

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Opracowanie nowej, prostszej i tańszej przekładni zębatej w miejsce skomplikowanych i drogich przekładni planetarnych

Development of a new, simpler and cheaper toothed gear in place of complicated and expensive planetary gears

Wyniki badań
Results

Optymalizacja procesu nawęglania próżniowego pod kątem obróbki kół zębatych przekładni
Optimization of vacuum carburizing process for transmission gears treatment

W pierwszym etapie, z dostarczonego przez wykonawcę kół zębatych do przekładni wielodrożnej, materiału - stal 17HNM (skład chemiczny materiału podano w tablicy 1) wykonano dwie tuleje o wymiarach jak na rysunku. Tuleje poddano obróbce cieplnej polegającej na nawęglaniu próżniowym, hartowaniu i odpuszczaniu, przy czym proces hartowania przeprowadzony był w oleju (tuleja oznaczona jako 1) oraz w azocie (tuleja oznaczona jako 2). Na rysunku 1 przedstawiono widok tulejki.

Wykonano pomiary tulejek przed i po obróbce cieplnej:

- średnicy zewnętrznej-przy pomocy pionowego długościomierza Abbego
- średnicy otworu - przy pomocy poziomego długościomierza Abbego
- wysokości - przy pomocy pionowego długościomierza Abbego.

Pomiary średnic wykonano na 4 wysokościach tulejek jak to przedstawiono na rysunku 1. Porównanie zmian wymiarowych po hartowaniu w oleju i w azocie przedstawione jest na rysunkach 2,3 i 4.

W drugim etapie wykonano próbne procesy nawęglania i hartowania w gazie stali 17HNM w celu doboru parametrów procesu dla docelowej obróbki kół zębatych przekładni wielodrożnej. Próbkę w formie krążków o średnicy 25mm i grubości 10mm poddano nawęglaniu próżniowemu, hartowaniu w azocie pod ciśnieniem 10bar oraz odpuszczaniu. Opracowano recepturę procesu pozwalającą na uzyskanie założonych grubości warstw nawęglanych. Po procesach próbki poddano badaniom metalograficznym oraz pomiarom rozkładu mikroczystości w warstwach utwardzonych. Wykonano dwa procesy nawęglania. W procesie pierwszym wystąpiło przewęglenie powierzchni a całkowite grubości warstw były zbyt duże. Dokonano zmian w recepturze, co spowodowało uzyskanie założonych grubości warstw (tj. po jednej stronie około 1mm, po drugiej 1,5mm. Warstwy zaprojektowano tak, że uwzględniona została operacja szlifowania powierzchni (na głębokość 0,2mm) Struktura stali przed obróbką przedstawiona jest na rysunku 5a. Po obróbce na rysunkach 5b (rdzeń) oraz 5c (proces 1 - przewęglenie) i 5d (proces 2 - właściwy)

Na rysunku 6a oraz 6b przedstawiono rozkłady mikroczystości wraz z określoną grubością warstwy nawęglanej dla kryterium twardości 550HV dla procesu 1.

In the first step, provided by the contractor to the transmission gear, material - steel 17HNM (chemical composition given in Table 1) two cylinders were prepared of dimensions as show in figure 1. Elements were heat-treated by vacuum carburizing, quenching and tempering, the tempering process was conducted in oil (denoted as cylinder 1) and nitrogen (denoted as cylinder 2). Figure 1 shows a view of the cylinder.

Measurements before and after heat treatment were done:

- an external diameter with vertical Abbe measuring probe
- an internal diameter - with horizontal Abbe measuring probe
- height - vertical Abbe measuring probe.

Measurements were performed At four points as shown in Figure 1

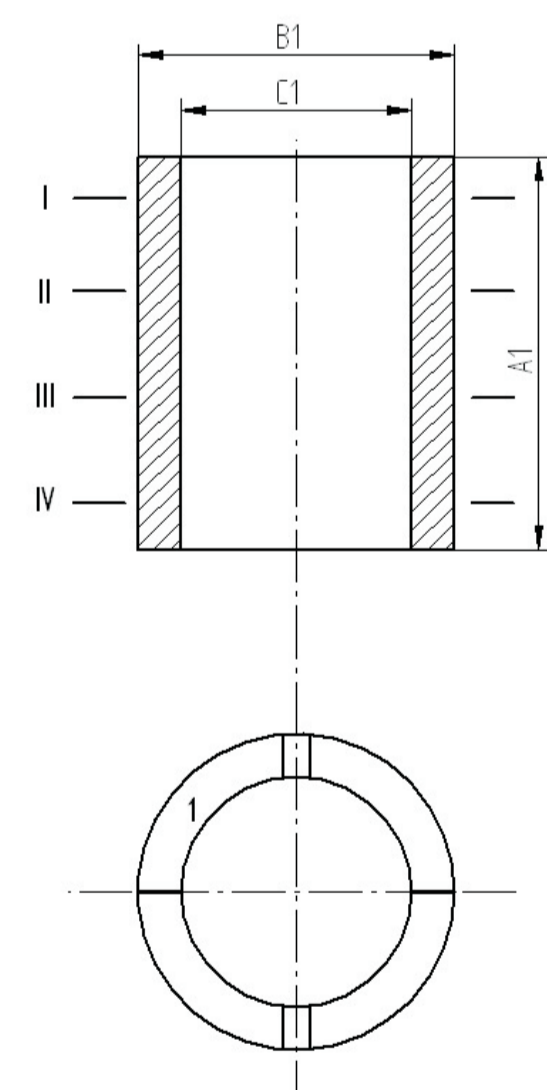
Comparison of dimensional changes after quenching in oil and nitrogen are shown in Figures 2,3 and 4

In the second stage of the trial process carried out, carburizing and hardening of steel 17HNM in nitrogen was performed, for the selection of process parameters for the targeted treatment of transmission gears. Samples in the form of discs with a diameter of 25mm and a thickness of 10mm underwent vacuum carburizing, quenching in nitrogen at a pressure of 10 bar and tempering. The prescription of the process to obtain assumed carburized layer thickness was elaborated. After the process samples were subjected to metallographic examination and measurement of microhardness distribution in layers. In the first process an over-carburizing appeared and the total thickness of the surface layer were too large. Changes have been made in the formula, resulting in achievement of the intended thickness of the layer (i.e. on one side of about 1 mm, and about 1.5 mm on the other). Layers are designed so that the grinding operation has been incorporated into the surface (to a depth of 0.2 mm). Steel structure before processing is shown in Figure 5a. After treatment, the figures 5b (core) and 5c (process 1 - carbon excess) and 5d (process 2 - proper)

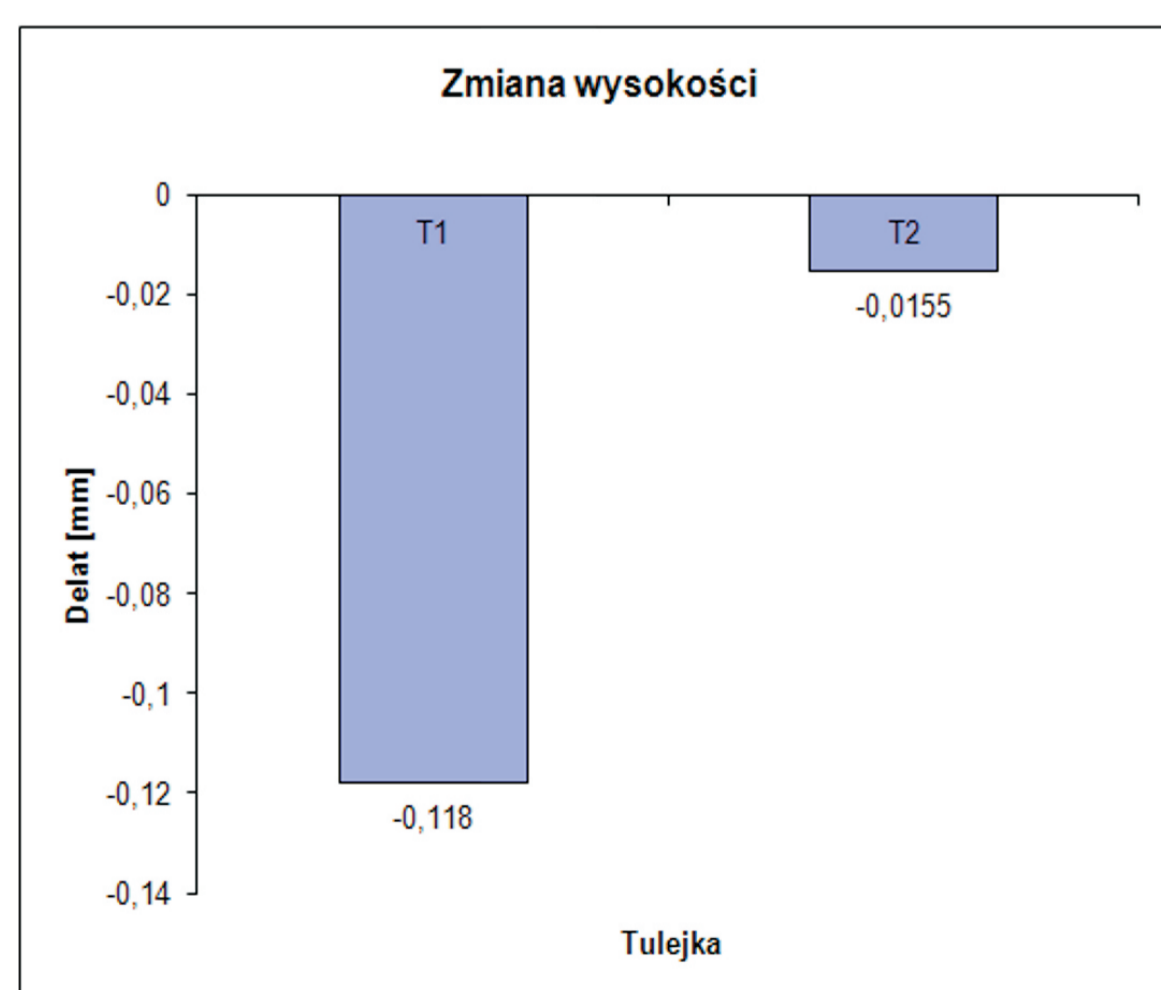
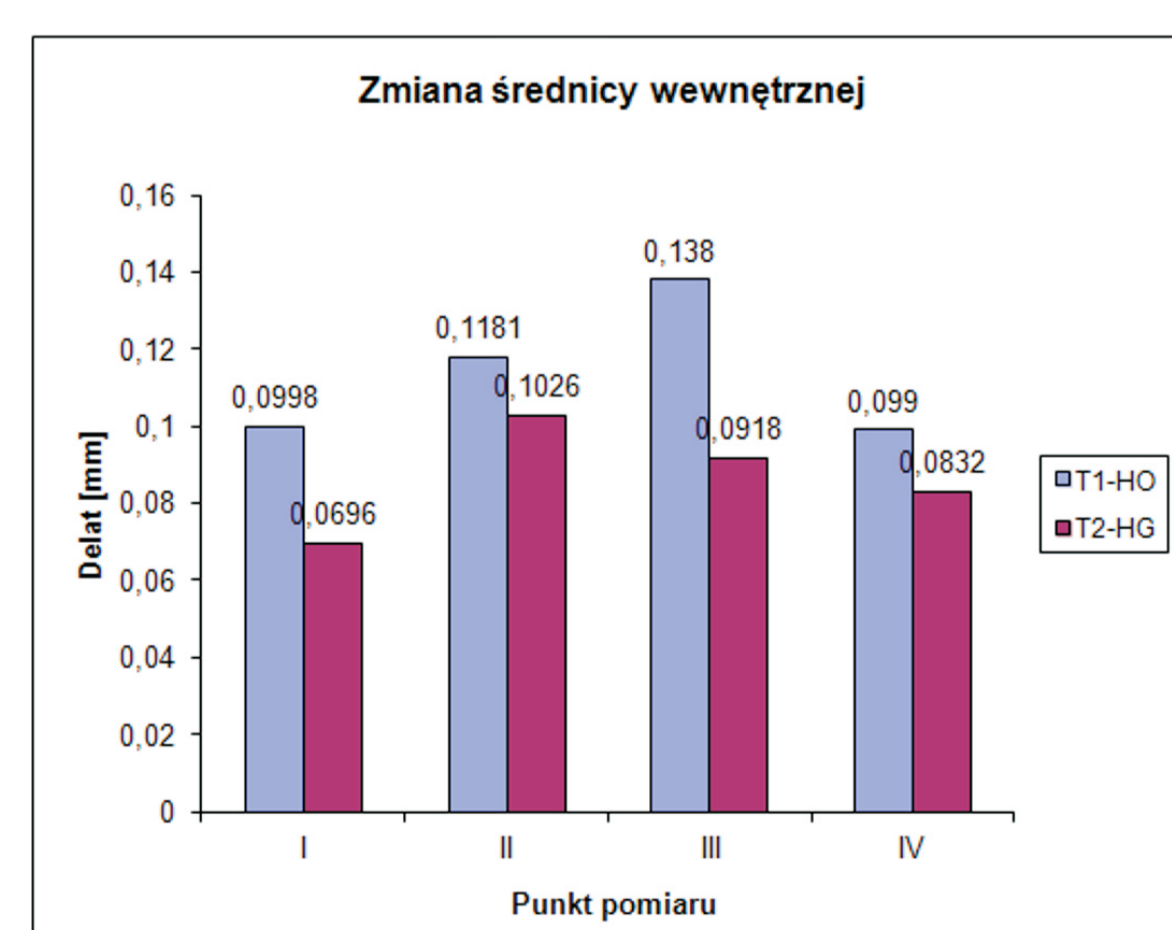
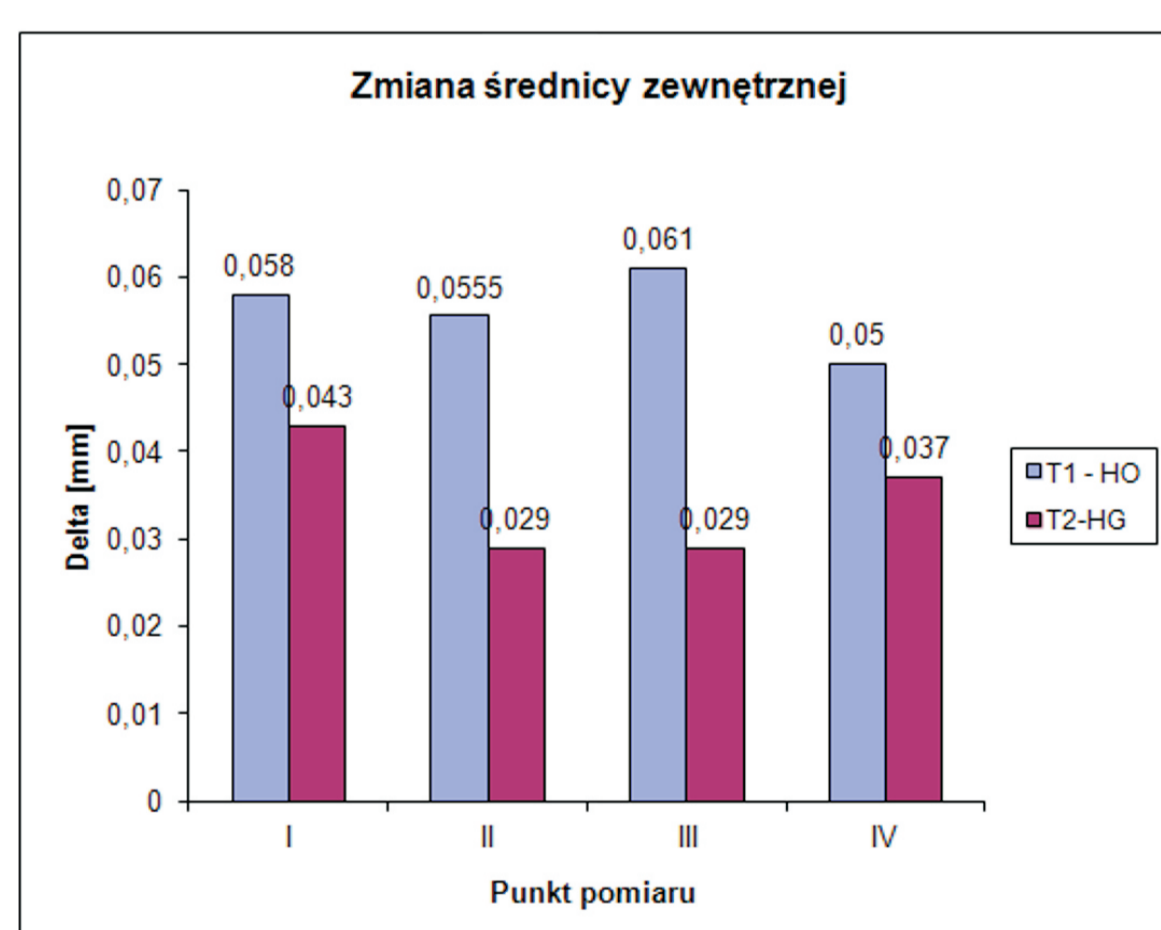
Figure 6a and 6b show the microhardness distribution within carburized layer with depicted thickness based on criterion of 550HV, for process 1.

