

## ANALIZA STANU NAPRĘŻEŃ W KONSTRUKCJACH ODLEWU KORPUSU, POKRYWY I KLINA ZASUW KLINOWYCH DO GAZU

Andrzej Gwiżdż, Robert Żuczek<sup>1</sup>, Mieczysław Nowak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków

<sup>2</sup>Fabryka Armatur JAFAR SA, 38-207 Przysieki 87

### Streszczenie

Przeprowadzono analizę numeryczną rozkładu naprężeń eksploatacyjnych w zasuwach miękko uszczelnionych do sieci gazowych z rur PE odlewanych z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15. Analiza przeprowadzona została z wykorzystaniem systemu ANSYS, na podstawie danych i dokumentacji dotyczącej rzeczywistych warunków próby, przeprowadzanych w Fabryce Armatur JAFAR SA. Zastosowanie oprogramowania ANSYS pozwoliło na zintegrowanie analiz numerycznych opracowanej konstrukcji wirtualnej, obciążanej ciśnieniem próby, z reakcją rzeczywistej konstrukcji w trakcie prób laboratoryjnych prowadzonych na stanowisku do analizy szczelności, wraz z możliwością weryfikacji wyników wirtualnych i rzeczywistych. W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki analizy dla zaworów DN50 i DN150. Wyniki tej analizy wykorzystane będą do weryfikacji konstrukcji odlewów wchodzących w skład modeli zasuw klinowych, poprzez poprawki wymiarowe konstrukcji.

Słowa kluczowe: komputerowe wspomaganie produkcji odlewniczej, symulacja rozkładu naprężeń, armatura żeliwna

### Wprowadzenie

Stosowanie nowoczesnych technik projektowania i analizy konstrukcji pozwala w szybki sposób uzyskać zadowalające korzyści, przy stosunkowo niewielkich nakładach pracy w trakcie projektowania, co pozwala na uzyskanie nowych cennych informacji, do których nie ma dostępu inaczej niż przez wirtualizację. Wykorzystywanie, przez inżynierów różnych branż przemysłu, oprogramowania do symulacji zjawisk rzeczywistych znacznie skraca czas wprowadzenia nowego elementu konstrukcji na rynek, bez konieczności wykonywania szeregu kosztownych prób laboratoryjnych i wielu serii próbnych elementów prototypowych.

Przejsie na wyższy poziom wytwarzania elementów armatury, za jaki uważa się armaturę gazową do rurociągów gazowych z PE, zamierza się zrealizować w sposób zintegrowany z jej nowoczesnym projektowaniem. Wymaga to przeprowadzenia analizy konstrukcyjno-technologicznej na etapie projektowania i dysponowania dla tego celu modelem 3D. W ramach tego przedsięwzięcia opracowano modele 3D elementów skła-

dowych oraz zintegrowanych z nich wyrobów. Modele te zostały wykorzystane do symulacji i analizy wytrzymałościowej elementów konstrukcyjnych oraz do przeprowadzenia analizy stanu naprężeń w konstrukcji korpusu, pokrywy i klina wykonanych z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15 z wykorzystaniem programów symulacji komputerowej MAGMAstress i ANSYS [1].

## **Analiza numeryczna rozkładu naprężeń w odlewanych elementach zasuw miętko uszczelnionych dla sieci gazowych z rur PE**

Analiza numeryczna rozkładu naprężeń eksploatacyjnych w zasuwach odlewanych z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15 przeprowadzona została z wykorzystaniem systemu ANSYS, na podstawie danych i dokumentacji dotyczącej rzeczywistych warunków próby, przeprowadzanej w JAFAR SA. Zastosowanie oprogramowania ANSYS pozwala na zintegrowanie analiz numerycznych opracowanej konstrukcji wirtualnej, obciążanej ciśnieniem próby, z reakcją rzeczywistej konstrukcji w trakcie prób laboratoryjnych prowadzonych na stanowisku do analizy szczelności, wraz z możliwością weryfikacji wyników wirtualnych i rzeczywistych prób szczelności nowych zaworów.

Stosowanie nowoczesnych technik projektowania i analizy konstrukcji pozwala w szybki sposób uzyskać zadowalające korzyści w trakcie projektowania. Wykorzystywanie, przez inżynierów różnych branż przemysłu, oprogramowania do symulacji zjawisk rzeczywistych znacznie skraca czas wprowadzenia nowego elementu konstrukcji na rynek, bez konieczności wykonywania szeregu kosztownych prób laboratoryjnych i wielu serii próbnych elementów prototypowych.

Oprogramowanie ANSYS jest jednym z wiodących programów wykorzystujących metodę elementów skończonych (MES) w szeroko pojętych analizach wytrzymałościowych, termicznych, elektromagnetycznych, akustycznych oraz mechaniki płynów. Najnowsze wersje oprogramowania posiadają przyjazny interfejs, zintegrowany w środowisku Workbench, wraz ze środowiskiem CAD – *DesignModeler*, umożliwiającym zaawansowane modelowanie powierzchniowo-bryłowe. Oprogramowanie umożliwia zautomatyzowanie procedur tworzenia siatki elementów skończonych z wykorzystaniem dostępu do biblioteki zaawansowanych elementów, przy zachowaniu pełnej kontroli użytkownika nad parametrami tworzonej siatki [2, 6, 7, 8].

Licencja programu ANSYS dostępna w Instytucie Odlewnictwa pozwala na wykonywanie zaawansowanych obliczeń numerycznych, wraz z wykorzystaniem analiz sprzężonych z zakresu:

- a. analizy wytrzymałościowe – zjawiska liniowe i nieliniowe, statyczne i dynamiczne, drgania własne konstrukcji i analiza harmoniczna, stany nieustalone, kinematyka, zjawiska mechaniki pęknięcia oraz zagadnienia dotyczące laminatów i kompozytów;
- b. analizy termiczne – stałe i zmienne w czasie pola temperatur, zmiany fazowe, konwekcja, radiacja i promieniowanie, przewodzenie ciepła w stanie ustalonym i nieustalonym;
- c. analizy mechaniki płynów – przepływy laminarne i turbulentne, ciecze ściśliwe i nieściśliwe, transport ciepła oraz zjawiska związane z oddziaływaniem prze-

pływającej cieczy na otaczające ścianki, modelowanie warstwy przyściennej i mieszanie płynów;

- d. analizy sprzężone (*Multiphysics*) – uwzględnienie jednoczesnego wpływu działających obciążeń mechanicznych i termicznych, interakcje zachodzące pomiędzy przepływającym medium a strukturą kanału przepływowego itp.

Wykorzystywana w przeprowadzonych analizach numerycznych wersja oprogramowania ANSYS, oprócz podstawowej, dość ograniczonej, bazy danych termofizycznych i wytrzymałościowych, jest wzbogacona o pełną wersję bazy danych IDAC uwzględniającej dane dla szeregu materiałów, nie tylko metalowych, ze szczególnie rozszerzoną bazą danych IDAC NonLinear, zawierającą szereg krzywych wytrzymałościowych i zmęzeniowych wybranych materiałów w funkcji temperatury. Posiadane bazy danych zostały również rozszerzone o pełne charakterystyki wybranych stopów odlewniczych na podstawie danych literaturowych i badań własnych prowadzonych w Instytucie Odlewnictwa [9].

Przeprowadzone symulacje numeryczne poprzedzono wnikliwą analizą dostarczonej dokumentacji płaskiej (wykonanej w systemie CAD) analizowanych konstrukcji, na podstawie której zamodelowano bryły 3D korpusów, pokryw i klinów ogumowanych, wraz z elementami pomocniczymi dla celów przeprowadzonych analiz.

### ***Modelowanie bryłowe wybranych konstrukcji korpusów, pokryw i klinów***

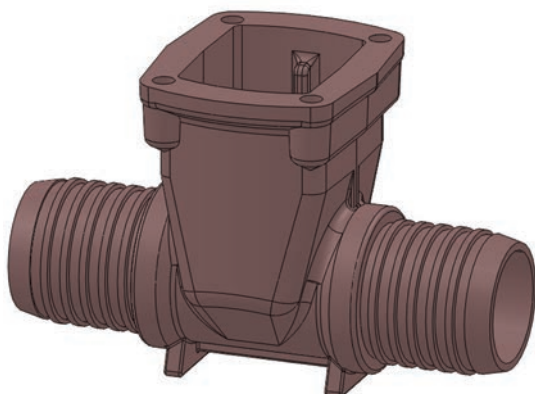
Na podstawie dostarczonej dokumentacji CAD 2D opracowanej w firmie JAFAR SA do analiz numerycznych rozkładu naprężeń opracowano modele bryłowe korpusów i pokryw DN50, DN150 oraz modele bryłowe klinów ogumowanych. Przygotowanie modeli bryłowych przeprowadzono, wykorzystując oprogramowanie SolidWorks. Ze względu na konieczność maksymalnego uproszczenia modeli dla potrzeb analiz numerycznych, nie modelowano elementów uszczelnień dla wybranych typów zasuw, a występowanie tych elementów uwzględniono w warunkach brzegowych zakładanych w programie ANSYS.

W przeprowadzonych analizach numerycznych, po uzgodnieniu z Fabryką Armatur JAFAR SA, szczególny nacisk położono na weryfikację naprężeniową korpusów wybranych zasuw i wskazanie newralgicznych miejsc, mogących się pojawiać silnych koncentracji naprężeń w trakcie prób laboratoryjnych i późniejszej eksploatacji w warunkach rzeczywistych.

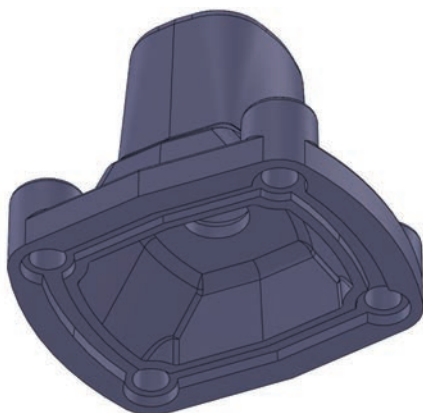
Pierwszym zestawem modelowym była zasuwa DN50. Opracowano konstrukcję bryłową korpusu przedstawioną na rysunku 1.

Wymiary gabarytowe zamodelowanej konstrukcji były następujące: długość korpusu pomiędzy końcami króćców  $L = 225$  mm, maksymalna wysokość  $H = 143$  mm, średnica kanału wewnętrznego korpusu  $\varnothing = 50$  mm. Zamodelowany korpus posiadał w kołnierzu cztery otwory do mocowania pokrywy zaprezentowanej na rysunku 2.

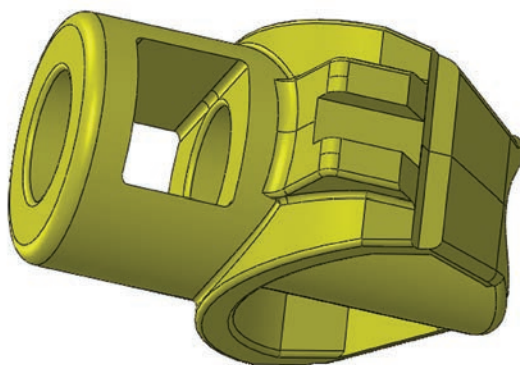
W zaprezentowanym modelu pokrywy przeprowadzono wstępną dyskretyzację konstrukcji otworu mocowania klina przedstawionego na rysunku 3, w celu zminimalizowania złożoności modelu MES dla analiz numerycznych.



Rys. 1. Model bryłowy korpusu DN50

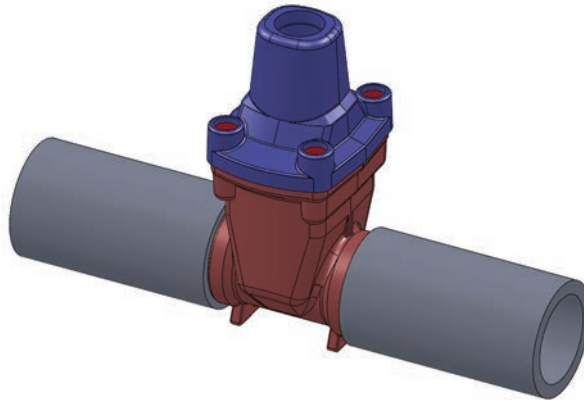


Rys. 2. Model bryłowy pokrywy DN50



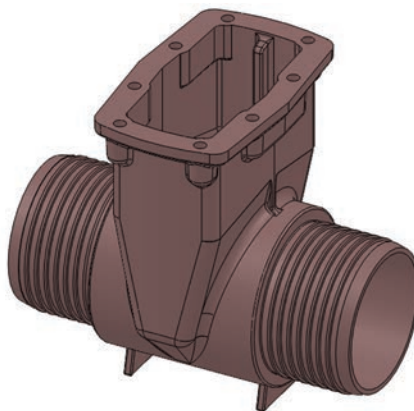
Rys. 3. Model bryłowy klina dla zasuw DN50

Na podstawie opracowanych modeli bryłowych korpusu i pokrywy przygotowano zestaw modelowy zasuw DN50 przeznaczony do laboratoryjnych prób szczelności przedstawiony na rysunku 4. Dla przygotowania modelu zestawieniowego dla potrzeb symulacji rozkładu naprężeń w korpusie i pokrywie dla zasuw serii DN50, zamodelowano fragmenty rur PVC (szary), mocowanych na króćcach korpusu zasuw oraz śruby mocujące (czerwony) pokrywę do korpusu, w celu zobrazowania rzeczywistego charakteru odkształceń całego zestawu modelowego.



*Rys. 4. Model bryłowy zestawienia dla zasuw DN50*

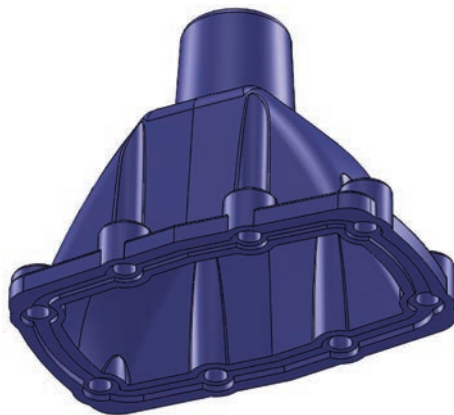
Drugi zestaw modelowy przygotowany do symulacji numerycznych procesu obciążania stanowiła zasuw DN150. Konstrukcję bryłową korpusu serii DN150 przedstawiono na rysunku 5.



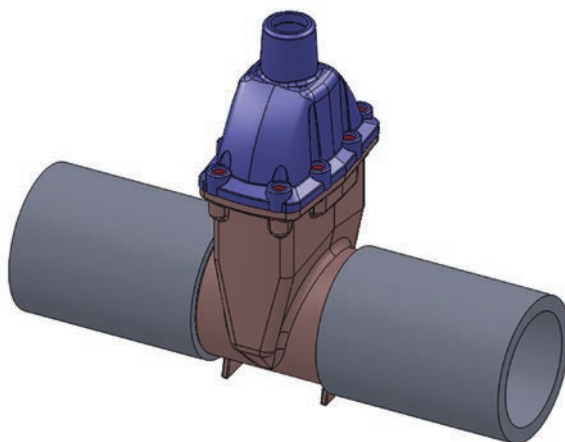
*Rys. 5. Model bryłowy korpusu DN150*

Wymiary gabarytowe największego z wytypowanych korpusów, serii DN150 były następujące: długość korpusu pomiędzy końcami króćców  $L = 350$  mm, maksymalna wysokość  $H = 309$  mm, średnica kanału wewnętrznego korpusu  $\varphi = 129$  mm. Pokrywa

DN150, zaprezentowana na rysunku 6, przykręcana jest do korpusu za pomocą ośmiu śrub mocujących.



Rys. 6. Model bryłowy pokrywy DN150



Rys. 7. Model bryłowy zestawienia dla zasuw DN150

### **Dyskretyzacja modeli elementów odlewanych zasuw w programie ANSYS**

Na podstawie przygotowanych modeli bryłowych zestawień dla zasuw przeprowadzono eksport kompletnych złożeń do programu ANSYS, a następnie w module Design-Modeler sprawdzono zaimportowane konstrukcje w celu wyeliminowania ewentualnych błędów i nieprawidłowych powierzchni.

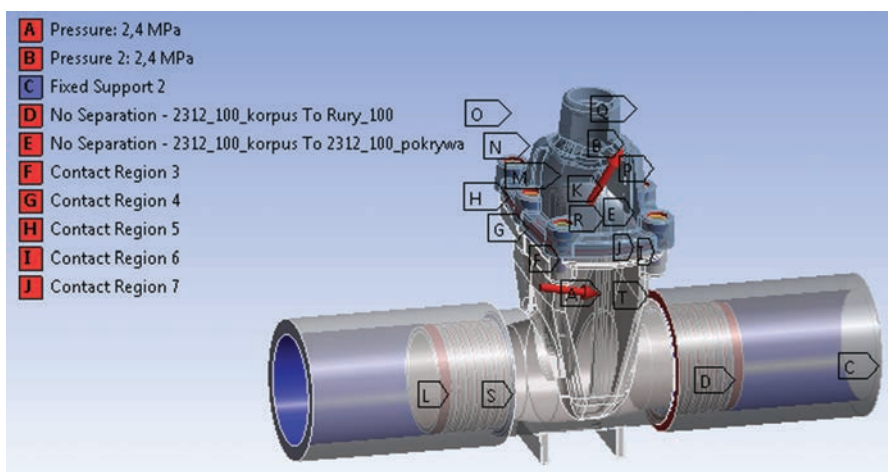
Do analiz numerycznych warunków eksploatacji, wybrano żeliwo sferoidalne wg normy EN-GJS-400-15 o podstawowych właściwościach wytrzymałościowych przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe właściwości wytrzymałościowe żeliwa przyjętego do analiz numerycznych EN-GJS-400-15

Gęstość	7100 kg/m <sup>3</sup>
Moduł Younga	159 000 MPa
Współczynnik Poissona	0,27
Wytrzymałość R <sub>m</sub>	min. 400 MPa
Granica plastyczności R <sub>0,2</sub>	min. 250 MPa

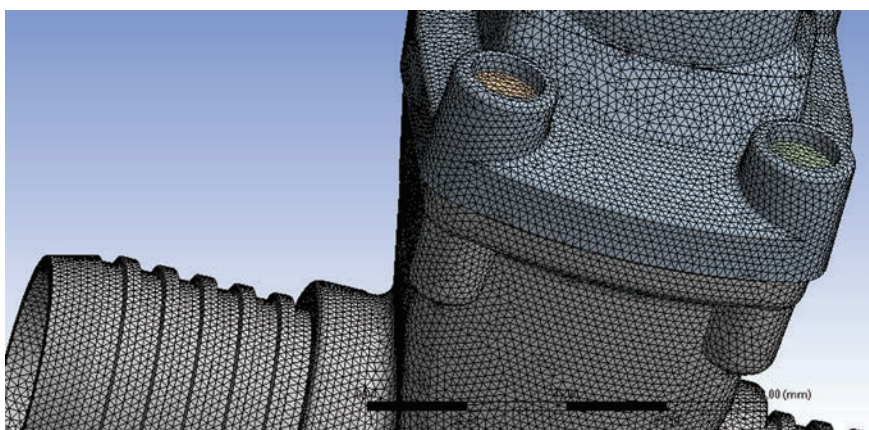
Dla żeliwa gatunku EN-GJS-400-15 dobrano dane z bazy danych fizykochemicznych i wytrzymałościowych dostępnych w programie ANSYS, a następnie dokonano niezbędnej modyfikacji tych informacji, poszerzając je o dane wytrzymałościowe dostępne w zasobach Instytutu Odlewnictwa. Zmodyfikowany stop odlewniczy, na podstawie którego przeprowadzono analizy numeryczne procesu obciążania, zawierał pełne charakterystyki uzyskane w statycznej próbie wytrzymałościowej, dla szeregu stopów badanych laboratoryjnie oraz dane uzupełnione z bazy danych IDAC. Dla potrzeb symulacji zamodelowano oddziaływanie śrub mocujących korpus i pokrywę, przyjmując standardowy materiał na śruby jako stal nierdzewna Fe/Zn5, dobierając odpowiednie charakterystyki z bazy danych programu ANSYS. Do złożenia wczytanego w programie DesignModeler przyjęto również standardowy materiał odkształcalny PVC z bazy danych programu, dla modeli rur z tworzywa sztucznego, zamodelowanych na potrzeby symulacji próby ciśnieniowej.

