznej stronie sfery. Maksymalne wartości naprężeń uogólnionych, określonych wg hipotezy H-M-H, w tym kroku optymalizacyjnym, wynoszą około 188 MPa, a więc dla założonej grubości ścianki odlewu czaszy przyjętej na poziomie 4,2 mm, są znacznie poniżej zakładanej w przeprowadzonych analizach umownej granicy plastyczności dla żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15, wynoszącej 250 MPa.

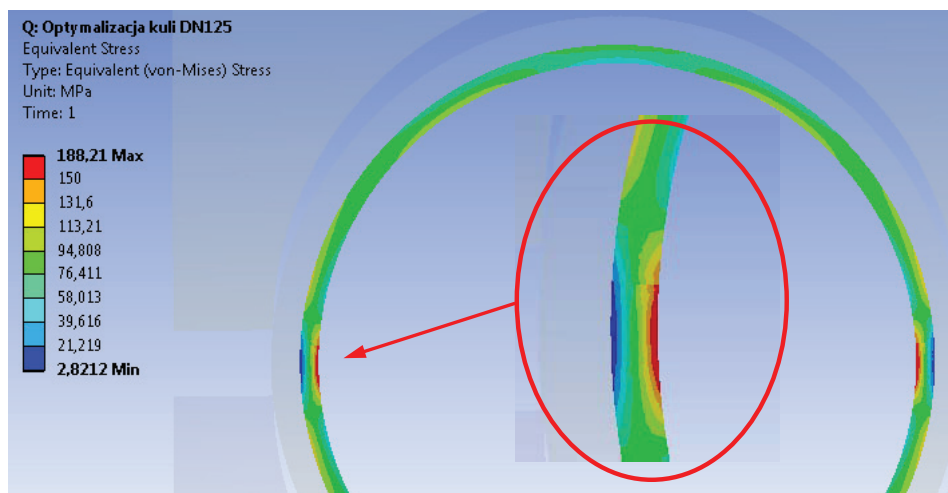
Analizując zaprezentowany rozkład pól naprężeń maksymalnych, zwłaszcza w obszarze silnych koncentracji, w miejscu łączenia dwóch czasz, należy spodziewać się przy zakładanym schemacie obciążania w trakcie procesu wulkanizacji, silnych koncentracji naprężeń normalnych i ścinających, prowadzą-

The analysis of the distribution of stress during the optimisation process revealed a significant increase of maximum stresses in the area of the lock that couples the casts of both domes. In this area as shown in Figure 4, the last optimisation point of dome cast wall reduction demonstrates a high concentration of the maximum stress field on the inner surface of the sphere and on the top surface inside of the sphere. The maximum generalised stress values defined according to the H-M-H hypothesis for this optimisation step amount to approx. 188 MPa; hence for the assumed dome cast wall thickness of 4.2 mm, the values are well below the conventional yield point of 250 MPa of EN-GJS-5400-15 spheroidal iron, a value which was assumed for the completed analyses.

In the presented distribution of maximum stress fields, especially in the high concentration area at the coupling of both domes, high concentration of normal and shearing stresses should be expected with the assumed loading diagram during the rubber curing process, where the stresses lead to significant structural overload of the dome cast, or to initiation of a destructive process. The results of normal

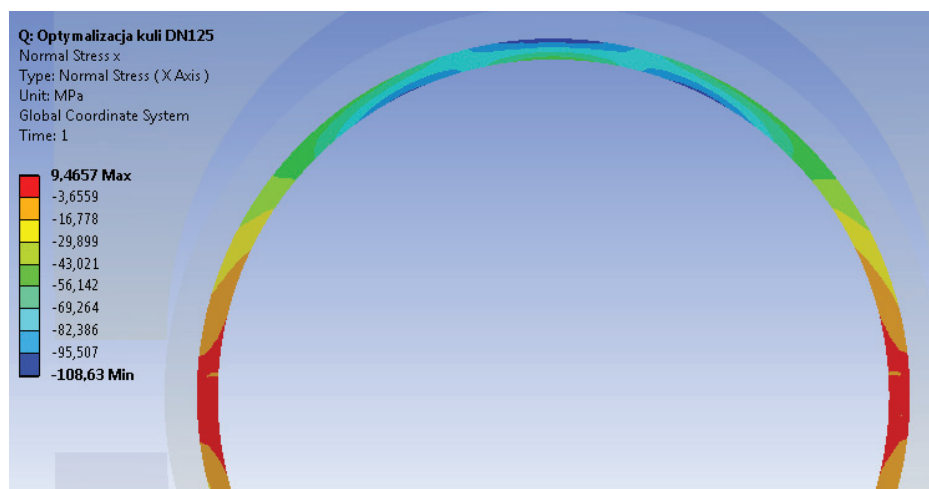
cych do znacznego przeciążenia konstrukcji odlewu czaszy lub zapoczątkowania procesu zniszczenia. Wyniki rozkładu naprężeń normalnych w kierunku osi X zaprezentowano na rysunku 5, natomiast naprężeń normalnych działających w kierunku osi Y – na rysunku 6. W obu zaprezentowanych przypadkach zaobserwować można pojawianie się naprężeń ściskających, o znacznie podwyższonych wartościach maksymalnych, natomiast maksymalne wartości naprężeń rozciągających nie przekraczają 10 MPa. Pomimo znacznych gradientów zaprezentowanych naprężeń normalnych zarówno ściskających, jak i rozciągających, maksymalna rozbieżność nie przekracza wartości umownej granicy plastyczności dla założonego materiału.

stress distribution in the axis X direction are shown in Figure 5. The results for the normal stress distribution in the axis Y direction are shown in Figure 6. Both presented cases show that compressive stresses occur with significantly elevated maximum values, whereas the maximum values of tensile stresses do not exceed 10 MPa. Despite the large gradients of presented normal stresses (both compressive and shearing), the maximum divergence does not exceed the conventional yield point for the assumed material.



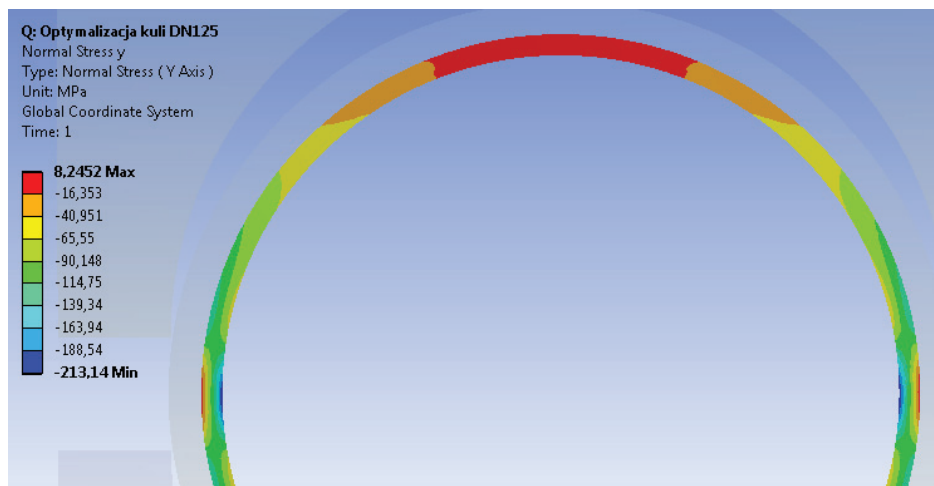
Rys. 4. Rozkład pola wartości maksymalnych naprężeń uogólnionych, określony dla ostatniego kroku optymalizacji grubości ścianki odlewu czaszy

Fig. 4. Distribution of the maximum generalised stress values field as defined for the last step of the dome cast wall thickness optimisation



Rys. 5. Rozkład pola wartości maksymalnych naprężeń normalnych działających w kierunku osi X, określony dla ostatniego kroku optymalizacji grubości ścianki odlewu czaszy

Fig. 5. Distribution of the field of maximum normal stress values for action in axis X, as defined for the last step of the dome cast wall thickness optimisation