Tabela 1. Skład chemiczny materiału odkuwki
Table 1. Chemical composition of the working material

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0,154	0,475	0,233	0,012	0,002	1,401	1,431	0,336	0,006	0,21	0,029



Rysunek 1. Rysunek tulejki. Wymiary: B1-49mm; C1-30mm, A1- 48mm
Figure 1. Cylinder drawing. Dimensions: B1-49mm; C1-30mm, A1- 48mm

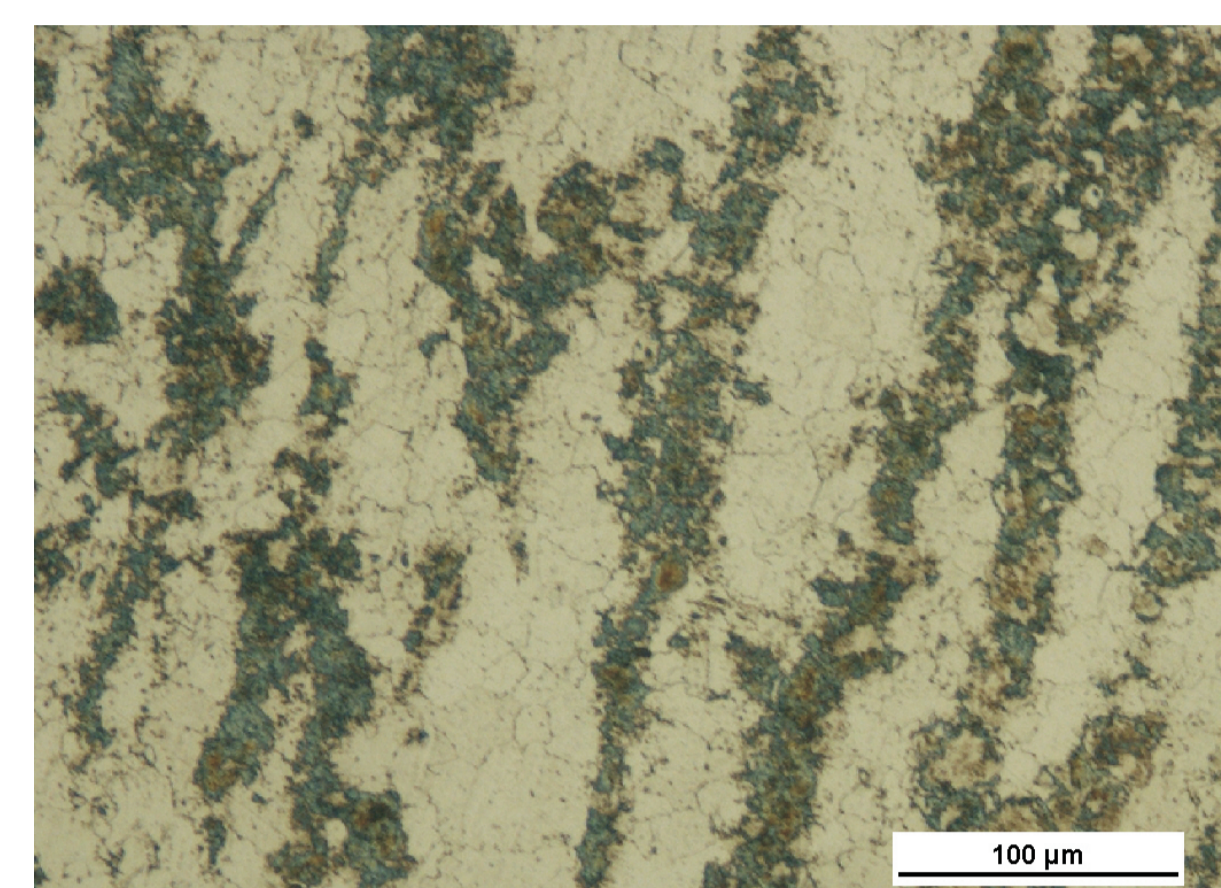


Rysunek 2. Zmiana średnicy zewnętrznej tulejek. T1- tulejka hartowana w oleju; T2 - tulejka hartowana w gazie
Figure 2. Changes in outer diameter of cylinders. T1- cylinder quenched in oil, T2- cylinder quenched in gas.

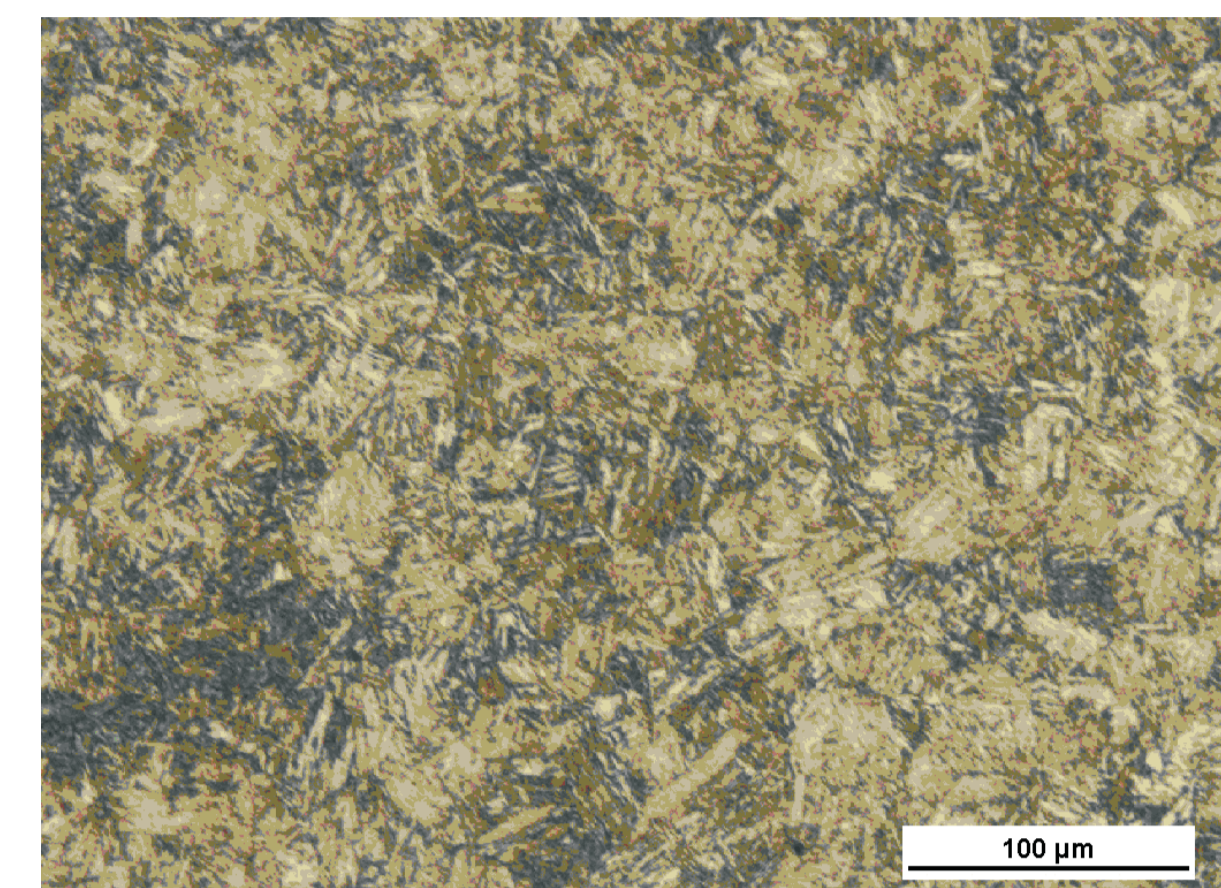
Rysunek 3. Zmiana średnicy wewnętrznej tulejek. T1- tulejka hartowana w oleju; T2 - tulejka hartowana w gazie
Figure 3. Changes in inner diameter of cylinders. T1- cylinder quenched in oil, T2- cylinder quenched in gas.

Rysunek 4. Zmiana wysokości tulejek. T1- tulejka hartowana w oleju; T2 - tulejka hartowana w gazie
Figure 4. Changes in height of cylinders. T1- cylinder quenched in oil, T2- cylinder quenched in gas.

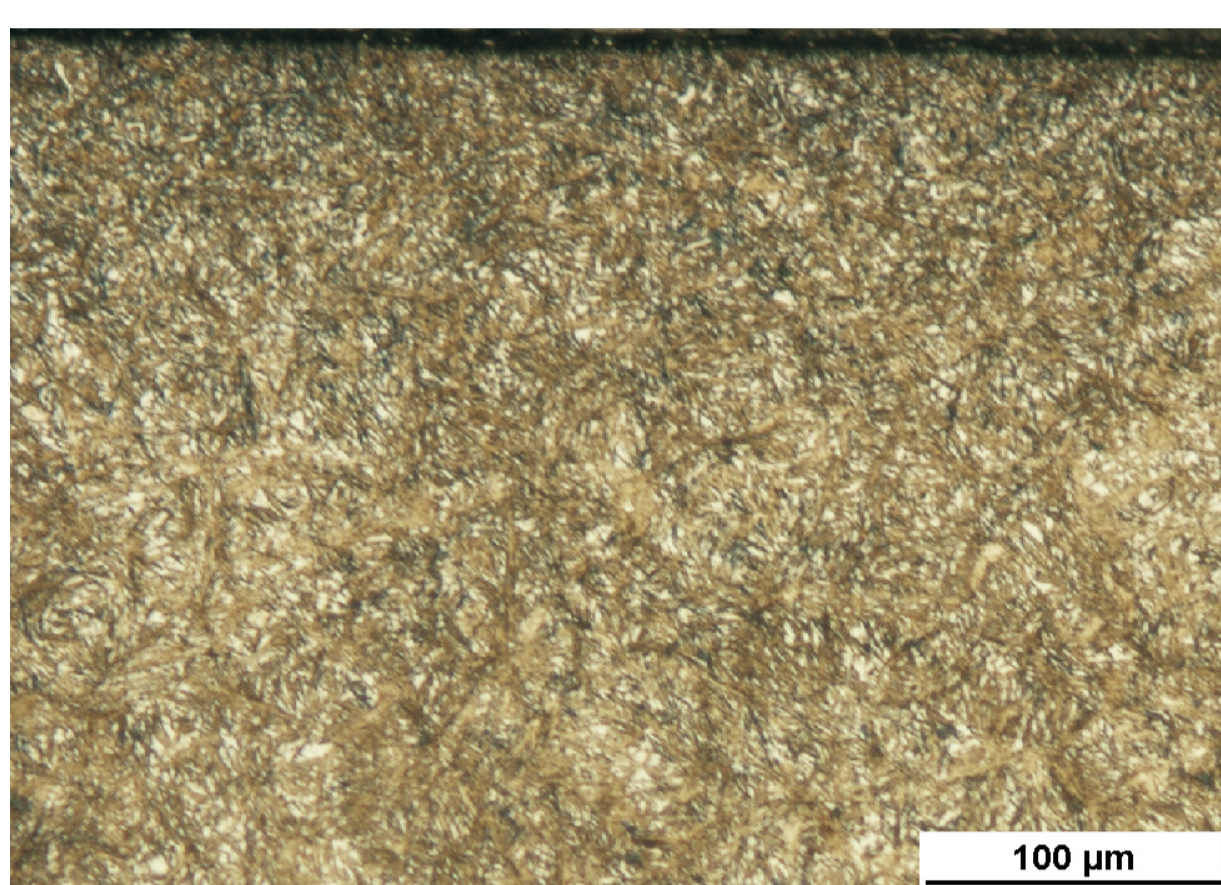
Politechnika Rzeszowska, Politechnika Łódzka



Rysunek 5a. Stal 17HNM przed obróbką. Struktura: ferryt+drobny perlit
Figure 5a. Initial state of the 17HNM steel. Structure: ferrite+fine pearlite



