mgr inż. Damian Kozanecki[1)]
ORCID: 0000-0003-3416-8795
dr hab. inż. Artur Wirowski, prof. uczelni[1)]
ORCID: 0000-0001-5251-321X
dr inż. Martyna Rabenda[1)*)]
ORCID: 0000-0002-2363-3543

Analysis of the influence of bidirectional sinusoidal corrugation of flue gas duct walls on its static response

Analiza wpływu dwukierunkowego sinusoidalnego pofałdowania ścian kanału spalin na jego odpowiedź statyczną

DOI: 10.15199/33.2026.10.12

Abstract. The paper presents the analysis of the influence of bidirectional sinusoidal corrugation of steel flue gas duct walls on their static response. The analysis was performed using FEM software for two variants of similar mass, one with flat and the other with corrugated plates. The considered load cases included self-weight, as well as internal pressure and thermal actions. Based on the obtained results, the effect of corrugation on the displacements and stresses of the flue gas duct structure was evaluated.

Keywords: bidirectional sinusoidal corrugation; flue gas duct; steel shell; finite element method; static analysis.

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę wpływu dwukierunkowego sinusoidalnego pofałdowania ścian stalowego kanału spalin na jego odpowiedź statyczną. Analizę przeprowadzono przy użyciu oprogramowania MES dla dwóch wariantów o zbliżonej masie, z blachami płaskimi oraz pofałdowanymi. Rozpatrzono oddziaływania pochodzące od ciężaru własnego oraz ciśnienia i temperatury wewnątrz kanału. Otrzymane wyniki posłużyły do oceny wpływu pofałdowania na przemieszczenia i naprężenia konstrukcji kanału spalin.

Słowa kluczowe: dwukierunkowe sinusoidalne pofałdowanie; kanał spalin; stalowa powłoka; metoda elementów skończonych; analiza statyczna.

Characteristics of flue gas duct structures. Flue gas ducts are essential components of installations involving combustion processes. Their primary function is to convey flue gases between individual components of an installation, such as boilers, dust collectors, heat exchangers, and stacks [1]. Owing to their considerable dimensions, they are generally designed as thin-walled shell structures, typically made of steel [1÷3]. During operation, flue gas ducts are primarily subjected to their self-weight, pressure differences between the duct interior and its surroundings, and temperature variations associated with the flue gas and ambient temperatures [1÷4]. These actions may result in significant structural displacements, local stress concentrations, and undesirable stability-related phenomena, including buckling of portions of the duct walls [2÷4]. To address these actions, designers seek solutions that increase structural stiffness. In engineering practice, this is most commonly achieved by increasing plate thickness, introducing stiffening ribs, or adding external framing systems [1÷3, 5]. Although effective, these solutions generally increase structural mass through greater material consumption and make fabrication and assembly more complex. An alternative approach is to modify the geometry of the duct wall surfaces themselves. Corrugation can increase wall stiffness without a substan-

Charakterystyka konstrukcji kanałów spalin. Kanały spalin stanowią nieodzowny element wszystkich instalacji, w których zachodzi proces spalania. Ich główną funkcją jest transport spalin między poszczególnymi urządzeniami instalacji, takimi jak kotły, odpylacze, wymienniki ciepła oraz kominy [1]. Ze względu na ich znaczne wymiary geometryczne, projektowane są najczęściej jako cienkościenne, zwykle stalowe, konstrukcje powłokowe [1÷3]. W trakcie eksploatacji kanały spalin poddane są oddziaływaniom pochodzącym najczęściej od ciężaru własnego, różnicy ciśnienia pomiędzy wnętrzem kanału a otoczeniem oraz zmian temperatury związanych z temperaturą spalin oraz otoczenia [1÷4]. Efektem tych oddziaływań mogą być znaczne przemieszczenia konstrukcji, lokalne koncentracje naprężeń oraz niepożądane zjawiska związane z utratą stateczności fragmentów ścian kanału [2÷4]. W odpowiedzi na analizowany zbiór oddziaływań, projektanci poszukują rozwiązań pozwalających na zwiększenie sztywności projektowanej konstrukcji. Efekt ten osiąga się najczęściej przez zwiększenie grubości blach, zastosowanie żeber usztywniających lub wprowadzenie zewnętrznych układów ramowych [1÷3, 5]. Wskazane rozwiązania, mimo skuteczności, prowadzą zwykle do zwiększenia masy konstrukcji z uwagi na większe zużycie materiału oraz skomplikowanie procesu produkcji i montażu. Alternatywą może być odpowiednie kształtowanie geometrii powierzchni ścian kanału. Pofałdowanie umożliwia zwiększenie sztywności ścian kanału bez konieczności istotnego zwiększenia ilości użytego materiału [6, 7]. Dwukierunkowe sinusoidalne pofałdowanie powierzchni wydaje się być interesującym rozwiąza-

[1)] Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
[*)] Correspondence address: martyna.rabenda@p.lodz.pl

tial increase in material consumption [6, 7]. Bidirectional sinusoidal surface corrugation is a particularly interesting solution because it can provide stiffening along both principal directions of the structure [8÷11].

Investigated method of strengthening the duct structure. This study examines one of the strengthening approaches outlined in the preceding section, namely the use of appropriately shaped duct wall surfaces. This approach is employed, among other applications, in corrugated sheets, trapezoidal profiled sheets, ribbed plates, and various profiled panels [6, 7, 11÷13]. Modifying the surface geometry increases member stiffness without a proportional increase in material consumption, thereby improving the strength- and stiffness-to-mass ratios of the structure [14, 15].

Surfaces with bidirectional corrugation constitute a distinct category of such solutions [8, 11, 16, 17]. Unlike conventional unidirectional corrugations, they can increase stiffness in two mutually perpendicular directions, which may be advantageous for components subjected to complex loading conditions. Such surfaces may reduce structural displacements and promote a more favourable redistribution of stresses while maintaining comparable material consumption.

Against this background, it is worthwhile to investigate the use of bidirectionally sinusoidally corrugated steel plates in flue gas duct structures and to determine their effect on the static response of the complete structural system.

Aim and scope of the study. The aim of this study is to investigate the effect of bidirectional sinusoidal corrugation of steel flue gas duct walls on their static response under the considered actions. A flue gas duct structure with a square cross-section and no stiffeners was investigated in two variants differing in wall geometry. Flat plates were adopted in the first variant, whereas bidirectionally sinusoidally corrugated plates were used in the second. To provide comparable assessment conditions, approximately equal structural mass was adopted as the comparison criterion. The increase in developed plate area resulting from corrugation was accommodated by a corresponding reduction in plate thickness in the second variant. Thus, the investigated variants differ not only in wall surface geometry but also in wall thickness, consistent with the adopted equal-mass comparison criterion. Consequently, differences in static response should be interpreted as the outcome of comparing two complete structural variants of similar mass rather than as the effect of surface geometry alone.

The analyses were performed using the finite element method (FEM) implemented in RFEM 6 [18]. Displacements and stresses were compared for five independent load cases: self-weight, negative internal pressure, positive internal pressure, heating, and cooling. An appropriate support arrangement was adopted to allow free thermal expansion and contraction. The results were used to assess the effect of corrugation on structural behaviour and the potential applicability of this approach to thin-walled industrial ducts without stiffeners.

niem, ponieważ pozwala na uzyskanie usztywnienia konstrukcji w obu głównych kierunkach [8÷11].