Dla zaimportowanego modelu zasuwki wraz z fragmentami rur z tworzywa sztucznego wprowadzono podstawowe parametry oddziaływania pomiędzy poszczególnymi elementami zestawienia oraz warunki brzegowe ciśnienia i mocowania powierzchni swobodnych. Zamodelowany sposób obciążania i opis warunków brzegowych oraz modele kontaktu pomiędzy poszczególnymi elementami zestawienia przedstawione zostały na rysunku 8.



Rys. 8. Sposób obciążania i podstawowe warunki brzegowe oraz warunki kontaktu, przyjęte na potrzeby analizy numerycznej procesu obciążania dla modelu zasuwki

Na podstawie wstępnych analiz obciążania zasuw przy automatycznie prowadzonej dyskretyzacji z wykorzystaniem standardowych elementów siatki MES, określono niewrażliwe miejsca w konstrukcji korpusu i pokrywy, w których przeprowadzono dodatkowo ręczny dobór optymalnych parametrów siatki MES. Do analizy numerycznej procesu obciążania wykorzystywano zaawansowane kształty siatki elementów skończonych, będące 10-węzłowymi elementami tetragonalnymi, przy uwzględnieniu możliwości pojawienia się nieliniowych zjawisk w trakcie prowadzonej analizy. Dla modelu klina zastosowano takie same elementy skończone, jedynie w przypadku modeli rur z tworzywa sztucznego zastosowano elementy heksagonalne 20-węzłowe będące prześciennymi strukturami sześciennymi, posiadającymi oprócz punktów wierzchołkowych dodatkowo punkty na każdej krawędzi bocznej struktury w celu znacznego zmniejszenia ilości elementów MES w obszarach o małym znaczeniu dla prowadzonych analiz numerycznych. Fragment modelu zasuw, z siatką tetragonalnych elementów MES na modelu korpusu, pokrywy i śrub mocujących, przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Dyskretyzacja modelu zasuw DN50 przy zastosowaniu modyfikowanej siatki tetragonalnych elementów skończonych

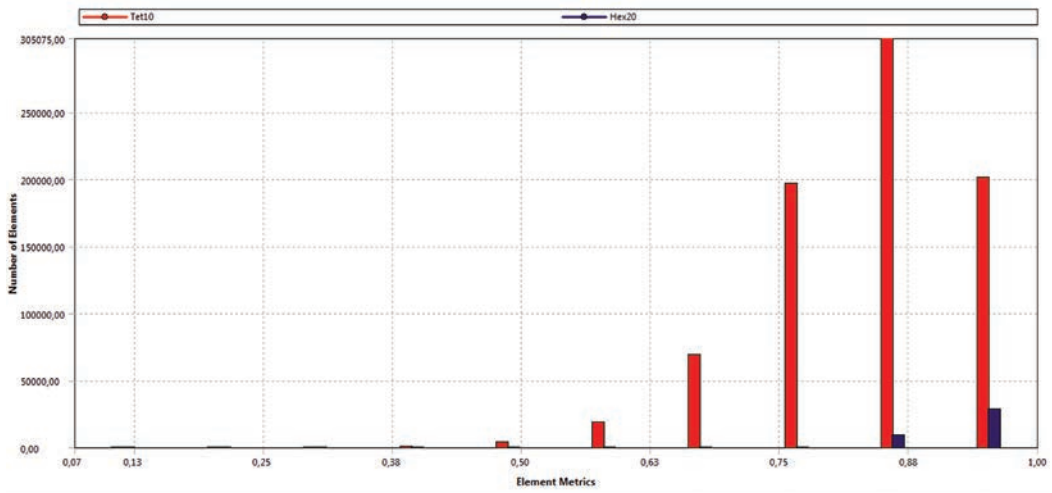
Ogólnie w przyjętych analizach zastosowano modele składające się z możliwie najmniejszej ilości elementów skończonych, pozwalające w najbardziej poprawny sposób dyskretyzować poszczególne części składowe zasuw, przy zachowaniu optymalnego czasu obliczeń i jakości osiąganych wyników. Program ANSYS pozwala oszacować „jakość” zastosowanych elementów skończonych (*Element Quality*), a co za tym idzie dokładność prowadzonych obliczeń. Wykres obrazujący „jakość” elementów MES w przeprowadzonych analizach, na przykładzie analizy siatki elementów zasuw DN50, przedstawia rysunek 10.

W celu wyeliminowania błędów siatki MES, mogących wprowadzać błędy w trakcie obliczeń numerycznych, „jakość” przyjmowanych elementów powinna zawierać się w zakresie 0,25–1,00. Jak widać na przedstawionym wykresie, w przyjętych obliczeniach najniższa wartość wynosi około 0,48. Podobnie, w przypadku analizy pozostałych parametrów diagnostycznych siatki, można przyjąć, że przyjęta gęstość siatki i rodzaj zastosowanych elementów nie wprowadzają błędów w prowadzonych analizach procesu obciążania konstrukcji, dla wytypowanych rodzajów zasuw. Dla celów prowadzonych



analiz przyjęto następującą wielkość siatki elementów MES:

- zasuw DN50: 833 867 elementów tetra i hexa,
- zasuw DN150: 927 416 elementów tetra i hexa.



Rys. 10. „Jakość” elementów MES na przykładzie zasuw DN50

### **Analiza numeryczna rozkładu naprężeń w trakcie próby na stanowisku badawczym, w wybranych odlewach składowych zasuw gazowych**

Wytypowane zasuw miękko uszczelnione do gazu ziemnego serii DN50, DN100 oraz DN150 pracują w warunkach średniego lub podwyższonego ciśnienia panującego w sieci gazowej w zakresie  $p_{nom} = 0,5-1,6$  MPa. Na podstawie założeń próby prowadzonej na stanowisku badawczym, dla wybranych zasuw do gazu ziemnego przyjęto ciśnienie w trakcie próby wynoszące  $p_{pr} = 2,4$  MPa. Dla prowadzonych analiz, jako obciążenie próby, przyjęto ciśnienie działające na całą wewnętrzną powierzchnię płaszcza korpusu i pokrywy oraz założono wstępny docisk pokrywy do korpusu pochodzący od wkręconych śrub. Modelowanie rur przyłączeniowych przy króćcach korpusu zostało ograniczone do zamodelowania dwóch pierścieni, a pomiędzy króćcami i rurą z tworzywa założono odpowiedni dla elementów odkształcalnych rodzaj kontaktu.

Analizy numeryczne rozkładu naprężeń i przemieszczeń w wybranych konstrukcjach pod wpływem statycznego obciążenia ciśnieniem próby obejmowały:

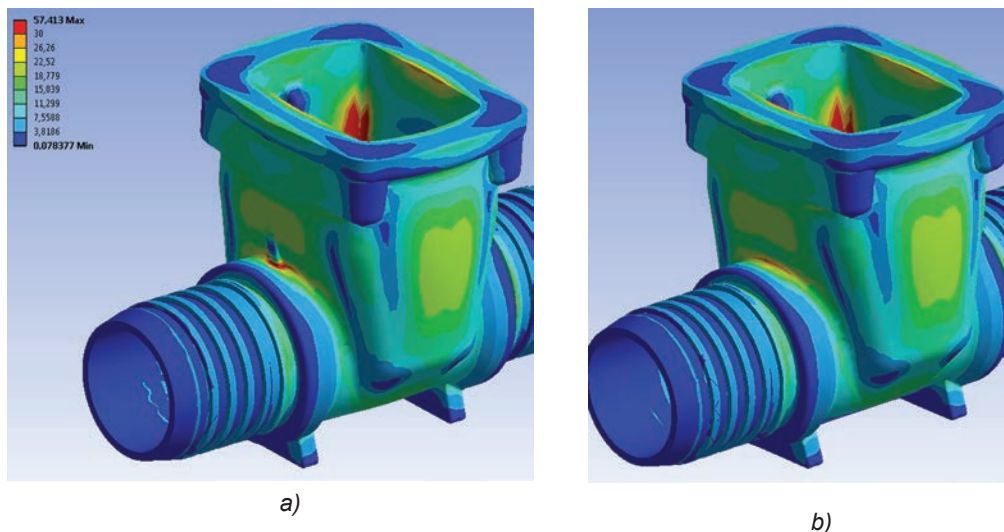
- określenie maksymalnych wartości naprężeń występujących w odlewach w trakcie próby;
- wskazanie miejsc silnych koncentracji pól naprężeń oraz propozycje zmniejszenia ich wartości, poprzez niewielkie zmiany w konstrukcji odlewów, bez konieczności ingerencji w kanał przelotowy;

- określenie maksymalnych wartości przemieszczeń występujących w odlewach pod wpływem działającego obciążenia;
- określenie szacowanego współczynnika bezpieczeństwa dla opracowanych konstrukcji.

UWAGA: Jednostki skali rozkładu naprężeń podane są w MPa, a przemieszczeń w mm.

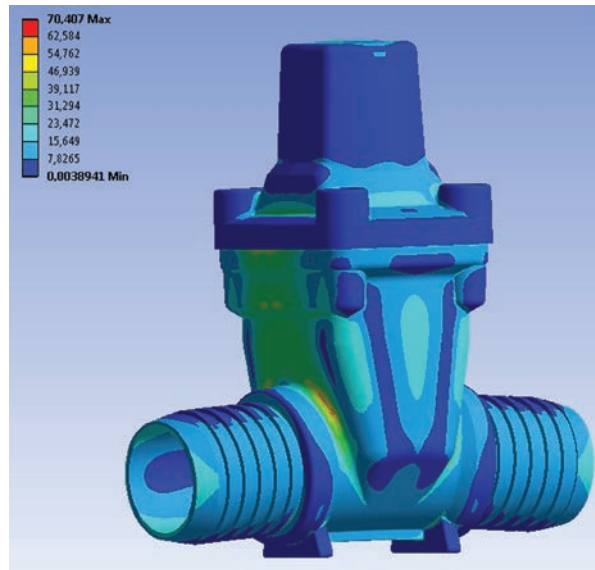
### Zasuwa miękko uszczelniona DN50

Dla modelu korpusu zasowy DN50 przeprowadzono wstępną analizę rozkładu naprężeń, w celu określenia newralgicznych miejsc koncentracji naprężeń. Wykonane obliczenia wskazały miejsca koncentracji naprężeń w pionowych żebrach wzmacniających konstrukcję, w miejscu przejścia kołnierza łączącego króćce z kołnierzem korpusu. Wprowadzone żebra powodują silną koncentrację naprężeń w opisanym miejscu, co w trakcie obciążania zasowy ciśnieniem roboczym, może spowodować rozwój szczelin zmęczeniowych i pęknięcie korpusu. W celu zmniejszenia tych naprężeń usunięto wprowadzone żebra, aby sprawdzić możliwość znacznego zmniejszenia ich wielkości. Porównanie rozkładu naprężeń, w trakcie obciążania odlewu korpusu z żebrami wzmacniającymi oraz po ich usunięciu z modelowanej konstrukcji, przedstawiono na rysunku 11. Przeprowadzona operacja pozwoliła wyeliminować silną koncentrację naprężeń na żebrach, w dalszych więc analizach powinno się uwzględnić proponowane zmiany.

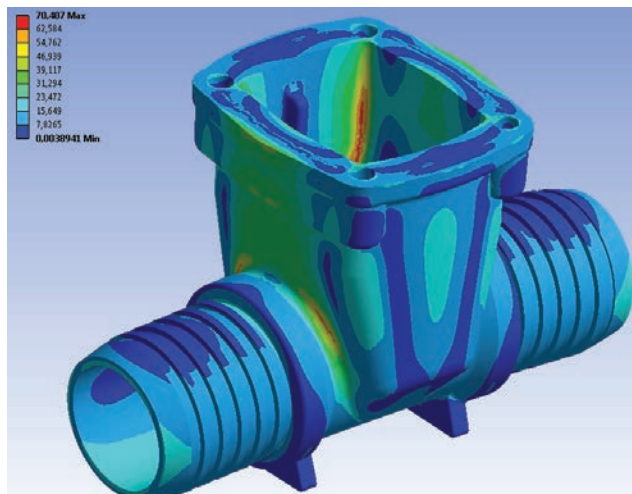


Rys. 11. Porównanie rozkładu naprężeń w odlewie korpusu z żebrami konstrukcyjnymi (a) oraz bez żeber (b) dla zasowy serii DN50

Dla zaproponowanej konstrukcji zasowy przeprowadzono obliczenia przy założonym ciśnieniu próby, dla zagęszczonej siatki elementów skończonych. Rozkład naprężeń dla modelu zestawienia zasowy DN50 przedstawiono na rysunku 12, natomiast dla korpusu i pokrywy przedstawiono na rysunku 13 i 14.

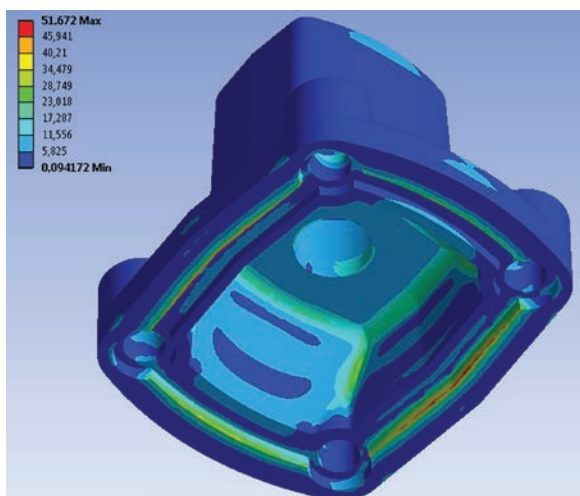


Rys. 12. Rozkład naprężeń zredukowanych w zasuwie DN50

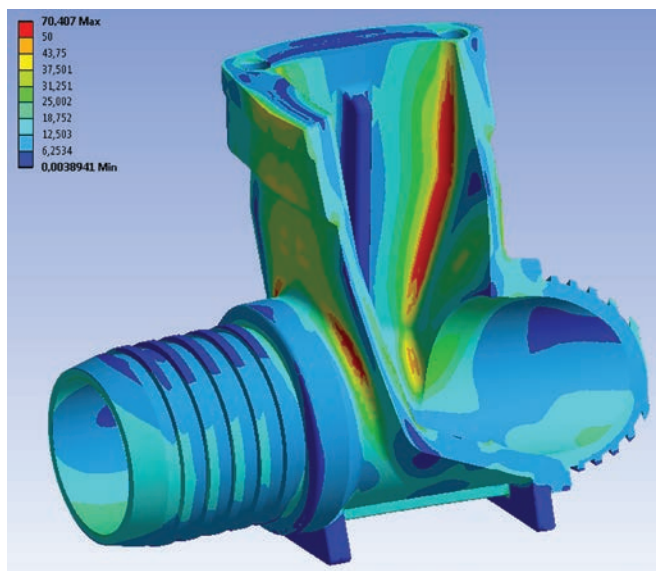


Rys. 13. Rozkład naprężeń zredukowanych w korpusie zasuw DN50

Przeprowadzona analiza rozkładu naprężeń w odlewach korpusu i pokrywy wykazała, że największe wartości naprężenia zredukowanego w odlewie korpusu wynoszą około 70 MPa, a pole koncentracji tych naprężeń zlokalizowane jest głównie w dwóch obszarach – wewnątrz korpusu, pomiędzy przejściem pionowych ścian oraz na promieniu łączącym kołnierz kanału przepływowego oraz płaszczka pionowego korpusu. Rozkład naprężeń w opisanych obszarach przedstawiono w powiększeniu na rysunku 15, przy uwzględnieniu przekroju wg płaszczyzny charakterystycznej, ograniczając skalę maksymalnych ich wartości do 50 MPa, w celu lepszego zobrazowania rozkładu pól i miejsc koncentracji tych naprężeń.



Rys. 14. Rozkład naprężeń zredukowanych w pokrywie zasuw DN50

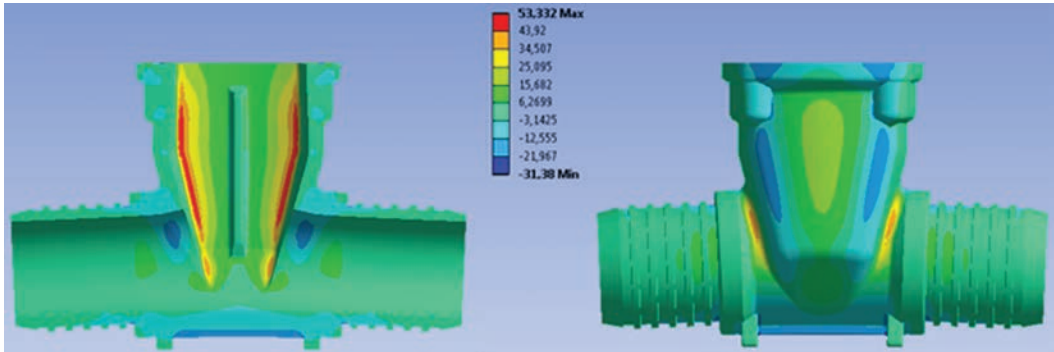


Rys. 15. Rozkład naprężeń w newralgicznych miejscach odlewanego korpusu DN50

Biorąc pod uwagę wysokie ciśnienie przyjęte w próbie szczelności, określone w trakcie symulacji wartości naprężeń maksymalnych w odlewie korpusu, ze względu na ich niskie wartości w porównaniu z minimalną wartością umownej granicy plastyczności, nie zagrażają prawidłowej pracy konstrukcji zasuw, nawet w przypadku wystąpienia chwilowych przeciążeń ciśnienia roboczego w sieci i zmian dynamiki przepływu.

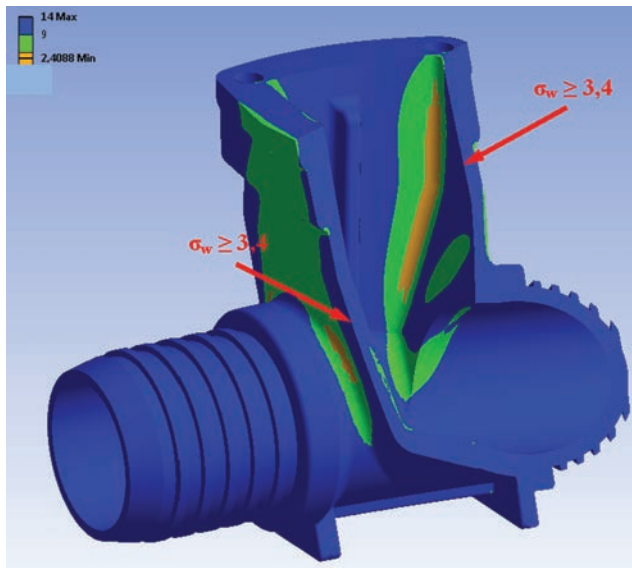
Analiza naprężeń normalnych wzdłuż osi podłużnej korpusu, przedstawiona na rysunku 16, pokazuje, że różnica maksymalnych naprężeń rozciągających i ściskających

wynosi ponad 80 MPa, jednak nie obserwujemy sąsiedownia pól tych naprężeń, a więc nie powstają obszary o gradientach, mogące zapoczątkować proces pęknięcia materiału konstrukcji.



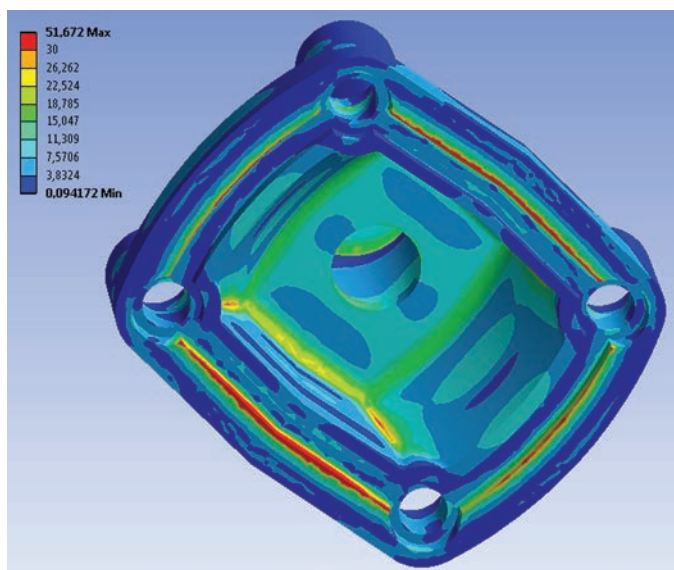
Rys. 16. Rozkład naprężeń normalnych na przekroju osiowym korpusu DN50

Dla wybranego odlewu korpusu DN50 przeprowadzono szacunkową analizę współczynnika bezpieczeństwa konstrukcji, z wykorzystaniem programu ANSYS, przy założeniu działających naprężeń maksymalnych. Oszacowany margines bezpieczeństwa dla wybranego korpusu osiąga minimalną wartość 2,4 w obszarach o największym wyęzieniu materiału, a więc minimalna szacunkowa wartość współczynnika bezpieczeństwa wynosi  $\sigma_w \geq 3,4$ . Prezentowany szacunkowy rozkład marginesu współczynnika bezpieczeństwa dla omawianej konstrukcji korpusu DN50 przedstawiony został na rysunku 17.