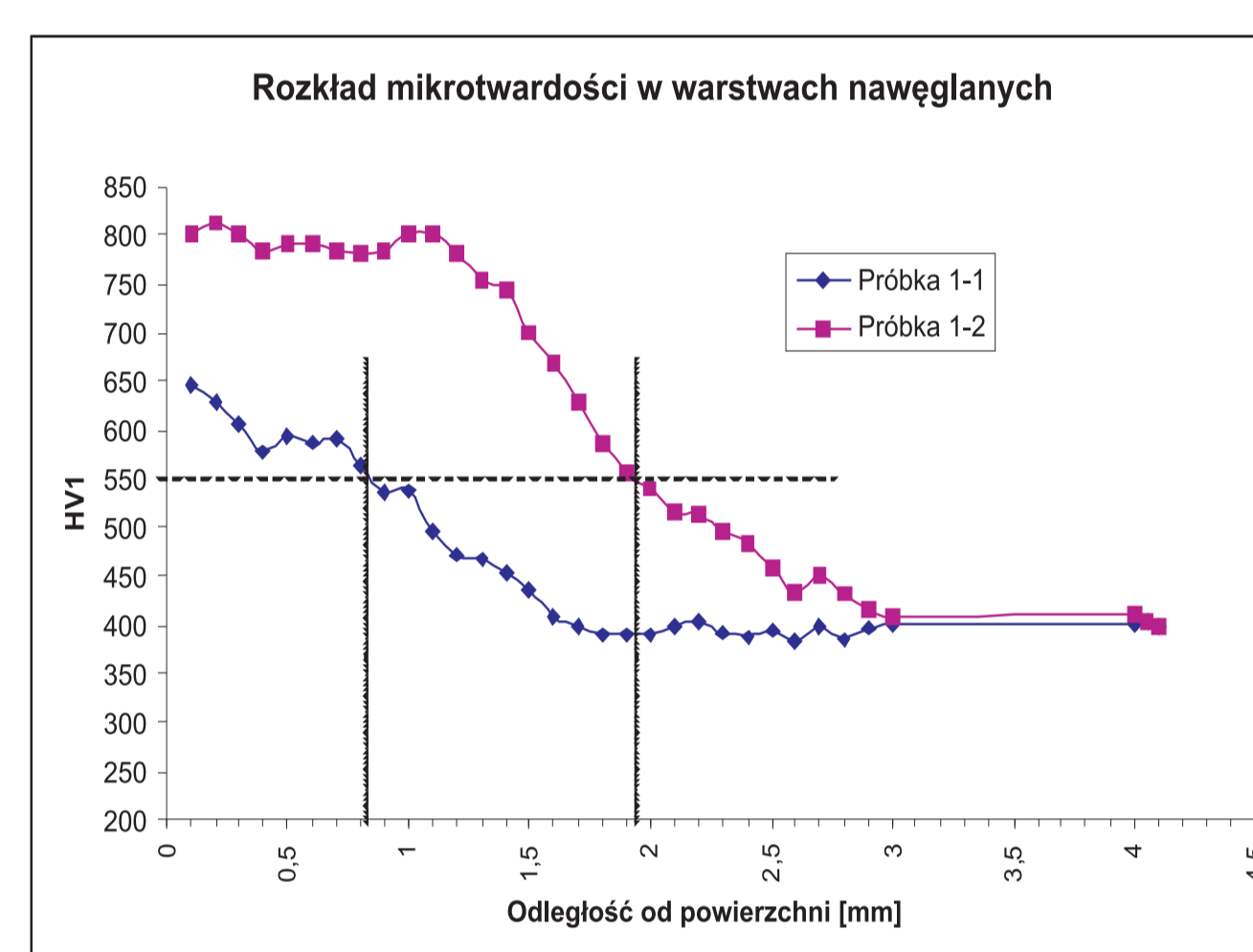
Rysunek 5b. Struktura rdzenia po obróbce: bainit+ferryt
Figure 5b. Structure of the core after treatment: bainite+ferrite



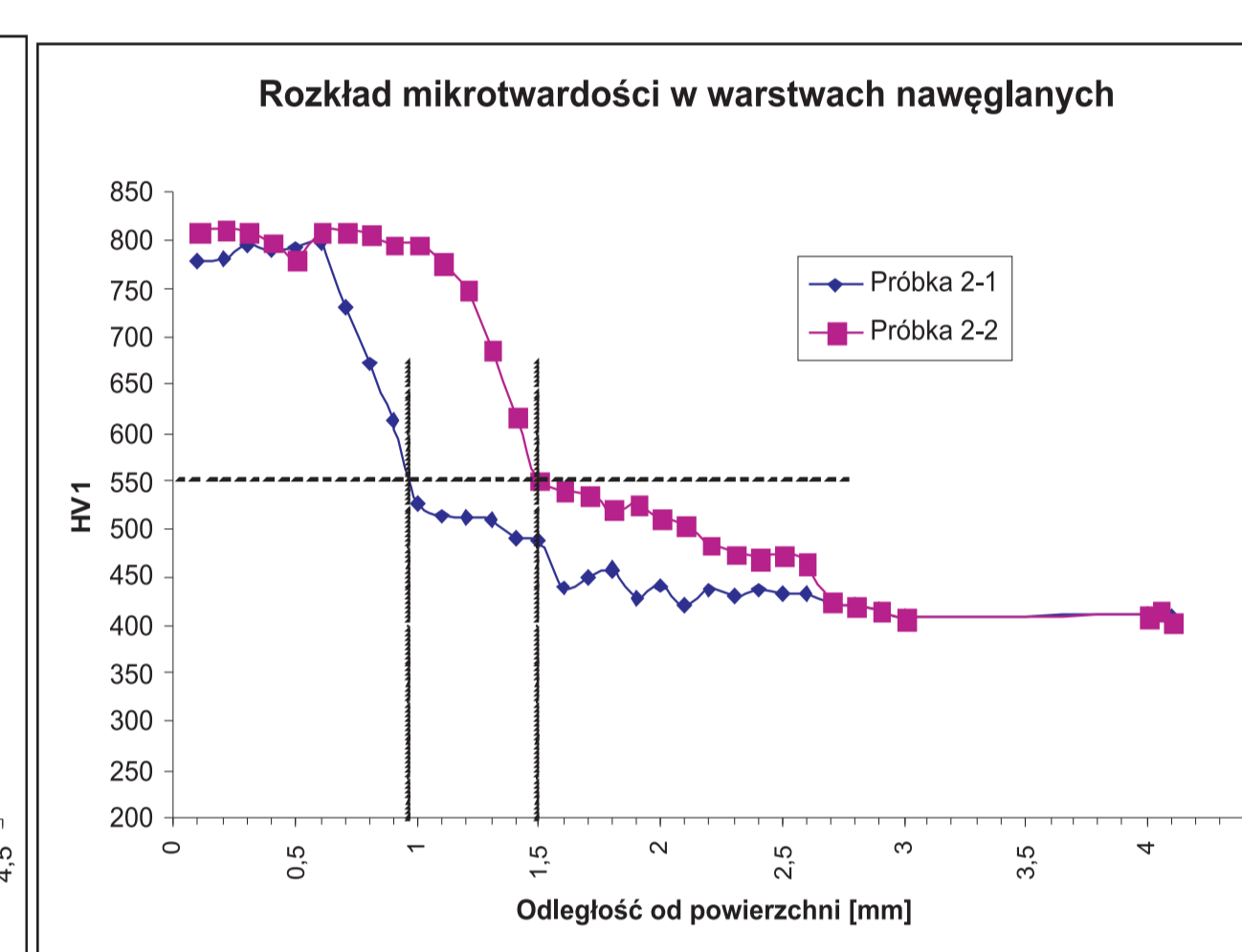
Rysunek 5c. Struktura warstwy przypowierzchniowej po obróbce (proces 1). Widoczny martenzyt, austenit szczątkowy oraz wydzielenia węglików po granicach ziaren do głębokości około 100 mikrometrów
Figure 5c. Structure of the near surface area after treatment (process 1): martensite+retained austenite+ carbides precipitations along grain boundaries to the depth about 100micrometers.



Rysunek 5d. Struktura warstwy przypowierzchniowej po obróbce (proces 2). Widoczny martenzyt, austenit szczątkowy bez wydzielenia węglików po granicach ziaren.
Figure 5d. Structure of the near surface area after treatment (process 2): martensite+retained austenite, without carbides precipitations



Rysunek 6a. Rozkład twardości w utwardzonej warstwie wierzchniej stali 17HNM po procesie 1
Figure 6a. Hardness distribution in hardened layer of 17HNM - process 1

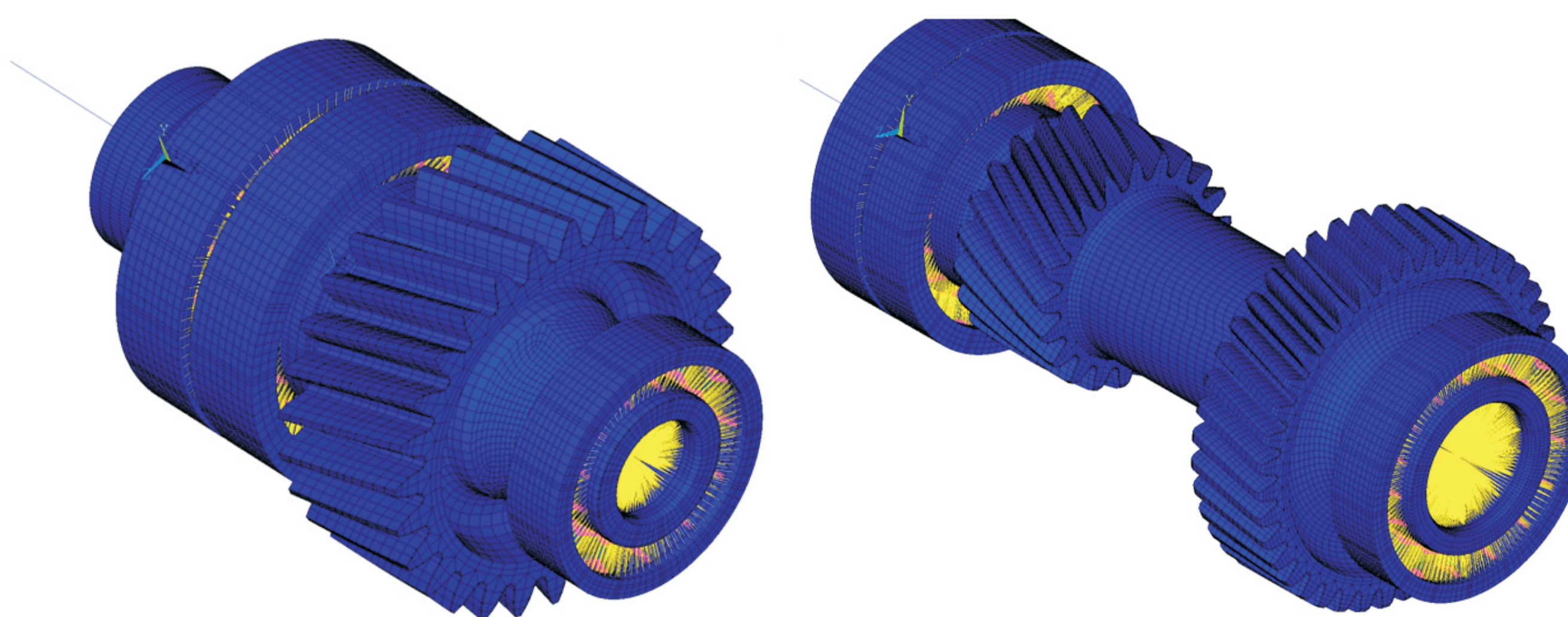


Rysunek 6b. Rozkład twardości w utwardzonej warstwie wierzchniej stali 17HNM po procesie 2
Figure 6b. Hardness distribution in hardened layer of 17HNM - process 2

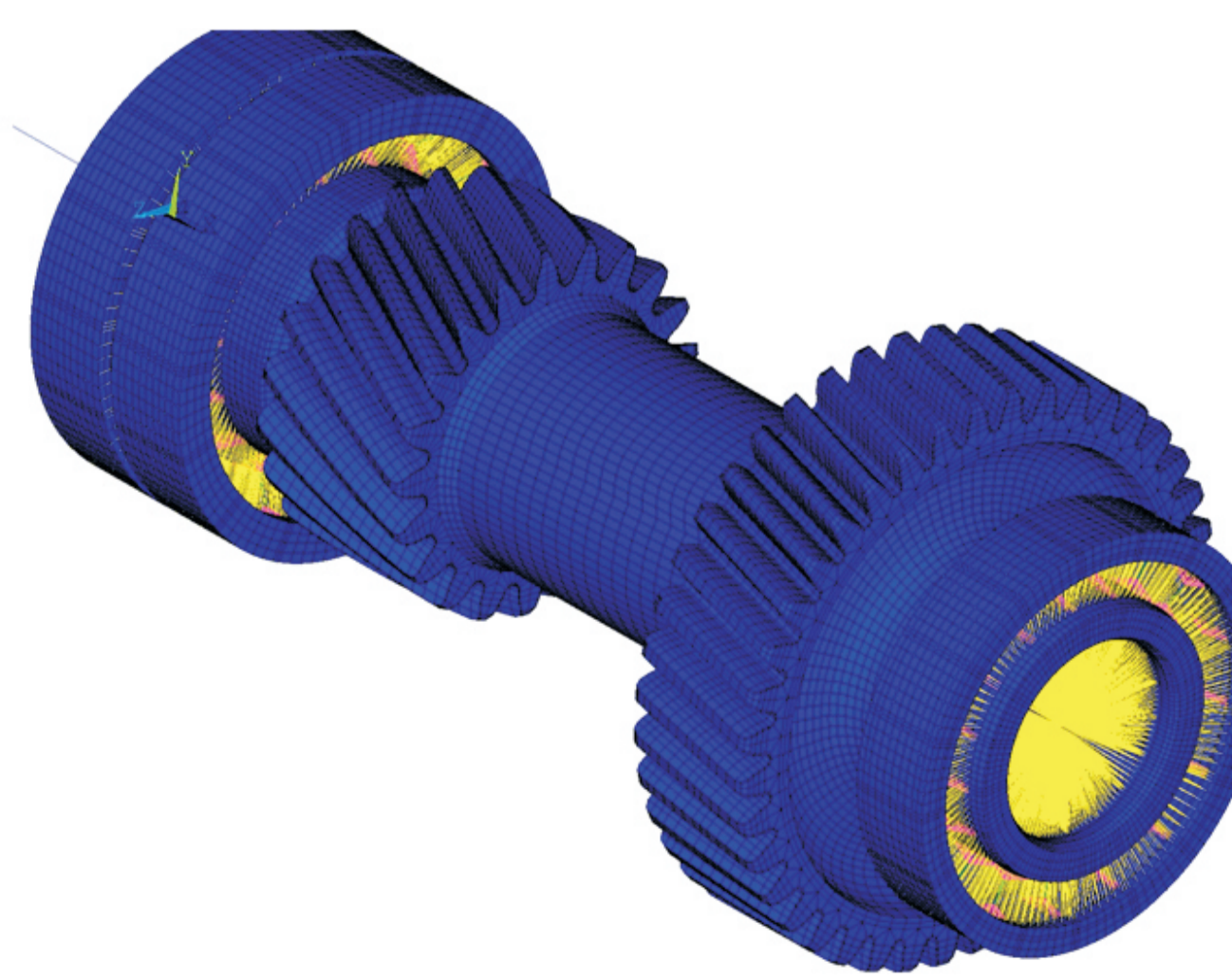
Analiza dynamiczna kół przekładni dwudrożnej
II Wykonanie analizy i określenie parametrów sztywnościowych kadłuba przekładni dwudrożnej
I Dynamic analysis of split path transmission gears
II Performance of the analysis and determination of the housing stiffness parameters of the split path transmission.

Niniejsze opracowanie zawiera wyniki numerycznych przeprowadzonych za pomocą metody MES, których celem było sprawdzenie cech dynamicznych kół przekładni dwudrożnej. Analizę przeprowadzono dla trzech kół walcowych, z których jedno wymagało modyfikacji kształtu w celu uniknięcia zjawiska rezonansu z pierwszą harmoniczną drgań kół. Aby ocenić wpływ różnych elementów konstrukcyjnych na częstotliwości drgań własnych, dla każdego koła wykonano analizę dla trzech modeli MES, różniących się sposobem modelowania warunków brzegowych odzwierciedlających podparcie kół. Dla koła wyjściowego wymagana była modyfikacja kształtu polegająca na odpowiednim doborze średnicy otworów w tarczy koła. Ostatecznie analiza potwierdziła że częstotliwości drgań własnych kół lokalizują się poza zakresem pracy co zapewnia właściwe warunki pracy kół. W celu odzwierciedlenia właściwych warunków podparcia kół koniecznym było wykonanie oddzielnych analiz dla określenia sztywności łożysk i kadłuba przekładni.