Analizowany sposób wzmocnienia konstrukcji kanału. Podjęto próbę analizy jednego z trzech wymienionych sposobów wzmocnienia konstrukcji kanałów spalin, jakim jest wykorzystanie odpowiednio ukształtowanej geometrii powierzchni ścian. Rozwiązanie to znajduje zastosowanie m.in. w przypadku blach falistych, blach trapezowych, płyt karbowanych oraz w różnego rodzaju panelach profilowanych [6, 7, 11÷13]. Zmiana geometrii skutkuje zwiększeniem sztywności elementu bez konieczności proporcjonalnego większego zużycia materiału, co pozwala na uzyskanie korzystniejszego stosunku nośności i sztywności w odniesieniu do masy konstrukcji [14, 15].

Szczególną grupę tego typu rozwiązań stanowią powierzchnie o pofałdowaniu dwukierunkowym [8, 11, 16, 17]. W odróżnieniu od klasycznych układów jednokierunkowych, umożliwiają one zwiększenie sztywności w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, co może być korzystne w przypadku elementów poddawanych złożonym stanom obciążenia. Zastosowanie takich powierzchni może prowadzić do zmniejszenia przemieszczeń konstrukcji oraz korzystnej redystrybucji naprężeń przy zachowaniu porównywalnego zużycia materiału.

Zasadne wydaje się przeanalizowanie możliwości wykorzystania dwukierunkowo sinusoidalnie pofałdowanych blach stalowych w konstrukcjach kanałów spalin oraz określenie ich wpływu na odpowiedź statyczną całego układu konstrukcyjnego.

Cel i zakres pracy. W artykule przedstawiono analizę wpływu dwukierunkowego sinusoidalnego pofałdowania ścian stalowego kanału spalin na jego odpowiedź statyczną w przypadku różnego rodzaju oddziaływań. Analizie poddano rzeczywistą konstrukcję kanału (bez usztywnień) o przekroju kwadratowym, wykonaną w dwóch wariantach różniących się geometrią ścian. W pierwszym wariancie były to blachy płaskie, natomiast w drugim – blachy o dwukierunkowym sinusoidalnym pofałdowaniu. W celu zapewnienia podobnych warunków oceny obu rozwiązań jako kryterium porównawcze przyjęto zbliżoną masę analizowanych konstrukcji. Zwiększenie powierzchni rozwiniętej blachy wynikające z pofałdowania zostało uwzględnione przez odpowiednie zmniejszenie grubości blachy w wariancie drugim. Tym samym analizowane warianty różnią się nie tylko geometrią powierzchni ścian, lecz również ich grubością, wynikającą z przyjętego kryterium porównawczej masy konstrukcji. W konsekwencji uzyskane różnice w odpowiedzi statycznej należy interpretować jako wynik porównania dwóch kompletnych wariantów konstrukcyjnych o zbliżonej masie, a nie wyłącznie jako efekt zmiany geometrii powierzchni.

Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania RFEM 6 [18] bazującego na metodzie elementów skończonych. Porównano uzyskane z obliczeń przemieszczenia oraz naprężenia dla pięciu niezależnych przypadków oddziaływań obejmujących ciężar własny, podciśnienie, nadciśnienie, nagrzanie oraz schłodzenie. Przyjęto odpowiedni układ podpór zapewniający swobodę odkształceń w przypadku oddziaływań termicznych. Otrzymane wyniki posłużyły do określenia wpływu pofałdowania na pracę konstrukcji oraz oceny możliwości wykorzystania tego typu rozwiązań w projektowaniu cienkościennych kanałów przemysłowych bez usztywnień.

Object of study

Geometry of the investigated flue gas duct. The object of study is a steel flue gas duct with a square cross-section and an approximately S-shaped arrangement. Its geometry was selected to reflect common industrial installations in which the flue gas flow must change direction between interconnected process equipment. It was inspired by an actual industrial structure at a power plant in Poland, previously examined as part of the engineering design work of one of the authors.

The investigated duct has a cross-section of 1.5 m × 1.5 m. The total structural height is 6.0 m, while the upper and lower horizontal sections are each 3.0 m long. The individual segments are connected by 90° bends, forming a spatial layout representative of ducts used in practice. The overall duct geometry was identical in both investigated variants. This made it possible to compare the responses of the two wall arrangements while maintaining the same external dimensions. Figure 1 presents the geometry of the investigated duct together with its principal dimensions and supports.

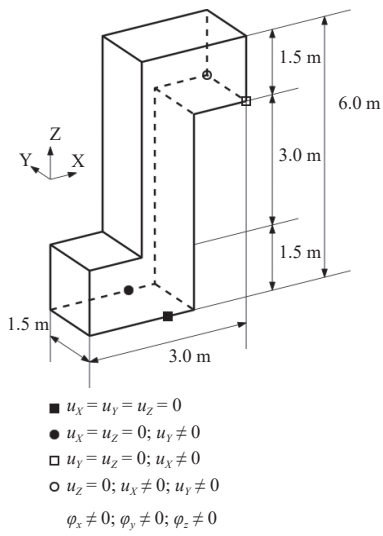


Fig. 1. Geometry and support scheme of the analysed flue gas duct
Rys. 1. Schemat geometrii i podpór analizowanego kanału spalin

Corrugation geometry. In the second variant, which features corrugated duct walls, the corrugation was defined by a bidirectional sinusoidal surface. This approach produces a regular corrugation pattern along two mutually perpendicular surface directions, resulting in increased geometric stiffness.

The surface geometry was described by the following relationship [6, 8, 9]:

$$z = x_3 = f(x_1, x_2) = \\ = h \cdot \sin\left(\frac{2\pi x_1}{a_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi x_2}{a_2}\right) \quad (1)$$

where:
h – corrugation amplitude,
a_1 – periodic cell length in the x direction,
a_2 – periodic cell length in the y direction.

A characteristic feature of the adopted geometry is the presence of regularly spaced zero-displacement lines along which the corrugated surface intersects the reference plane. In the investigated variant, the dimensions of the individual duct wall surfaces and the positions of the periodic cells were selected so that the edges of adjacent surfaces coincided with these zero-displacement lines. This allowed straight duct edges to be retained and adjacent walls to be joined at the corners without locally modifying the prescribed corrugation geometry. Figure 2 illustrates the corrugated plate and identifies its periodic cell. A corrugation amplitude of 30 mm and a periodic cell measuring 300 mm × 300 mm were adopted in this study. Figure 3 shows the three-dimensional numerical representation of the investigated W2 variant (a), together with a detail of the connection between cor-

Przedmiot analizy

Geometria analizowanego kanału spalin. Analizie poddano stalowy kanał spalin o przekroju kwadratowym i przebiegu w kształcie przypominającym literę „S" (rysunek 1). Jego geometria została dobrana w sposób odpowiadający typowym rozwiązaniom stosowanym w instalacjach przemysłowych, w których występuje konieczność zmiany kierunku przepływu spalin między współpracującymi urządzeniami technologicznymi. Została ona zainspirowana rzeczywistym obiektem przemysłowym zlokalizowanym w jednej z polskich elektrowni.