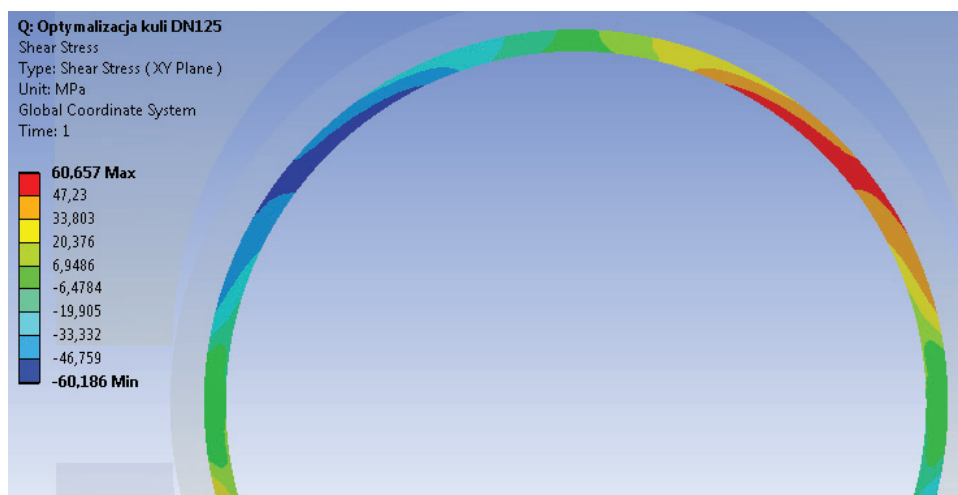


Rys. 6. Rozkład pola wartości maksymalnych naprężeń normalnych działających w kierunku osi Y, określony dla ostatniego kroku optymalizacji grubości ścianki odlewu czaszy

Fig. 6. Distribution of the field of maximum normal stress values for action in axis Y, as defined for the last step of the dome cast wall thickness optimisation

Weryfikacja rozkładu pola naprężeń ścinających, działających w płaszczyźnie analizowanego modelu, wskazuje na pojawianie się w odlewie czaszy naprężeń ścinających o przeciwnych znakach, głównie w górnej części analizowanego modelu sfery. Różnica tych naprężeń osiąga jednak wartość znacznie poniżej poziomu przyjętej maksymalnej wartości umownej granicy plastyczności. Rozkład pola naprężeń ścinających w analizowanym modelu zaprezentowano na rysunku 7.

The verification of the distribution of the field of shearing stresses acting in the plane of the studied model indicates that shearing stresses occur in the dome cast with opposing number signs and mainly in the top part of the studied sphere model. The difference between the stresses reaches a value well below the assumed maximum conventional yield point. The distribution field of shearing stresses in the analysed model is shown in Figure 7.



Rys. 7. Rozkład pola wartości naprężeń ścinających działających w płaszczyźnie analizowanego modelu, określony dla ostatniego kroku optymalizacji grubości ścianki odlewu czaszy

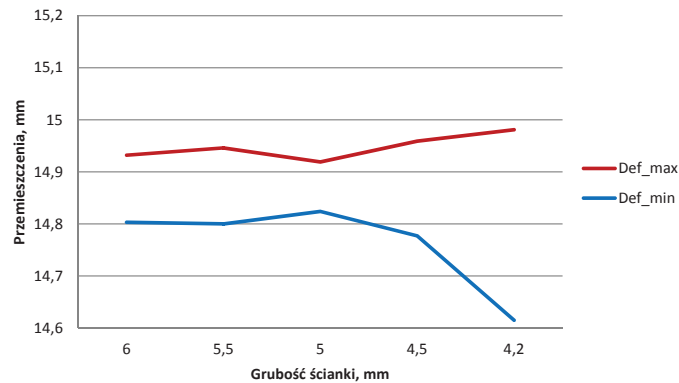
Fig. 7. Distribution of the field of shearing stress values acting in the plane of the studied model, as defined for the last step of the dome cast wall thickness optimisation.

Wielkość deformacji sfery żeliwnej podczas procesu wulkanizacji można ocenić przez obliczenie przemieszczeń poszczególnych punktów na przekroju odlewu. Przemieszczenia występujące w odlewie

The magnitude of deformation in the cast iron sphere during the rubber curing process can be assessed by calculating the displacements of individual points on the cast cross section. The displacements

czaszy obliczono w końcowej fazie ruchu tłoka prasy wulkanizacyjnej, wynoszącego 15 mm przed zamknięciem się formy. Maksymalne wartości przemieszczeń występujących w odlewie czaszy zaprezentowano na rysunku 8.

ments occurring in the dome cast were calculated for the final phase of the curing press piston movement, which is 15 mm of length before sealing of the mould. The maximum values of displacements in the dome cast are shown in Figure 8.



Rys. 8. Maksymalne i minimalne wartości przemieszczeń węzłowych występujących w odlewie czaszy uzyskane w trakcie procesu optymalizacji grubości ścianki odlewu

Fig. 8. Maximum and minimum values of node displacements present in the dome cast as produced during the cast wall thickness optimisation process

Analiza przeprowadzonych iteracji procesu optymalizacji grubości ścianki dla założonych warunków obciążania wskazuje, że w przypadku modelu czaszy, nagły wzrost maksymalnych wartości naprężeń następuje przy zmniejszeniu grubości ścianki odlewu poniżej 5 mm. Dla tej grubości ścianki odlewu można zaobserwować występowanie najniższych wartości przemieszczeń, a nawet niewielkie zmniejszenie tych wartości w stosunku do maksymalnych wartości przemieszczeń dla grubszej ścianki odlewu.

Przeprowadzone symulacje optymalizacji w zakresie wstępnie założonych grubości ścianek odlewu miały na celu określenie maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych, występujących w trakcie procesu wulkanizacji. Pozwoliły one określić charakter zmian naprężeń eksploatacyjnych, których wartości okazały się niższe niż granica plastyczności zastosowanego materiału konstrukcji. Uzyskane wyniki wskazują na istnienie możliwości zmniejszenia grubości ścianki odlewu, przy zachowaniu bezpiecznych warunków pracy odlewu podczas procesu wulkanizacji.

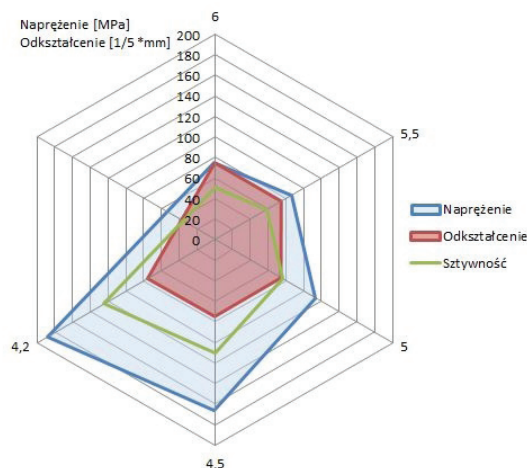
W trakcie analizy wyników z procesu optymalizacji grubości ścianki odlewu w zależności od oczekiwanych maksymalnych wartości naprężeń eksploatacyjnych, opracowano schemat rozkładu oczekiwanych wartości naprężeń, odkształcenia i stosunku przyjętej wartości granicy plastyczności do maksymalnej wartości naprężeń eksploatacyjnych uzyskanych w procesie symulacji. Uzyskane wyniki zaprezentowano na rysunku 9, przedstawiając na schemacie radarowym, tendencje wzrostu naprężeń maksymalnych w stosunku do maksymalnych deformacji modelu i szacowanego, umownego, współczynnika bezpie-

The analysis of completed iterations of the wall thickness optimisation process with the assumed loading conditions indicates that a rapid increase in maximum stress values in the dome model occurs when the cast wall thickness is reduced below 5 mm. The lowest displacement values are observed at this wall thickness, even with slight reduction of the values in relation to the maximum displacement values for the thicker cast wall.

The completed optimisation simulations for preliminary assumed cast wall thickness values were intended to determine the maximum values of generalized stresses that occur during the curing process. The simulations allowed defining the nature of operating stress changes the values of which appeared to be lower than the yield point of the structural material. The produced results indicate that there is an opportunity to reduce the cast wall thickness with retention of safe operating conditions of the cast during its curing process.

During the analysis of results from the process of cast wall thickness optimisation in relation to the expected maximum values of operating stresses a diagram was developed for the distribution of expected values of stress, deformation and ratio of the assumed yield point to maximum operating stress values produced in the simulation. The obtained results are shown in Figure 9 with the radar diagram of trends of increase in the maximum stresses in relation to the maximum deformations of the model, and the estimated conventional safety factor (R_e/σ_{max} , which describes the ratio of the adopted yield point value to the maximum stress that occurs in the structural detail during loading).

czeństwa (R_e/σ_{max} , opisującego stosunek wartości przyjętej granicy plastyczności do maksymalnego naprężenia występującego w elemencie konstrukcyjnym podczas obciążania).