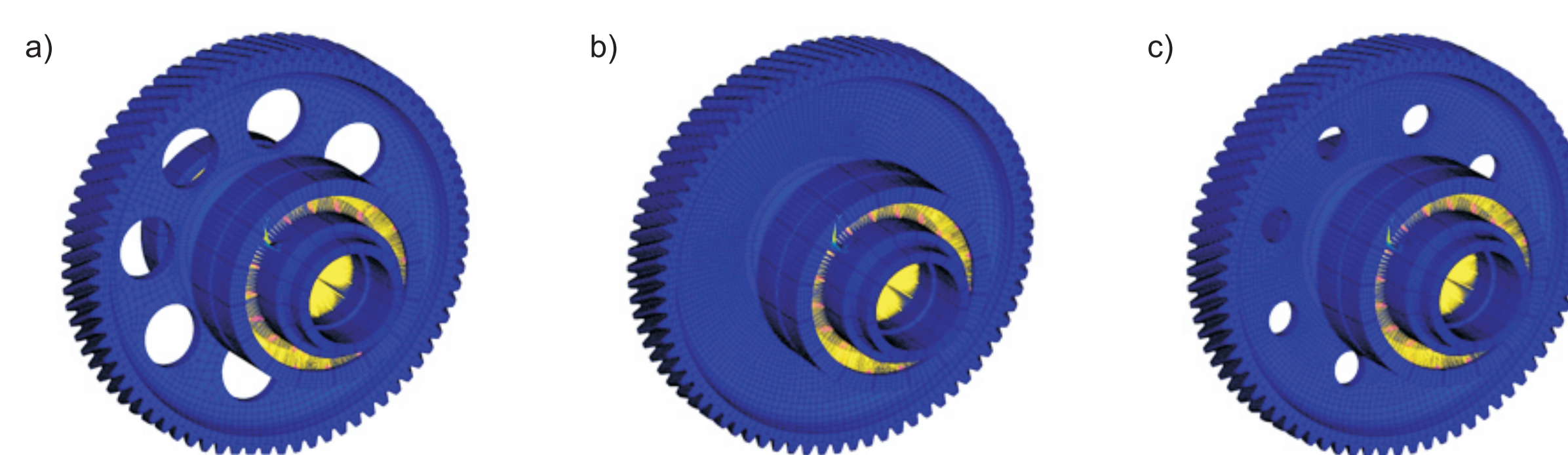
This study includes the results of numerical research conducted by means of FEM, the purpose of which was to check dynamic characteristics of the split path gearbox. The analysis was performed for three spur gears, one of which required design modification in order to avoid resonance with first harmonic of mesh frequency. In order to evaluate the influence of various construction elements on natural frequencies three FEM models were examined for each gear with different boundary conditions which reflected gear support. Design modification was required for the output gear. The modification consisted in proper hole diameter determination on the gear web. Finally analysis confirmed that the natural frequencies are beyond operation range which ensures proper operational conditions of the gears. In order to reflect proper gear support conditions it was necessary to perform



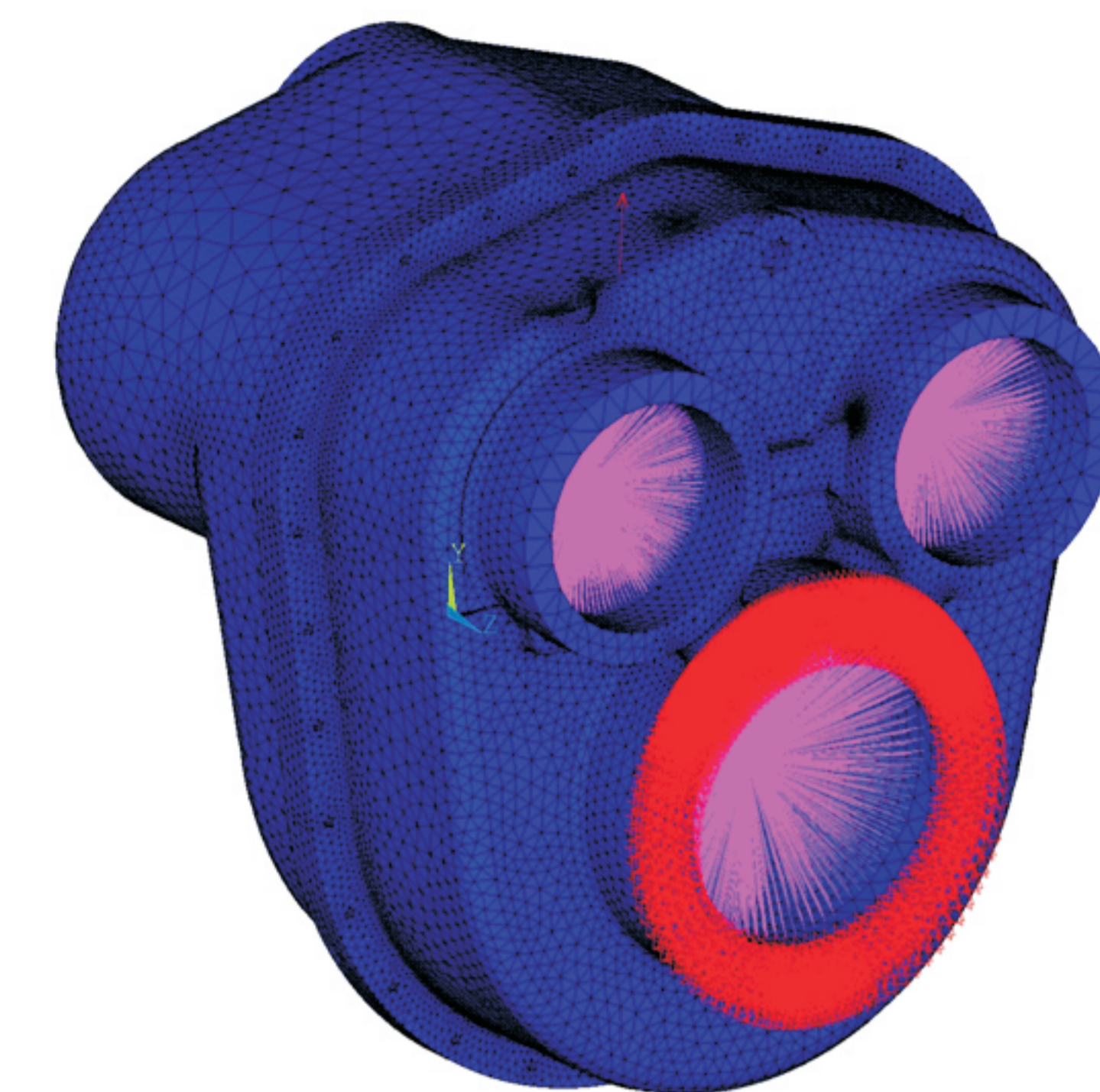
Rys. 7. Model koła wejściowego (z3) z warunkami brzegowymi
Fig. 7. Input gear model (z3) with boundary conditions



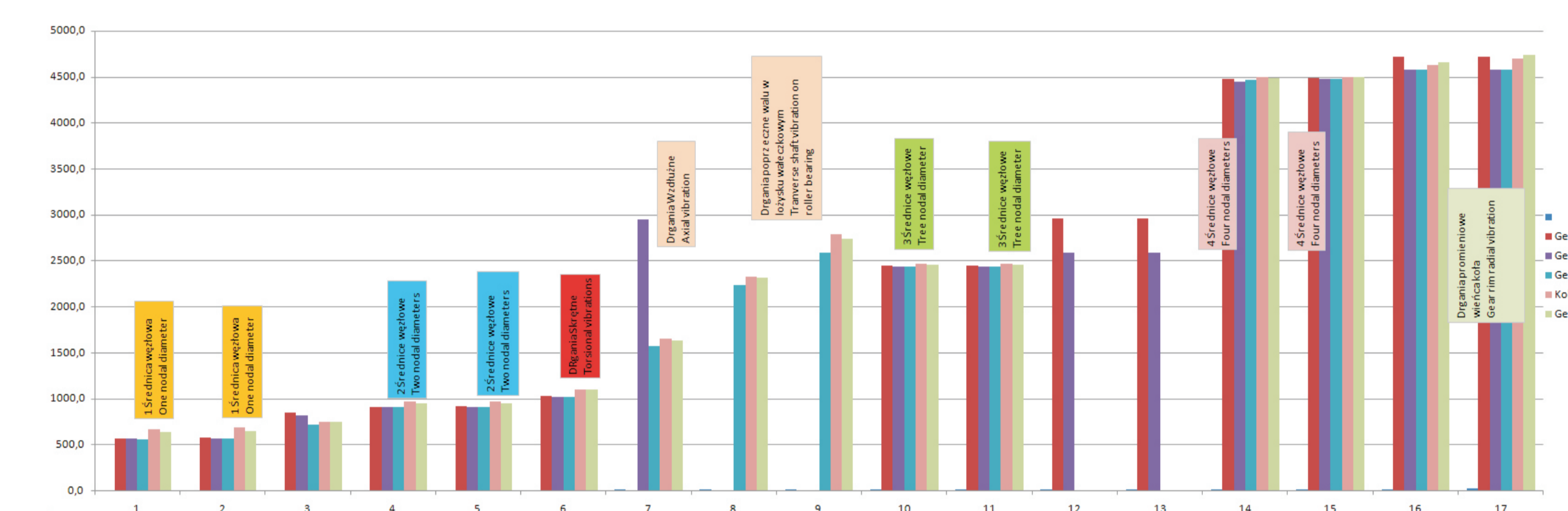
Rys. 8. Model koła z45
Fig. 8. Compound shaft model z45



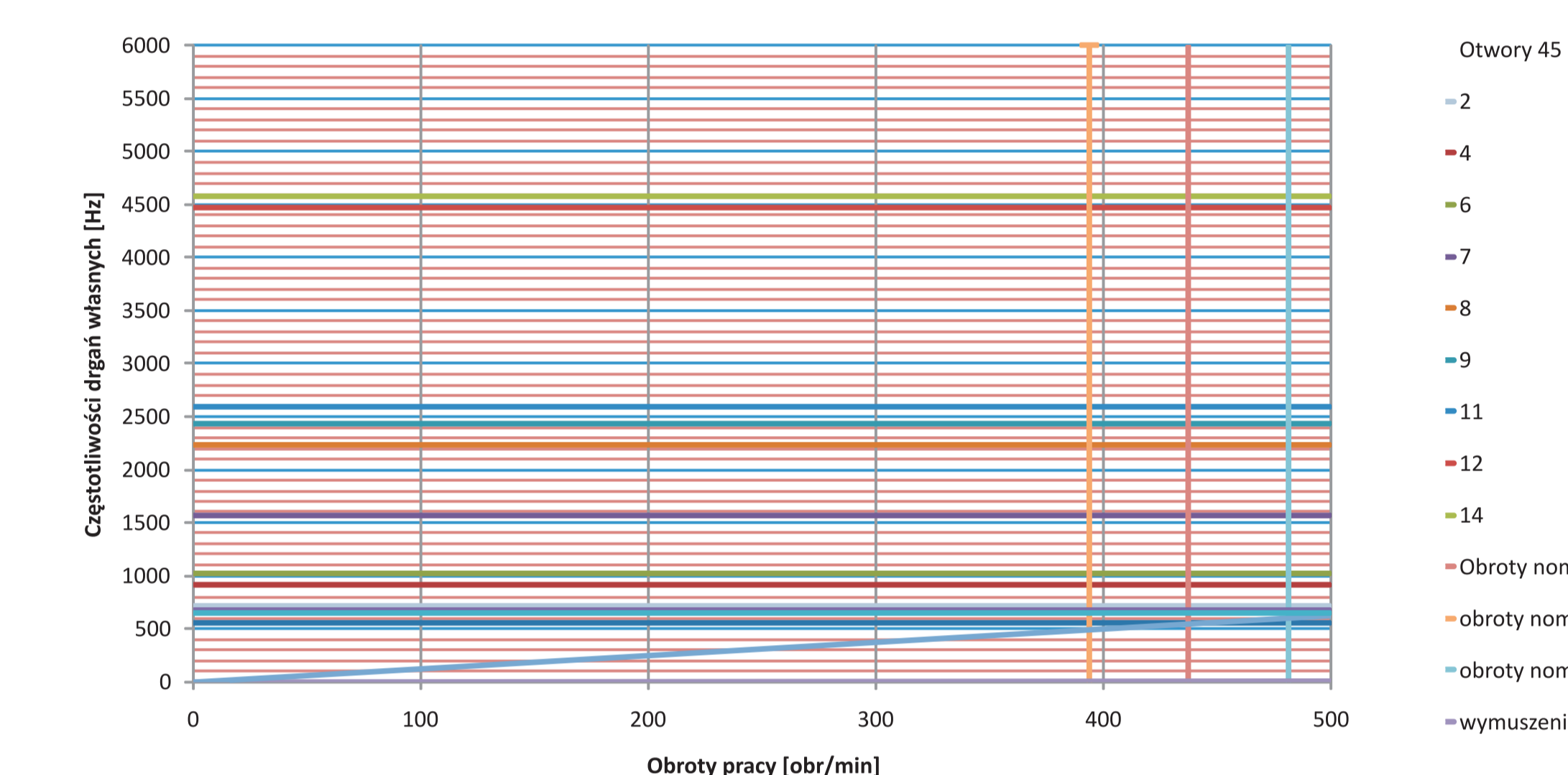
Rys. 9. Modele koła z6a wersja wyjściowa, b wersja bez otworów, c wersja z optymalną średnicą otworów.
Fig. 9. Output gear model (z6) original design a, design without holes b, design with optimized hole diameter c