Przekrój poprzeczny kanału ma wymiary 1,5 × 1,5 m, a całkowita wysokość konstrukcji wynosi 6,0 m, natomiast długość górnego i dolnego odcinka poziomego – po 3,0 m. Poszczególne segmenty połączono za pomocą załamań o kącie 90°, tworząc przestrzenny układ o przebiegu charakterystycznym w przypadku kanałów stosowanych w rzeczywistości. Przyjęto identyczną geometrię kanału w przypadku dwóch analizowanych wariantów. Umożliwiło to bezpośrednie porównanie wpływu geometrii ścian (rysunek 1) na odpowiedź konstrukcji.

Geometria pofałdowania. W wariancie drugim pofałdowanie opisano za pomocą dwukierunkowej powierzchni sinusoidalnej. Przyjęte rozwiązanie umożliwia uzyskanie regularnego pofałdowania w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach powierzchni, co prowadzi do zwiększenia jej sztywności geometrycznej.

Geometrię powierzchni opisano zależnością [6, 8, 9]:

$$z = x_3 = f(x_1, x_2) = \\ = h \cdot \sin\left(\frac{2\pi x_1}{a_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi x_2}{a_2}\right) \quad (1)$$

gdzie:
h – amplituda pofałdowania;
a_1 – długość komórki periodycznej w kierunku x;
a_2 – długość komórki periodycznej w kierunku y.

Charakterystyczną cechą przyjętej geometrii jest występowanie regularnych linii zerowych pofałdowania, wzdłuż których powierzchnia pofałdowana przecina płaszczyznę odniesienia. W analizowanym wariancie wymiary poszczególnych powierzchni kanału oraz położenie komórek periodycznych dobrano w taki sposób, aby krawędzie łączonych powierzchni pokrywały się z liniami zerowymi pofałdowania. Pozwoliło to na zachowanie prostoliniowych krawędzi kanału oraz połączenie sąsiednich ścian w narożach bez konieczności lokalnej modyfikacji przyjętej geometrii pofałdowania. Na rysunku 2 pokazano schemat pofałdowanej płyty z wyróżnioną komórką periodyczną. W analizie przyjęto, że amplituda pofałdowania wynosi 30 mm, a komórka periodyczna ma 300 × 300 mm. Rysunek 3 przedstawia numeryczne odwzorowanie przestrzennej geometrii analizowanego wariantu W2 (a) wraz z detalem połączenia pofałdowanych ścian w narożu kanału (b).

rugated walls at a duct corner (b).

Investigated structural variants. To assess the effect of bidirectional sinusoidal corrugation on the static response of the flue gas duct, two variants differing in wall geometry were analysed. **The reference variant** consisted of a duct made of unstiffened flat steel plates 12 mm thick. This represents a conventional design approach and was adopted as the reference for the subsequent comparison. **The second variant** comprised a duct made of bidirectionally corrugated plates with the geometry described. Corrugation increases the actual wall surface area relative to the corresponding flat surface, which would increase structural mass if the same steel plate thickness were retained. This was accounted for by reducing the thickness of the corrugated plate. The ratio of the corrugated plate area to the flat plate area was determined using Equation (2).

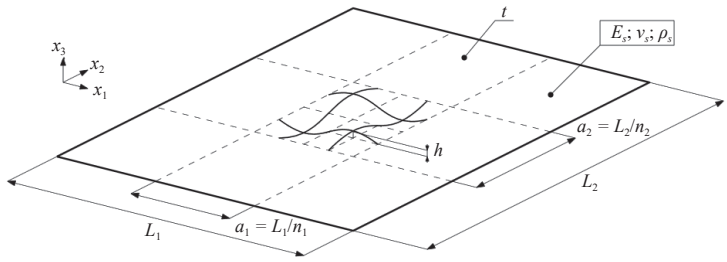


Fig. 2. Periodic cell of the bidirectional sinusoidal corrugation
Rys. 2. Komórka periodyczna dwukierunkowego pofałdowania sinusoidalnego

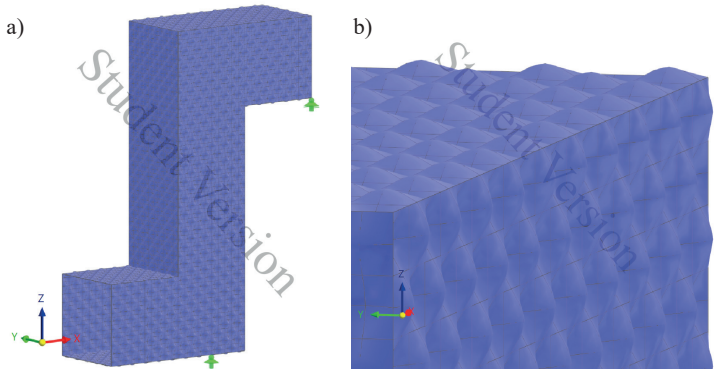


Fig. 3. 3D numerical model of W2 variant: a) general view; b) detail of the corrugated wall connection at the duct corner
Rys. 3. Model 3D numerycznego wariantu W2: a) widok ogólny; b) detal połączenia pofałdowanych ścian w narożu kanału

$$\eta = \frac{\int_0^{a_1}\int_0^{a_2}\sqrt{1+\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2}\,dx_1dx_2}{a_1a_2} = 1{,}0933 \qquad (2)$$

To determine the corrugated plate thickness, the flat plate thickness of 12 mm was divided by the factor obtained from Equation (2). The resulting corrugated plate thickness was 11 mm. This comparison criterion enables the performance of two structural solutions to be assessed at similar material consumption. It should be emphasized that reducing the plate thickness in variant W2 affects structural stiffness. The observed differences in static response must therefore be interpreted as the outcome of comparing two complete structural variants of similar mass rather than as the effect of surface geometry alone. The principal parameters of the investigated variants are summarized in Table 1.

Numerical analysis

Numerical model. Static analyses were carried out in RFEM 6 [18], which employs the finite element method. Three-dimensional shell models were developed for both variants to represent the geometry of the flue gas duct. Variant W1 was modelled using flat surfaces, whereas variant

Analizowane warianty konstrukcyjne. Celem oceny wpływu dwukierunkowego sinusoidalnego pofałdowania na odpowiedź statyczną konstrukcji kanału spalin przeanalizowano dwa warianty różniące się geometrią ścian. **Wariant bazowy** stanowiła konstrukcja kanału wykonana z płaskich blach stalowych o grubości 12 mm bez użebrowania. Rozwiązanie to odpowiada typowemu podejściu stosowanemu w praktyce projektowej i zostało przyjęte jako punkt odniesienia w przypadku dalszych analiz. **Drugi wariant** stanowił kanał wykonany z blach dwukierunkowo pofałdowanych zgodnie z opisaną geometrią. Pofałdowanie powoduje zwiększenie rzeczywistej powierzchni ścian w stosunku do odpowiadającej im powierzchni płaskiej, co skutkowałoby zwiększeniem masy konstrukcji przy zachowaniu grubości stalowej blachy. Zjawisko to uwzględniono przez zmniejszenie grubości płyty pofałdowanej. Wykorzystując wzór (2), wyznaczono stosunek powierzchni płyty pofałdowanej do płaskiej.