Rys. 9. Schemat odniesienia maksymalnych wartości naprężeń, deformacji modelu oraz szacowanego współczynnika bezpieczeństwa konstrukcji czasz żeliwnych dla różnych grubości ścianek odlewu

Fig. 9. Reference diagram of maximum stress values, model deformation and estimated safety factor of the cast iron dome structure

Na zaprezentowanym schemacie przeskalowano uzyskane wartości odkształceń i umownego współczynnika bezpieczeństwa konstrukcji w celu lepszego zobrazowania oraz odniesienia ich wartości w stosunku do osiąganych maksymalnych wartości naprężeń eksploatacyjnych. Przy optymalnej, rzeczywistej grubości ścianki odlewu wynoszącej 6 mm, wartość współczynnika R_e/σ_{max} wyniosła dla przeprowadzonych analiz około 3,3. Wraz ze zmniejszaniem grubości ścianki odlewu wartość ta zmalała do 1,5, przy założeniu maksymalnego dopuszczalnego naprężenia bezpiecznego na poziomie granicy plastyczności wynoszącej $R_e = 250$ MPa. Poprawnie prowadzony proces odlewania i odpowiedni skład chemiczny powinien zapewnić jednak znacznie wyższą wartość granicy plastyczności dla omawianego gatunku żeliwa, a co za tym idzie podwyższyć wartość omawianego współczynnika bezpieczeństwa.

Przedstawiona analiza optymalizacyjna zmiany grubości ścianki przeprowadzona została dla modelu opisującego proces wulkanizacji kuli zaworu DN125, jako przykładowego dla następnych analiz rozkładu naprężeń w czaszkach kul żeliwnych. Pomimo przyjętych uproszczeń konstrukcji oraz dyskretyzacji modelu matematycznego, uzyskane wyniki analiz obrazują charakter rozwoju zmian pola naprężeń i wzrostu ich maksymalnych wartości podczas obciążania odlewu czaszy w trakcie procesu wulkanizacji. Przeprowadzone analizy pozwoliły określić optymalną grubość ścianki odlewu czaszy, przy zachowaniu oczekiwanych maksymalnych wartości naprężeń, nieprzekraczających przyjętej granicy plastyczności mate-

The presented diagram has rescaled produced values of deformations and the conventional safety factor of the structure to better image and refer the values to the produced maximum operating stress values. At the cast's optimum actual wall thickness of 6 mm, the safety factor R_e/σ_{max} value was approx. 3.3 for the completed analyses. The value dropped to 1.5 with the reduction of the cast wall thickness and with the assumed maximum permissible safe stress at the yield point of $R_e = 250$ MPa. However, a properly performed casting process and a suitable chemical composition should assure a much higher yield point value for the spheroidal iron discussed herein, and increase the said safety factor value.

The presented optimising analysis of the wall thickness change was carried out for a model that describes the rubber curing process on a DN125 valve ball, being exemplary for successive analyses of stress distribution in cast iron ball domes. Despite the adopted simplifications in design and discretisation of the mathematical model, the produced analytical results depict the nature of development in the stress field changes and increase of relevant maximum stress values during loading of the dome cast in the curing process. The completed analyses allowed determination of the optimum dome cast wall thickness with retained expected maximum stress values that do not exceed the assumed yield point of the material. They also allowed estimation of the value of expected safety factor for the studied structural element. The cast iron dome wall thickness that seems to be optimal for the occurrence of maximum

riatu oraz oszacować wartość oczekiwanego współczynnika bezpieczeństwa analizowanego elementu konstrukcyjnego. Dla przeprowadzonej analizy, optymalną pod względem występowania maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych wydaje się ścianka czaszy żeliwnej o grubości 5 mm, dla której nie obserwuje się znacznego wzrostu naprężenia krytycznego. Jednak wartość ta nie jest oczekiwaną grubością ścianki odlewu, gdyż nie zapewnia uzyskania gęstości ogólnej zestawu (czasz żeliwnych wraz z gumową warstwą uszczelniającą) na żądanym poziomie.

Przyjęta grubość ścianki odlewu czaszy, zaprezentowana w tabeli 1, po optymalizacji konstrukcji odlewu, zakłada dla poszczególnych typoseregów zaworów kulowych bezpieczną eksploatację konstrukcji kuli wulkanizowanej, przy jednoczesnym, znacznym obniżeniu maksymalnej masy elementu żeliwnego. Zaproponowane do dalszych analiz grubości ścianek odlewów czasz wybrano, uwzględniając również możliwości wykonania tak cienkich ścianek odlewów żeliwnych, przy zachowaniu założenia braku wad wewnętrznych w odlewanych elementach metalowych, a więc ze szczególnym naciskiem na poprawnie opracowaną technologię wykonywania wybranych odlewów czasz.

Na podstawie przeprowadzonych wstępnie analiz procesu optymalizacji grubości ścianki dla kuli gumowanej zaworu DN125, opracowano nowy model CAD, dla wszystkich kul zaworów serii DN125, DN200 oraz DN300. Przygotowane modele uwzględniały szczegóły konstrukcyjne w obrabianym mechanicznie obszarze zamka odlewanych czasz żeliwnych oraz założoną wstępnie grubość warstwy wulkanizowanej gumy, wynoszącą 6 mm po zakończonym procesie wulkanizacji.

Dla wszystkich przeprowadzonych analiz numerycznych procesu obciążania sklejonych połówek sfery, zakładano poziome umieszczenie pierścienia łączącego dwie połówki odlewów kuli (zamka) w stosunku do osi poziomej prasy hydraulicznej. W trakcie przeprowadzonych symulacji obciążania czasz ciśnieniem pochodzącym od nacisku prasy wulkanizacyjnej przyjęto założenie, że czas trwania całego procesu wulkanizacji wynosi około 20 sekund.

Po zaimportowaniu opracowanego modelu CAD i otworzeniu pliku bryłowego w edytorze graficznym programu *DesignModeler*, przeprowadzono ponownie proces dyskretyzacji modelu, zakładając zagęszczenie siatki elementów skończonych oraz weryfikację danych wytrzymałościowych, przy uwzględnieniu sprężysto-plastycznych modeli oddziaływania elementów gumowych, z dodatkowymi charakterystykami wytrzymałościowymi zakładanego gatunku materiału gumowego, przy różnych schematach obciążania.

generalized stress values is 5 mm, where no major increase of the critical stress is observed. The value, however, is not the expected cast wall thickness, since it does not assure the required overall density of the set (i.e. the cast iron domes with the rubber sealing layer).

Following the optimisation of the dome structure, the assumed wall thickness of the dome cast as presented in Table 1 assures safe operation of the rubber-cured ball structure with significant reduction of the cast iron element weight for specific ball valve type series. The dome cast wall thickness values proposed for further analysis were selected in consideration of the capacity to produce cast iron wall that thin and by assuming that no internal defects exist in the cast metal elements, i.e. with specific stress on properly designed manufacturing process for the selected dome casts.

Based on the preliminary analyses of the wall thickness optimisation for the DN125 valve rubber-coated ball, a new CAD model was developed for all balls in the valve series of DN125, DN200 and DN300. The new models included the design details in the machined area of the lock on cast iron domes and the preliminarily assumed cured rubber layer thickness of 6 mm after the curing process.

In all numerical analyses of the process of loading the bonded ball halves, the assumptions had the connecting ring of both ball half casts (i.e. the lock) in horizontal position against the horizontal axis of the hydraulic curing press. In the simulations of loading the domes with the pressure exerted by the curing press, the assumed curing process time is ca. 20 seconds.

The developed CAD model was imported and the solid file was opened in the DesignModeler graphical editor to digitalize the model. The assumption was to thicken the finite elements grid and to verify the strength data with consideration of the spring-plastic models of rubber part reactions and additional strength characteristics of the assumed rubber material grade at different loading diagrams.

Analiza naprężeń w kuli zaworu DN125

Dla kuli zaworu DN125 przeprowadzono symulację nacisku prasy wulkanizacyjnej w trakcie pokrywania warstwą gumy połączonych czasz żeliwnych. W przeprowadzonej symulacji założono dwa warianty grubości ścianki: 6 mm – obecnie stosowaną oraz 4,2 mm – oszacowaną ze względu na konieczność uzyskania obniżenia gęstości kompletnej kuli gumowanej. Przeprowadzone symulacje miały na celu sprawdzenie czy tak znaczne obniżenie grubości nie spowoduje przekroczenia granicy plastyczności żeliwa sferoidalnego gatunku EN-GJS-400-15, przyjętej w obliczeniach jako wartość naprężeń granicznych.