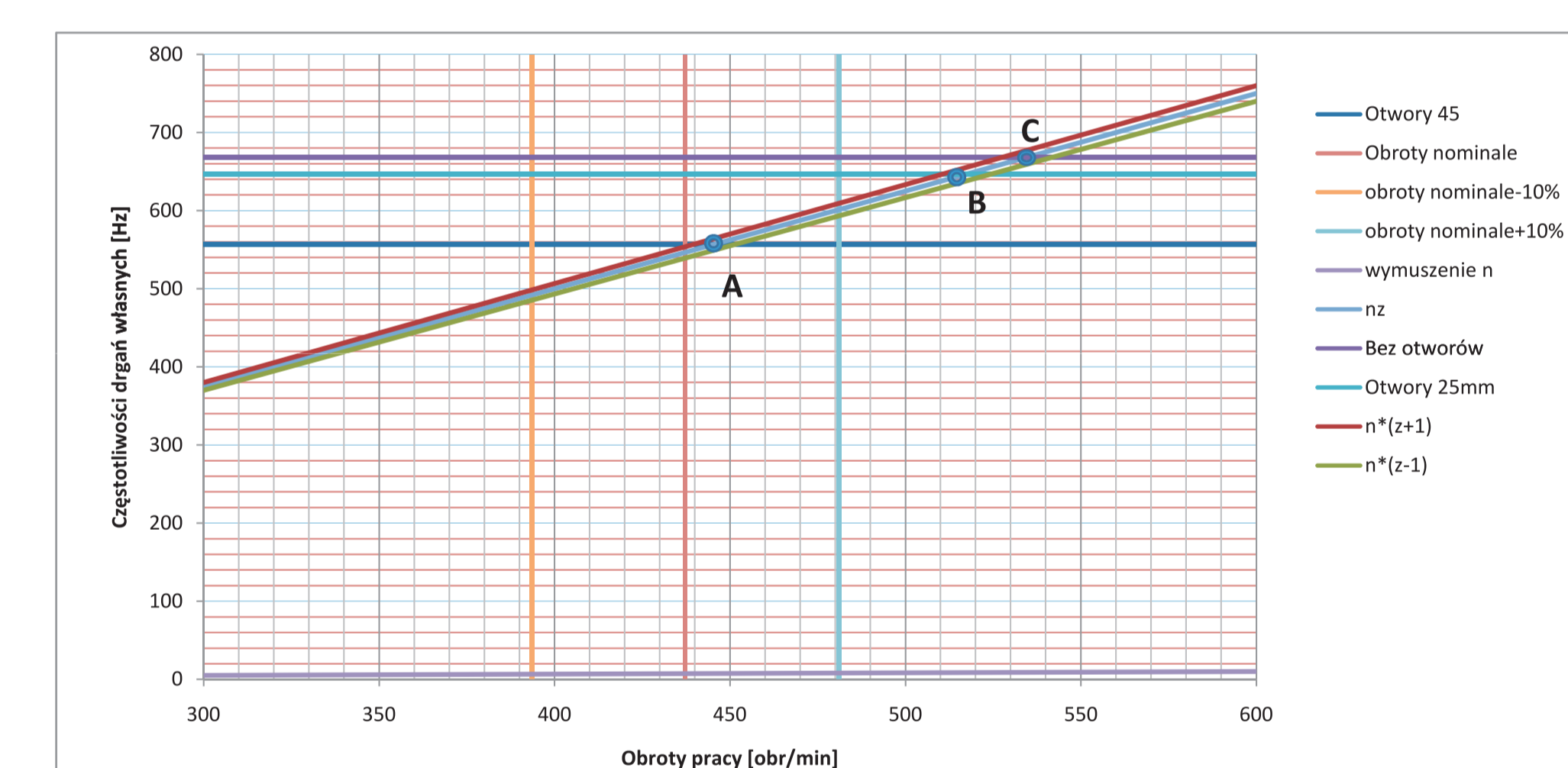
Rys. 10. Model zespołu kadłubów przekładni z warunkami brzegowymi oraz elementami MPC
Fig. 10. Model of housing with boundary conditions and MPC elements



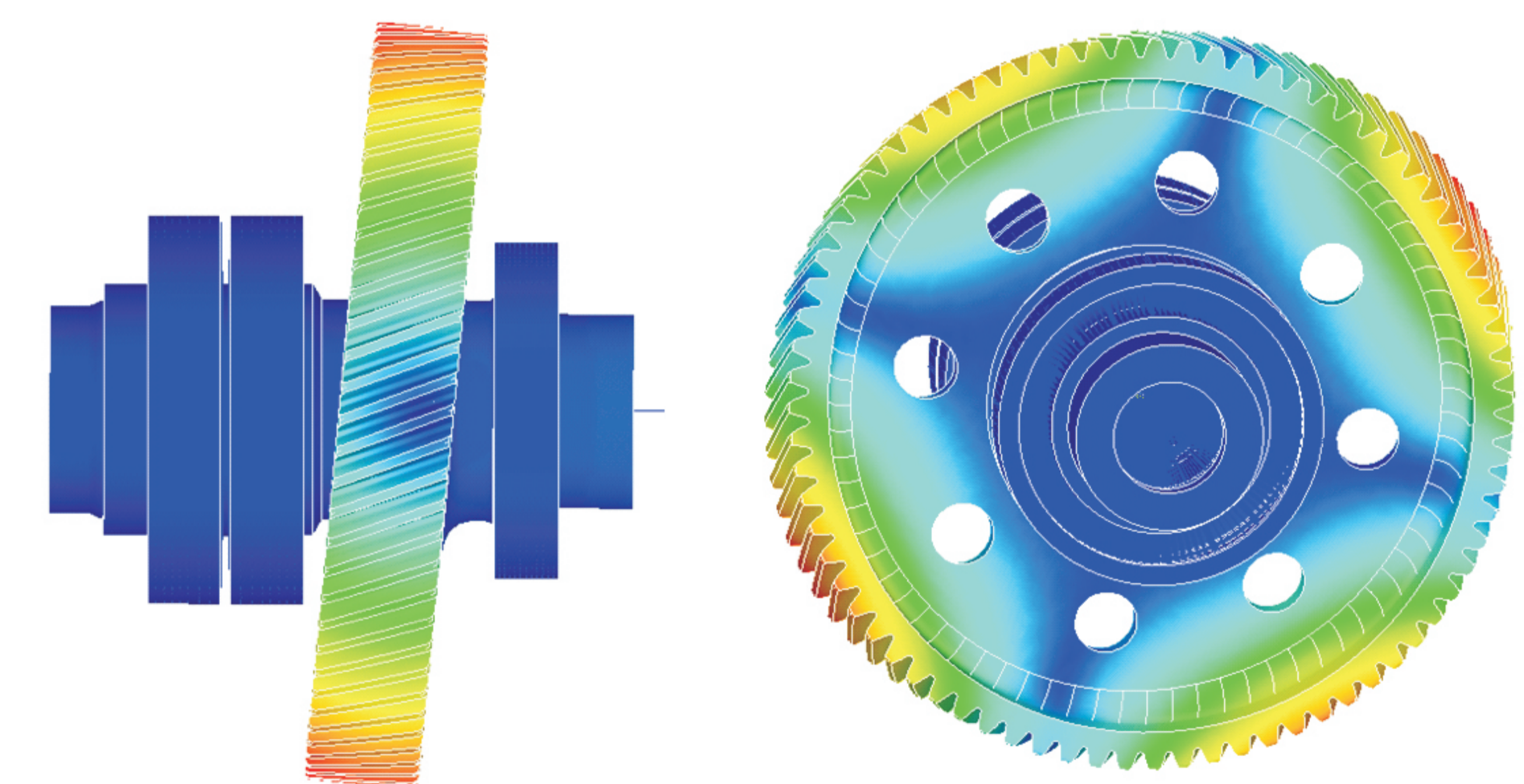
Rys. 11. Zmiana częstotliwości drgań własnych koła w zależności od sposobu modelowania podparcia koła
Fig. 11. Variation of the natural frequencies of the output gear depending on way of gear support modeling



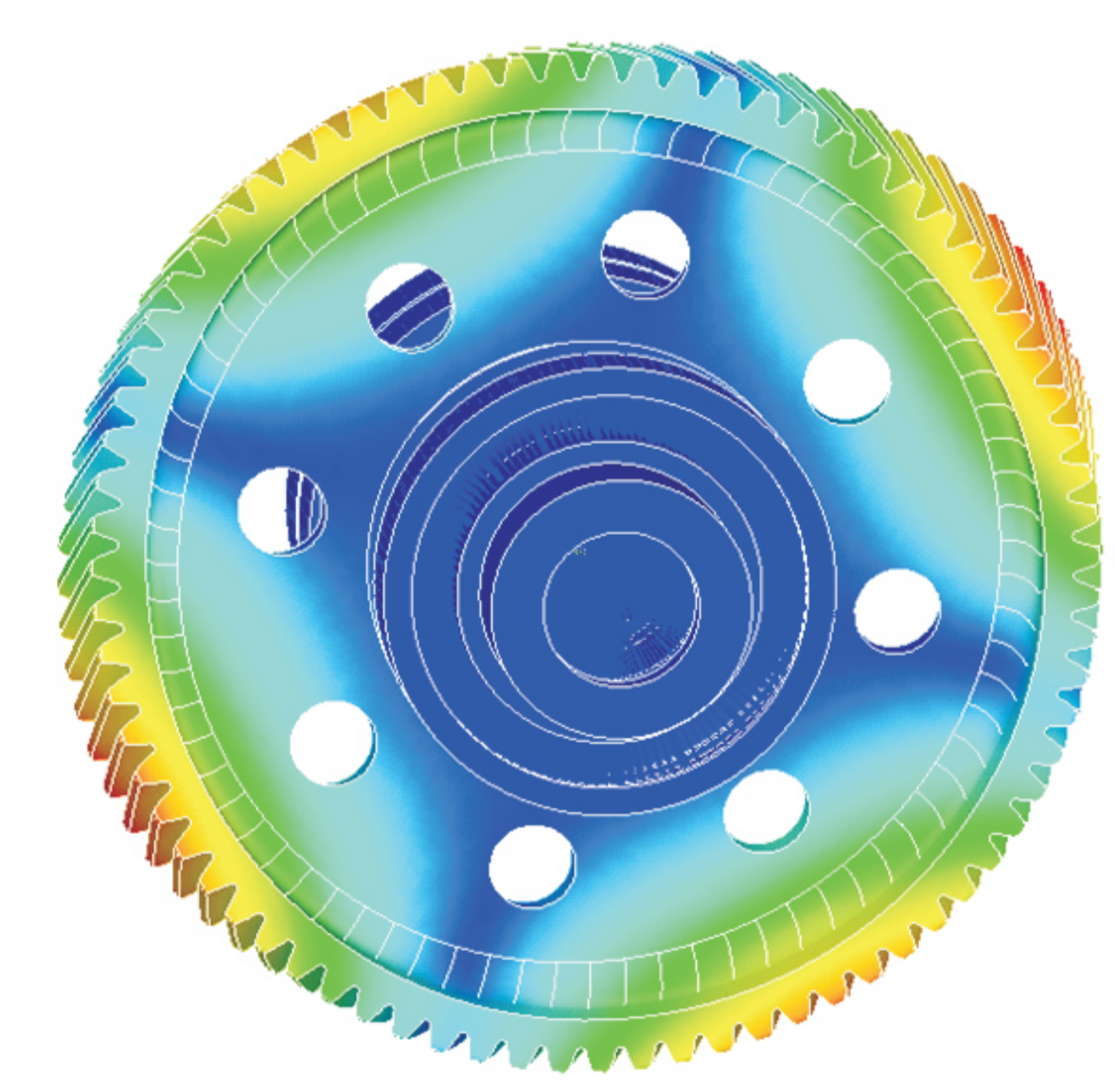
Rys. 12. Wykres rezonansowy koła wyjściowego z6
Fig. 12. Resonance diagram of the output gear z6



Rys. 13. Zmiana częstotliwości własnej dla różnych wersji geometrycznych koła z6
Fig. 13. Variation of the first natural frequency for various output gear (z6) design



Rys. 14. Postać drgań własnych koła z6 z jedną średnicą węzłową
Fig. 14. Natural frequency form of the output gear (z6), with one nodal diameter.



Rys. 15. Postać drgań własnych koła z6 dwoma średnicami węzłowymi
Fig. 15. Natural frequency form of the output gear (z6) with two nodal diameters

Wnioski
Conclusions

Badanie tulejek miało na celu porównanie zmian wymiarowych w zależności od ośrodka chłodzącego. W przypadku chłodzenia w azocie zmiany wymiarowe są wyraźnie mniejsze, jednakże charakter zmian pozostaje taki jak w przypadku oleju (tj. poszerzenie oraz skrócenie tulejek)

Uwzględnienie sztywności łożysk i kadłuba ma znaczny wpływ na obniżenie częstości drgań giętych wałów kół oraz częstotliwości drgań giętych wieńców kół z jedną średnicą i okręgiem węzłowym. Nie stwierdzono natomiast wpływu warunków brzegowych kół na częstotliwości drgań giętych kół z dwoma i więcej średnicami węzłowymi.

Testing of cylinder aimed to compare the dimensional changes depending on the cooling medium. In the case of cooling in nitrogen dimensional changes are considerably smaller, however, the nature of change is such as in the case of oil (ie. extension and shortening).

Taking into consideration bearing and housing stiffness has a significant influence on lowering the natural frequencies of the bending form of the shaft vibrations and on lowering natural frequencies of the bending form of vibrations of gear rims with one diameter nodes and one node circle. However no influence of the boundary conditions of the gears was found in relation with natural frequencies of the bending form of vibrations of gear rims with two or more diameter nodes.

Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym

Modern material technologies in aerospace industry

Opracowanie nowej, prostszej i tańszej przekładni zębatej w miejsce skomplikowanych i drogich przekładni planetarnych

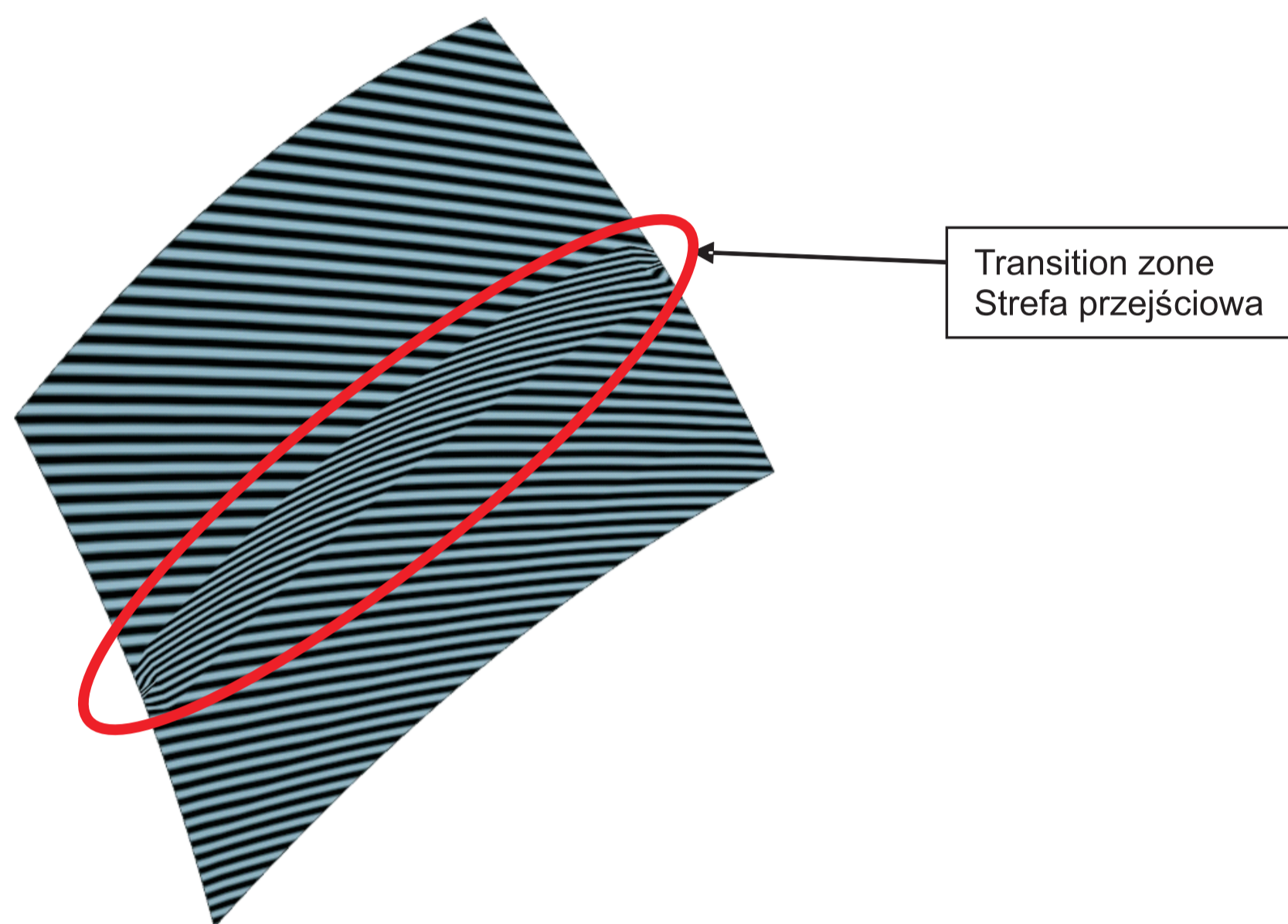
Development of a new, simpler and cheaper toothed gear in place of complicated and expensive planetary gears