$$\eta = \frac{\int_0^{a_1}\int_0^{a_2}\sqrt{1+\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2+\left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2}\,dx_1dx_2}{a_1a_2} = 1{,}0933 \qquad (2)$$

W celu wyznaczenia grubości płyty pofałdowanej, grubość płyty płaskiej wynoszącą 12 mm podzielono przez współczynnik otrzymany z wzoru (2). Uzyskana wartość wynosi 11 mm. Przyjęcie takiego kryterium umożliwia porównanie efektywności dwóch rozwiązań konstrukcyjnych przy zbliżonym zużyciu materiału. Należy zaznaczyć, że zmniejszenie grubości blachy w wariancie W2 wpływa na sztywność analizowanej konstrukcji, dlatego otrzymane różnice w odpowiedzi statycznej należy interpretować jako wynik porównania dwóch kompletnych wariantów konstrukcyjnych o zbliżonej masie, a nie wyłącznie jako efekt zmiany geometrii powierzchni. Podstawowe parametry analizowanych wariantów zestawiono w tabeli 1.

Analiza numeryczna

Model numeryczny. Analizy statyczne przeprowadzono z wykorzystaniem programu RFEM 6 [18], bazującego na metodzie elementów skończonych. W przypadku każdego z wariantów opracowano trójwymiarowe modele powłokowe odwzorowujące numerycznie geometrię konstrukcji kanału spalin. Wariant W1 odwzorowano numerycznie za pomocą powierzchni płaskich, nato-

W2 included the complete geometry of the bidirectional sinusoidal wall corrugation. Combined shell finite elements based on the MITC (Mixed Interpolation of Tensorial Components) formulation coupled with a membrane element were employed [18]. These elements account for both membrane and bending behaviour of thin-walled shell structures.

The geometry was discretized using a finite element mesh with a characteristic element size of 0.015 m. This mesh size provided an adequate representation of local curvature variations associated with the corrugation. Furthermore, using the same characteristic element size for both variants allowed stress values at concentration locations to be compared.

Table 1. Parameters of analysed structural variants
Tabela 1. Parametry analizowanych wariantów konstrukcyjnych

Parameter / Parametr	Variant W1 / Wariant W1	Variant W2 / Wariant W2
Material / Materiał	S355 structural steel / stal konstrukcyjna S355	S355 structural steel / stal konstrukcyjna S355
Plate thickness t [mm] / Grubość blachy t [mm]	12	11
Surface type / Rodzaj powierzchni	flat / płaska	bidirectionally sinusoidally corrugated / dwukierunkowo sinusoidalnie pofałdowana
Corrugation amplitude h [mm] / Amplituda pofałdowania h [mm]	–	30
Periodic cell $a_1 \times a_2$ [mm] / Komórka periodyczna $a_1 \times a_2$ [mm]	–	300 × 300
Total structural mass [t] / Całkowita masa konstrukcji [t]	5.1	5.1

The numerical analyses assumed geometrically linear structural behaviour and a linear elastic material model. A direct equation solver was used, and the iterative procedure employed the Newton-Raphson method. Geometric imperfections and material nonlinearity were not included.

Material properties. An isotropic, linear elastic material model corresponding to S355 structural steel was adopted. Table 2 lists the material properties used in the analysis. Thermal effects were included only as applied actions. The influence of temperature on the mechanical properties of the material was neglected.

Boundary conditions. The investigated flue gas duct was supported at four points, reflecting typical arrangements used in industrial structures. To allow deformation caused by thermal actions, a support system commonly used for structures subject to such actions was adopted. All four supports permit rotation about each axis while restraining vertical displacement. The horizontal displacement constraints in the X and Y directions were assigned individually to each support. Figure 1 shows the support arrangement represented in the numerical model, including the restraint conditions at each of the four supports.

Load cases. To determine the effect of corrugation on the duct's static response, five independent load cases were analysed.

Table 2. Material parameters of S355 steel
Tabela 2. Parametry materiałowe stali S355

Parameter / Parametr	Value / Wartość
Young's modulus [GPa] / Moduł Younga [GPa]	210
Poisson's ratio [–] / Współczynnik Poissona [–]	0.30
Density [kg/m^3] / Gęstość [kg/m^3]	7850
Coefficient of thermal expansion [1/°C] / Współczynnik rozszerzalności cieplnej [1/°C]	$12 \cdot 10^{-6}$
Yield strength [MPa] / Granica plastyczności [MPa]	355

miast w wariancie W2 odwzorowano pełną geometrię dwukierunkowego sinusoidalnego pofałdowania ścian. Zastosowano kombinowane elementy powłokowe wykorzystujące sformułowanie MITC (Mixed Interpolation of Tensorial Components) połączone z elementem membranowym [18]. Elementy te umożliwiają jednoczesne uwzględnienie pracy membranowej oraz zginania cienkościennych konstrukcji powłokowych.

Dyskretyzację geometrii przeprowadzono z wykorzystaniem siatki elementów skończonych o charakterystycznym wymiarze elementu wynoszącym 0,015 m. Przyjęty wymiar elementów skończonych zapewnił odpowiednie odwzorowanie geometrii konstrukcji w odniesieniu do lokalnych zmian krzywizny wynikających z pofałdowania. Ponadto, przyjęcie wskazanego wymiaru elementów skończonych w przypadku obydwu wariantów pozwoliło na porównanie wartości naprężeń w miejscach ich koncentracji.

Analizy numeryczne przeprowadzono przy założeniu geometrycznie liniowej odpowiedzi konstrukcji oraz liniowo sprężystego modelu materiału. Wykorzystano bezpośrednią metodę rozwiązywania równań, a proces iteracyjny realizowano metodą Newtona-Raphsona. W analizach nie uwzględniano imperfekcji geometrycznych ani nieliniowości materiałowej.

Parametry materiałowe. Na potrzeby analizy przyjęto izotropowy, liniowo sprężysty model materiału z parametrami odpowiadającymi stali konstrukcyjnej o oznaczeniu S355. W tabeli 2 przedstawiono parametry materiałowe stali. Oddziaływania termiczne uwzględniono jedynie jako obciążenie. W analizie pominięto wpływ oddziaływań termicznych na zmianę parametrów mechanicznych materiału.

Warunki brzegowe. Kanał spalin, będący przedmiotem analizy, podparto w czterech punktach odpowiadających typowym rozwiązaniom stosowanym w konstrukcjach przemysłowych (rysunek 1). W celu zapewnienia swobody odkształceń wynikających z oddziaływań termicznych zastosowano odpowiedni układ podpór, często stosowany w konstrukcjach poddanych tego typu oddziaływaniom. Wszystkie z czterech podpór mają zwolnione obroty w każdym z kierunków oraz przemieszczenia pionowe. Ograniczenia swobody przemieszczeń poziomych w kierunkach X oraz Y były dobrane odpowiednio dla każdej z podpór.