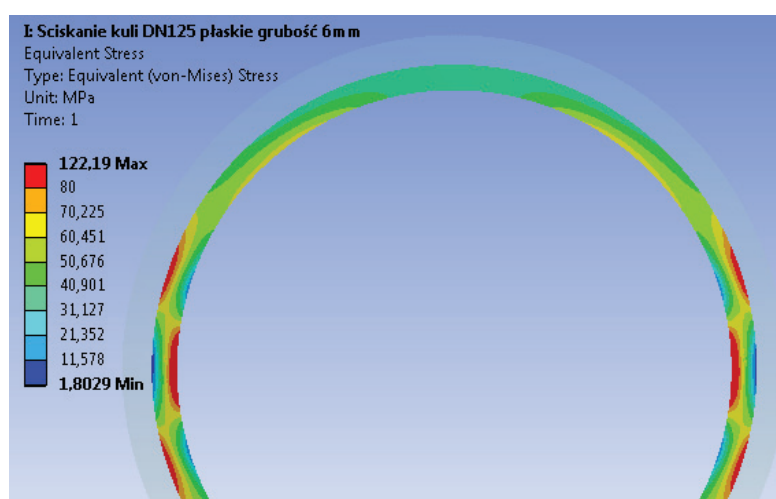
W trakcie przeprowadzonych analiz numerycznych określono maksymalne wartości naprężeń występujących w odlewach czasz w trakcie obciążania ich ciśnieniem pochodzącym od nacisku komory wulkanizacyjnej na warstwę gumy, przykrywającej odlew czaszy.

Do analiz numerycznych czaszy o grubości ścianki 6 mm, opracowano nowy model matematyczny z uwzględnieniem zagęszczenia siatki MES w newralgicznych obszarach konstrukcji oraz modyfikacji warunków kontaktu uwzględniającego tarcie pomiędzy współpracującymi elementami. Wyniki rozkładu pól maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych, występujących w odlewie czaszy DN125, o grubości ścianki 6 mm, przedstawione zostały na rysunku 10, natomiast naprężenia normalne działające wzdłuż osi poprzecznej X oraz osi pionowej działającego nacisku, dla analizowanego modelu zaprezentowano na rysunku 11. Na rysunku 12 przedstawiono rozkład naprężeń głównych w analizowanym modelu czaszy DN125.

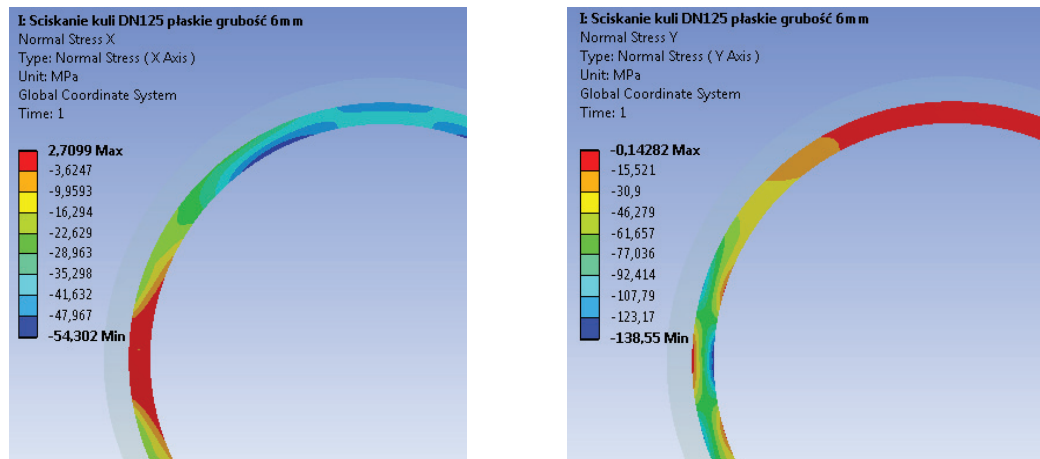
Analysis of stress in the DN125 valve ball

The ball of the DN125 valve had a simulation of the curing press pressure during coating the coupled cast iron domes with the rubber layer. Two wall thickness variants were adopted for the simulation: 6 mm, the current one; and 4.2 mm, the one estimated for the demand of reducing the complete rubber-coated ball density. The simulations were intended to check if such great reduction in thickness breaks the yield point of EN-GJS-400-15 spheroidal iron assumed as the value of limit stresses. During the numerical analysis, the maximum values were determined for the stresses present in the dome casts during their loading with the pressure from the curing chamber acting on the rubber layer that coated the dome cast.

The numerical analyses of the dome with 6 mm of wall thickness had a new mathematical model developed with thickened FEM grid at the critical areas of structure, and with modifications of contact conditions made to consider the friction between mating elements. The results for the distribution of fields of maximum generalized stress values present in the DN125 dome cast with 6 mm of wall thickness are shown in Figure 10. The normal stresses in the transverse axis X and in the vertical axis of acting pressure are shown in Figure 11 for the studied model. Figure 12 shows the distribution of primary stresses in the studied model of the DN125 dome.



Rys. 10. Rozkład maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 6 mm
Fig. 10. Distribution of the maximum generalized stress values for the cast iron dome with 6 mm of wall thickness



Rys. 11. Rozkład wartości naprężeń normalnych dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 6 mm
 Fig. 11. Distribution of the normal stress values for the cast iron dome with 6 mm of wall thickness



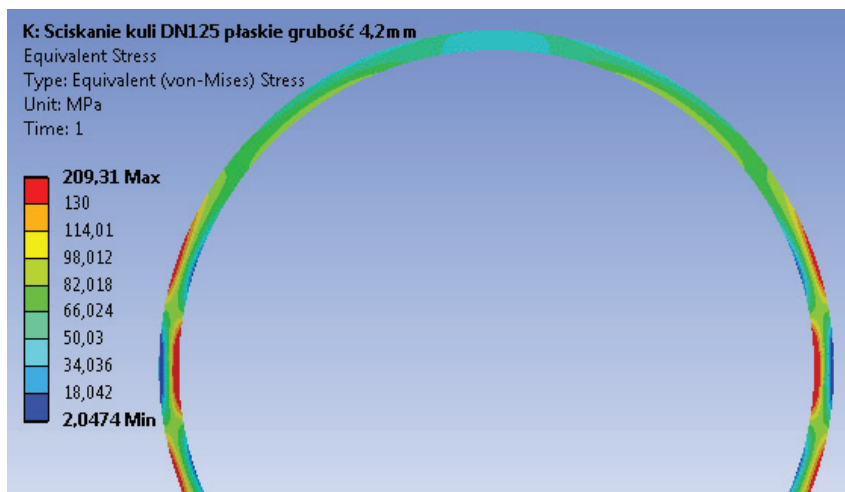
Rys. 12. Rozkład pól maksymalnych naprężeń głównych dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 6 mm
 Fig. 12. Distribution of the fields of maximum primary stresses for the cast iron dome with 6 mm of wall thickness

Analizując rozkład naprężeń uogólnionych w analizowanym modelu zaobserwować można, że koncentracja pól o najwyższych wartościach zlokalizowana jest w obszarze łączenia dwóch półczasz żeliwnych. Podobnie, w przypadku analizy maksymalnych naprężeń głównych, obserwujemy, że najwyższe wartości naprężeń ściskających zlokalizowane są w obszarach, w których następuje najdłuższy i najsilniejszy nacisk pochodzący od matrycy prasy hydraulicznej. W analizowanym przypadku maksymalne wartości naprężeń krytycznych nie przekraczają granicy plastyczności żeliwa.