Wyniki badań Results

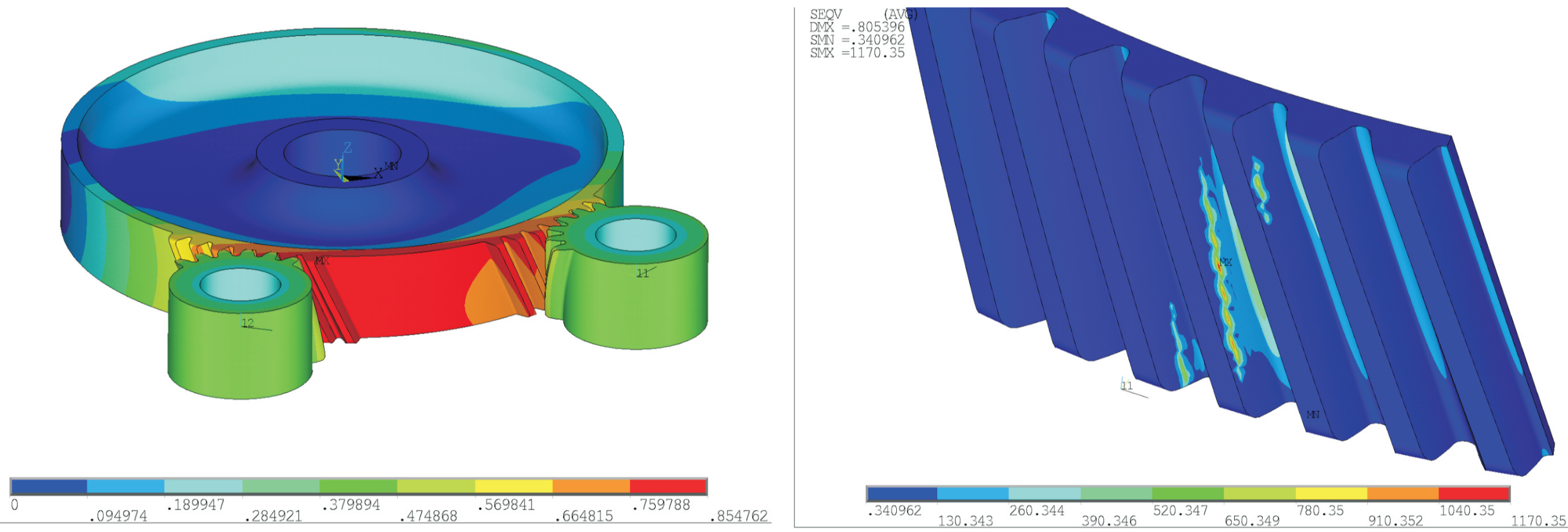
Modyfikacja powierzchni bocznej zęba Tooth flank modification modified

Przekładnie wielodrożne stały się obiecującym rozwiązaniem dla wiroplątów od momentu udanej aplikacji na śmigłowcu Mi-26. Metody opracowane do analizy i optymalizacji rozdzielenia momentu obrotowego w przekładniach wielodrożnych wciąż są przedmiotem intensywnych badań. Efektem, każdej z opracowywanych metod jest akceptowalna różnica w rozdzieleniu momentu i powtarzalna przy użyciu stałych metod wytwarzania i montażu.

Elementy układów napędowych śmigłowców są projektowane do przenoszenia maksymalnych obciążeń eksploatacyjnych przy minimalnej masie jako funkcja celu. Procesy optymalizacji obejmują wiele aspektów konstrukcji kół zębatych. Modyfikacje powierzchni bocznej zębów, są jednym z tych procesów. Układ wielodrożny może oferować dwie ścieżki do przeniesienia momentu. Na stopniu końcowym koło sumujące jest w przyporze z dwoma zębnikami, co czyni analizę modyfikacji bardzo złożonym. Metoda elementów skończonych została użyta do znalezienia rozwiązania.

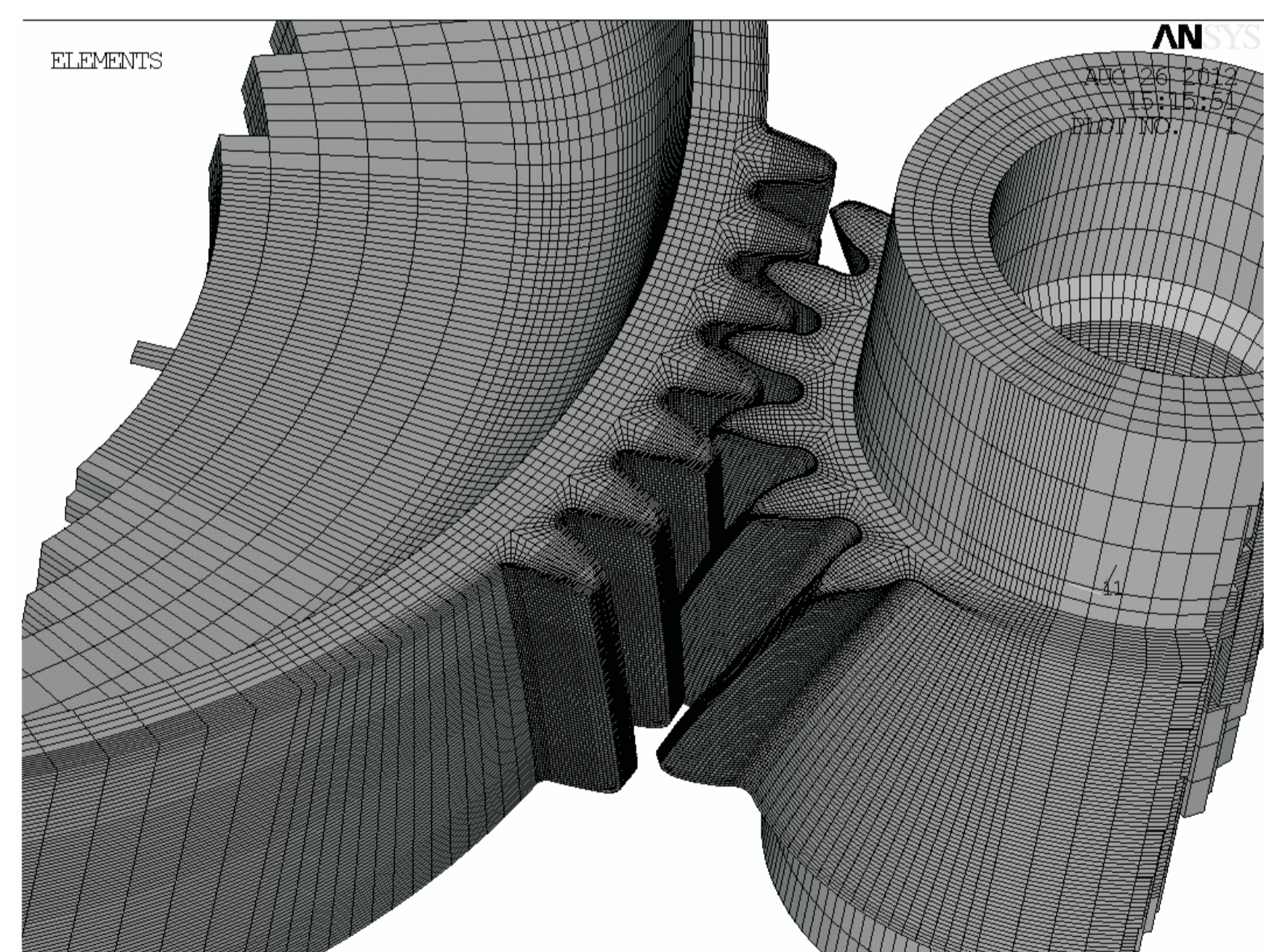


Rys. 1. Zmodyfikowana powierzchnia boczna zęba z widoczną strefą przejściową
Fig. 1. Modified tooth flank with visible transition zone (lead modification included)



Rys. 2. Odształcenia wieńca koła sumującego spowodowane siłami poosiowymi
Fig. 2. Bull gear rim deflection due to mesh axial forces

Rys. 3. Ślad współpracy na modelu wieńca (koło sumujące)
Fig. 3. Teeth contact pattern on solid model (bull gear)

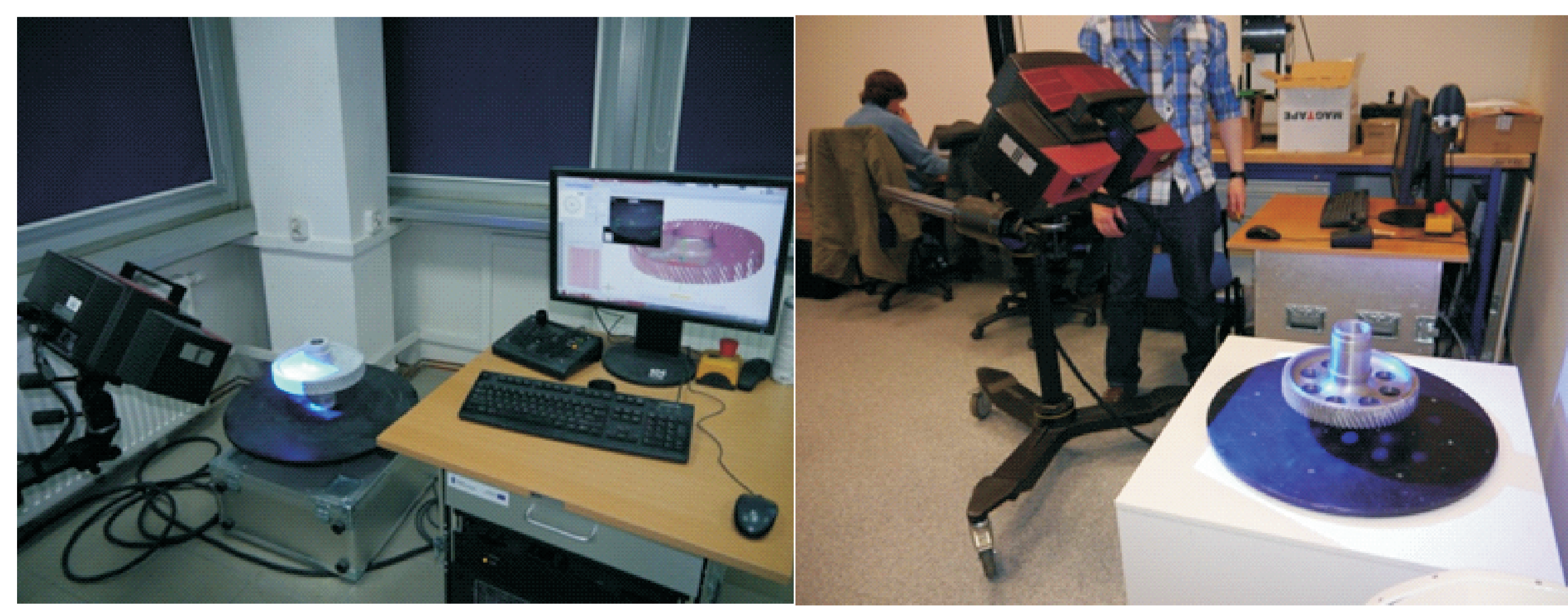


Rys. 4. Strategia podziału na element skończone (koło sumujące i 1 zębnik)
Fig. 4. Meshing strategy (bull gear & one pinion)

Analiza geometrii koła testowego przekładni dwudrożnej po obróbce zgrubnej przed obróbką cieplną

Analysis of geometry of tested gear wheel for aeronautical dual-power path gear after roughing and before heat treatment

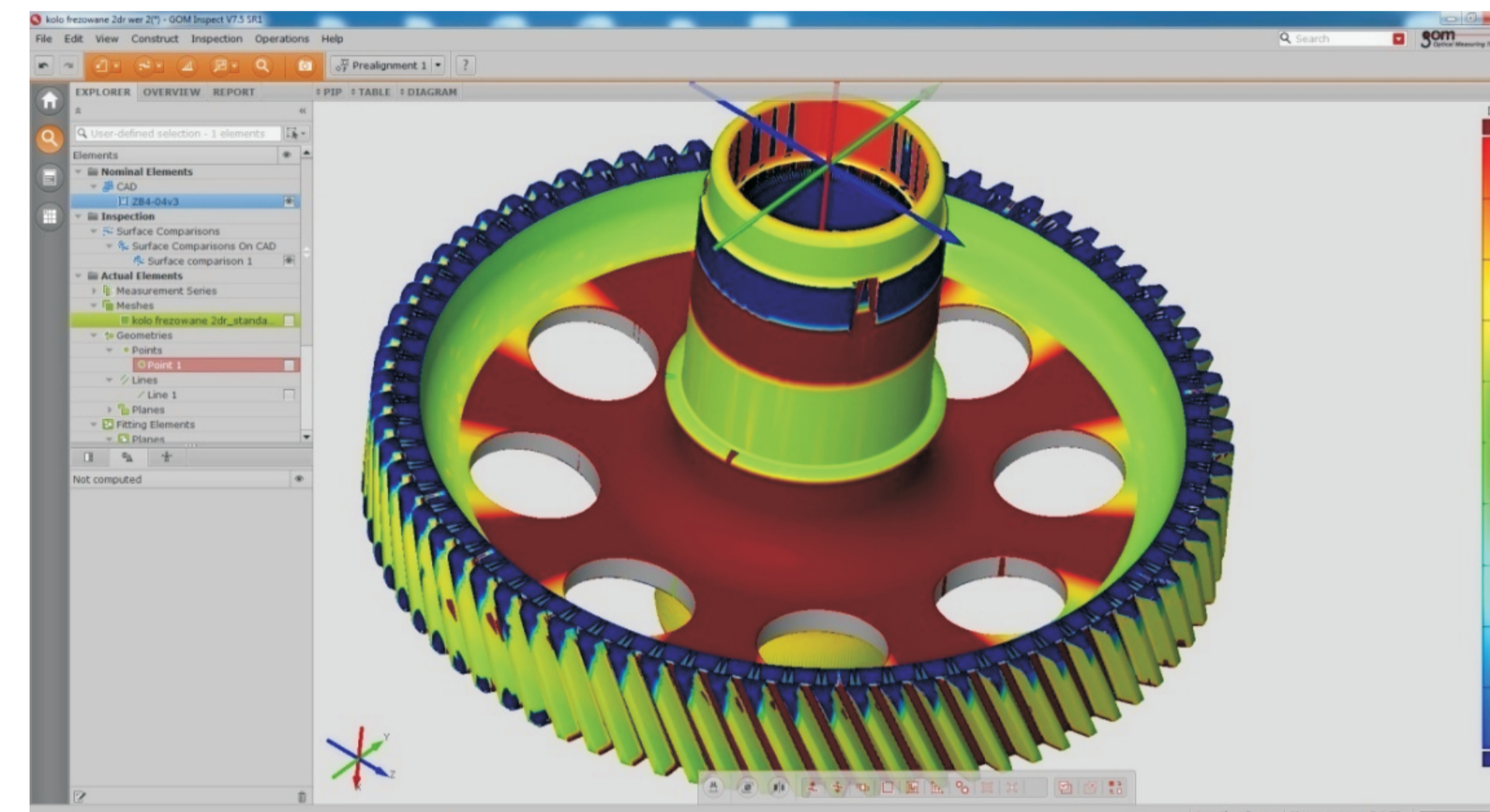
Celem prowadzonych badań było opracowanie i wykonanie analizy dokładności wykonania geometrii koła testowego przekładni dwudrożnej po obróbce zgrubnej przed obróbką cieplną z zastosowaniem współrzędnościowych optycznych metod pomiarowych. Prowadzone badania wykonano w Laboratorium Inżynierii Odrotnej i Szybkiego Prototypowania Katedry Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej. Zrealizowane zostały przy użyciu optycznej współrzędnościowej maszyny pomiarowej - skanera ATOS II TripleScan (rys. 5) i oprogramowaniu ATOS Professional V7.5. Aby zapewnić wiarygodność wyników pomiarów, badania zostały przeprowadzone również w siedzibie specjalistycznej firmy pomiarowej ITA Polska w Poznaniu (rys. 6). W obu przypadkach zastosowano optyczne systemy pomiarowe GOM ATOS, których działanie oparte jest na bazie niebieskiego światła. Wykonane w obu ośrodkach badania wykazały spójność otrzymanych wyników pomiarów.