These actions represent the principal loads encountered during flue gas duct operation. Each load case was assessed separately; load combinations were not considered. Table 3 lists the investigated load cases and their corresponding load magnitudes. The self-weight of the structure (LC1) was calculated automatically in RFEM 6 [18] from the adopted geometry and material density.

Table 3. Analysed load cases and load values
Tabela 3. Analizowane przypadki oraz wartości obciążeń

ID / Oznaczenie	Load case / Przypadek obciążenia	Load magnitude / Wartość obciążenia
LC1	self-weight / ciężar własny	–
LC2	negative pressure / podciśnienie	–6.0 kPa
LC3	positive pressure / nadciśnienie	3.0 kPa
LC4	heating / nagrzanie	140°C
LC5	cooling / schłodzenie	–40°C

The negative internal pressure of −6.0 kPa (LC2) and the positive internal pressure of 3.0 kPa (LC3) were applied uniformly to the duct wall surfaces, assuming a uniform pressure distribution throughout the duct interior. These pressures act over the entire corresponding surface. As discussed in Section 2.3, the actual area of the corrugated surface is approximately 9.3% greater than that of the flat surface. Accordingly, the total applied pressure loading on the corrugated surface was considered to be 9.3% higher, representing an unfavourable consequence of corrugation.

Thermal load cases were also investigated to represent heating by the medium inside the duct (LC4) and cooling in its absence (LC5). The adopted temperatures were 140 °C and −40 °C, respectively, relative to a reference structural temperature of 20 °C.

Results

Displacements. First, the effect of corrugation on duct wall deformation was investigated. Displacements were determined for each load case. Figure 4 presents the resulting distributions.

Table 4 compares the maximum displacements obtained for each variant and load case, together with the relative change associated with corrugation.

Table 4. Maximum values of displacements
Tabela 4. Maksymalne wartości przemieszczeń

Load case / Przypadek	Variant W1 [mm] / Wariant W1 [mm]	Variant W2 [mm] / Wariant W2 [mm]	Change [%] / Zmiana [%]
LC1	1,0	0,9	–10,0
LC2	4,0	2,7	–32,5
LC3	2,0	1,3	–35,0
LC4	24,2	24,2	0,0
LC5	6,9	6,9	0,0

For load case LC1, the maximum displacement decreased by 10%. However, the displacement field of variant W2 indicates an overall rotation of the duct that is substantially greater than in variant W1. The relatively modest 10% reduction may result from the superposition of local wall deformation and global duct rotation.

For LC2 and LC3, the reductions in maximum displacement were more pronounced, amounting to 32.5% and 35%, respectively. An overall rotation of the duct can also be observed, although it is less evident than in LC1. The displacement magnitudes and distributions obtained for LC4 and LC5 indicate very similar, almost identical results for both variants.

Przypadki obciążeń. W celu określenia wpływu pofałdowania na odpowiedź statyczną konstrukcji kanału przeprowadzono analizę pięciu niezależnych przypadków obciążenia (tabela 3). Rozpatrywane oddziaływania odpowiadają głównym obciążeniom występującym podczas eksploatacji kanałów spalin. Dokonano analizy każdego z przypadków osobno – nie analizowano kombinacji przypadków obciążeń.

Ciężar własny konstrukcji (LC1) został wyznaczony w sposób automatyczny w oprogramowaniu RFEM 6 [14] na podstawie przyjętej geometrii oraz gęstości materiału. Obciążenie wynikające z podciśnienia (LC2) wynoszące –6,0 kPa oraz nadciśnienia (LC3) wynoszące 3,0 kPa przyłożono równomiernie do powierzchni ścian kanału, ponieważ założono równomierny rozkład ciśnienia w całej objętości kanału. Należy zauważyć, że obciążenia te przykładane są na całą powierzchnię, na którą oddziałują. W przypadku powierzchni pofałdowanej, pole w odniesieniu do powierzchni płaskiej zwiększa się o ok. 9,3%. Sumaryczne obciążenie działające na powierzchnię pofałdowaną jest zatem o 9,3% większe, co jest niekorzystnym skutkiem pofałdowania.

Przeanalizowano również obciążenia wynikające z temperatury czynnika znajdującego się wewnątrz kanału (nagrzanie – LC4) bądź jego braku (schłodzenie – LC5). Przyjęte wartości wynoszą odpowiednio 140°C oraz –40°C i odnoszą się do bazowej temperatury konstrukcji przyjętej jako 20°C.

Wyniki

Przemieszczenia. W pierwszej kolejności analizie poddano wpływ pofałdowania na deformacje ścian kanału. W przypadku każdego obciążenia wyznaczono wartości przemieszczeń (rysunek 4).

W tabeli 4 zestawiono maksymalne wartości przemieszczenia dotyczące każdego wariantu oraz przypadku obciążenia, wraz ze zmianą wynikającą z pofałdowania analizowanej konstrukcji.

W przypadku LC1 zaobserwowano zmniejszenie przemieszczenia o 10%, natomiast pole przemieszczeń całego kanału w wariancie W2 wskazuje na obrót całej konstrukcji, znacznie większy niż w wariancie W1. Zmniejszenie przemieszczeń jedynie o 10% może wynikać najprawdopodobniej z nałożenia się na siebie lokalnej deformacji ścianki i globalnego obrotu kanału. W przypadkach LC2 i LC3 zmniejszenie przemieszczenia było wyraźniejsze i wyniosło odpowiednio 32,5 oraz 35%. Można również dostrzec, w nieco mniejszym stopniu niż w przypadku LC1, globalny obrót konstrukcji kanału. Wartości przemieszczeń oraz ich rozkład w przypadkach LC4 i LC5 sugerują bardzo zbliżone, niemal identyczne wyniki.