Rys. 17. Rozkład szacunkowy marginesu bezpieczeństwa konstrukcji odlewanego korpusu DN50, wraz z zaznaczonymi obszarami o najniższym współczynniku bezpieczeństwa  $\sigma_w \geq 3,4$

Analiza rozkładu naprężeń w odlewie pokrywy również nie wykazała znacznych wartości naprężeń maksymalnych, które nie przekraczają 52 MPa, a których pola zlokalizowane są głównie na promieniach przejść wewnętrznego płaszcza pokrywy oraz na krawędzi łączenia pokrywy i korpusu, w miejscu modelowania warunków brzegowych oddziaływania układu pokrywa-kropus w trakcie obciążania zestawu modelowego. Rozkład naprężeń w odlewie pokrywy, przy założeniu działającego na wewnętrzną powierzchnię ciśnienia próby, przedstawiono na rysunku 18, przy czym zakres maksymalnych wartości ograniczono do 30 MPa, w celu lepszego uwidocznienia miejsc silnych koncentracji. Otrzymane wyniki pozwalają określić, iż odlew pokrywy pracuje w zakresie bezpiecznych wartości maksymalnych naprężeń, znacznie poniżej granicznej wartości wytrzymałości materiału konstrukcji.

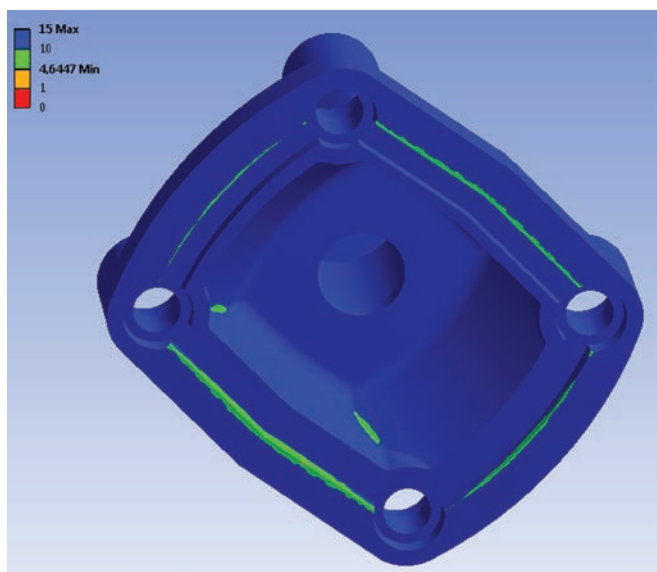


Rys. 18. Rozkład naprężeń zredukowanych w pokrywie zasuw DN50

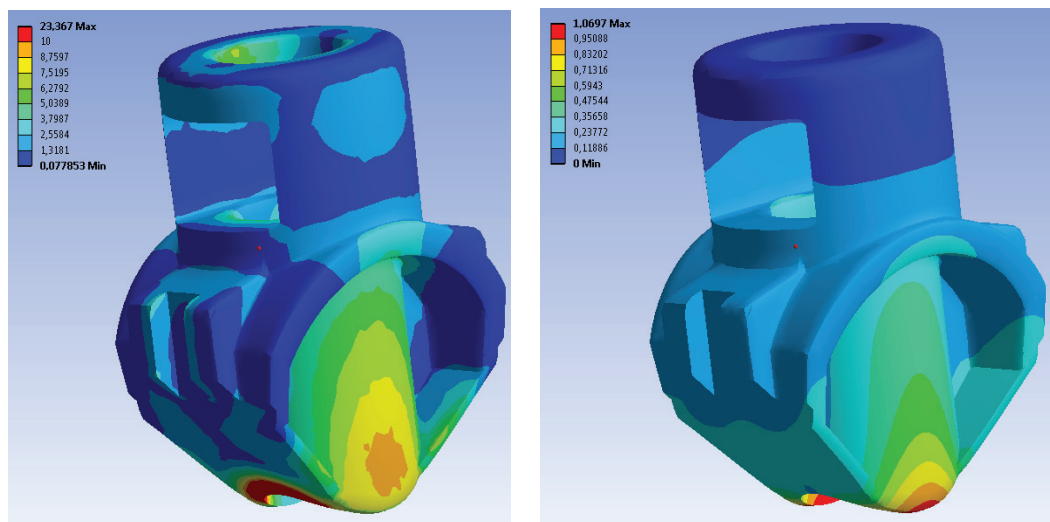
Przeprowadzona szacunkowa analiza wartości współczynnika bezpieczeństwa w odlewie pokrywy wykazała, że najniższa wartość  $\sigma_w$  jest wyższa niż 4,6. Oznacza to więc znaczny zapas bezpieczeństwa materiałowo-konstrukcyjnego analizowanej pokrywy przy założonym ciśnieniu próby. Rozkład wartości współczynnika bezpieczeństwa przy założonym obciążeniu przedstawiony został na rysunku 19.

Dla przykładowego klina zasuw DN50 przeprowadzono rozkład naprężeń i przemieszczeń pod wpływem działającego obciążenia ciśnieniem próby. Uzyskane wyniki obciążania klina DN50 przedstawiono na rysunku 20.

Analiza rozkładu przemieszczeń w odlewie korpusu i pokrywy wykazała niewielkie odkształcanie się tych konstrukcji w trakcie obciążania kanału przepływowego ciśnieniem próby na stanowisku badania szczelności.

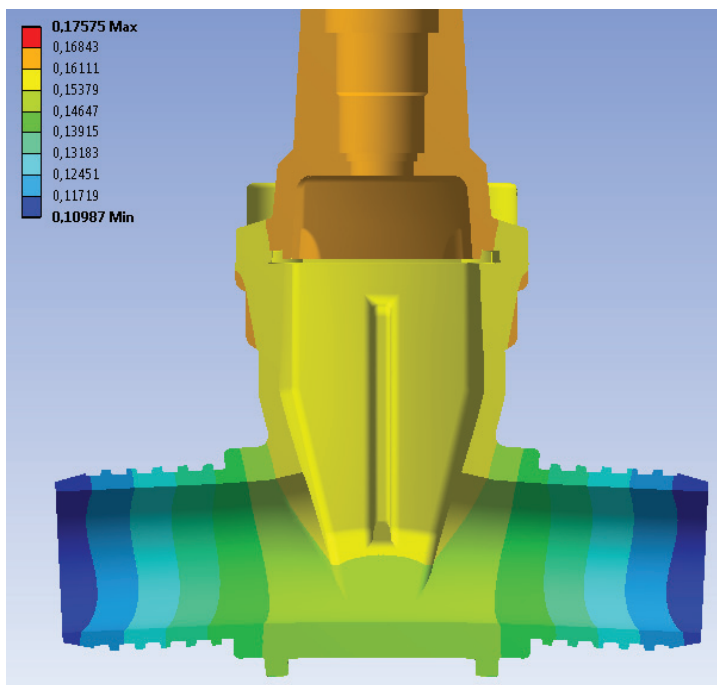


Rys. 19. Rozkład szacunkowy współczynnika bezpieczeństwa odlewu pokrywy DN50

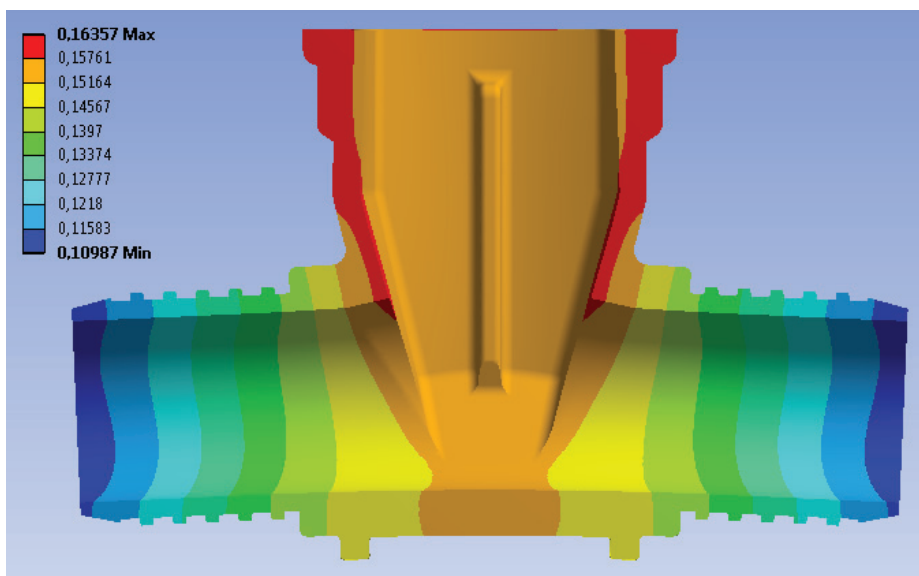


Rys. 20. Rozkład naprężeń (a) i przemieszczeń (b) w ogumowanym klinie DN50

Przedstawione wyniki analiz numerycznych rozkładu przemieszczeń dla zestawu modelowego zasuw DN50 przedstawiono na rysunku 21, natomiast dla odlewu korpusu i pokrywy zaprezentowano odpowiednio na rysunkach 22 i 23.

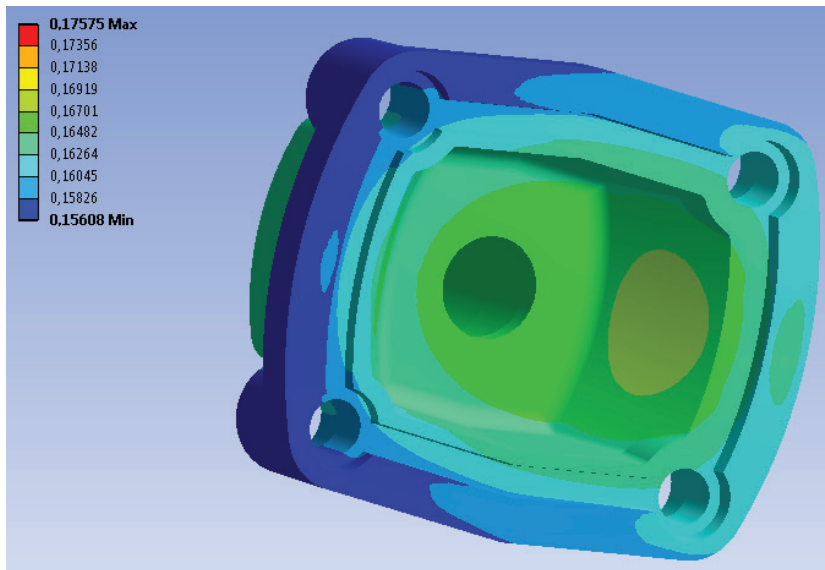


Rys. 21. Rozkład przemieszczeń w zestawie modelowym zasuwki DN50



Rys. 22. Rozkład przemieszczeń w odlewie korpusu DN50





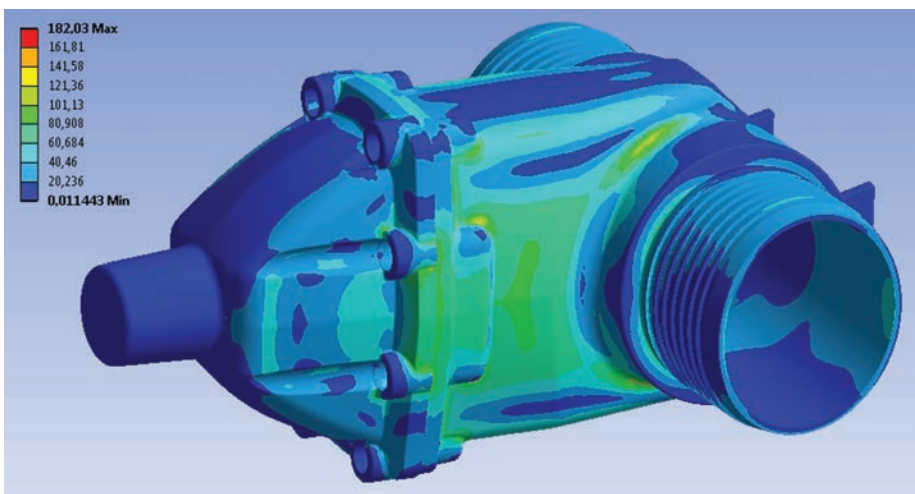
Rys. 23. Rozkład przemieszczeń w odlewie pokrywy DN150

### Zasuwa miękko uszczelniona DN150

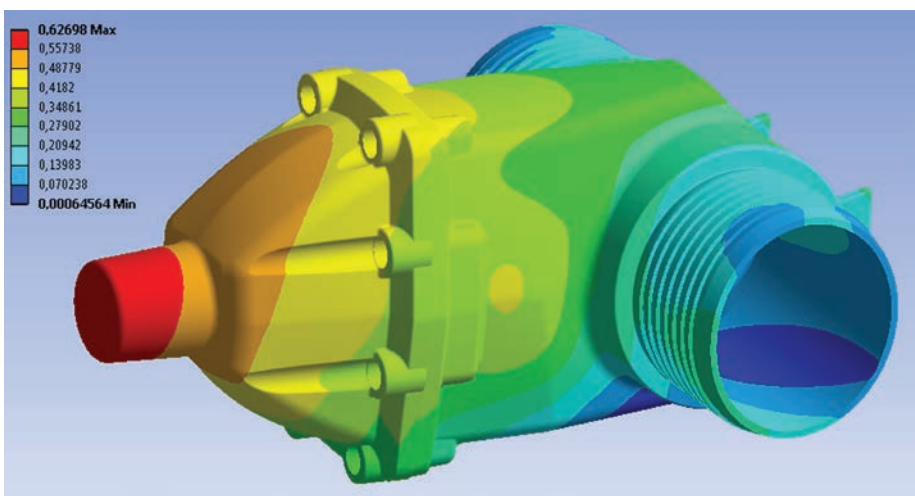
Następnym analizowanym zestawem modelowym zasuw miękko uszczelnionych dla sieci gazowej z rur PE, była gabarytowo największa z analizowanych, zasuw DN150. W omawianej konstrukcji grubość ścianki przekroju korpusu zwiększyła się jedynie o 1 mm w stosunku do grubości ścianki znacznie mniejszego korpusu serii DN50, a więc można szacować, że ciśnienie próby spowoduje znaczny wzrost maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych. Wyniki rozkładu naprężeń zredukowanych w zestawie modelowym zasuw DN150 przedstawione zostały na rysunku 24, natomiast przemieszczenia względem konstrukcji bazowej zestawu modelowego zaprezentowano na rysunku 25.

Maksymalne wartości naprężeń zredukowanych wg von Misesa, dla analizowanego zestawu modelowego DN150, osiągają wartość 182 MPa, a więc w całym zestawie modelowym nie przekraczamy granicy plastyczności materiału konstrukcji, przy założonym schemacie działających obciążeń. Dokładna analiza rozkładu pól naprężeń maksymalnych dla odlewu korpusu DN150 przedstawiona została na rysunku 26, przy uwzględnieniu przekroju osiowego, wzdłuż kanału przepływowego omawianej konstrukcji korpusu. Na przedstawionym rysunku skala maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych ograniczona została do wartości 120 MPa, w celu pokazania bardziej przejrzystego rozkładu pól naprężeń maksymalnych.

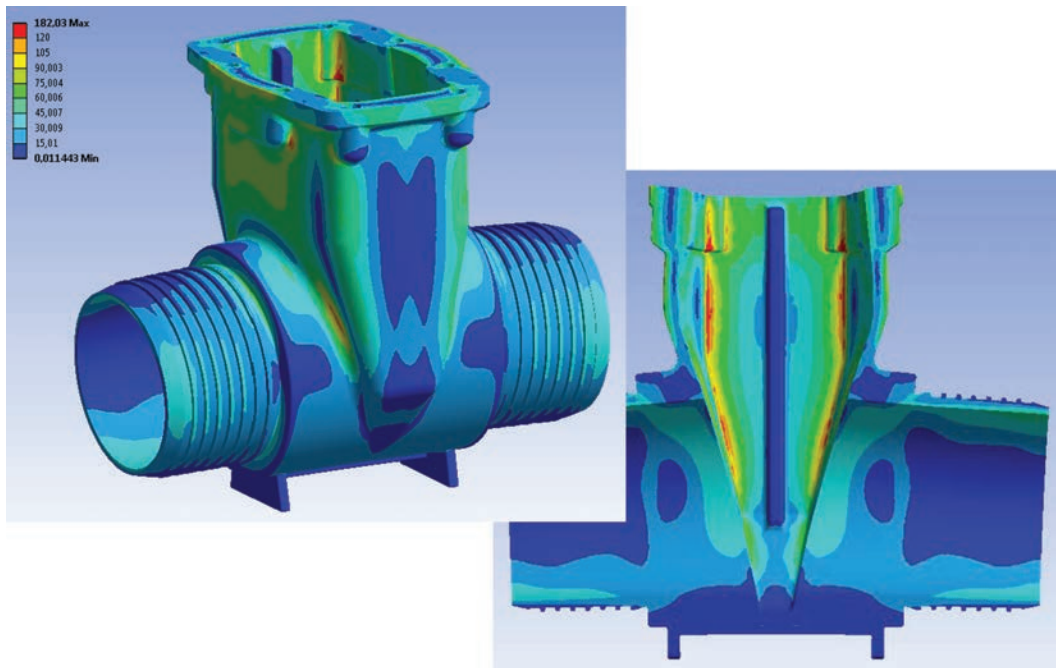
Analiza rozkładu naprężeń zredukowanych wskazuje na silną koncentrację pól naprężeń o maksymalnych wartościach, głównie w obszarach promienia zaokrąglenia pionowych ścian płaszcza korpusu oraz na nabach bocznych modelowanych w górnej części kołnierza od wewnętrznej części kanału przepływowego. Dodatkowo, pola o zbliżonych do maksymalnych, wartościach naprężeń zredukowanych występują na promieniu przejścia płaszcza pionowego z kanałem łączącym króćce korpusu.



Rys. 24. Rozkład pól maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych wg von Misesa, dla zestawu modelowego zasuw DN150



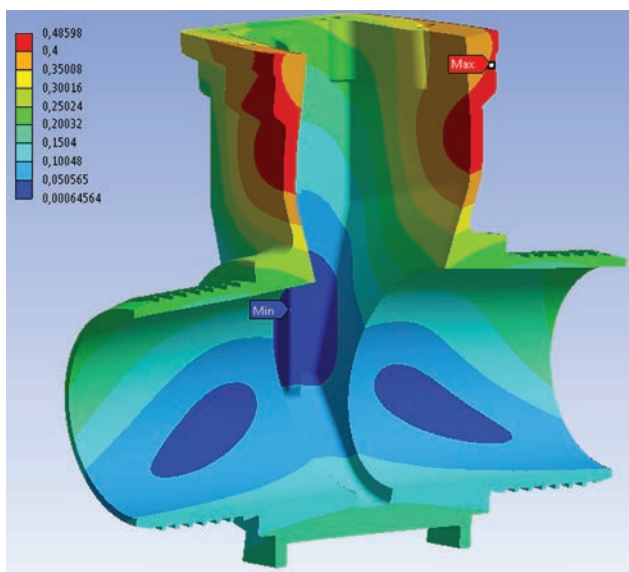
Rys. 25. Rozkład maksymalnych wartości przemieszczeń dla zestawu modelowego zasuw DN150



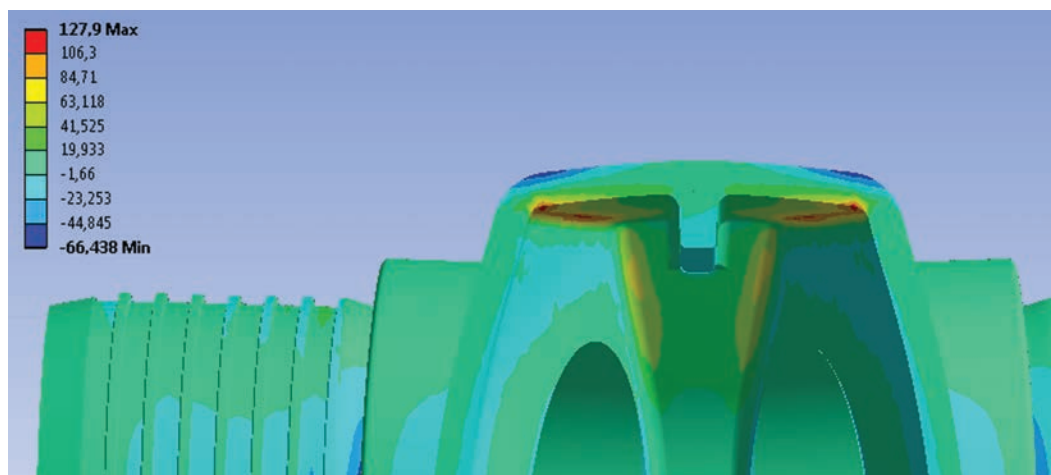
Rys. 26. Rozkład pól maksymalnych wartości naprężeń zredukowanych wg von Misesa, dla korpusu DN150

Analizując rozkład przemieszczeń w omawianym odlewie korpusu, zaobserwować można, podobnie jak w przypadku odlewu korpusu DN50, że maksymalne odkształcanie odlewu następuje na bocznych ściankach konstrukcji, gdzie istnieją największe powierzchnie płaskie, bez żeber wzmacniających, jednak wartości tych przemieszczeń nie powinny wpłynąć na trwałe odkształcanie konstrukcji. Schemat rozkładu przemieszczeń w analizowanej konstrukcji pokrywy przedstawiono na rysunku 27. Zaobserwować można równomierny rozkład przemieszczeń, występujący symetrycznie po obu stronach odlewu, a maksymalne wartości nie przekraczają 0,5 mm.