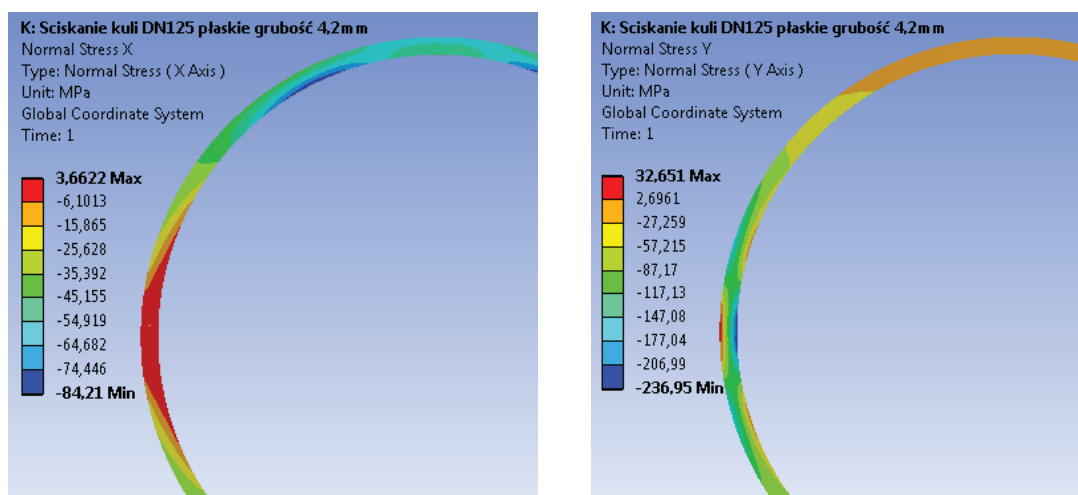
Podobnie jak dla obciążania czaszy żeliwnej o grubości ścianki 6 mm, przeprowadzono symulacje obciążania czasz o grubości ścianki 4,2 mm, zoptymalizowanej ze względu na oczekiwaną gęstość kompletnej kuli DN125. Rozkłady naprężeń uogólnionych wg hipotezy H-M-H, normalnych oraz naprężeń głównych przedstawiono odpowiednio na rysunkach 13–15.

The distribution of generalised stresses in the analysed model reveals that the concentration of fields with the highest values is located in the coupling area of the two cast iron domes. By analogy, when analysing the maximum primary stresses it is evident that the highest values of compressive stresses are located in the areas with the longest and strongest pressure from the hydraulic press die. The maximum critical stress values in the analysed case do not exceed the yield point of spheroidal iron.

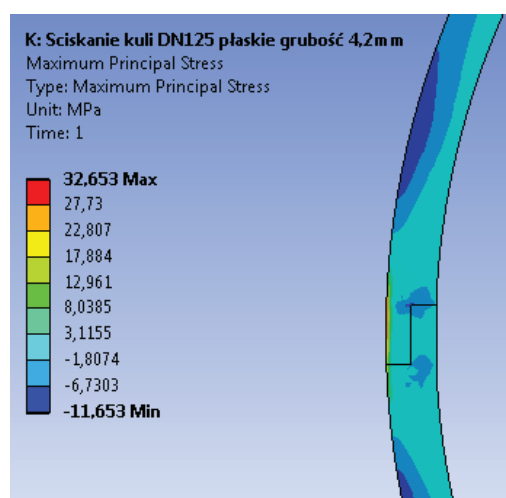
Just as in the case of loading the cast iron dome with 6 mm of wall thickness, loading simulations were carried out for the domes with 4.2 mm of wall thickness, i.e. the thickness optimised due to the expected density of the complete DN125 ball. The distributions of generalised stresses acc. to the H-M-H hypothesis, of normal stresses and of primary stresses are shown in Figures 13, 14 and 15, respectively.



Rys. 13. Rozkład maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 4,2 mm
 Fig. 13. Distribution of the maximum generalized stress values for the cast iron dome with 4.2 mm of wall thickness



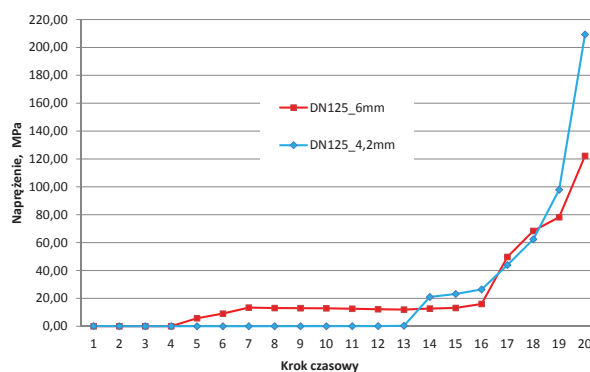
Rys. 14. Rozkład wartości naprężeń normalnych dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 4,2 mm
 Fig. 14. Distribution of the normal stress values for the cast iron dome with 4.2 mm of wall thickness



Rys. 15. Rozkład pól maksymalnych naprężeń głównych dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 4,2 mm
 Fig. 15. Distribution of the fields of maximum primary stresses for the cast iron dome with 4.2 mm of wall thickness

W trakcie przeprowadzonej analizy otrzymano charakterystykę wzrostu maksymalnych wartości naprężeń pod wpływem działającego obciążenia. Schemat i wartości maksymalnych naprężeń dla poszczególnych kroków czasowych przedstawiono na rysunku 16. Analizując przedstawiony wykres, zaobserwować można, że w trakcie procesu obciążania czaszy żeliwnej następuje ustabilizowanie naprężeń zarówno dla kuli o grubości ścianki 6 mm, jak i dla grubości 4,2 mm. W przypadku grubszego odlewu przystanek ten jest dłuższy, a następnie obserwujemy nagły wzrost naprężeń maksymalnych. Oba fragmenty ustabilizowania naprężeń na niezmiennym poziomie spowodowane są wzrostem sztywności gumy w końcowej fazie doprasowania.

The analysis produced the characteristics of increase in the maximum stress values caused by the active load. The diagram and values of maximum stresses for individual time steps are shown in Figure 16. The chart shows that when the cast iron dome is loaded, the stresses are stabilised both for the 6 mm and the 4.2 mm balls. In the case of thicker cast walls, the stabilisation period is longer and progresses into a rapid rise of maximum stresses. Both sections of stress stability at the constant level result from the increase in rubber stiffness in the final phase of pressing.



Rys. 16. Charakterystyka wzrostu naprężeń w trakcie obciążania dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 6 oraz 4,2 mm
Fig. 16. Characteristics of the increase of stress during loading of the cast iron dome with 6 and 4.2 mm of wall thickness

Analiza naprężeń w kuli zaworu DN200

Analiza numeryczna obciążania kuli dla zaworu DN200 zakładała, podobnie jak dla modelu serii DN125, przeprowadzenie symulacji nacisku prasy wulkanizacyjnej dla dwóch wariantów grubości ścianek czasz odlewanych. Symulacje obejmowały określenie maksymalnych wartości naprężeń dla czaszy o grubości ścianki 10 mm oraz dla ścianki odchudzonej, po modyfikacji konstrukcyjnej, o 3 mm. W przypadku kuli zaworu DN200 nie przeprowadzono wstępnych symulacji optymalizacyjnych, a zmniejszenie grubości ścianki do wartości 7 mm podyktowane zostało postawionym celem osiągnięcia założonej masy (gęstości) kuli kompletnej. Ze względu na wartości maksymalnych naprężeń, uzyskanych dla kuli o zmniejszonej grubości ścianki, znacznie niższe od przyjętej wartości granicy plastyczności, nie prowadzono analiz dla pośrednich grubości ścianek z zakresu poniżej 10 mm.

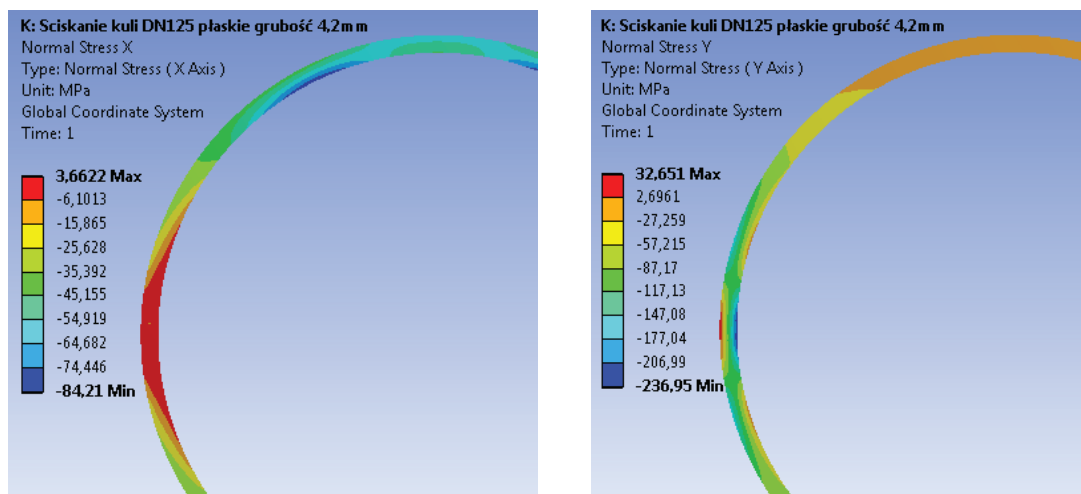
Dla czaszy o grubości ścianki stosowanej obecnie w zaworach DN200, przeprowadzono analizę wyników obciążania w trakcie procesu wulkanizacji. Uzyskane rozkłady pól naprężeń uogólnionych zaprezentowano na rysunku 17. Rozkłady pól naprężeń normalnych, określonych wzdłuż głównych osi modelu, zaprezen-