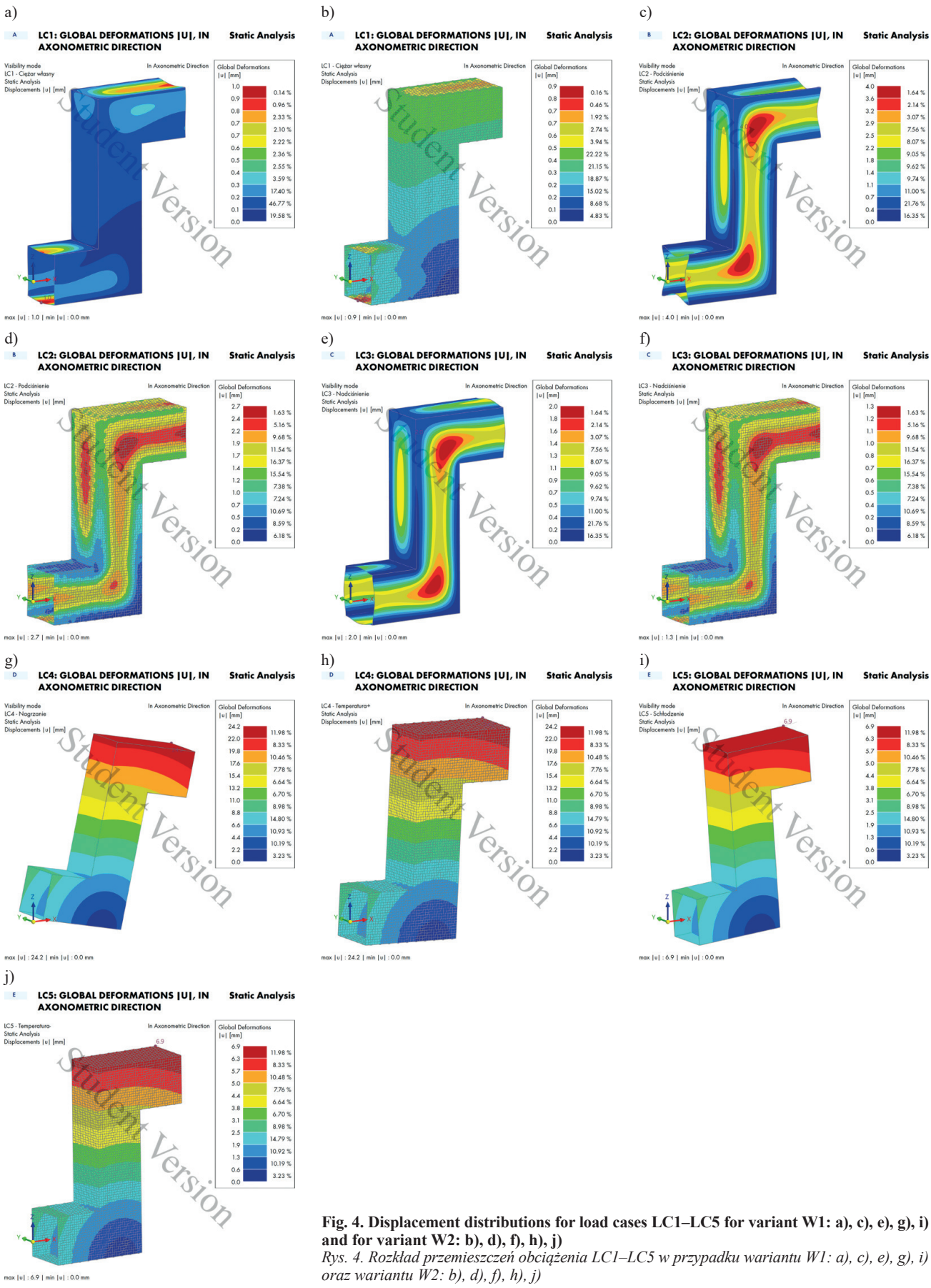


Fig. 4. Displacement distributions for load cases LC1–LC5 for variant W1: a), c), e), g), i) and for variant W2: b), d), f), h), j)

Rys. 4. Rozkład przemieszczeń obciążenia LC1–LC5 w przypadku wariantu W1: a), c), e), g), i) oraz wariantu W2: b), d), f), h), j)

Stresses. Next, the influence of corrugation on maximum stresses in the duct walls was examined. The maximum von Mises equivalent stress was calculated for each load case. Owing to the adopted support arrangement, which permits free thermal deformation of the structure, no stresses occur in load cases LC4 and LC5. Figure 5 presents the results.

Naprężenia. W przypadku każdego obciążenia wyznaczono maksymalne naprężenia zredukowane zgodnie z hipotezą von Misesa (rysunek 5). Z uwagi na zastosowany układ podpór, zapewniający swobodę odkształceń konstrukcji przy oddziaływaniu termicznym, naprężenia w przypadkach LC4 oraz LC5 nie występują.

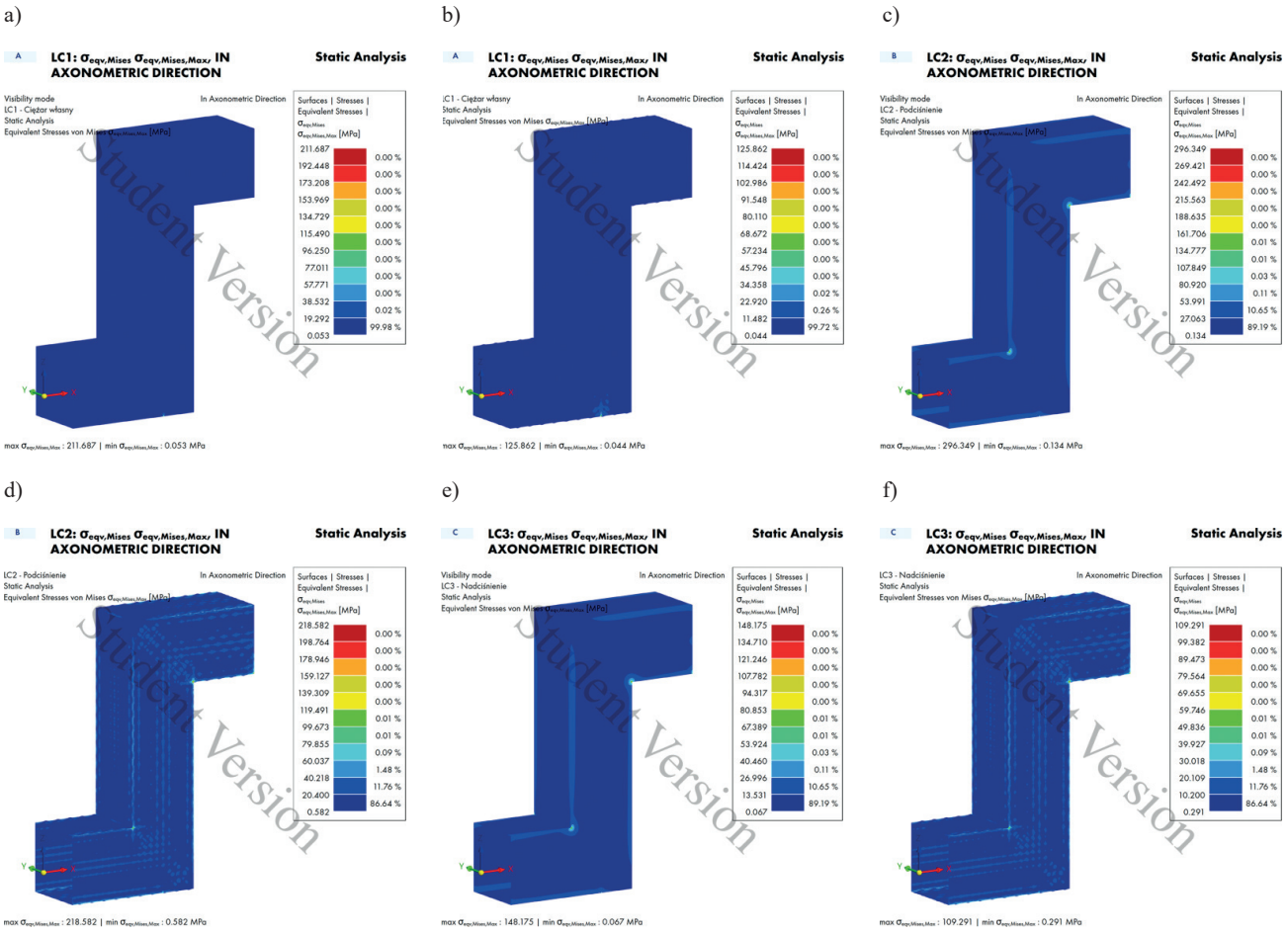


Fig. 5. Von Mises stress distributions for load cases LC1–LC3 for variant W1: a), c), e), and variant W2: b), d), f), respectively
Rys. 5. Rozkład maksymalnych naprężeń von Misesa od obciążenia LC1-LC3 w przypadku wariantu W1: a), c), e) oraz wariantu W2: b), d), f)

Table 5 summarizes the maximum von Mises equivalent stresses for each variant and load case, together with their relative changes due to corrugation.