Na podstawie uzyskanych wyników rozkładu naprężeń zredukowanych, określonych w trakcie symulacji próby szczelności, zaobserwować można obszary wokół promienia zaokrąglenia płaszcza pionowego korpusu, gdzie występuje silna koncentracja naprężeń o maksymalnych wartościach. Analiza rozkładu naprężeń normalnych, wzdłuż osi X oraz Z, wykazała występowanie sąsiadujących obszarów o silnie zmiennych znakowo naprężeniach powodujących dwukierunkowe rozciąganie i ściskanie analizowanych obszarów, a więc niekorzystne z punktu widzenia prawidłowej pracy konstrukcji. Wyniki analizy omawianych przykładów zaprezentowano na rysunkach 28 oraz 29. Jak widać na rysunku 28, obszary występowania naprężeń dodatnich i ujemnych zlokalizowane są po przeciwnej stronie ścianki bocznej korpusu.

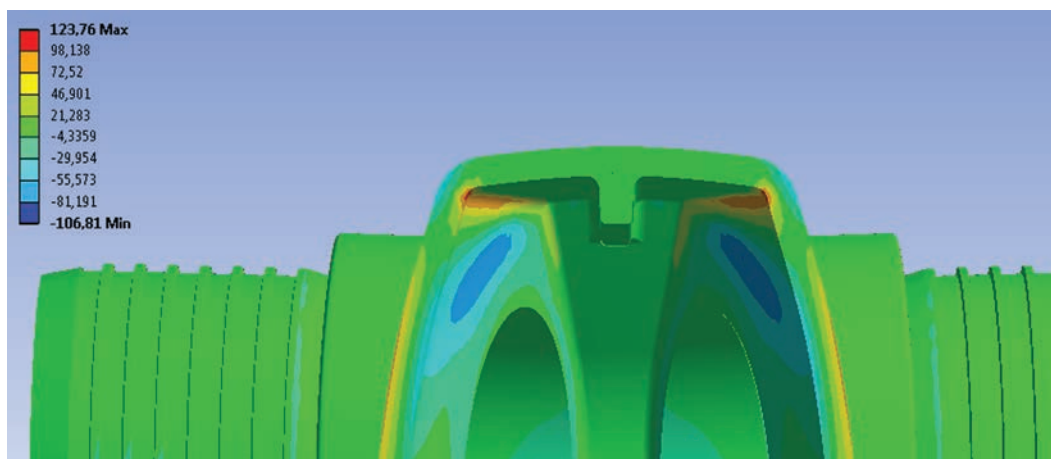


Rys. 27. Rozkład przemieszczeń w korpusie DN150 z zaznaczonymi obszarami minimalnej i maksymalnej wartości

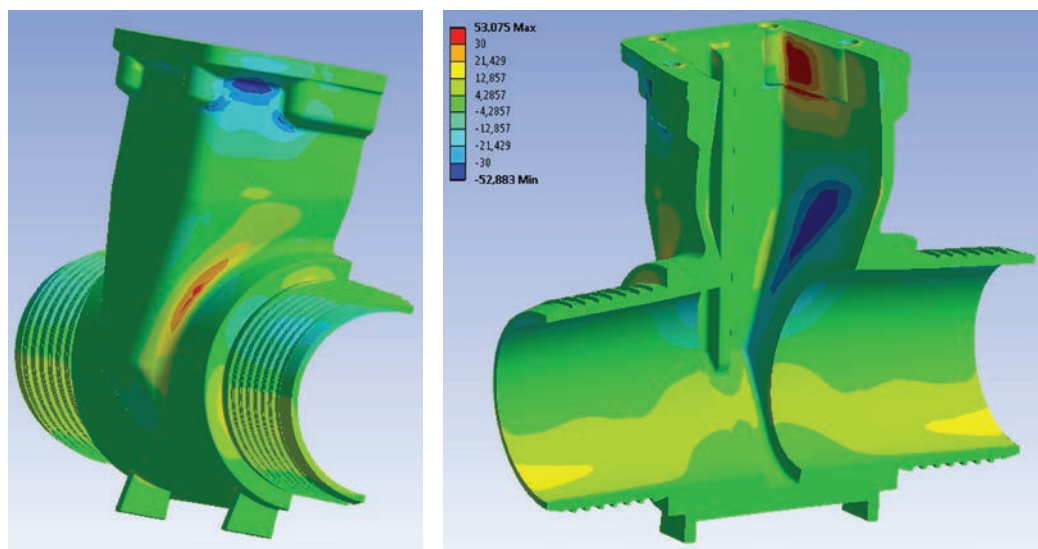


Rys. 28. Naprężenia normalne wzdłuż osi podłużnej X korpusu DN150

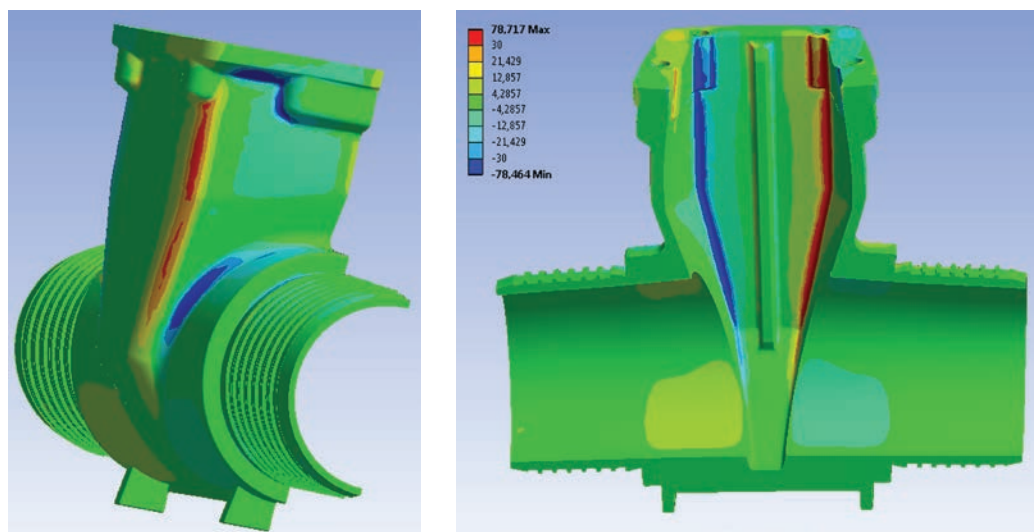
Potwierdzeniem występowania obszarów powodujących ścinanie w konstrukcji opracowanego korpusu jest rozkład naprężeń ścinających działających w płaszczyźnie YZ, przedstawiony na rysunku 30, gdzie wartości naprężeń ścinających ograniczono w zakresie +30 MPa do -30 MPa oraz na rysunku 31, gdzie przy tej samej skali ograniczenia naprężeń rozciągających i ściskających przedstawiono działanie i charakter rozkładu pól naprężeń ścinających działających w płaszczyźnie poziomej XZ.



Rys. 29. Naprężenia normalne wzdłuż osi pionowej Z korpusu DN150



Rys. 30. Naprężenia ścinające w płaszczyźnie YZ dla odlewu korpusu DN150



Rys. 31. Naprężenia ścinające w płaszczyźnie XZ dla odlewu korpusu DN150

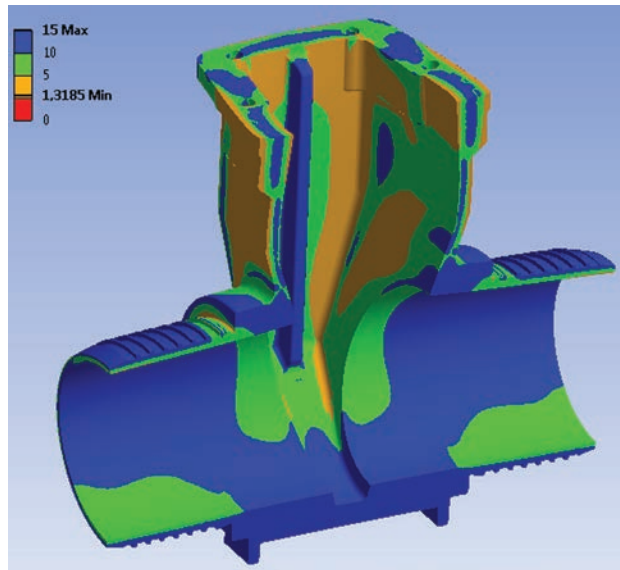
Przedstawione na rysunkach rozkłady naprężeń w analizowanej konstrukcji korpusu DN150, jednoznacznie wskazują, że niewralgicznym miejscem w analizowanym detalu jest promień zaokrąglenia pionowych ścianek bocznych płaszcza korpusu. Dalsze prace powinny być więc ukierunkowane na zmianę jego wartości i zwiększenie promienia zaokrąglenia powierzchni bocznej konstrukcji.

Podobnie jak w przypadku poprzednich zasuw serii DN50, określenie szacowanego współczynnika bezpieczeństwa konstrukcji pozwoliło potwierdzić, że omówione powyżej pole silnej koncentracji naprężeń daje odpowiedź w postaci najniższej wartości współczynnika bezpieczeństwa dla konstrukcji korpusu odlewane. Uzyskany szacunkowy rozkład współczynnika  $\sigma_w$  przedstawiono na rysunku 32.

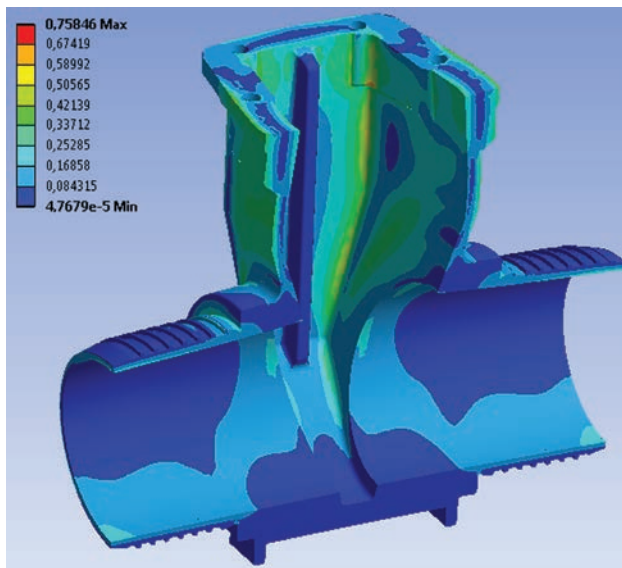
Dodatkowo, dla omawianego korpusu oszacowano stosunek wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych, występujących w analizowanej konstrukcji w odniesieniu do umownej granicy plastyczności żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15, z którego wykonywany jest korpus. Rozkład omawianych wartości, przedstawiony na rysunku 33, wskazuje, że maksymalne naprężenia występujące w odlewie osiągają 75% wartości granicy plastyczności, co jednoznacznie przekłada się na oszacowany współczynnik bezpieczeństwa konstrukcji, którego minimalna wartość w analizowanym elemencie  $\sigma_w \geq 1,3$ .

W ostatnim etapie przeprowadzonych analiz określono maksymalne wyężenie materiału konstrukcji odlewanej pokrywy do zasuw DN150. Z przeprowadzonych analiz rozkładu naprężeń zredukowanych wg von Misesa wynika, że obszarem występowania maksymalnych pól naprężeń jest boczna strona kołnierza wzmacniającego, pomiędzy dwoma otworami na śruby mocujące oraz promień przejścia powierzchni na wewnętrznej ściance korpusu. Analizowane obszary przedstawione zostały na rysunku 34 w dwóch widokach ustawienia pokrywy zasuw. Dokładniejsza analiza zaprezentowanych wyników pozwala stwierdzić, że maksymalne naprężenia nie osiągają dużych wartości, a zaznaczone na czerwono obszary związane są głównie z występowaniem promienia

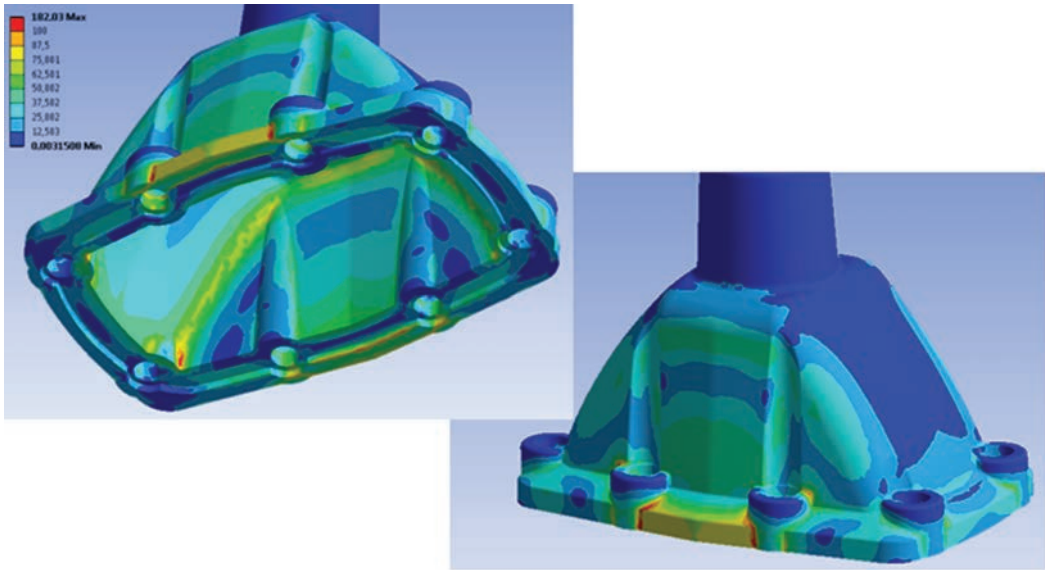
zaokrąglenia o zbyt małej wartości. Największe wartości naprężeń zredukowanych zlokalizowane są właśnie w obszarach o dużej nierówności modelowanej powierzchni.



Rys. 32. Rozkład współczynnika bezpieczeństwa konstrukcji korpusu DN150

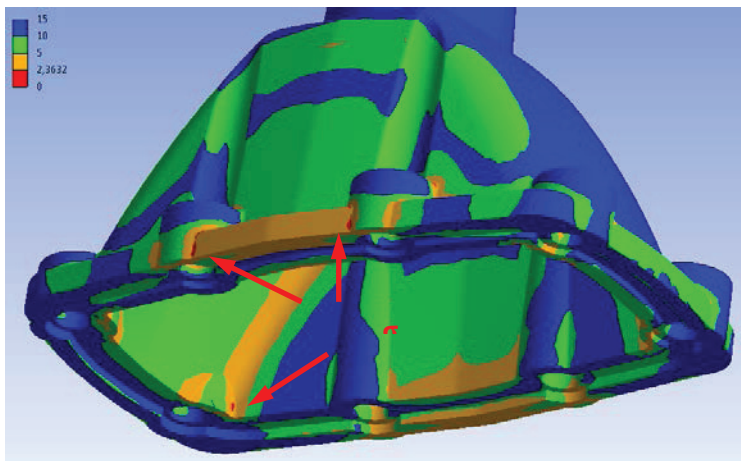


Rys. 33. Rozkład stosunku naprężeń zredukowanych do umownej granicy plastyczności materiału konstrukcji odlewanego korpusu DN150



Rys. 34. Rozkład naprężeń zredukowanych w odlewanej pokrywie DN150

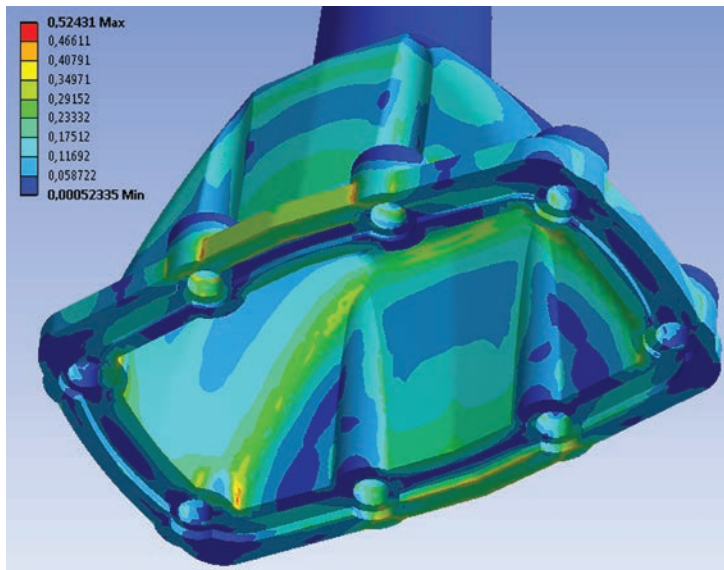
Oszacowane wartości współczynnika bezpieczeństwa dla omawianej konstrukcji pokrywy DN150 oraz rozkład zakresów występowania jego minimalnych wartości w odlewie, przedstawiony został na rysunku 35. Wyższa jego wartość ( $\sigma_w \geq 2,3$ ) w porównaniu do odlewu korpusu potwierdza, że analizowana konstrukcja posiada pola naprężeń o niższych wartościach maksymalnych, a minimalna wartość współczynnika bezpieczeństwa zlokalizowana jest głównie na newralgicznych promieniach przejścia w modelowanej konstrukcji pokrywy.



Rys. 35. Rozkład współczynnika bezpieczeństwa pokrywy DN150 z zaznaczonymi obszarami występowania jego najniższej wartości w polach powierzchniowych



Dla pokrywy DN150 również oszacowano rozkład współczynnika opisującego stosunek wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych określonych w trakcie symulacji numerycznej w odniesieniu do umownej granicy plastyczności materiału, z którego wykonywany jest odlew pokrywy. Rozkład oszacowanej wartości stosunku tych zależności przedstawiono na rysunku 36. Maksymalne wartości naprężenia zredukowanego występujące w odlewie osiągają około 53% wartości granicy plastyczności, co przekłada się na dużo wyższe bezpieczeństwo pracy konstrukcji w warunkach eksploatacji w sieci gazowej.



Rys. 36. Rozkład stosunku naprężeń zredukowanych do umownej granicy plastyczności materiału konstrukcji odlewanej pokrywy DN150

## Wnioski

- Analizy numeryczne rozkładu naprężeń w odlewanych elementach konstrukcji zasuw miękko uszczelnionych dla sieci gazowych z rur PE zakładały przeprowadzenie obliczeń dla ciśnień działających na kanał przepływowy zasuw, zgodnych z wytycznymi próby szczelności, dla ciśnienia próby wynoszącego  $p_{pr} = 2,4$  MPa. Zakładane ciśnienie badania szczelności zasuw jest około 2–4 razy wyższe niż ciśnienie panujące w gazowej sieci średniego lub podwyższonego ciśnienia. Podwyższone ciśnienie próby miało na celu wyeliminowanie błędów zaprojektowanej konstrukcji elementów składowych zasuw i wad mogących istnieć w odlewach w przypadku chwilowego, znacznego wzrostu ciśnienia w sieci gazowej.
- W trakcie prowadzonych symulacji numerycznych procesu eksploatacji poszczególnych odlewanych części składowych zasuw dla sieci gazowej z rur PE określano rozkład naprężeń i przemieszczeń w trakcie obciążania ciśnieniem próby. Ze

względu na charakter pracy szczególny nacisk położono na analizę numeryczną korpusu i pokrywy, dla wytypowanych zasuw gazowych. Przeprowadzone analizy pozwoliły określić maksymalne wartości naprężeń zredukowanych, określone wg teorii von Misesa i zidentyfikować krytyczne obszary występowania pól naprężeń maksymalnych dla wybranych konstrukcji odlewów żeliwnych.