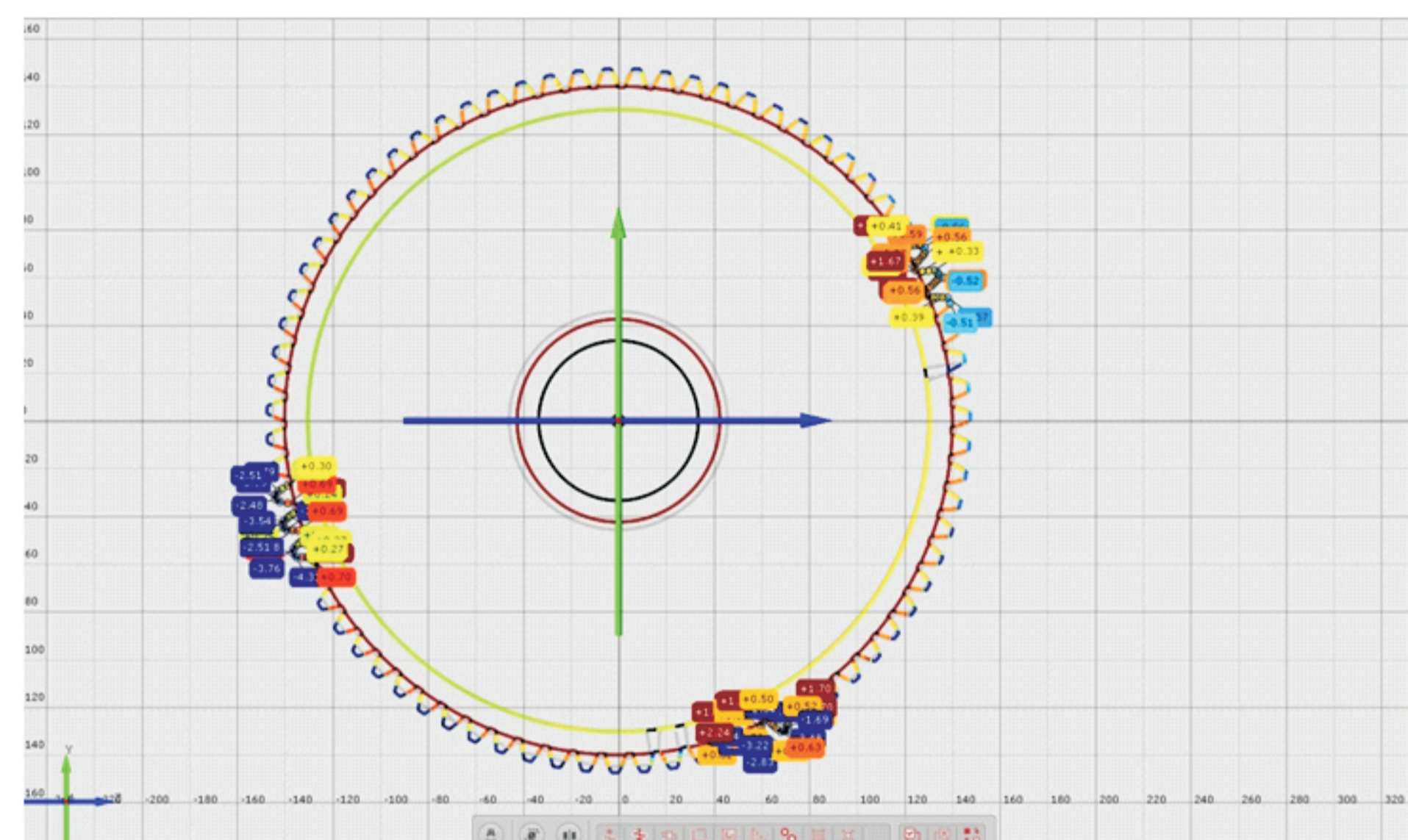
Rys. 5. Pomiar walcowego koła zębatego dwudrożnej przekładni lotniczej z zastosowaniem optycznego skanera 3D ATOS II TripleScan: a) w Katedrze Konstrukcji Maszyn Politechniki Rzeszowskiej b) w laboratorium pomiarowym firmy ITA Polska w Poznaniu
Fig. 5. Measurement of gear wheel for aeronautical dual-power path gear using optical 3D scanner ATOS II TripleScan: a) in the KKM, b) in the laboratory measurement of ITA Poland in Poznan

Politechnika Rzeszowska, Politechnika Łódzka

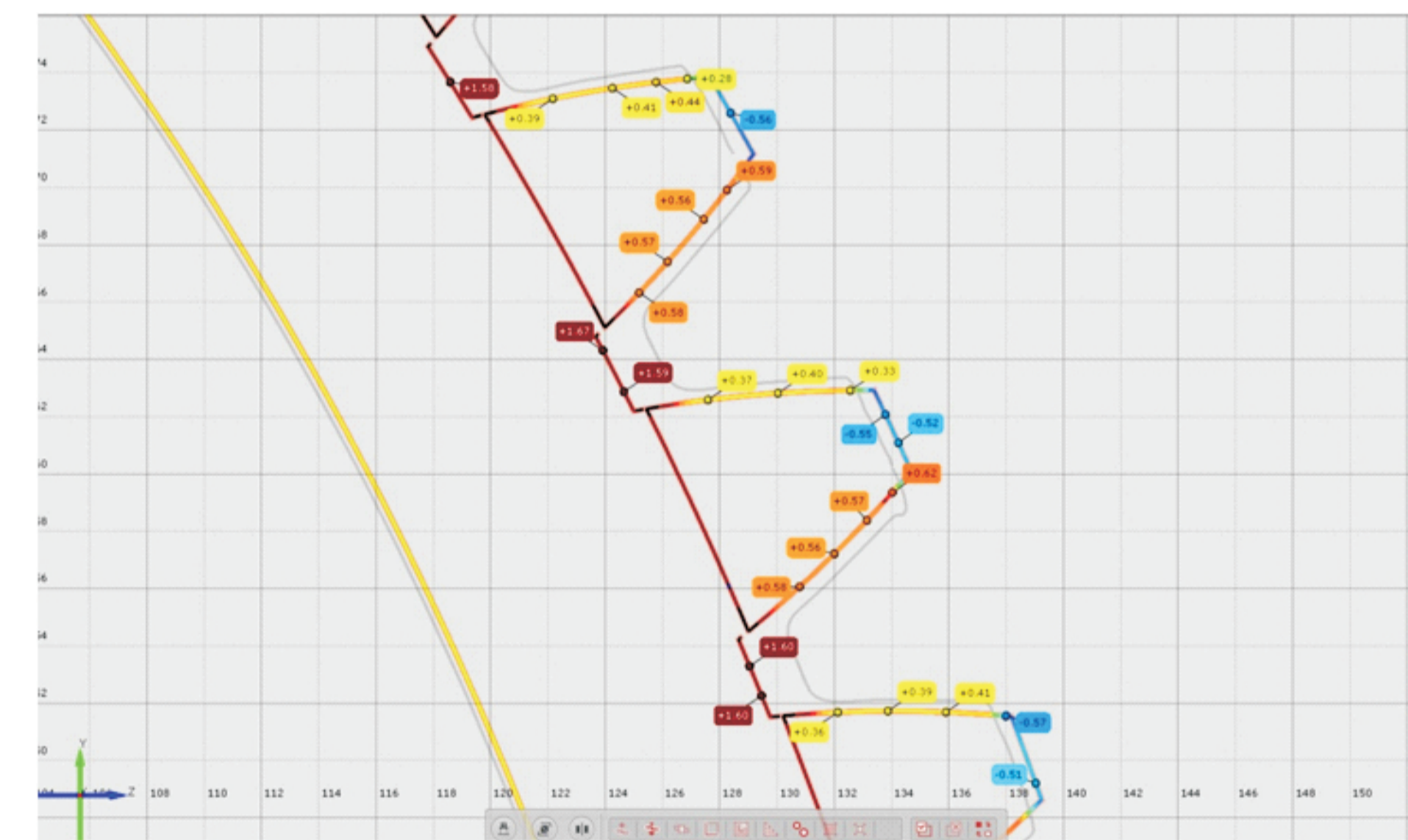
Otrzymany obraz odchyłek wizualizuje w miejsca krytyczne mierzonego koła, które należy poddać analizie szczegółowej. Analiza wykonana została kompleksowo (rys. 7) zgodnie z bazowaniem układu współrzędnych na rzeczywistej osi obrotu koła zębatego. Wykonane przekroje inspekcyjne umożliwiły głębszą analizę dokładności wykonania koła zębatego w krytycznych miejscach. Oprogramowanie GOM Inspection umożliwia wygenerowanie przekroju przez dane pomiarowe i dane konstrukcyjne CAD. Odchyłki tych dwóch przekrojów są przedstawiane również kolorystycznie. W wybranych punktach można załączyć informację o wartości odchyłki oraz czy mieści się w określonej tolerancji.



Rys. 6. Globalna analiza odchyłek powierzchni koła zębatego w odniesieniu do modelu CAD
Fig. 6. Global analysis of deviations of the gear surfaces on the CAD model



Rys. 7. Rozmieszczenie miejsc wykonania analizy zarysu w przekroju 1
Fig. 7. Positions of executing the analysis of profile on cross-section 1



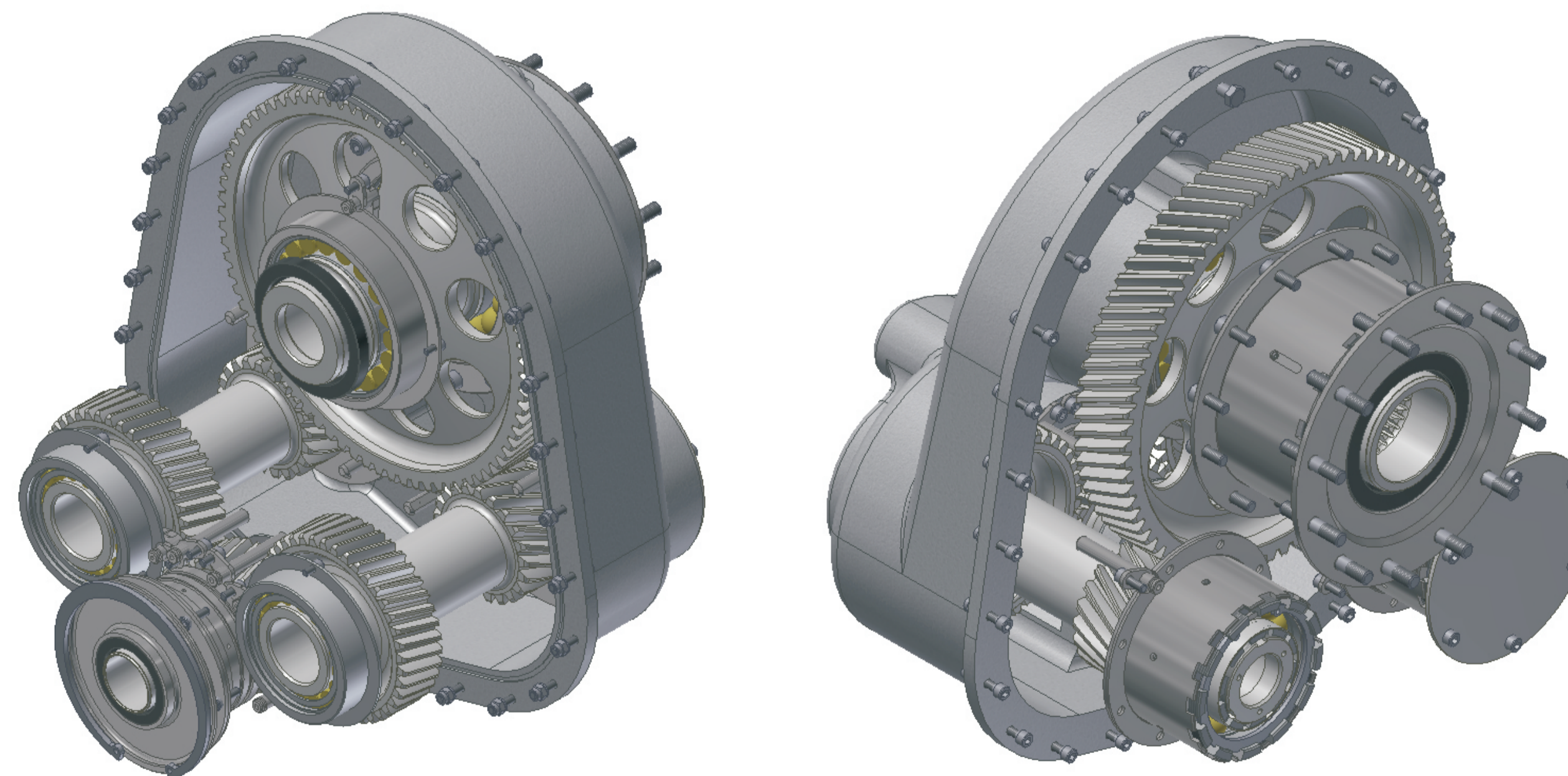
Rys. 8. Analiza odchyłek zarysu w przekroju 1 - położenie 1
Fig. 8. Analysis of profile deviations on cross-section 1 - position 1

Układ olejowy przekładni dwudrożnej Lubrication system of a dual-path gearing

Układ olejowy przekładni musi zapewnić dobre smarowanie par ciernych oraz dostarczenie niezbędnej ilości oleju w celu odprowadzenia ciepła wytworzonego w ząbkowaniu i łożyskach.