Analysis of stress in the DN200 valve ball

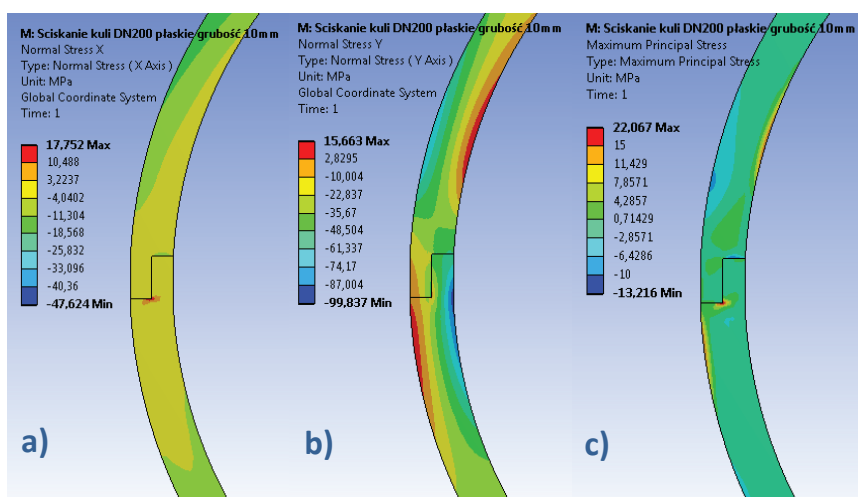
The numerical analysis of loading the DN200 valve ball had an assumption (similar to the DN125 series model) of simulating the curing press pressure in two variants of cast dome wall thickness. The simulations covered determination of the maximum stress values for the dome with 10 mm of wall thickness and for the wall leaned by 3 mm (from design modification). There were no preliminary optimising simulations carried out for the DN200 ball, while the wall thickness was reduced to 7 mm as required to achieve the assumed weight (density) of the complete ball. The values of maximum stresses produced for the ball with reduced wall thickness were much lower than the assumed yield point, so no analyses were made for intermediate wall thickness values in the range below 10 mm.

The dome with the current wall thickness used in the DN200 valves had an analysis carried out for the results of loading during the curing process. The resulting distributions of general stress fields are shown in Figure 17. The distributions of normal stress fields defined along the primary axes of the model are shown in Figure 18a and 18b; Figure 18c presents the distribution of primary stresses.

towano na rysunkach 18a i 18b, natomiast rozkład naprężeń głównych przedstawiono na rysunku 18c.



Rys. 17. Rozkład maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 10 mm
 Fig. 17. Distribution of the maximum generalized stress values for the cast iron dome with 10 mm of wall thickness



Rys. 18. Rozkład wartości naprężeń normalnych (a) i (b) oraz głównych (c) dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 10 mm
 Fig. 18. Distribution of the normal stresses (a), (b) and of the primary stresses (c) for the cast iron dome with 10 mm of wall thickness

Analiza rozkładu pól wartości naprężeń uogólnionych dla grubości ścianki wynoszącej 10 mm pokazuje poziom maksymalnych naprężeń znacznie poniżej wartości krytycznych, jednak charakter rozkładu pola tych naprężeń jest odmienny w przypadku pól naprężeń dla kuli DN125 o standardowej grubości ścianki, a maksymalne wartości naprężeń zlokalizowane są w innych miejscach ścianki odlewu. Maksymalne wartości naprężeń dla analizowanego modelu zlokalizowane są po wewnętrznej stronie czaszy dolnej w obszarze zamka, a rozkład pola tych wartości jest symetryczny.

Analizując rozkład przemieszczeń, w analizowanym modelu zaobserwować można nierównomierny rozkład deformacji w dolnej i górnej półczaszy

The analysis of the distribution of fields for the generalised stress values at the wall thickness of 10 mm reveals a low level of maximum stress values, which is far below the critical values; however, the nature of distribution of these stresses' field is different than in the stress fields of the DN125 ball with standard wall thickness, whereas the maximum stress values are located in other parts of the cast wall. The maximum stress values in the analysed model are located on the inside of the bottom dome, at the lock area, and the field distribution of the values is symmetrical.

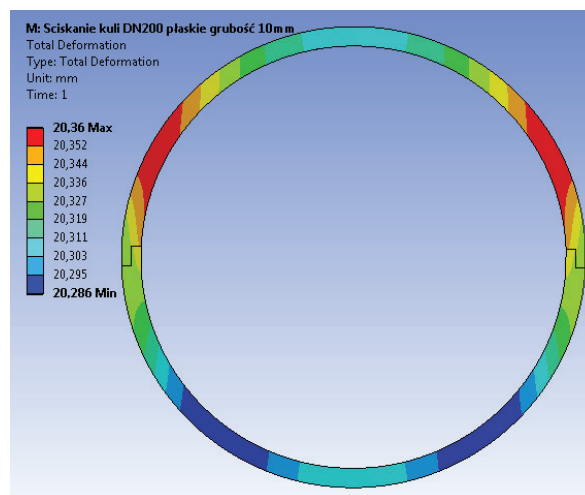
The distribution of displacements in the analysed model shows that the deformation distribution is heterogeneous in the bottom and top domes of the DN200 valve ball cast. The presented distribution of displace-

odlewu kuli zaworu DN200. Zaprezentowany rozkład przemieszczeń w czasie obciążania kuli w procesie wulkanizacji przedstawiono na rysunku 19. Maksymalne wartości przemieszczeń znajdują się w analizowanym modelu w górnej czaszy, w miejscach nacisku ścianek matrycy prasy wulkanizacyjnej.

Podobny schemat analizy numerycznej dotyczącej rozkładu naprężeń maksymalnych w procesie wulkanizacji przeprowadzono dla odlewu o zmniejszonej grubości ścianki do 7 mm. W analizie rozkładu pola naprężeń uogólnionych, zaprezentowanym na rysunku 20, widać niewielki wzrost koncentracji naprężeń na krawędzi zamka łączącego dwie półczasy oraz silny rozwój pola naprężeń maksymalnych w okolicach zamka po wewnętrznej stronie sfery kuli zaworu DN200. Rozkłady pól naprężeń normalnych określonych wzdłuż głównych osi (a) i (b) oraz naprężeń głównych (c) przedstawiono na rysunku 21.

ments during the loading of the ball in curing is shown in Figure 19. The maximum shift values are in the top dome, where the die walls of the curing press exert pressure.

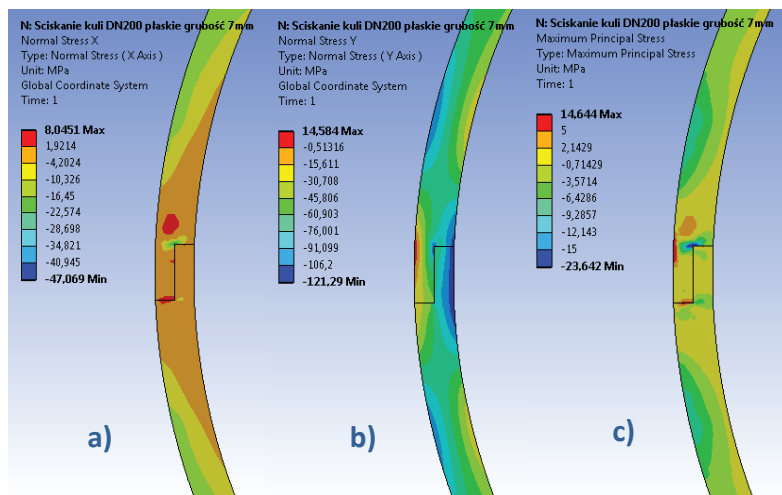
A similar diagram of numerical analysis concerning the distribution of maximum stresses in the curing process was carried out for the cast with the wall thickness reduced to 7 mm. The analysis of the distribution of generalised stress field shown in Figure 20 demonstrates a slight increase in the concentration of stress at the edge of the lock which couples the two hemispheres, and a strong development of the maximum stress field in the area of the lock at the inner side of the DN200 ball sphere. The distribution of fields of normal stresses defined along the main axes (a) and (b), and the primary stresses (c) are shown in Figure 21.