- Przeanalizowane przypadki zarówno korpusów, jak i pokryw serii DN50 oraz DN150 wykazały występowanie maksymalnych naprężeń o wartościach niższych od znormalizowanej, umownej granicy plastyczności wybranego żeliwa EN-GJS-400-15. Zakładając, dla wybranych konstrukcji, przyjęte przez konstruktora na etapie projektowania współczynniki bezpieczeństwa oraz znacznie wyższe ciśnienie eksploatacji wynikające z ciśnienia próby szczelności, należy stwierdzić, że wszystkie wytypowane do analiz konstrukcje żeliwnych pokryw oraz korpusów spełniają wymogi bezpieczeństwa przewidziane dla konstrukcji zasuw dla sieci gazowej średniego lub podwyższonego ciśnienia, a rzeczywiste warunki pracy powinny zapewnić ich bezawaryjną eksploatację. Przeprowadzone analizy numeryczne procesu odkształcania konstrukcji w trakcie obciążania ciśnieniem próby wskazują na możliwość pojawienia się niewielkich wartości przemieszczeń w elementach odlewanych, które jednak, ze względu na duże wydłużenie żeliwa sferoidalnego EN-GJS-400-15, nie mają negatywnego wpływu na warunki eksploatacji zasuw. Dodatkowo, określony w trakcie przeprowadzonych analiz numerycznych, szacowany współczynnik bezpieczeństwa oraz współczynnik nadwyżki wytrzymałości materiału konstrukcji w stosunku do umownej granicy plastyczności żeliwa EN-GJS-400-15, wskazuje na wyższy zakres bezpieczeństwa pracy dla zasuw gazowych z rur PE. W trakcie prowadzonych analiz zidentyfikowano obszary w konstrukcji korpusów i pokryw, w których następuje silna koncentracja naprężeń maksymalnych. Dla wybranych obszarów, zlokalizowanych głównie na promieniach przejścia powierzchni bocznych korpusów i pokryw zaproponowano zmianę wartości tych promieni przez konstruktora odlewów, tak aby wyeliminować możliwość wystąpienia w tych miejscach silnych koncentracji naprężeń. Tak przeprowadzone, niewielkie zmiany w konstrukcji elementów odlewanych, nie wpłyną na proces przepływu medium przez kanały przelotowe zasuw, a przyczynią się do znacznego zwiększenia bezpieczeństwa konstrukcji, przy założeniu możliwości stosowania wybranych zasuw dla znacznie wyższych ciśnień eksploatacji w sieci gazowej.
- Dla wybranych konstrukcji klinów ogumowanych, przy analizie numerycznej obciążania konstrukcji pod wpływem ciśnienia próby szczelności, nie stwierdzono występowania dużych naprężeń mających znaczący wpływ na proces eksploatacji kompletnych zasuw gazowych z króćcami z rur PE.

## Podziękowania

Publikacja powstała w oparciu o wyniki badań przemysłowych wykonywanych w ramach projektu celowego CI ROW-III-209/2012 pt.: „Opracowanie i wdrożenie do produkcji typoszeregu zasuw klinowych z króćcami z rur PE do gazociągów z rur PE”. Autorzy realizujący badania przemysłowe z ramienia Instytutu Odlewnictwa w Krakowie

dziękują Szefowi Rozwoju Fabryki Armatur JAFAR SA Mieczysławowi Nowakowi za współpracę przy realizacji tych badań.

## Literatura

1. Gwiżdż A., Żuczek R.: *Opracowanie modelu 3D zasuw klinowych do gazu, analiza stanu naprężeń w konstrukcjach odlewu korpusu, pokrywy i klina*. Sprawozdanie z zadania nr 2 projektu celowego CI NOT ROW-III-209/2012.
2. Hindurao D.V., Chavan D.S.: *Optimization of 16" plug valve body using FEA and Experimental Stress analysis method*. International Journal of Mechanical Engineering, 2011, Vol. 1, No. 1, pp. 79–83.
3. Allison J., Backman D., Christodoulou L.: *Integrated Computational Materials Engineering: A New Paradigm for the Global Materials Profession*. JOM, 2006, Vol. 58, No. 11, pp. 25–27.
4. Allison J.E.: *Integrated Computational Materials Engineering (ICME) for Mg: International Pilot Project*. Ford Motor Company, April 2010.
5. Warrick R.J., Althoff P., Druschitz A.P., Lemke J.P., Zimmerman K.: *Austempered Ductile Iron Castings for Chassis Applications*. Society of Automotive Engineers, 2000 World Congress, Detroit, March 6–9, 2000.
6. Maj M., Piekło J.: *MLCF – an optimised program of low – cycle fatigue test to determine mechanical properties of cast materials*. Archives of Metallurgy and Materials, 2009, Vol. 54, No. 2, pp. 393–397.
7. Wowra S.: *Obliczenia równoległe w ANSYS*. Konferencja ANSYS – Symulacja 2010, Tarnowskie Góry, 2010.
8. Ignaszak Z., Popielarski P., Hajkowski J., Prunier J.B.: *Problem of Acceptability of Internal Porosity in Semi-Finished Cast Product as New Trend – “Tolerance of Damage” Present in Modern Design Office*. Defect and Diffusion Forum, 2012, Vols. 326–328, pp. 612–619. Online available since 2012 Apr/26 at [www.scientific.net](http://www.scientific.net), Trans Tech Publications, Switzerland, 2012, doi:10.4028/www.scientific.net.DDF.326-328.612.
9. Gazda A.: *Kompleksowa baza danych właściwości termofizycznych metali, stopów oraz materiałów formierskich i ceramicznych w aspekcie projektowania odlewów*. [W:] Innowacje w odlewnictwie. Część I. Instytut Odlewnictwa, Kraków, 2007, s. 311–318.
10. Ignaszak Z., Mikołajczyk P.: *Problem empirycznych parametrów pre-processingu na przykładzie symulacji krzepnięcia i zasilania odlewów z żeliwa sferoidalnego*. [W:] Innowacje w odlewnictwie. Część I. Instytut Odlewnictwa. Kraków 2007, s. 301–310.

## ANALYSIS OF THE STATE OF STRESS IN CAST BODIES, COVERS AND WEDGES OF THE WEDGE GATE VALVES USED IN GAS NETWORKS

*Andrzej Gwiżdż, Robert Żuczek<sup>1</sup>, Mieczysław Nowak<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

<sup>2</sup>*JAFAR SA Fittings Factory, 38-207 Przysieki 87*

### **Abstract**

*Numerical analysis was carried out to establish the operating stress distribution in soft-sealed gate valves cast from ductile iron EN-GJS-400-15 for the gas network of PE pipes. The analysis was carried out with ANSYS software, based on data and documentation of actual test conditions used at the JAFAR SA Fittings Factory. The use of ANSYS software allowed integration between the results of numerical analysis of the developed virtual structure loaded with test pressure and the response of real structure obtained during laboratory tests carried out on a stand for pressure leak testing, with further possibility of a verification of the results, both virtual and real. This publication presents the results of the analysis carried out on DN50 and DN150 gate valves. Through dimensional corrections introduced to the design, the results of this analysis will be used in verification of castings operating as components in models of the wedge gate valves.*

*Keywords: computer-aided foundry production, simulation of stress distribution, cast iron fittings*

### **Introduction**

The use of modern techniques of design and structure analysis enables getting quickly the satisfactory results at a relatively low labour input during the design stage, thus providing new valuable information to which there is no access other than through virtualisation. The use by the engineers from various industries of computer softwares to simulate real phenomena significantly reduces the time necessary to introduce a new element of design to the market, without the need for costly series of laboratory tests, and manufacture of numerous elements in prototype series.

Upgrading the production of fittings, that is, going up to a higher and more sophisticated level of the manufacture of valves for the PE gas pipelines, will be done in a manner integrated with the modern technique of design. This requires an analysis of both the structure and technology conducted at the design stage and creating a 3D model appropriate for this purpose. As part of this project, 3D models of components

and of products integrated with these components were developed. Using MAGMAstress and ANSYS computer simulation programmes, the developed models were next used in simulation and mechanical testing of components and in analysis of the state of stress in structures of the valve body, cover and wedge cast from ductile iron EN-GJS-400-15 [1].

## **Numerical analysis of stress distribution in cast parts of the soft-sealed gate valves for the PE gas pipeline system**

Numerical analysis of the operating stress distribution in gate valves cast from ductile iron EN-GJS-400-15 was carried out on ANSYS software, based on data and documentation of actual test conditions used at the JAFAR SA Fittings Factory. The use of ANSYS software allowed integration between the results of numerical analysis of the developed virtual structure loaded with test pressure and the response of real structure obtained during laboratory tests carried out on a stand for pressure leak testing, with further possibility of a verification of the virtual results by comparing them with the real ones obtained on new, pressure leak tested valves.

The use of modern techniques of design and structure analysis enables getting quickly the satisfactory results during the design stage. The use by the engineers from various industries of computer softwares to simulate real phenomena significantly reduces the time necessary to introduce a new element of design to the market, without the need for costly series of laboratory tests, and manufacture of numerous elements in prototype series.

ANSYS software is one of the leading programmes using the finite element method (FEM) in broad analysis – structural, thermal, electromagnetic, acoustic, and of fluid mechanics. The latest versions of the software are provided with user-friendly interface, integrated into the Workbench environment, together with the CAD environment – DesignModeler, for advanced surface-solid modelling. The software enables automation of procedures of finite element mesh generation using access to the library of advanced features, while maintaining full user control over the parameters of the created mesh [2, 6, 7, 8].

ANSYS License available at the Foundry Research Institute enables performing advanced numerical computations and coupled analysis in the following areas:

- a. strength analysis – linear and non-linear phenomena, static and dynamic, free vibration of the structure and harmonic analysis, transient states, kinematics, fracture mechanics and phenomena related with laminates and composites;
- b. thermal analysis – steady and time-varying temperature fields, phase changes, convection, radiation, steady and transient heat transfer;
- c. analysis of fluid dynamics – laminar and turbulent flows, compressible and incompressible fluids, heat transfer and phenomena of liquid flow-surrounding wall interaction, boundary layer modelling and mixing of fluids;
- d. coupled analysis (multiphysics) – allowing simultaneously for the impact of mechanical and thermal loads, interactions between the flowing medium and flow channel structure, etc.

The ANSYS software version used in the conducted numerical analysis, in addition to basic, fairly limited, thermophysical and mechanical properties database, has been enriched with the full version of the IDAC database, taking into account the data for a range of various materials, not just metals, with particularly enhanced NonLinear IDAC database containing a number of curves illustrating the strength and fatigue life of selected materials as a function of temperature. The databases already possessed have also been extended to include full characteristics of selected casting alloys, based on data given in the literature and own research conducted at the Foundry Research Institute [9].

Numerical simulations were preceded by a thorough analysis of the provided 2D documentation of the analysed design (prepared in CAD system), based on which modelling was done for the 3D solids of the valve bodies, covers and rubber-coated wedges, including auxiliaries used in the conducted analysis.

### ***Solid modelling of selected designs of the valve bodies, covers and wedges***

Based on the 2D CAD documentation developed by JAFAR SA for the numerical analysis of stress distribution, solid models were developed for bodies, covers and rubber-coated wedges of the DN50 and DN150 gate valves. The 3D models were prepared using SolidWorks software. Because of the necessity to simplify to maximum models for the numerical analysis, the sealing elements were not modelled for the selected types of valves, but were included in the boundary conditions provided by the ANSYS programme.

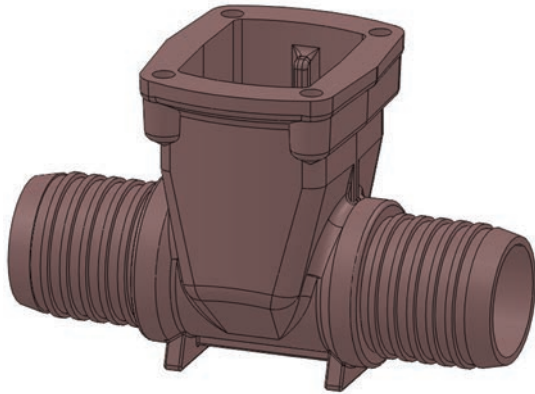
In the conducted numerical analysis, after previous arrangements made with the JAFAR SA Fittings Factory, special emphasis was put on the stress verification in bodies of selected gate valves and on the identification of critical sites, where high stress concentrations might be expected to occur during laboratory tests and subsequent operation under real conditions.

The first modelled set was gate valve from the DN50 series. A 3D model of the body design shown in Figure 1 was developed.

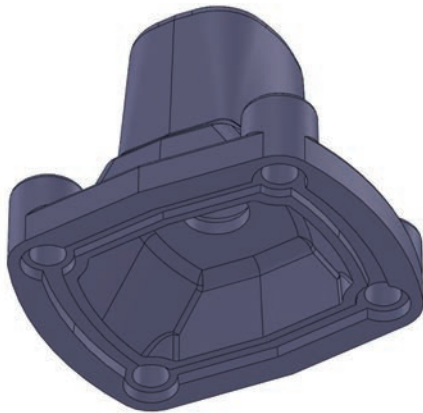
The overall dimensions of the modelled structure were as follows: body length between the stub connection ends  $L = 225$  mm, maximum height  $H = 143$  mm, diameter of the inside body channel  $\varnothing = 50$  mm. The modelled body had four holes in the flange to secure the cover presented in Figure 2.

In a model of the cover presented here, initial digitisation was carried out for the design of the fixing hole shown in Figure 3, to minimise the FEM model complexity for numerical analysis.

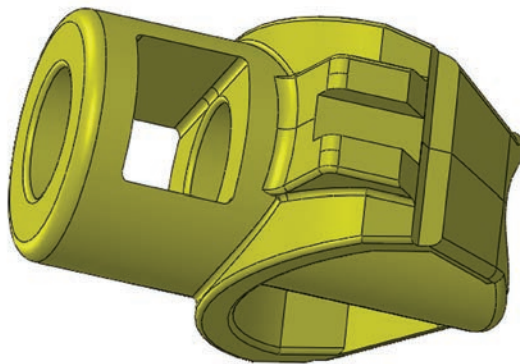
Based on the developed solid models of the body and cover, a model set of the DN50 gate valve was prepared to be used next in the laboratory pressure leak test. The model is shown in Figure 4. To make as-built model for the simulation of stress distribution in the body and cover of the DN50 series gate valves, modelling covered fragments of the PVC pipes (grey), mounted on stub connections of the gate valve body, and screws (red) fastening cover to the body, mainly to illustrate the true nature of deformation experienced by the entire model set.



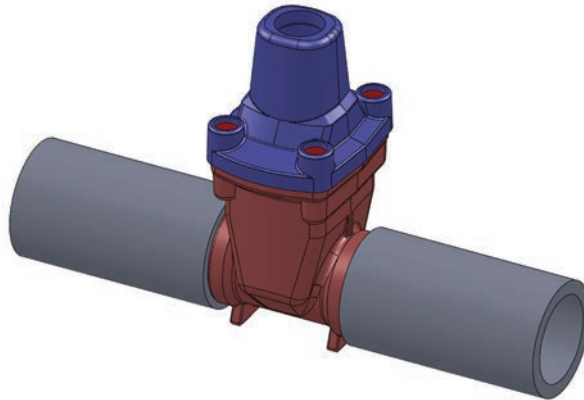
*Fig. 1. Solid model of the DN50 gate valve body*



*Fig. 2. Solid model of the DN50 gate valve cover*

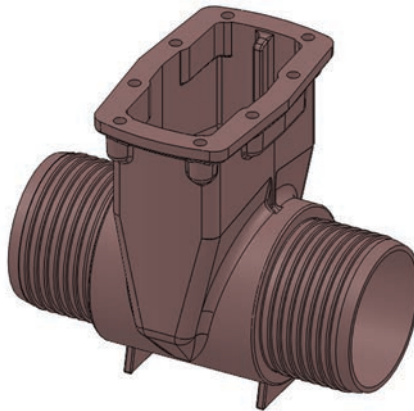


*Fig. 3. Solid model of the DN50 gate valve wedge*



*Fig. 4. As-built solid model of the DN50 gate valve*

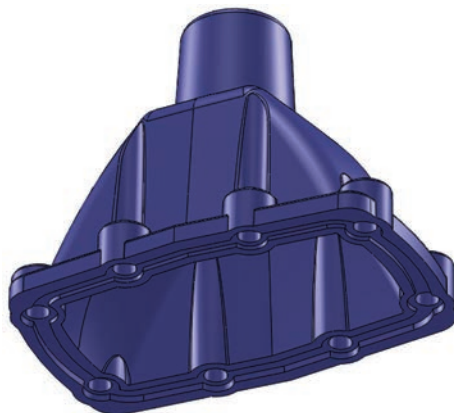
The second modelled set used in the numerical simulation of the loading process was gate valve from the DN150 series. A solid structure of its body is shown in Figure 5.



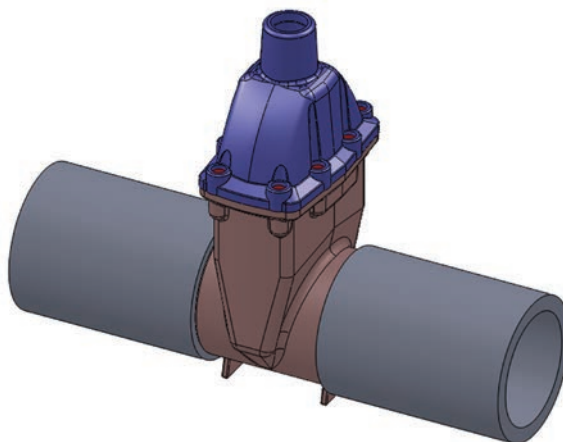
*Fig. 5. Solid model of the DN150 gate valve body*

The overall dimensions of the largest of the bodies selected from the DN150 series were as follows: body length between the stub connection ends  $L = 350$  mm, maximum height  $H = 309$  mm, diameter of the inside body channel  $\varphi = 129$  mm. The DN150 gate valve cover, presented in Figure 6, is screwed to the body with eight fastening screws.





*Fig. 6. Solid model of the DN150 gate valve cover*



*Fig. 7. As-built solid model of the DN150 gate valve*

### ***Discretisation of models of the cast gate valve elements in ANSYS software***

Based on the ready as-built solid models of the gate valves, export of complete as-assemblies was performed to ANSYS, and then in a DesignModeler module, the imported structures were tested to eliminate possible errors and incorrect surfaces.

For the numerical analysis of operating conditions, ductile iron according to the EN-GJS-400-15 Standard of the basic mechanical properties given in Table 1 was selected.

Table 1. Basic mechanical properties of the EN-GJS-400-15 ductile iron adopted in numerical analysis

Density	7100 kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus	159 000 MPa
Poisson ratio	0.27
Tensile strength R <sub>m</sub>	min. 400 MPa
Yield strength R <sub>0,2</sub>	min. 250 MPa

For the cast iron of EN-GJS-400-15 grade, the data were selected from a database of physico-chemical and mechanical properties available in ANSYS, and then necessary modifications were introduced to this information, expanding it with the data on mechanical properties available in resources of the Foundry Research Institute. The description of the modified casting alloy used in the numerical analysis of the loading process included full characteristics obtained in the static tensile test carried out in laboratory on several alloys and data completed with information taken from the IDAC database. For the need of the simulation, the effect of the screws fixing the valve body and cover was modelled, adopting as a standard material for screws the Fe/Zn5 stainless steel and selecting appropriate characteristics from the ANSYS database. For the as-built model loaded in DesignModeler software, a standard deformable PVC material was selected from the programme database as most appropriate for the plastic pipes, modelled for the needs of the pressure test simulation.