Opracowano dwa warianty konstrukcji kadłuba różniące się koncepcją układu olejowego. W pierwszym z nich zastosowano zintegrowaną miskę olejową, natomiast w drugim (rys. 9) wykorzystano zewnętrzny zbiornik olejowy, sam kadłub wyposażając jedynie w sływ oleju.

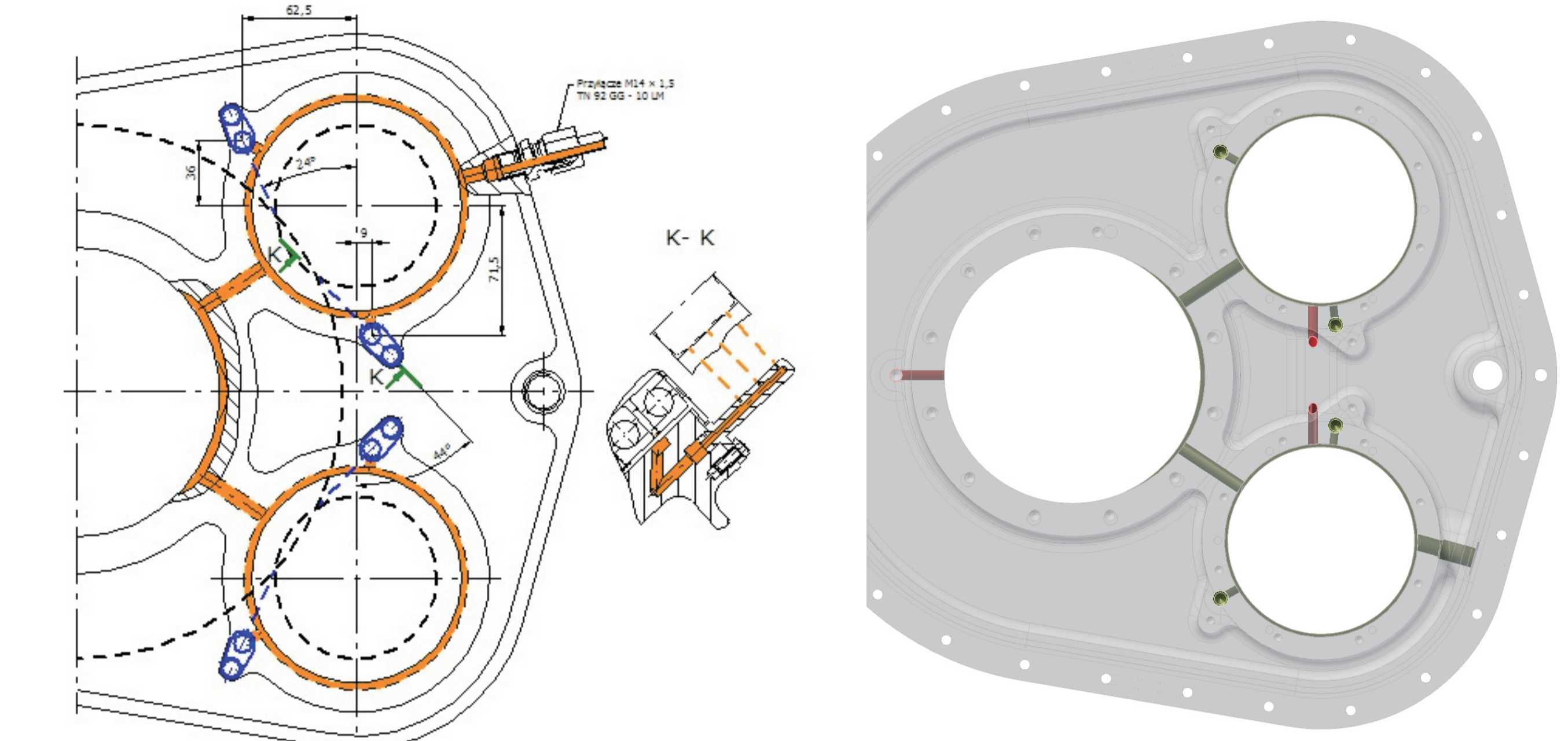
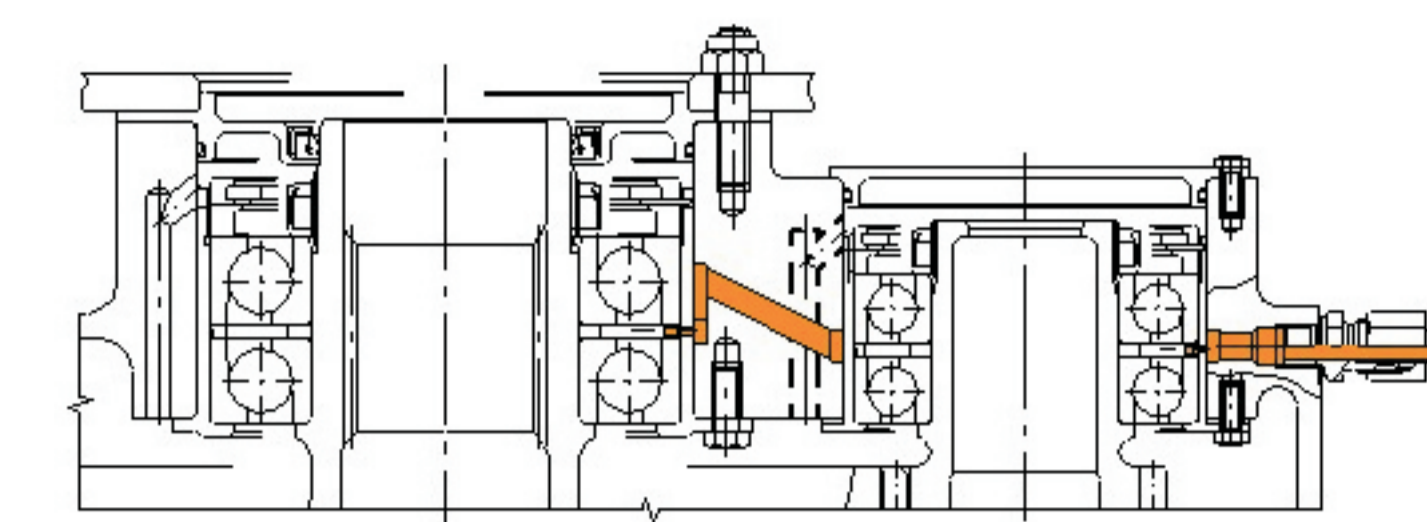
Analiza układu chłodząco-smarującego przekładni pozwoliła na określenie ilości oleju dla poszczególnych miejsc doprowadzenia (tabela 1). Fragmenty rozwiązania układu smarowania z przykładowym doprowadzeniem oleju oraz rozmieszczeniem kanałów olejowych i wtryskiwaczy przedstawiono na rysunkach 10 i 11.



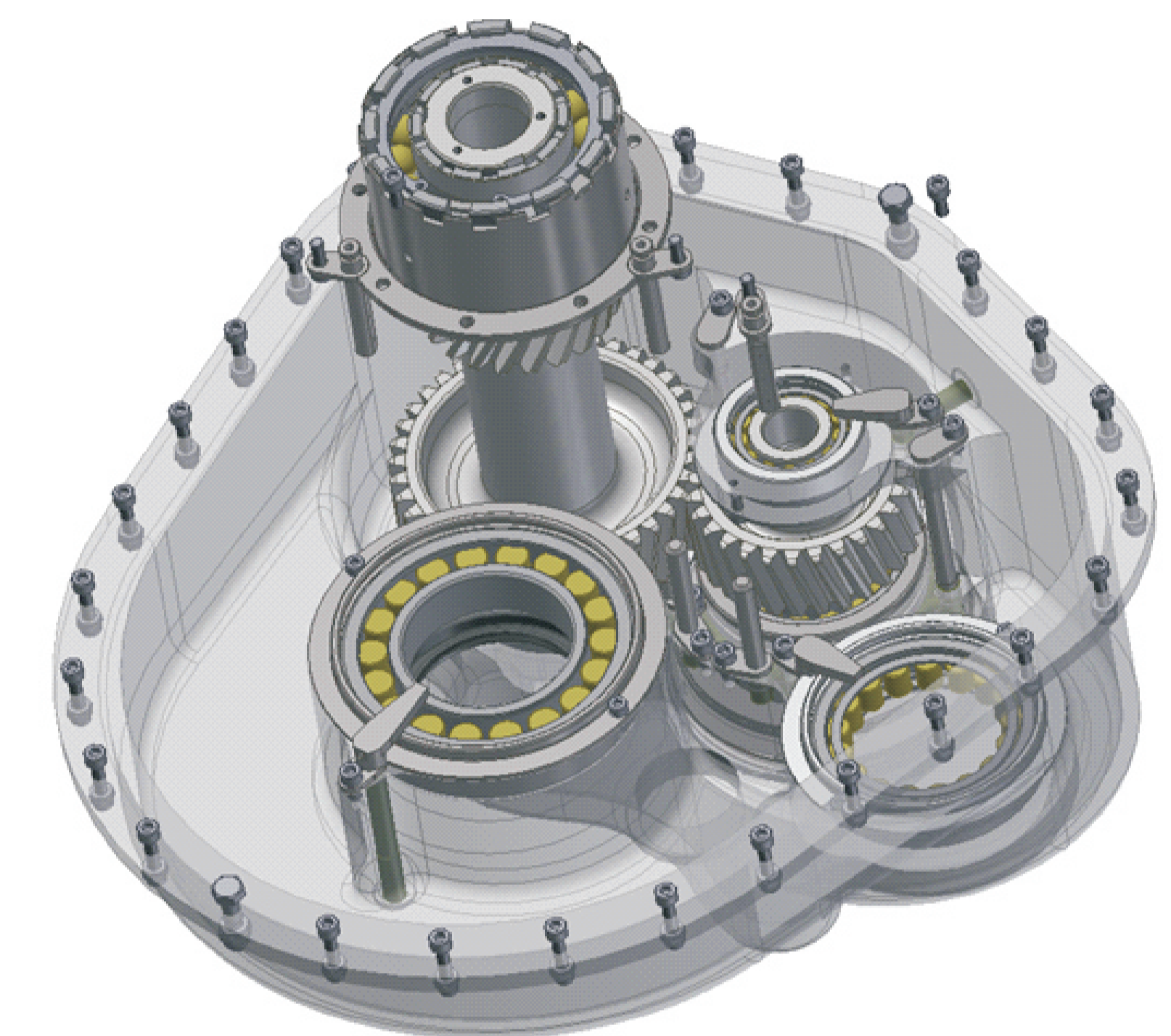
Rys. 9. Rozwiązanie konstrukcji kadłuba z wykorzystaniem zewnętrznego zbiornika olejowego
Fig. 9. The fuselage structure solution using an external oil tank

Tabela 1. Ilość oleju dla przekładni dwudrożnej
Table 1. The amount of oil for the dual-path gearing

L.p.	Miejsce doprowadzenia	dm ³ /min
1	Łożyska kulkowe skośne wału zębnika - 2 × 7210	1,5
2	Łożysko walcowe wału zębnika - RNU 206	1,0
3	Koła zębate I stopnia 4 wtrysk. × 2 L/min.	8,0
4	Łożysko walcowe wału pośredniego - 2 × RNU 211	2,0
5	Łożyska kulkowe skośne wału pośredniego - 2 × 7212	2,0
6	Łożysko walcowe napędu wyjściowego - RNU 215	1,5
7	Łożyska kulkowe skośne napędu wyjściowego - 2 × 7217	2,0
8	Koła zębate II stopnia 4 wtrysk. × 2,5 L/min.	10,0
Całkowita ilość oleju dopływającego do przekładni ZB-4		28,0



Rys. 10. Doprowadzenie oleju pod oprawy łożysk i rozmieszczenie wtryskiwaczy kół zębatych stopnia zbiorczego oraz łożysk kulkowych skośnych.
Fig. 10. The supply of oil under bearing housings and the injectors arrangement for combined stage gear wheels and angular ball bearings



Rys. 11. Rozmieszczenie wtryskiwaczy w dolnej części korpusu
Fig. 11. The arrangement of injectors in the bottom part of the body

Wnioski Conclusions

Koła zębate o śrubowej linii zęba jako elementy sumujące mają ograniczone zastosowanie w przekładniach z powodu znacznych odształceń wieńca od zsumowanych sił poosiowych. Odształcenia te czynią bardzo trudnym dopracowanie modyfikacji linii zębów koła sumującego i ząbkowanych z nim zębników. Modyfikacja zarysu a w szczególności strefy przejściowej pomiędzy ewolwentą modyfikacji głowy lub stopy a ewolwentą nominalną odstawia problemy które obecnie są w małym zakresie opisane w literaturze i wymagają głębszej analizy. Analizowany przypadek wykazał możliwość wpływania na położenia jak i wartość maksymalnych naprężeń kontaktowych.

Wykonane przekroje inspekcyjne umożliwiły głębszą analizę dokładności wykonania koła zębatego w krytycznych miejscach. Oprogramowanie GOM Inspection umożliwia wygenerowanie przekroju przez dane pomiarowe i dane konstrukcyjne CAD. Odchyłki tych dwóch przekrojów są przedstawiane kolorystycznie. W wybranych punktach można załączyć informację o wartości odchyłki oraz czy mieści się w określonej tolerancji.

Helical gears have limited application at final summation stage of split-torque transmission due to huge displacement of rim caused by axial force summation. This displacement makes very difficult lead flank modification of mated pinions with one gear. Proper tooth flank modification is necessary for smooth load transition without any edge of contact. Profile modification especially transition zone between modified involute and nominal one revealed problem which currently is not widely discussed in science publication and requires more deeply analysis. Case discussed above shows that significant contact stress reduction is possible.

The created inspection cross-sections allowed detailed analysis of accuracy of the gear at critical points. GOM Inspection Software allows you to generate a cross-section through the measurement data and CAD design data. Deviations of these two sections are presented in the form of colored maps. Information about a deviation may be annexed at some points and whether it is within the specified tolerance.

Wskaźniki realizacji celów projektu Indicators of the project

Referaty

Budzik G., Markowski T., Kozik B., Sobolewski B., Cirył M.: *Modelowanie 3D-CAD i prototypowanie demonstratora przekładni lotniczej do badań stanowiskowych*. 52. Sympozjum „Modelowanie w mechanice”, Ustroń 2013.
Markowski T., Kozik B., Budzik G., Dziubek T.: *Analiza wymiarowa kół zębatych demonstratora przekładni lotniczej wykonanych metodą MEM*. 52. Sympozjum „Modelowanie w mechanice”, Ustroń 2013.

Publikacje

Budzik G., Sobolewski B.: *Zastosowanie systemów CAD i RP w prototypowaniu przekładni dwudrożnej*. MECHANIK nr 2/2013, CD 18, s. 1-10.
Dziubek T., Pisula J.: *Analiza dokładności modeli 3D-CAD walcowych kół zębatych otrzymanych w procesie symulacji obróbki w odniesieniu do parametrycznych modeli powierzchniowych*. MECHANIK nr 2/2013, CD 19, s. 1-12.

Prace mgr, dr, hab.

Prace magisterskie planowane

Krzysztof Jursa : *Parametryzacja przekładni dwudrożnej*. Promotor: dr inż. B. Kozik , planowany termin obrony pracy: lipiec 2013