Rys. 19. Rozkład wartości przemieszczeń dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 10 mm
Fig. 19. Distribution of the shift values for the cast iron dome with 10 mm of wall thickness



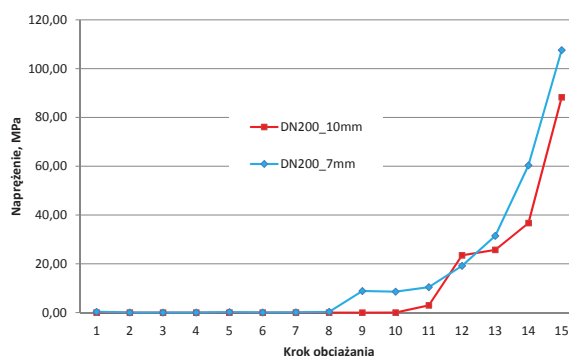
Rys. 20. Rozkład maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 7 mm
Fig. 20. Distribution of the maximum generalized stress values for the cast iron dome with 7 mm of wall thickness



Rys. 21. Rozkład wartości naprężeń normalnych (a) i (b) oraz głównych (c) dla czaszy żeliwnej o grubości ścianki 7 mm
 Fig. 21. Distribution of the normal stresses (a), (b) and of the primary stresses (c) for the cast iron dome with 7 mm of wall thickness

Podobnie jak dla analiz obciążania czaszy kuli DN125, w przypadku kuli DN200 również wygenerowano krzywe charakterystyczne wzrostu maksymalnych wartości naprężeń pod wpływem działającego obciążenia. Schematycznie, w postaci wykresu zaprezentowanego na rysunku 22, przedstawiono rozkład maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych dla poszczególnych kroków czasowych.

Similar to the loading analysis for the DN125 ball dome, characteristic charts were also plotted for the DN200 ball for the increase of maximum stress value under the acting load. Figure 22 presents the diagram of distribution of maximum generalised stress values in specific time steps.



Rys. 22. Charakterystyka wzrostu naprężeń w trakcie obciążania dla czaszy żeliwnej DN200 o grubości ścianki 10 oraz 7 mm
 Fig. 22. Characteristics of the increase of stress during loading of the DN200 cast iron dome with 10 and 7 mm of wall thickness

Analiza naprężeń w kuli zaworu DN300

Analysis of stress in the DN300 valve ball

Wyniki symulacji numerycznej obciążania modelu połączonych czasz DN300 w trakcie procesu wulkanizacji gumy, zarówno w przypadku dotychczas stosowanej kuli, w której grubość ścianki wynosi 16 mm, jak i dla odlewów czasz o zmniejszonej do 10,3 mm grubości pokazują, że maksymalne wartości naprężeń eksploatacyjnych są na poziomie znacznie niższym niż przyjęta wartość granicy plastyczności materiału. Dla tej konstrukcji, podobnie jak w przy-

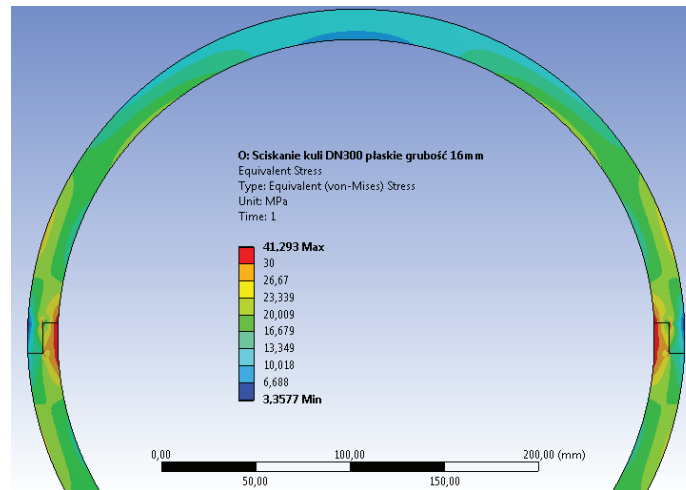
The results of the numerical simulation of loading the coupled DN300 domes model during the rubber curing process, both for the current ball wall thickness of 16 mm and the dome casts with the wall thickness reduced to 10.3 mm show that the maximum values of operating stresses are well below the assumed yield point of material. Similar to the DN200 valve ball, this design had no optimisation analyses made, and the assumed wall thickness of 10.3 mm resulted from the

padku kuli zaworu DN200, nie prowadzono analiz optymalizacyjnych, a przyjęta grubość ścianki na poziomie 10,3 mm wynikała z określonej masy (gęstości) kompletnej kuli, zakładanej w ramach realizowanego projektu.

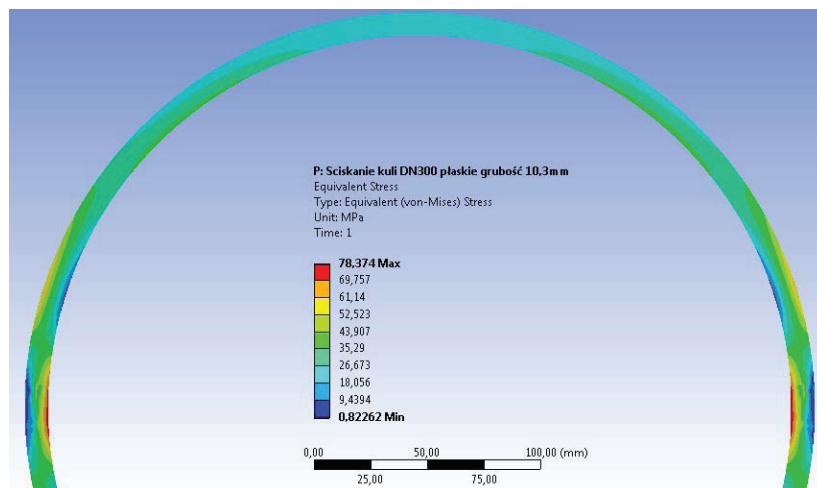
Rozkłady pól naprężeń uogólnionych dla czaszy o grubości ścianki równej 16 mm, stosowanej obecnie w zaworach DN300, zaprezentowano na rysunku 23, natomiast dla grubości zoptymalizowanej wynoszącej 10,3 mm zamieszczono na rysunku 24.

defined complete ball weight (density) as assumed for the project.

The distributions of fields of generalised stresses for the dome with 16 mm of wall thickness, as used now in DN300 valves, are shown in Figure 23; Figure 24 shows the distributions for the optimised wall thickness of 10.3 mm.



Rys. 23. Rozkład maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych dla czaszy żeliwnej DN300 o grubości ścianki 16 mm
Fig. 23. Distribution of the maximum generalized stress values for the DN300 cast iron dome with 16 mm of wall thickness



Rys. 24. Rozkład maksymalnych wartości naprężeń uogólnionych dla czaszy żeliwnej DN300 o zoptymalizowanej grubości ścianki 10,3 mm

Fig. 24. Distribution of the maximum generalized stress values for the DN300 cast iron dome with the optimised wall thickness of 10.3 mm

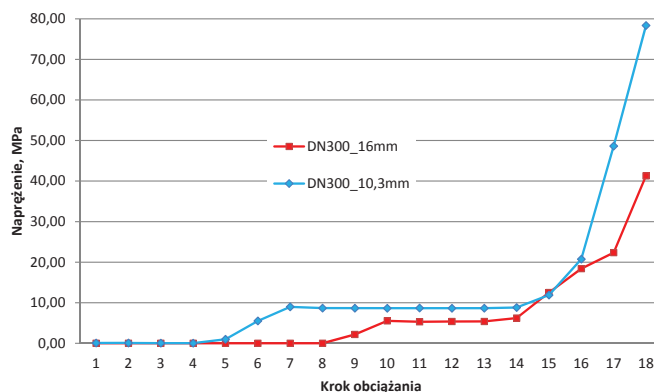
Analiza rozkładu pól wartości naprężeń uogólnionych, dla obydwu przypadków analizowanych grubości ścianki, wykazuje poziom maksymalnych naprężeń znacznie poniżej wartości granicy plastyczności materiału odlewu, a charakter rozkładu pola tych naprężeń jest równomierny i podobny jak

The analysis of the distribution of fields of the generalised stress values in both studied cases of wall thickness shows that the maximum stress level is well below the cast material yield point, whereas the nature of field distribution is homogeneous and similar to the ball cast with the original wall thickness (16 mm).

w przypadku odlewu kuli o pierwotnej grubości ścianki (16 mm).