The imported model of gate valve with fragments of plastic pipes was provided with basic parameters of an interaction between various elements of the as-built assembly and with the boundary conditions of pressure and mounting of free surfaces. The modelled loading mode and the description of boundary conditions, as well as models of contact between individual elements of the as-built assembly are shown in Figure 8.

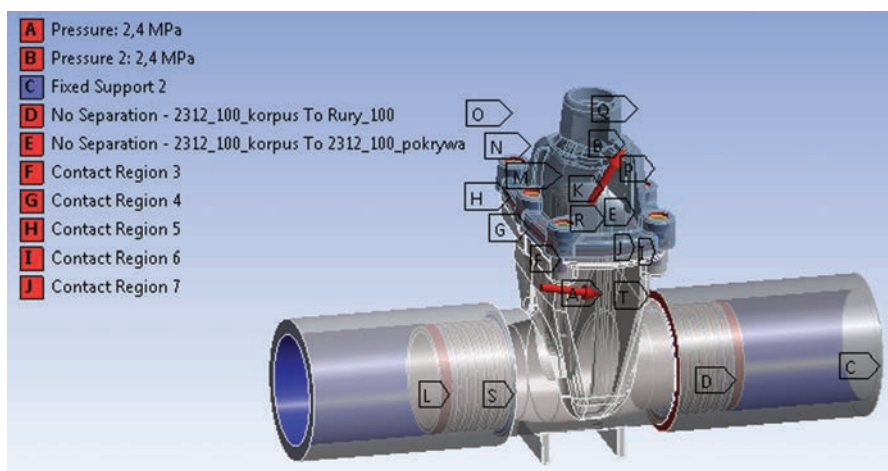
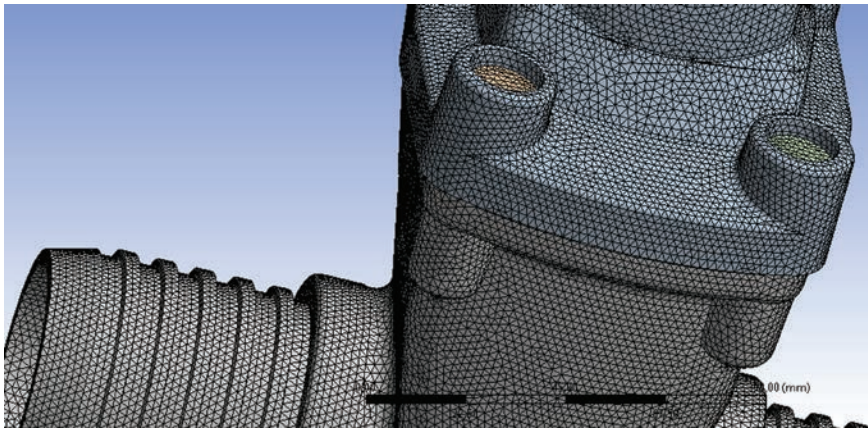


Fig. 8. Loading mode, basic boundary conditions and contact areas adopted in a numerical analysis of the gate valve model loading process

Based on the preliminary analysis of the results of the gate valve loading test with automatically run discretisation using standard FEM mesh elements, critical places in the structure of the valve body and cover were identified, for which, additionally, optimum parameters of the FEM mesh were selected manually. For the numerical analysis of the loading process, advanced shapes of the finite element mesh were used, which were 10-node tetragonal elements, allowing for the possible emergence of non-linear phenomena during the study. The wedge model used the same finite elements, only for models of the plastic pipes, 20-node hexagonal elements were used. Those were through-wall cubic structures having, in addition to vertex points, other points on each side edge of the structure to significantly reduce the amount of FEM elements in the areas of low importance for the conducted numerical analysis. A fragment of the gate valve model with a tetragonal mesh of FEM elements on the modelled body, cover and fixing screws is shown in Figure 9.



*Fig. 9. Discretisation of the DN50 gate valve model using modified mesh of tetragonal finite elements*

Generally, in the conducted analysis, models were used which consisted of the smallest possible number of finite elements, allowing for a most correct discretisation of various components of the gate valves, while maintaining optimal computation time and quality of the results obtained. ANSYS programme enables the finite element "quality" estimation, and thus improved accuracy of the calculations carried out. A chart showing the "quality" of FEM elements used in the analysis is displayed in Figure 10, based on the example of an analysis of the DN50 gate valve mesh elements.

To eliminate errors in FEM mesh, which can introduce errors in the numerical calculations, the "quality" of the received elements should be in a range of 0.25–1.00. As seen in the graph above, in the performed calculations, the lowest accepted value amounts to about 0.48. Similarly, in the analysis of other diagnostic parameters of the mesh, it can be assumed that the selected mesh density and type of components used do not introduce errors in the ongoing analysis of the structure loading process for given types of the gate valves. For the purpose of the conducted analysis, the following size of the FEM mesh elements was adopted:

- DN50 gate valve: 833 867 of tetra and hexa elements,
- DN150 gate valve: 927 416 of tetra and hexa elements.

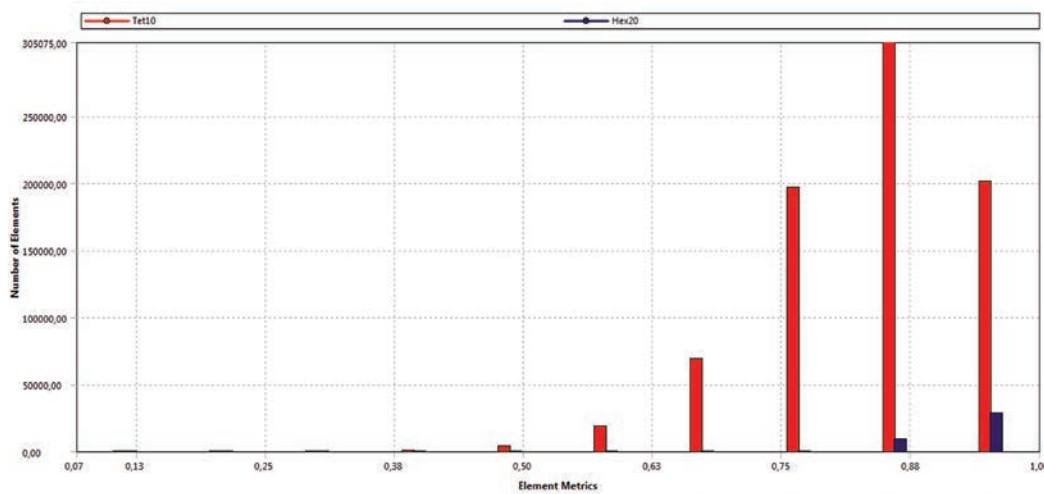


Fig. 10. "Quality" of FEM elements on the example of a DN50 gate valve

### **Numerical analysis of stress distribution in selected cast components of the gas gate valves during bench test**

Selected soft-sealed gate valves from the series DN50, DN100 and DN150 for natural gas system are operating under the conditions of medium or high pressure, i.e. in a range of  $p_{nom} = 0.5\text{--}1.6$  MPa, applied as a standard routine in gas networks. Based on the parameters adopted in a bench test, for selected gate valves for natural gas, the test pressure of  $p_{pr} = 2.4$  MPa was considered most appropriate. For the analysis, as a test load, pressure acting on the entire inner surface of the valve body shell and cover was adopted, including the initial pressure exerted by the cover on the body and originating from the screws driven home. Modelling of connecting pipes at the valve body stub connections was reduced to modelling of two rings, and between the stub connections and the pipe made of plastic, the type of contact most relevant for the deformable elements was assumed.

Numerical analysis of the distribution of stresses and displacements in selected structures under the influence of static loading with the test pressure included:

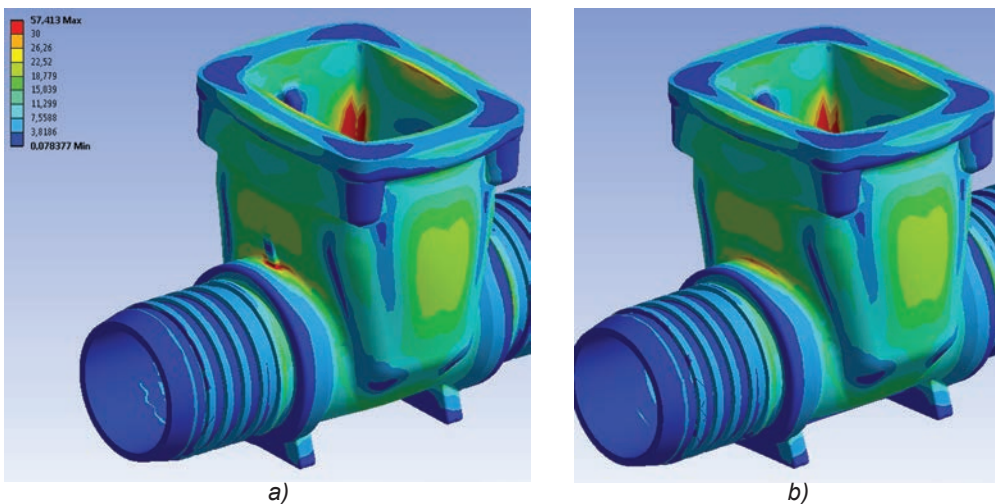
- determination of maximum stresses occurring in castings during the trial;
- identifying places with heavy concentration of the fields of stresses and proposals how to reduce their value by introducing small changes to the design of castings, however, with no interference into the design of flow channels;
- determination of maximum displacements occurring in castings under the influence of the operating load;

- determination of the estimated factor of safety for the developed structure design.

*NOTE: The stress distribution values are given in MPa, and the displacement in mm.*

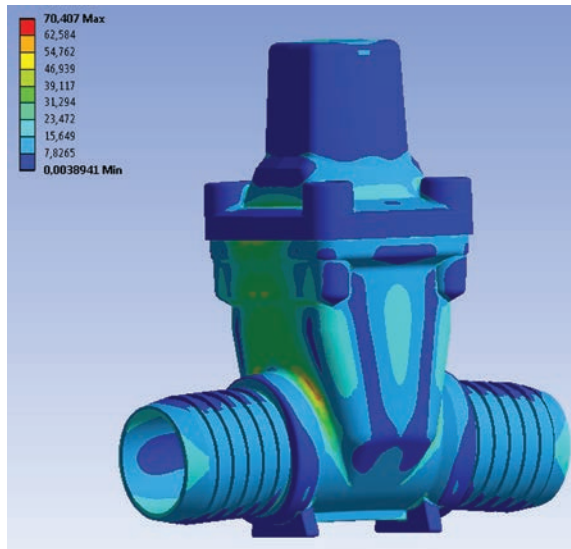
### **Soft-sealed DN50 gate valve**

For a model of the DN50 gate valve body, preliminary examination of stress distribution was carried out to determine the critical stress concentration sites. Calculations indicated stress concentration in vertical ribs reinforcing the structure, at a transition point between the stub connection flange and the valve body flange. Ribs introduced to the structure cause high stress concentration in this place which, during loading of the gate valve with operating pressure, may cause the onset and development of fatigue cracks and damages to the valve body. To release these stresses, the ribs were removed and it was checked how far their size could be reduced. Figure 11 compares the distribution of stresses in a loaded cast valve body design with the reinforcing ribs and after their removal from the modelled structure. The removal of ribs eliminated the high stress concentration occurring in these elements, and in further analysis, the proposed changes should be taken into account.

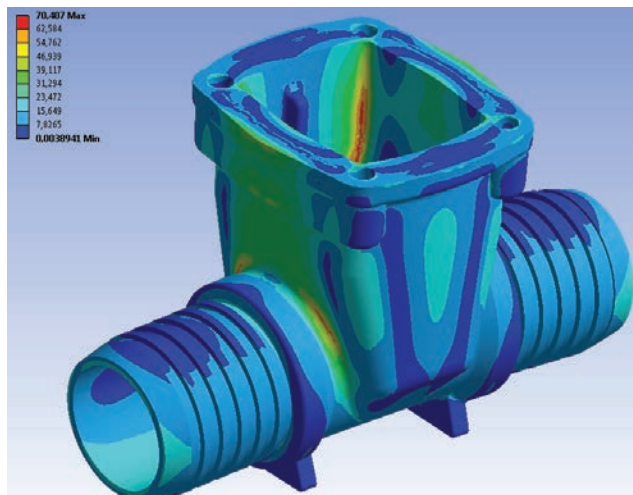


*Fig. 11. Stress distribution compared for the cast DN50 gate valve body with the reinforcing ribs (a) and without (b)*

For the proposed gate valve design, calculations were carried out at a given test pressure on a dense finite element mesh. Stress distribution in a model of the DN50 gate valve as-built assembly is shown in Figure 12, while for the body and the cover it is shown in Figures 13 and 14, respectively.



*Fig. 12. Reduced stress distribution in the DN50 gate valve*



*Fig. 13. Reduced stress distribution in the DN50 gate valve body*

From the conducted analysis of the stress distribution in castings of the valve body and cover it follows that the highest value of reduced stress in the cast body amounts to about 70 MPa, and the stress concentration area is mainly located in two regions, i.e. inside the body between the transition of the vertical walls, and in the radius connecting the flow channel flange with the vertical body shell. The stress distribution in the areas described above is shown in an enlarged view in Figure 15, allowing for the cross-section through a characteristic plane, and limiting the scale of the maximum value to 50 MPa, to better illustrate the distribution of the stress fields and places with the highest stress concentration.

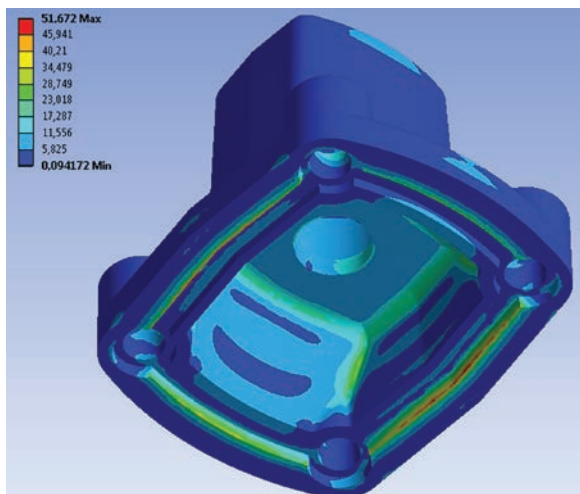


Fig. 14. Reduced stress distribution in the DN50 gate valve cover

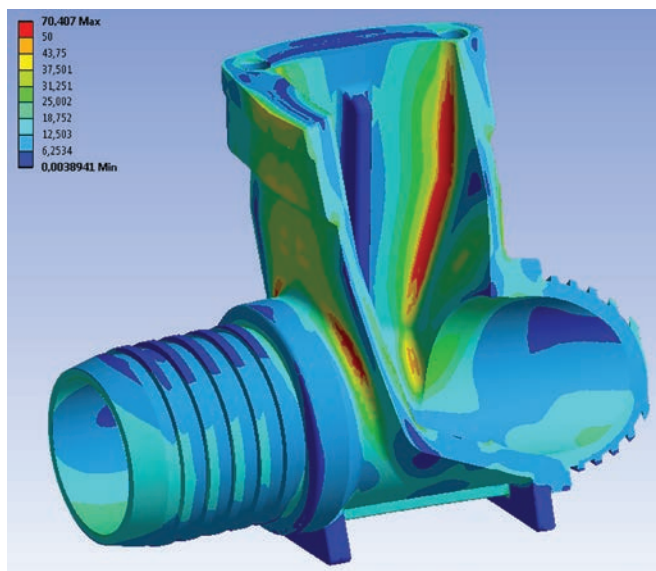


Fig. 15. Stress distribution in critical places of the cast DN50 gate valve body

Considering high pressure values used in the pressure leak test, the maximum stress values determined by simulation for the cast valve body, by being low compared to a minimum yield strength, do not threaten the correct operation of the gate valve assembly, even in the case of temporary overloading of the gas network with operating pressure and changes in flow dynamics.

The analysis of normal stress along the longitudinal axis of the valve body, disclosed in Figure 16, shows that the difference in maximum tensile and compressive stresses is

greater than 80 MPa, but no neighbouring of these stress fields has been observed, and hence there is no risk of the formation of gradient fields, which could give rise to the crack onset and propagation in the structural material.

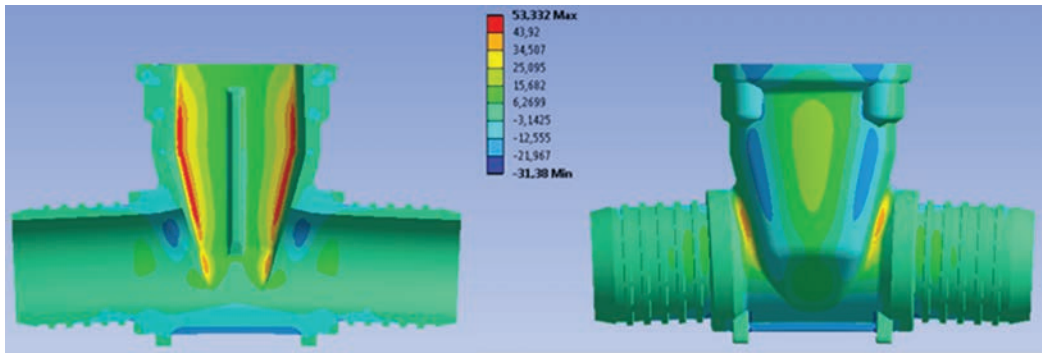


Fig. 16. Normal stress distribution on an axial section of the DN50 gate valve body

Using ANSYS software and assuming the presence of maximum operating stress, the analysis of the safety factor was conducted on a selected cast body of the DN50 valve. The estimated margin of safety for the selected valve body had a minimum value of 2.4 in the areas of the greatest material effort, thus yielding the estimated minimum value of the safety factor equal to  $\sigma_w \geq 3.4$ . The estimated distribution of the margin of safety values for the presented structure of the DN50 valve body is shown in Figure 17.

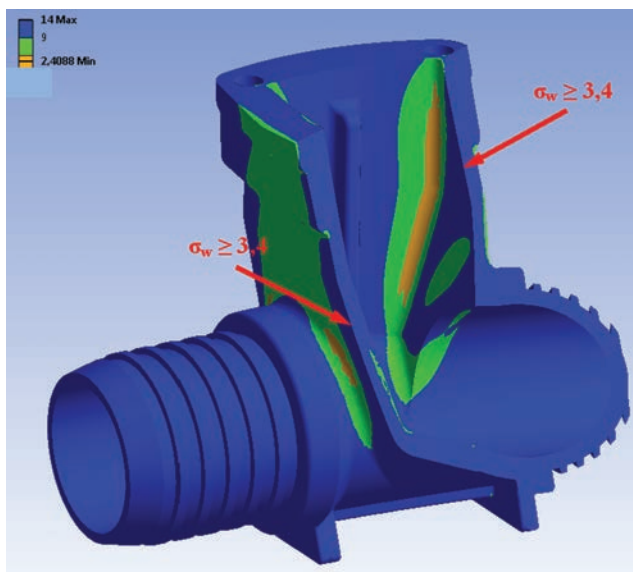


Fig. 17. Estimated distribution of the margin of safety values for the cast DN50 valve body with marked areas of the lowest safety factor  $\sigma_w \geq 3.4$



The analysis of stress distribution in the cast valve cover has not revealed the presence of high maximum stress values. The values of stresses did not exceed 52 MPa, and respective stress fields were mainly located in the fillet radii of the inner cover shell and cover-body contact edge, in the place where the boundary conditions were modelled for the cover-body interaction on loading of the model set. The distribution of stresses in the cast valve cover, assuming the test pressure acting on the inner surface, is shown in Figure 18 with the range of maximum values limited to 30 MPa to better highlight the places with high stress concentration. The obtained results indicate that the cast cover is operating within the range of the safe maximum stress values, well below the strength limit of the structural material.

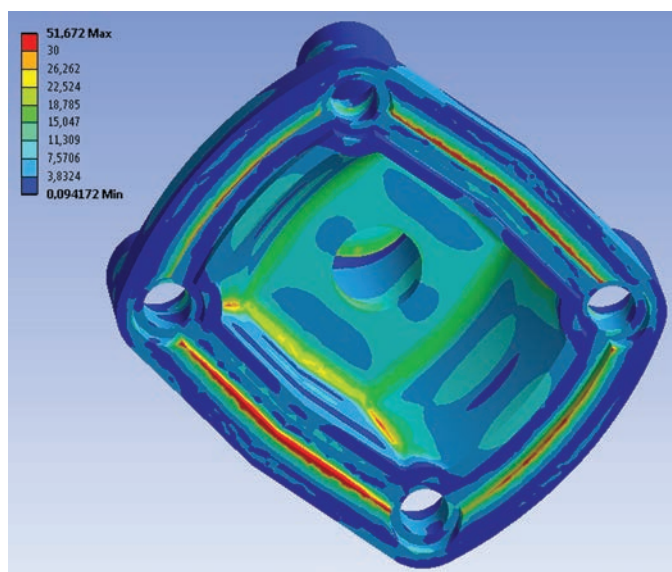


Fig. 18. Reduced stress distribution in the DN50 gate valve cover

The analysis of the estimated safety factor in casting of the cover showed that the lowest value of  $\sigma_w$  was higher than 4.6. So this means a large material and design safety margin in the examined cover at a given test pressure applied. The distribution of the safety factor values under a given load is shown in Figure 19.