For all load cases considered in this section (LC1, LC2, and LC3), the stresses were localized at individual points. Under self-weight (LC1), the maximum stress decreased by 39.1%, while reductions of 26.2% were obtained for both negative internal pressure (LC2) and positive internal pressure (LC3).

Table 5. Maximum value of von Mises stress
Tabela 5. Maksymalna wartość naprężenia von Misesa

Load case / Przypadek	Variant W1 [MPa] / Wariant W1 [MPa]	Variant W2 [MPa] / Wariant W2 [MPa]	Change [%] / Zmiana [%]
LC1	211,7	128,9	–39,1
LC2	296,3	218,6	–26,2
LC3	148,2	109,3	–26,2

W tabeli 5 zestawiono maksymalne wartości naprężeń von Misesa dotyczące każdego wariantu oraz przypadku obciążenia, wraz ze zmianą wynikającą z pofałdowania analizowanej konstrukcji.

We wszystkich analizowanych przypadkach (LC1, LC2, LC3), naprężenia miały charakter punktowy i lokalny. W przypadku ciężaru własnego LC1 maksymalna wartość naprężenia zmniejszyła się o 39,1%, natomiast w przypadkach zarówno podciśnienia LC2, jak i nadciśnienia LC3, o 26,2%.

Discussion and summary

The numerical results enabled an assessment of the effect of bidirectional sinusoidal wall corrugation on the static response of the flue gas duct. Two variants with similar total masses but different wall geometries and thicknesses were compared. The reduced plate thickness in the corrugated variant followed from the adopted criterion of maintaining approximately equal structural masses. This allowed the performance of the two structural solutions to be compared at nearly identical material consumption. The use of corrugation substantially reduced maximum displacements and stresses under self-weight and internal pressure. The maximum displacement reduction reached 35%, while the maximum stress reduction was as high as 39%. These reductions were achieved despite the smaller plate thickness used in variant W2.

It should be noted, however, that the displacement field revealed an overall rotation of the entire structure in the corrugated variant W2. This rotation increased the total deformation in one region of the duct while reducing it in another. The effect was most pronounced under self-weight and was smaller, although still noticeable, under internal pressure. This behaviour indicates a redistribution of stiffness within the structure associated with the introduction of corrugated walls.

As with the displacements, differences in the reductions of maximum stress and the presence of localized regions with higher stresses than in the flat-wall variant probably arise from the different nature of self-weight and internal pressure. Self-weight always acts in the negative global Z direction, whereas internal pressure acts normal to the surface to which it is applied. In variant W2, the direction of the pressure load followed the curvature of the corrugated surface, locally inducing membrane forces in the midsurface of the corrugated walls. This contributed to the bending and straightening of the corrugation folds and affected the observed differences.

Another notable result is the absence of a global effect of corrugation on the maximum displacements under thermal actions. In engineering practice, the stiffness of duct walls is most often increased through the use of stiffening ribs. Such solutions, however, introduce localized and eccentric changes in structural stiffness that may affect the response to thermal actions. In the present case, stiffness was increased solely by modifying the geometry of the duct wall surfaces, without additional structural members. This preserved surface continuity and avoided the local stiffness discontinuities characteristic of conventional rib-stiffened solutions.

Furthermore, as in the flat-plate variant W1, no thermally induced stresses were observed anywhere in the duct structure in variant W2. This was attributable to the commonly used duct support arrangement, which permits free displacement of the overall structure. The results indicate that the investigated corrugation pattern does not introduce additional local disturbances that would produce undesirable stresses due to local restraint of thermal deformation.

Podsumowanie

Wyniki otrzymane z przeprowadzonych analiz numerycznych pozwoliły na ocenę wpływu dwukierunkowego sinusoidalnego pofałdowania ścian kanału spalin na jego odpowiedź statyczną. Porównanie obejmowało dwa warianty konstrukcyjne o zbliżonej masie całkowitej, różniące się geometrią oraz grubością ścian. Zmniejszenie grubości blachy w wariancie pofałdowanym wynikało z przyjętego kryterium zachowania zbliżonej masy obu analizowanych konstrukcji. Pozwoliło to na porównanie efektywności obu rozwiązań konstrukcyjnych przy niemal jednakowym zużyciu materiału. Pofałdowanie prowadziło do znacznego zmniejszenia maksymalnych wartości przemieszczeń oraz naprężeń w przypadku oddziaływań związanych z ciężarem własnym oraz ciśnieniem wewnętrznym kanału. Zaobserwowano redukcję maksymalnej wartości przemieszczenia nawet do 35%, a maksymalnej wartości naprężeń aż do 39%. Redukcje te uzyskano pomimo mniejszej grubości blachy zastosowanej w wariancie W2.

Należy podkreślić, że w przypadku przemieszczeń zaobserwowano globalny obrót całej konstrukcji w wariancie W2 (pofałdowanym), który z jednej strony kanału generował wzrost sumarycznej deformacji części kanału, a z drugiej zaś redukcję. Wpływ ten był zdecydowanie wyraźniejszy w przypadku obciążenia związanego z ciężarem własnym konstrukcji. Był on mniejszy, niemniej nadal zauważalny, w przypadku obciążeń związanych z ciśnieniem wewnętrznym. Zjawisko to wskazuje na zmianę sposobu redystrybucji sztywności w konstrukcji wynikającą z zastosowania pofałdowanych ścian.

Podobnie jak w przypadku przemieszczeń, różnica w redukcji maksymalnej wartości naprężenia oraz lokalne strefy z większymi (niż w przypadku płaskiej płyty) wartościami naprężenia w ścianie kanału, wynikają najprawdopodobniej z różnicy w charakterze oddziaływań ciężarem własnym oraz ciśnieniem wewnętrznym. Ciężar własny jest obciążeniem skierowanym zawsze w kierunku ujemnym względem globalnej osi Z, natomiast obciążenie ciśnieniem wewnętrznym jest zawsze prostopadłe do powierzchni, do której jest przyłożone. Obciążenie ciśnieniem w wariancie W2 (płyta pofałdowana) podążało za krzywizną powierzchni, więc lokalnie generowało siły membranowe w płaszczyźnie środkowej ścian pofałdowanych. Wspomagało to mechanizm doginania i prostowania fałd, co wpływało na zaobserwowane różnice.