Dla przeprowadzonych symulacji, podobnie jak dla analiz obciążania czaszy kuli DN125 i DN200, wygenerowane krzywe charakterystyczne wzrostu maksymalnych wartości naprężeń pod wpływem działającego obciążenia, dla poszczególnych kroków obciążania odlewu na prasie wulkanizacyjnej, przedstawiono na rysunku 25.

As in the analysis of loading the DN125 and the DN200 ball domes, the generated characteristic curves chart the increase of the maximum stress values under load are shown in Figure 25 for the specific loading steps of the cast on the curing press.



Rys. 25. Charakterystyka wzrostu naprężeń w trakcie obciążania dla czaszy żeliwnej DN300 o grubości ścianki 16 oraz 10,3 mm

Fig. 25. Characteristics of the increase of stress during loading of the DN300 cast iron dome with 16 and 10.3 mm of wall thickness

Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje numeryczne obciążania odlewów czasz dla kul zaworów zwrotnych DN125, DN200 oraz DN300 na prasie, w trakcie procesu wulkanizacji założoną warstwą gumy, wskazują na możliwość zmniejszenia grubości ścianek wszystkich wielkości typoszeregu planowanego do modernizacji i uzyskania kompletnych kul o założonej gęstości $\delta = 1,20 \text{ kg/dm}^3$. Największe naprężenia i odkształcenia występują w czaszach kuli do zaworu DN125, gdzie maksymalne naprężenie uogólnione występujące w odlewie o obniżonej do 4,2 mm grubości ścianki, niebezpiecznie zbliża się do granicy plastyczności. Przy założonej wartości granicy plastyczności na poziomie 250 MPa, stosunek $n = R_e / \text{Sigma_max}$ wynosi odpowiednio: $n = 1,19$ dla zaworu DN125, $n = 2,32$ dla zaworu DN200 oraz $n = 3,19$ dla zaworu DN300. Można przyjąć, że dla pozostałych wielkości zaworów – z planowanego typoszeregu DN150 i DN250 – naprężenia i odkształcenia przyjmą wartości pośrednie. Dla przeprowadzonych analiz poszczególnych zestawów czasz o zmniejszonej grubości ścianki stosowano porównywalną ilość elementów skończonych, a zagęszczenie siatki wprowadzono w niewralgicznych miejscach konstrukcji odlewu, tj. w okolicach zamka, gdzie spodziewano się koncentracji naprężeń.

Summary

The completed numerical simulations of loading the dome casts for the balls of DN125, DN200 and DN300 check valves on a press during the process of curing the assumed rubber layer point to an opportunity for reducing the wall thickness in all sizes of the type series intended for upgrading, and also to production of complete balls with the required density $\delta = 1.20 \text{ kg/dm}^3$. The highest stresses and deformations occur in the ball domes for the DN125 valve, where the maximum generalised stress is present in the cast with the wall thickness reduced to 4.2 mm, dangerously approaching the yield point. With the assumed yield point being 250 MPa, the ratio $n = R_e / \text{Sigma_max}$ is, respectively: $n = 1.19$ for the DN125 valve, $n = 2.32$ for the DN200 valve, and $n = 3.19$ for the DN300 valve. It is safe to assume that the remaining valve sizes, i.e. in the scheduled type series of DN150 and DN250, the stresses and deformations will have intermediate values. In the analyses of specific dome sets with reduced wall thickness values, a comparable number of finite elements were used, and the grid thickening was introduced at critical spots of the cast structure, i.e. near the lock, where concentrations of stress were expected.

Wnioski

Z przeprowadzonych analiz numerycznych procesu obciążania, w trakcie wulkanizacji warstwy gumy, czasz kul żeliwnych do zaworów kulowych, wynika, że:

1. istnieje możliwość zmniejszenia grubości ścianek odlewów, w celu zmniejszenia masy (gęstości) kul kompletnych,
2. założony materiał, żeliwo sferoidalne w gatunku EN-GJS-400-15, pozwala na planowane obniżenie grubości ścianki w czaszach do zaworów DN150 do DN300,
3. w przypadku czaszy zaworu DN125, ze względu na bardzo wysokie wartości naprężeń maksymalnych, których poziom niebezpiecznie zbliża się do przyjętej dla analizowanego żeliwa granicy plastyczności, może wystąpić konieczność zastosowania gatunku o wyższej wytrzymałości,
4. z uwagi na czułość żeliwa sferoidalnego na grubość ścianki, rzeczywista granica plastyczności tego gatunku żeliwa w ściance o grubości około 4 mm jest znacznie wyższa niż podawana w normie materiałowej i stąd jest bardzo prawdopodobne, że nawet dla tego gatunku zmodyfikowana kula nie zostanie uszkodzona podczas wulkanizacji,
5. we wszystkich symulacjach numerycznych, jako newralgiczne miejsce odlewu wskazać można strefę łączenia czasz; w okolicach zamka zawsze zlokalizowana jest strefa występowania maksymalnych wartości naprężeń, a więc jest to potencjalne miejsce pojawiania się pęknięć, a co za tym idzie teoretyczny inicjator zniszczenia odlewu w trakcie procesu wulkanizacji,
6. należy zwrócić szczególną uwagę na dokładność wymiarową wykonania odlewów czasz (centryczność) i obróbki mechanicznej zamka łączącego, dla uniknięcia karbu mogącego spowodować pęknięcie połączenia i zniszczenie kuli,
7. przeprowadzone symulacje nie określają w sposób jednoznaczny charakter rzeczywistych obciążeń, związanych przede wszystkim z możliwą do osiągnięcia dokładnością wymiarową odlewów, dlatego niezbędnym staje się wykonanie serii próbných odlewów, przeznaczonych do prób laboratoryjnych.

Podziękowania

Prace wykonano w ramach projektu celowego nr ROW-III-239/2012 pt. „Opracowanie i wdrożenie nowej konstrukcji węzła uszczelniająco-zwrotnego typoszeregu żeliwnych zaworów zwrotnych, spełniającego wymagania normy PN-EN 1074-3:2002” (zlec. 2203/00).

Conclusion

The completed numerical analyses of the loading process in rubber layer curing on cast iron ball domes of ball valves indicate the following:

1. an opportunity exists for reducing the cast wall thickness to reduce the weight (density) of complete balls,
2. the assumed material, i.e. EN-GJS-400-15 spheroidal iron, allows the planned wall thickness reduction in the domes for the valve sizes from DN150 to DN300,
3. in the case of the DN125 valve domes, a cast iron grade with higher strength may become the necessary input material due to the extremely high maximum stress values which are close to the yield point adopted for the studied cast iron type,
4. due to the sensitivity of spheroidal iron to wall thickness, the actual yield point of the grade in walls ca. 4 mm thick is much higher than listed in the reference material standard; hence is it highly probable that the modified ball design will not be damaged during curing even with this cast iron grade,
5. in all numerical simulations the critical cast spot is the area of dome coupling; there is always a zone at the lock area where maximum stress values occur, so it is the potential spot of cracks and a theoretical initiator of cast destruction during the curing process,
6. special attention should be paid to the dimensional precision of dome cast manufacturing (concentricity) and of mechanical treatment of the coupling lock to avoid the notching effect that may result in failure of the coupling and destruction of the whole ball,
7. the completed simulation do not explicitly determine the nature of actual loads, related first to the dimensional precision that can be achieved in casts; hence it is necessary to make a series of test casts for laboratory research.

Acknowledgements

The work was completed under the Target Project no. ROW-III-239/2012 titled “Development and implementation of a new design for the sealing reflexive node of the cast iron check valve type series in compliance with PN-EN 1074-3:2002” (Order no. 2203/00).

Literatura/References

1. Moaveni S. (2003). *Finite element analysis. Theory and applications using ANSYS*. Paerson Education Inc.
2. Kłosowski P., Woźnica K. (2007). *Nieliniowe lepkoplastyczne prawa konstytutywne w wybranych zastosowaniach analizy konstrukcji*. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
3. Rakowski G., Kacprzyk Z. (2005). *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*. Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW.
4. Rączka M., Gandurski K., Isendorf B. (2012). Wykonywanie odlewów z żeliwa sferoidalnego w formach warstwowych z ekologicznych mas formierskich. *Archives of Foundry Engineering*, 12(1), 169–174.