For the DN50 gate valve wedge taken as an example, the distribution of stresses and displacements was examined under the effect of the operating test pressure load. The results of loading the DN50 gate valve wedge are shown in Figure 20.

The analysis of the distribution of displacements in the cast valve body and cover showed slight deformation of these structures on loading of the flow channel during pressure leak test.

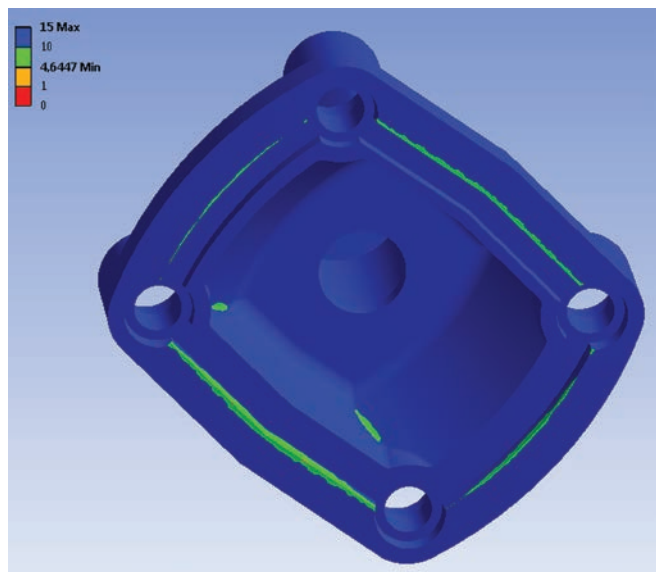


Fig. 19. Estimated safety factor distribution in the DN50 gate valve cover

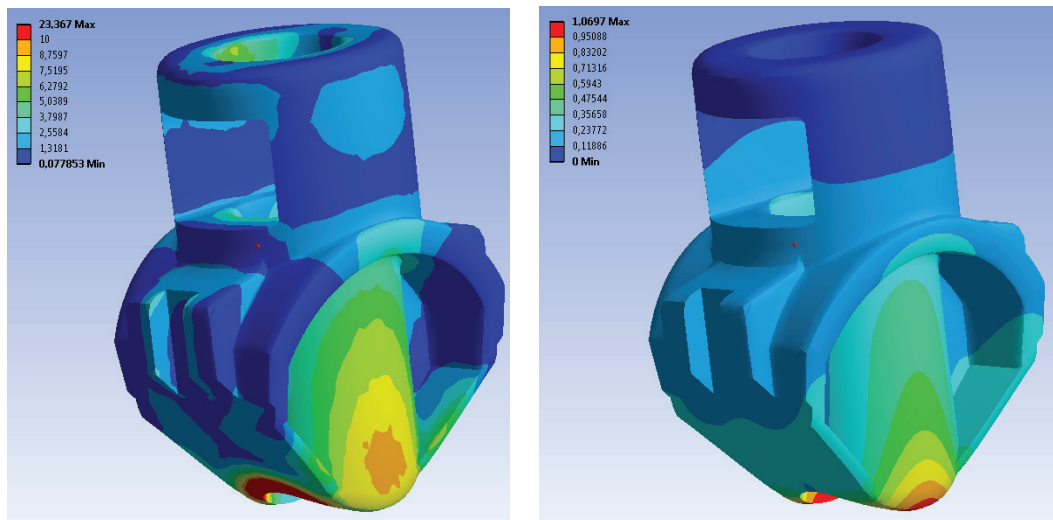


Fig. 20. Distribution of stresses (a) and displacements (b) in the soft-sealed DN50 gate valve wedge

The submitted results of the numerical analysis of the distribution of displacements in a modelled set of the DN50 gate valve are shown in Figure 21, and in the valve body and cover in Figures 22 and 23, respectively.

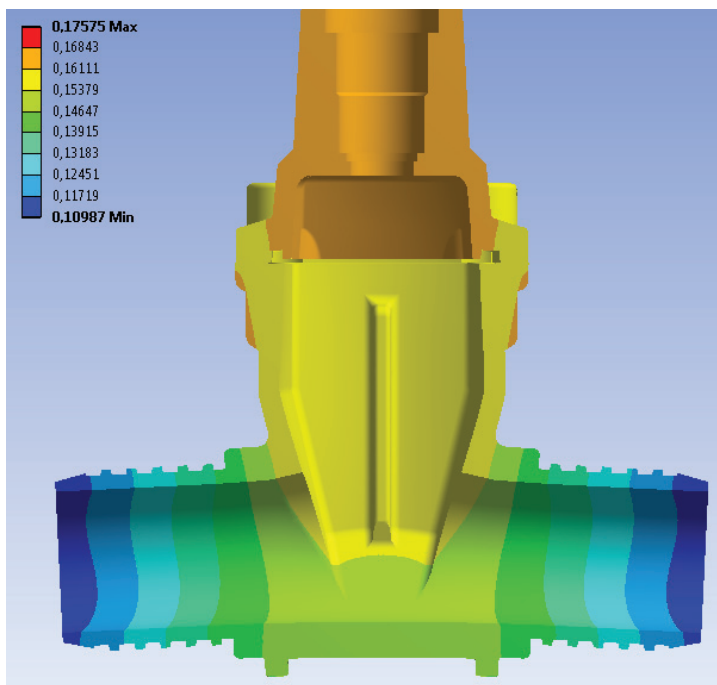


Fig. 21. Distribution of displacements in a modelled set of the DN50 gate valve

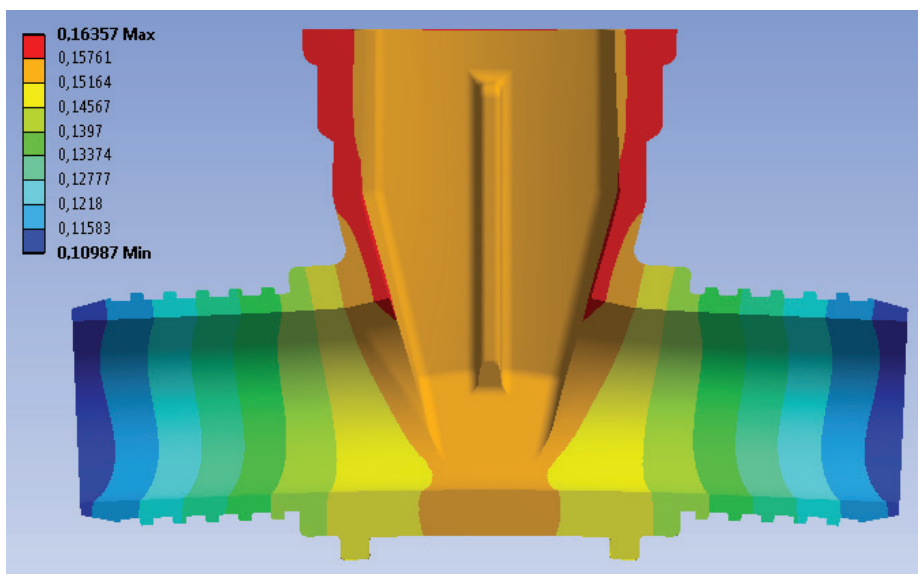


Fig. 22. Distribution of displacements in the cast DN50 gate valve body

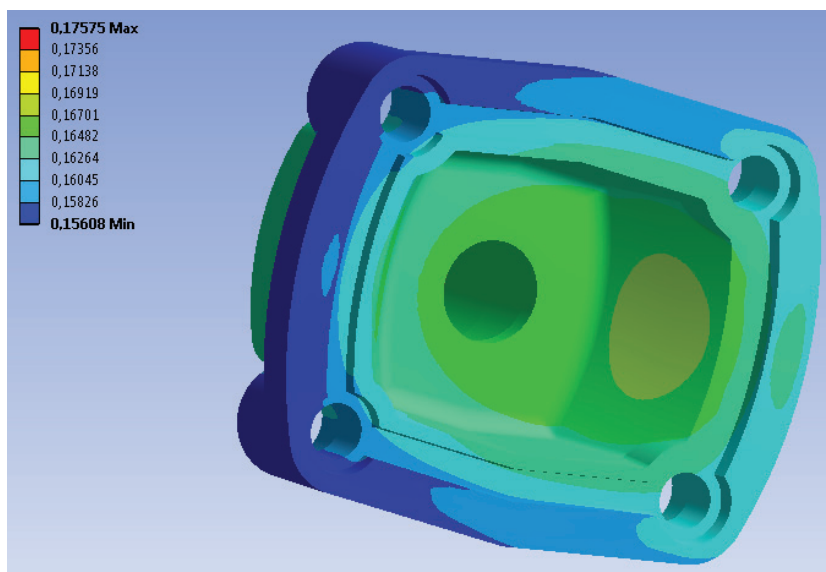


Fig. 23. Distribution of displacements in the cast DN50 gate valve cover

### **Soft-sealed DN150 gate valve**

The next modelled set of the soft-sealed gate valves for the PE gas pipelines was the largest, in terms of overall dimensions, DN150 gate valve. In the examined design, the wall thickness on the body cross-section was by 1 mm larger than the thickness of a much smaller valve body from the DN50 series. Hence it could be expected that the test pressure would cause a significant increase in the maximum value of reduced stress. The results of the analysis of the reduced stress distribution in a modelled set of the DN150 gate valve are shown in Figure 24, while displacements in this set compared to the reference structure are presented in Figure 25.

The maximum values of the von Mises reduced stress in the examined DN150 model set are reaching the value of 182 MPa, and so, within the entire model set, for a given scheme of operating loads, the yield strength of the structural material is never exceeded. Detailed analysis of the distribution of the maximum stress fields in the cast DN150 valve body is presented in Figure 26, showing also the axial section through a flow channel in the presented valve body design. In respective drawing, the scale of the maximum value of the reduced stress has been limited to 120 MPa, to show more clearly the distribution of the maximum stress fields.

The analysis of the reduced stress distribution indicates high concentration of the fields of maximum stresses, especially in the areas of the fillet radius of the vertical body shell walls and in the lateral extension rods modelled in the upper part of flange from the inside part of a flow channel. Additionally, fields of reduced stress with close-to-maximum values occur in the fillet radius marking a transition between the vertical shell and the channel connecting the valve body stubs.

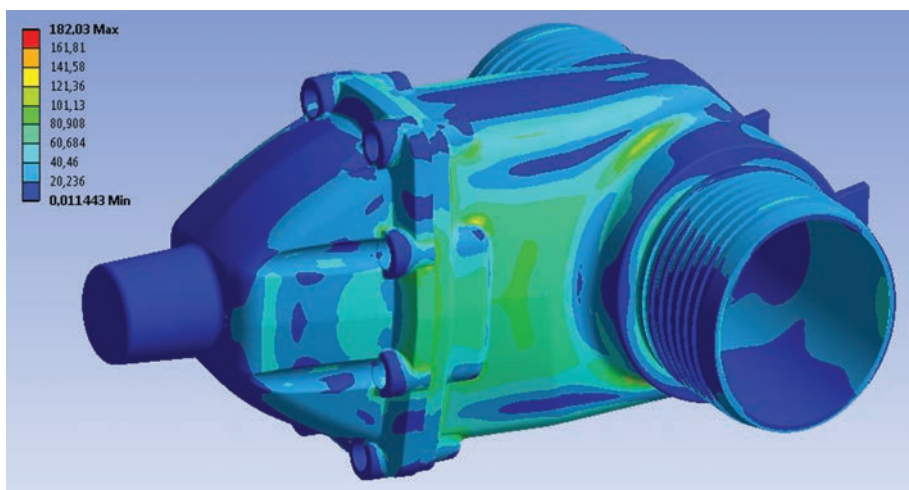


Fig. 24. Distribution of maximum values of the von Mises reduced stress fields in a modelled set of the DN150 gate valve

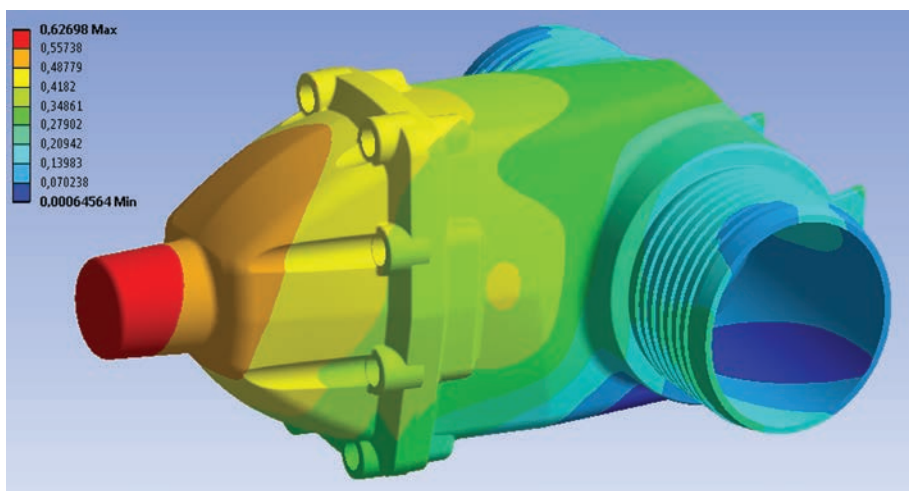
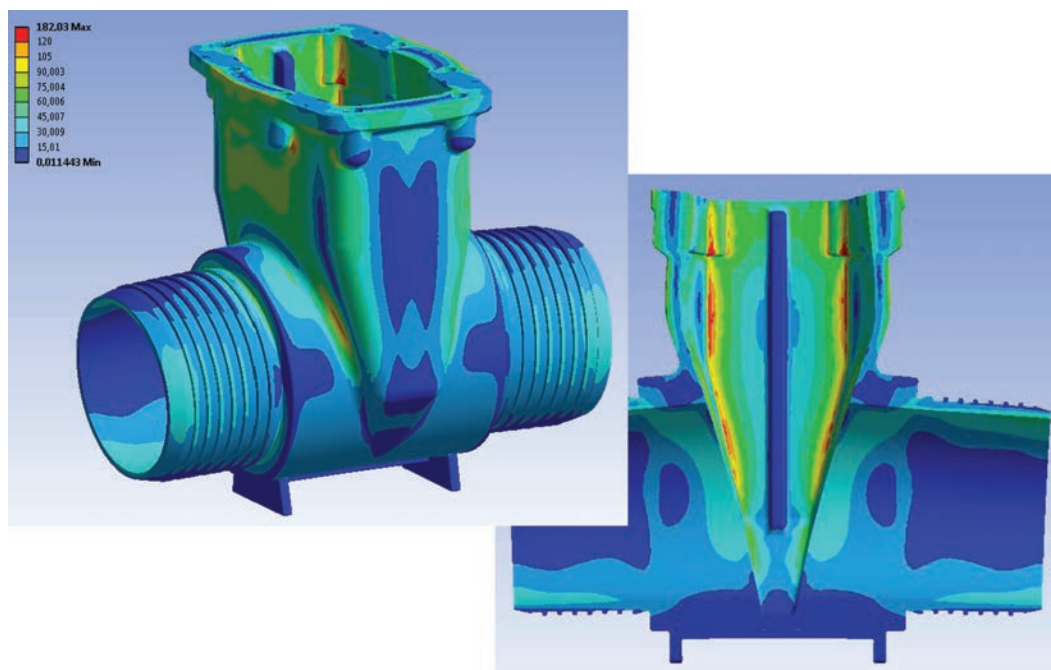


Fig. 25. Distribution of the maximum values of displacements in a modelled set of the DN150 gate valve



*Fig. 26. Distribution of maximum values of the von Mises reduced stress fields in the DN150 valve body*

Analysing the distribution of displacements in the described cast valve body, it can be observed that, as in the case of the DN50 cast valve body, also now the maximum casting deformation occurs in the side walls of the structure, where the flat surfaces without the reinforcing ribs are the largest, but even so, the values of the displacements should not result in permanent deformation of the structure. Schematic distribution of displacements in the analysed structure of the valve cover is shown in Figure 27. Evenly distributed displacements occurring symmetrically on both sides of the casting with the maximum values not exceeding 0.5 mm can be observed.

Based on the results of the reduced stress distribution analysis, as defined in the leak test simulation, areas with high concentration of the maximum stresses were detected around the fillet radius of the vertical body shell. The analysis of the normal stress distribution along the X and Z axes shows the presence of adjacent areas with stresses of different signs, which cause the occurrence of two-directional tensile and compressive forces, so detrimental to the correct operation of the structure. The results obtained for these examples are presented in Figures 28 and 29. As shown in Figure 28, the areas where the positive and negative stresses occur are located on the opposite side of the valve body lateral wall.

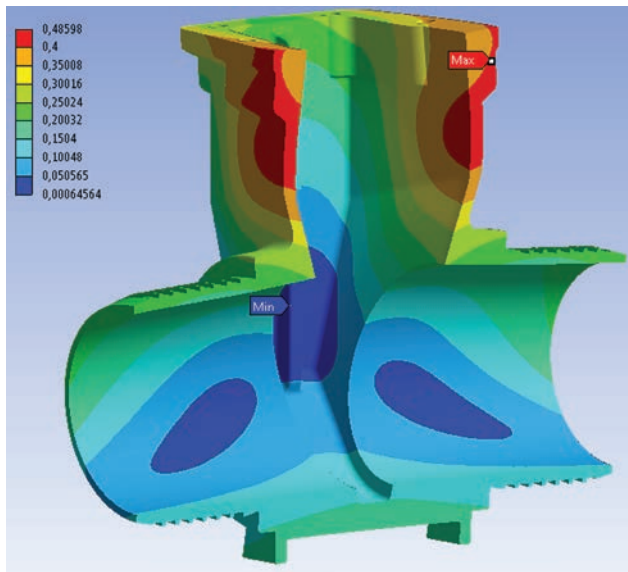


Fig. 27. Distribution of displacements in the DN150 valve body with marked areas of the occurrence of minimum and maximum values

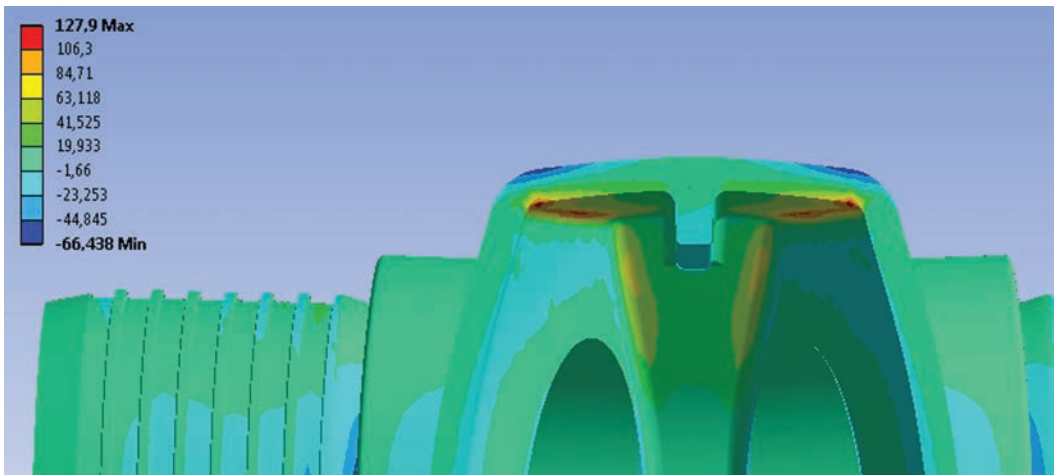


Fig. 28. Normal stress distribution along the horizontal X axis of the DN150 valve body

The occurrence of areas responsible for the shear effect in the body structure has been confirmed by the shear stress distribution in the YZ plane, shown in Figure 30, where the values of shear stresses are limited to a range between +30 MPa and -30 MPa, and in Figure 31, which shows the effect and the nature of the distribution of the shear stress fields in the horizontal XZ plane with the tensile and compressive stresses maintained in the same range of values.

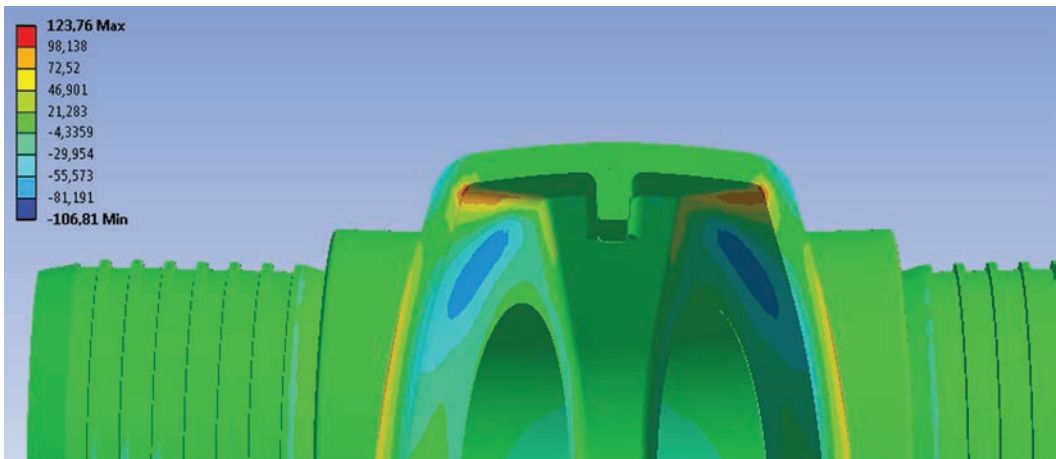


Fig. 29. Normal stress distribution along the vertical Z axis of the DN150 valve body

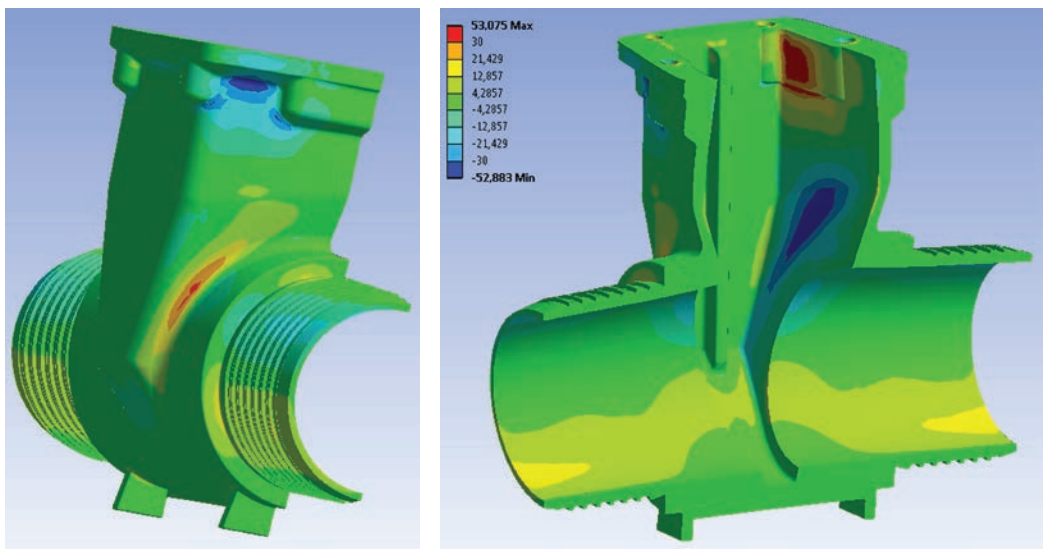


Fig. 30. Shear stress in the YZ plane of the cast DN150 valve body



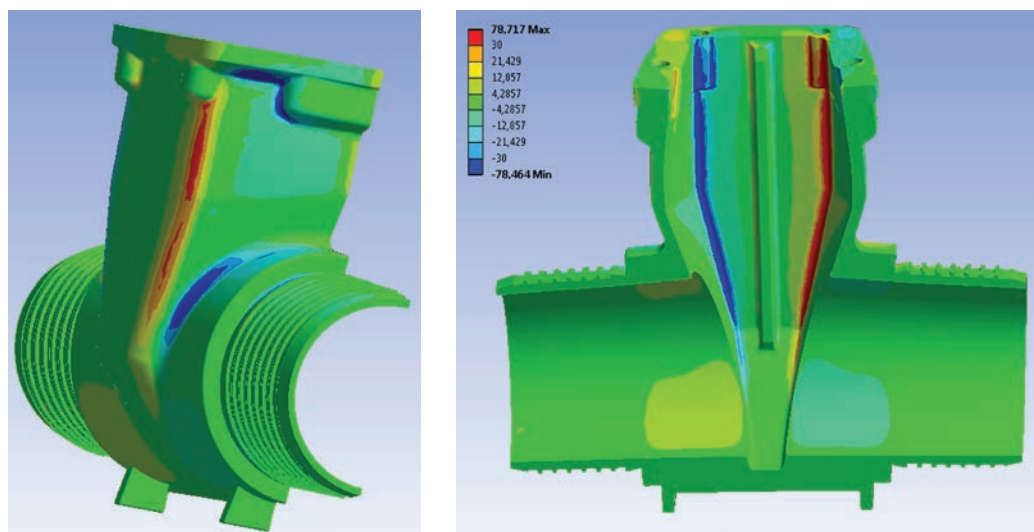


Fig. 31. Shear stress in the XZ plane of the cast DN150 valve body

The, presented in respective drawings, stress distributions in the examined structure of the DN150 valve body clearly show that the critical place in the analysed item is the fillet radius of the vertical lateral walls in the body shell. Further work should therefore focus on changes of this value and increasing the fillet radius on the lateral surface of the structure.

As with the previously examined series of the DN50 gate valves, also now the determination of an estimated safety factor of the structure helped confirm that the presence of the above mentioned field of the high stress concentration was reflected in a low value of the safety factor calculated for the cast valve body structure. The resulting estimated distribution of the  $\sigma_w$  factor is shown in Figure 32.

Additionally, for the valve body under discussion, the value of a ratio between the maximum reduced stress occurring in the examined structure and the yield strength of ductile iron EN-GJS-400-15, of which this body has been made, was estimated. The distribution of these values, as shown in Figure 33, indicates that the maximum stress occurring in the casting reaches 75% of the yield strength, which is clearly reflected in the estimated safety factor of the structure, the minimum value of which in the examined element is  $\sigma_w \geq 1.3$ .

In the last stage of the analysis, maximum effort of material used for the cast DN150 gate valve cover was determined. From the von Mises reduced stress analysis it follows that the area of the occurrence of the maximum field of stress is in the lateral part of the reinforcing flange, between the two holes for mounting screws, and in the fillet radius on the surface of the inner valve body wall. The examined areas are shown in Figure 34 in two views of the gate valve cover position. A detailed analysis of the presented results shows that the maximum stress does not reach high values, and areas marked in red mainly denote the fillet radius of too small value. The highest values of reduced stress are concentrated in areas with a high non-uniformity of the modelled surface.

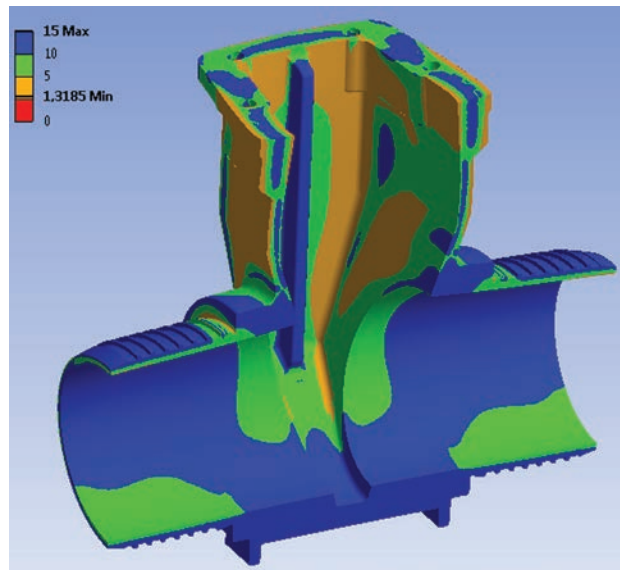


Fig. 32. Estimated safety factor distribution in the DN150 valve body structure

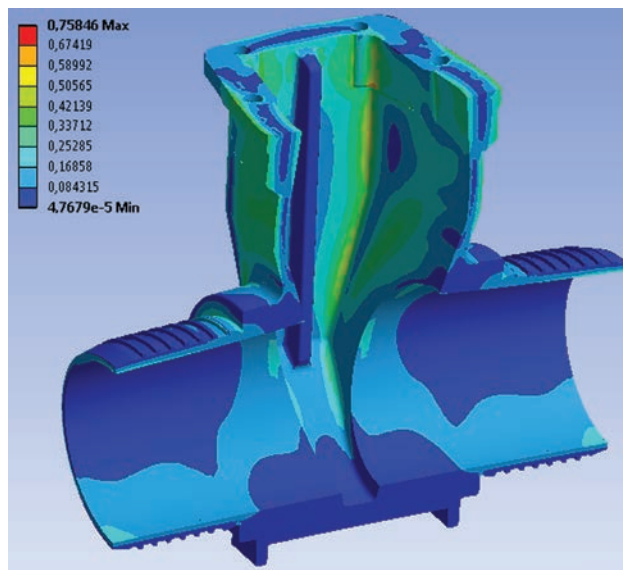


Fig. 33. Distribution of the reduced stress-to-yield strength ratio in the cast DN150 valve body material

The safety factor estimated for the examined design of the DN150 valve cover and the distribution of its minimum values in the casting are shown in Figure 35. A relatively high value of this factor ( $\sigma_w \geq 2.3$ ), compared with the cast valve body, confirms that the examined structure has the stress fields of lower maximum values, while the minimum

value of the safety factor is mainly located in the critical fillet radii of the modelled cover structure.

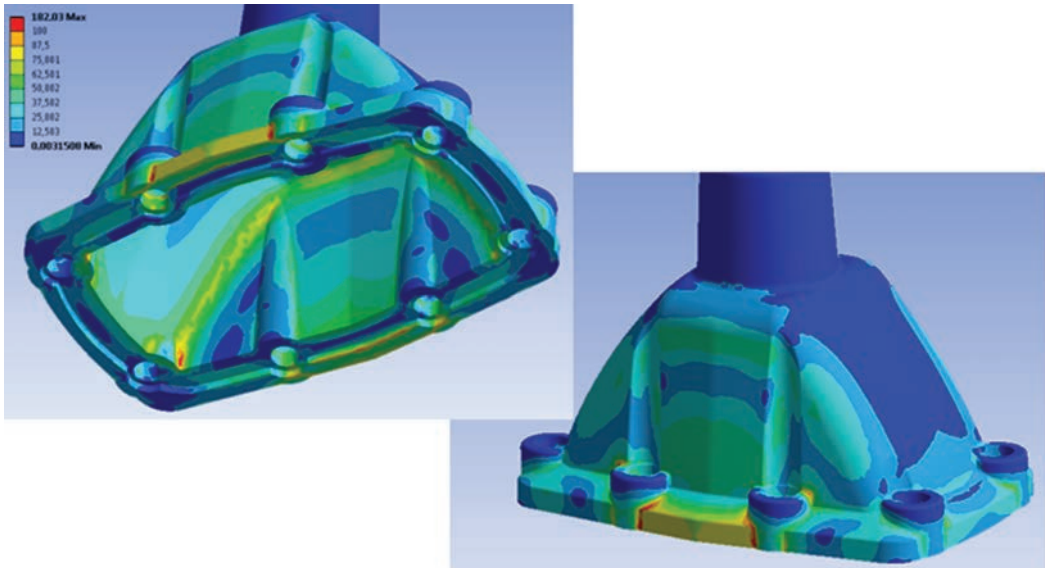


Fig. 34. Distribution of reduced stress in the cast DN150 valve cover

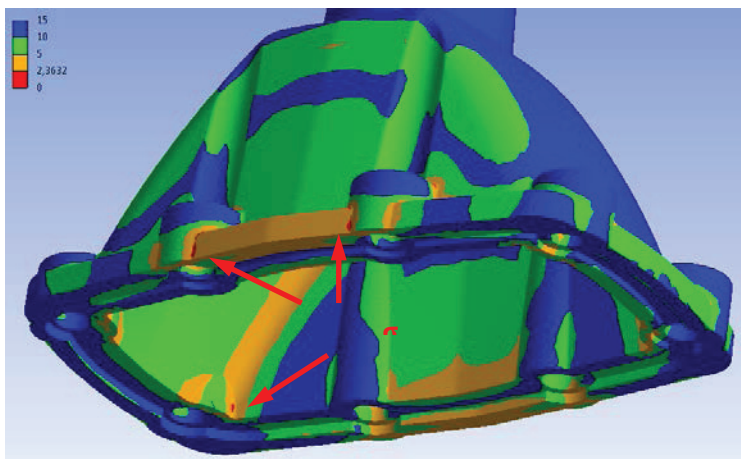
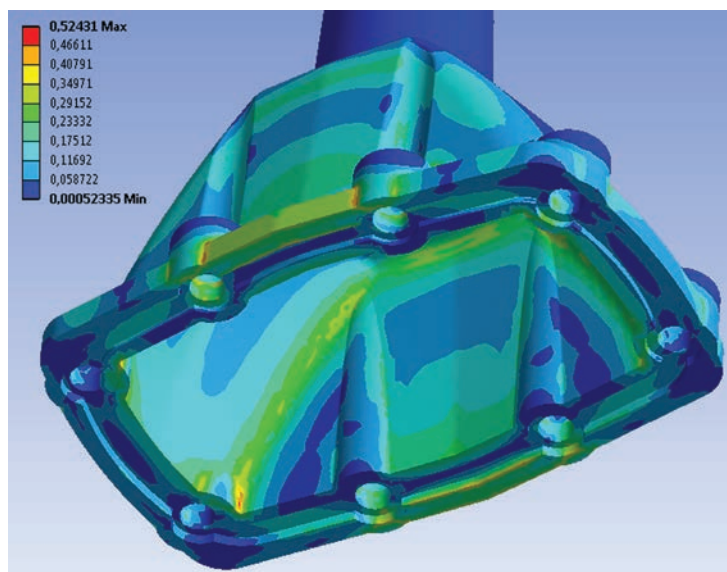


Fig. 35. Estimated safety factor distribution in the DN150 valve cover with marked surface areas of the occurrence of its minimum value

For the DN150 valve cover, the distribution of a coefficient describing the ratio between the maximum reduced stress determined in numerical simulation and the yield strength of material used for the casting of the cover was also estimated. The distribution of the estimated values of this ratio is shown in Figure 36. The maximum values of the reduced stress occurring in casting reach approximately 53% of the yield strength,

which translates into a much higher structural safety of the gas network under operating conditions.



*Fig. 36. Distribution of the reduced stress-to-yield strength ratio in cast material of the DN150 valve cover*

## Conclusions

- Numerical analysis of the stress distribution in cast structural elements of soft-sealed gate valves for the PE gas pipelines was based on calculations performed for pressures acting on the gate valve flow channel in conformity with the leak test guidelines assuming a pressure of  $p_{pr} = 2.4$  MPa. The pressure adopted in the gate valve leak test was 2–4 times higher than the pressure that occurs in a medium- or high-pressure gas network. The increased pressure was applied to eliminate errors in the design of the gate valve structural components and defects that might occur in castings with an occasional, temporary increase of pressure in the gas network.
- During numerical simulation of the operation of individual cast components of the gate valves for the PE gas pipelines, the distribution of stresses and displacements during application of the leak test pressure was determined. Due to a specific nature of the operation, special attention was devoted to the numerical analysis of the gate valve body and cover. The results of the analysis enabled determination of the maximum value of reduced stresses, as defined by von Mises theory, and identification of critical areas of the occurrence of maximum stress fields in selected iron castings.
- The examined bodies and covers of the gate valves from the DN50 and DN150 series had maximum stress values lower than the standard yield strength of the selected cast iron EN-GJS-400-15. Adopting, for selected structures, the safety

factors approved by the manufacturer at the design stage and much higher operating pressure demanded by the pressure leak test, it has been stated that all cast iron designs of the covers and bodies selected for analysis meet the safety requirements laid down for the gate valves used in medium- and high-pressure gas networks, while actual operating conditions should ensure their trouble-free operation. The performed numerical analysis of structure deformation during application of the test pressure has indicated the possibility of the appearance of small displacements in the cast parts. However, owing to large elongation of the ductile iron EN-GJS-400-15, this minor defect is not expected to have a negative impact on the gate valve performance conditions. In addition, the estimated safety factor and the coefficient of excess structural material effort, determined during numerical analysis in relation to the yield strength of the cast iron EN-GJS-400-15, have indicated a higher range of safety for the gas gate valves operating in a PE gas pipeline system. In the course of the analysis, areas in the valve bodies and covers were identified, where a high concentration of maximum stresses has occurred. For selected areas, located mainly in the fillet radii on the lateral surfaces of the valve bodies and covers, a change in the values of these radii was proposed to the designer of castings, to eliminate the possibility of an excessive stress concentration occurring in these areas. The small changes introduced to the design of cast components should not affect the flow process of the medium through the gate valve channels. On the contrary, they should contribute to a significant improvement of the design safety, allowing selected gate valves to be used under the conditions of a much higher pressure operating in the gas network.

- For selected rubber-coated wedge designs, the numerical analysis of the structure behaviour on loading it with the leak test pressure did not reveal the presence of any major stresses which might have a significant impact on the operation of complete gas gate valves with PE stub connections.

## Acknowledgements

This article has been based on the results of industrial research carried out within the target project CI ROW-III-209/2012 entitled: "The development and implementation in production of a type series of the wedge gate valves with PE stub connections for the PE gas pipeline systems". On behalf of the Foundry Research Institute in Cracow, the authors of the present study implementing the industrial research wish to thank Mr Mieczysław Nowak, the Development CEO at JAFAR SA Fittings Factory, for his kind cooperation and assistance rendered in the course of performed studies.

## References

1. Gwizdź A., Żuczek R.: *Developing a 3D model of the wedge gate valves for a gas network system with stress analysis done for the cast valve body, cover and wedge*. A report of task no. 2 included in the Target Project CI NOT ROW-III-209/2012.
2. Hindurao D.V., Chavan D.S.: *Optimization of 16" plug valve body using FEA and Experimental Stress analysis method*. International Journal of Mechanical Engineering, 2011, Vol. 1, No. 1, pp. 79–83.

3. Allison J., Backman D., Christodoulou L.: *Integrated Computational Materials Engineering: A New Paradigm for the Global Materials Profession*. JOM, 2006, Vol. 58, No. 11, pp. 25–27.
4. Allison J.E.: *Integrated Computational Materials Engineering (ICME) for Mg: International Pilot Project*. Ford Motor Company, April 2010.
5. Warrick R.J., Althoff P., Druschitz A.P., Lemke J.P., Zimmerman K.: *Austempered Ductile Iron Castings for Chassis Applications*. Society of Automotive Engineers, 2000 World Congress, Detroit, March 6–9, 2000.
6. Maj M., Piekło J.: *MLCF – an optimised program of low – cycle fatigue test to determine mechanical properties of cast materials*. Archives of Metallurgy and Materials, 2009, Vol. 54, No. 2, pp. 393–397.
7. Wowra S.: *Parallel computations in ANSYS*. Conference – Simulation 2010, Tarnowskie Góry, 2010.
8. Ignaszak Z., Popielarski P., Hajkowski J., Prunier J.B.: *Problem of Acceptability of Internal Porosity in Semi-Finished Cast Product as New Trend – “Tolerance of Damage” Present in Modern Design Office*. Defect and Diffusion Forum, 2012, Vols. 326–328, pp. 612–619. Online available since 2012 Apr/26 at [www.scientific.net](http://www.scientific.net), Trans Tech Publications, Switzerland, 2012, doi:10.4028/www.scientific.net.DDF.326-328.612.
9. Gazda A.: *A comprehensive database on thermophysical properties of metals, alloys, and moulding and ceramic materials for use in the design of castings*. [In:] Innovations in foundry. Part I. Foundry Research Institute, Kraków, 2007, pp. 311–318.
10. Ignaszak Z., Mikołajczyk P.: *The problem of empirical parameters of pre-processing on the example of simulation of the ductile iron castings solidification and feeding*. [In:] Innovations in foundry. Part I. Foundry Research Institute. Kraków 2007, pp. 301–310.