Interesującym rezultatem jest brak globalnego wpływu pofałdowania na wartości maksymalnych przemieszczeń uzyskanych w przypadkach związanych z oddziaływaniami termicznymi. W praktyce projektowej zwiększenie sztywności ścian kanałów osiąga się najczęściej przez stosowanie żeber usztywniających. Jednak takie rozwiązanie prowadzi do lokalnych, mimośrodowych zmian sztywności konstrukcji, które mogą wpływać na odpowiedź konstrukcji na przytoczone oddziaływania. W analizowanym przypadku zwiększenie sztywności nastąpiło wyłącznie przez odpowiednie ukształtowanie powierzchni ścian kanału, bez uwzględnienia dodatkowych elementów konstrukcyjnych. Zapewniło to ciągłość powierzchni i nie wprowadziło lokalnych nieciągłości sztywności, charakterystycznych dla typowych rozwiązań opartych na żebrach usztywniających. Ponadto, podobnie jak w przypadku wariantu W1 (płyta płaska), w wariancie W2 również nie zaobserwowano jakichkolwiek wartości naprężenia w całej konstrukcji kanału spalin wynikających z oddziaływań termicznych. Przyczynił się do tego powszechnie stosowany układ

It should also be noted that corrugation increased the actual surface area of the duct walls by approximately 9.3%. In the analysis, this was associated with a corresponding increase in the total loading attributed to internal pressure acting on the duct. Despite this, substantial reductions in displacement and stress were obtained, supporting the conclusion that increased geometric stiffness of the walls significantly influences the static response of the overall structure.

Conclusions and future research

The analyses presented in this paper indicate that bidirectional sinusoidal wall corrugation may be an effective means of increasing the stiffness of thin-walled steel flue gas ducts without increasing their mass. Despite the reduction in plate thickness in the corrugated variant, a more favourable static response was obtained under self-weight and internal pressure. These findings suggest that appropriately shaped wall surfaces may offer an alternative to conventional stiffening methods based on increasing plate thickness or introducing stiffening ribs.

An important advantage of the investigated corrugation pattern is the occurrence of regularly spaced zero-displacement lines, i.e., lines along which the surface intersects the reference plane. In the investigated variant, this feature made it possible to retain straight duct edges and join corrugated surfaces at the corners. It may substantially facilitate the geometric design of complex engineering structures, including flue gas ducts, by simplifying the joining of adjacent surface segments and the formation of bends and geometric transitions. Thus, the investigated corrugation pattern may be advantageous not only in terms of mechanical performance but also in shaping the geometry of complex structures.

It should also be emphasized that the present study focuses on the static response of the proposed solution and does not address the manufacturing technology for bidirectionally corrugated steel plates. The presented analyses represent an initial research stage intended to identify the potential benefits of the proposed geometry. Demonstrating its favourable effect on structural behaviour may provide a basis and justification for subsequent investigations into the technological feasibility of manufacturing such elements.

A further research direction involves analyses that account for geometric and material nonlinearities. Particular attention should be paid to the buckling behaviour of corrugated walls, including geometric imperfections and the examination of static equilibrium paths. Such investigations would extend the assessment of the proposed solution to its critical and post-critical response and would help determine the influence of corrugation on ultimate structural load-carrying capacity.

In view of the findings of the present study, a particularly promising direction for further research is the development of homogenization models that replace the actual

podpór kanału spalin, zapewniający swobodę przemieszczeń całej konstrukcji. Otrzymane wyniki potwierdzają, że analizowany rodzaj pofałdowania nie wprowadza dodatkowych lokalnych zaburzeń generujących niepożądane wartości naprężenia wynikające z lokalnego skrępowania konstrukcji kanału.

Należy również zwrócić uwagę, że w analizowanym wariancie pofałdowania spowodowały zwiększenie rzeczywistej powierzchni ścian kanału, które wyniosło ok. 9,3% i skutkowało jednoczesnym zwiększeniem sumarycznej wartości obciążenia pochodzącego od ciśnienia wewnętrznego działającego na konstrukcję kanału spalin. Pomimo tego uzyskano wyraźne ograniczenie przemieszczeń oraz naprężeń, co potwierdza istotny wpływ zwiększenia sztywności geometrycznej ścian na odpowiedź statyczną całej konstrukcji.

Wnioski i przyszłe badania

Przeprowadzone analizy wskazują, że dwukierunkowe sinusoidalne pofałdowanie ścian może być skutecznym sposobem zwiększania sztywności cienkościennych stalowych konstrukcji kanałów spalin bez konieczności zwiększania ich masy. Pomimo zmniejszenia grubości blach w wariancie pofałdowanym uzyskano korzystniejszą odpowiedź statyczną konstrukcji w przypadkach obciążeń związanych z ciężarem własnym oraz ciśnieniem wewnętrznym. Otrzymane wyniki sugerują, że odpowiednio ukształtowana geometria powierzchni może stanowić alternatywę dla klasycznych metod usztywniania konstrukcji bazujących na zwiększaniu grubości stalowych blach lub stosowaniu żeber usztywniających.

Należy również zauważyć, że istotną zaletą analizowanego rodzaju pofałdowania jest występowanie regularnych linii zerowych pofałdowania, czyli linii, wzdłuż których powierzchnia przecina płaszczyznę odniesienia. W analizowanym wariancie właściwość ta pozwoliła na zachowanie prostoliniowych krawędzi kanału i połączenie pofałdowanych powierzchni w jego narożach. Cecha ta może znacznie ułatwiać kształtowanie geometrii złożonych konstrukcji inżynierskich, w tym kanałów spalin, przez uproszczenie sposobu łączenia poszczególnych fragmentów powierzchni oraz wykonywania załamań i przejść geometrycznych. Z tego względu analizowany sposób pofałdowania może być efektywnym rozwiązaniem nie tylko z punktu widzenia właściwości mechanicznych, ale również możliwości kształtowania geometrii złożonych konstrukcji.

Jednocześnie należy zaznaczyć, że analiza koncentrowała się na ocenie odpowiedzi statycznej i nie obejmowała zagadnień związanych z technologią wykonania dwukierunkowo pofałdowanych blach. Przedstawione analizy stanowią pierwszy etap badań, którego celem jest określenie potencjalnych korzyści wynikających z zastosowania proponowanej geometrii. Potwierdzenie jej korzystnego wpływu na pracę konstrukcji może stanowić podstawę i uzasadnienie kolejnych etapów badań, obejmujących ocenę możliwości technologicznego wykonania tego typu elementów.

Kolejnym kierunkiem rozwoju przedstawionych badań są analizy uwzględniające nieliniowość geometryczną i materiałową konstrukcji. Szczególnie istotne będzie określenie zachowania pofałdowanych ścian w przypadku utraty stateczności, z uwzględnieniem imperfekcji geometrycznych oraz analizy

corrugation geometry with equivalent effective properties. This would enable the determination of equivalent in-plane and bending stiffnesses of the corrugated surface and their use in simplified models of complete structures. Such an approach could substantially reduce numerical model complexity and computational costs associated with analysing very large structures incorporating bidirectionally sinusoidally corrugated surfaces. This is particularly important for large industrial facilities, where explicitly modelling the complete corrugation geometry may be impractical because of hardware requirements and computational time. Even the relatively limited example considered here, with only five basic load cases, required substantial computational resources for model development and analysis. This was partly due to the need for a sufficiently small finite element size to accurately represent local surface curvatures arising from the adopted corrugation geometry. As structural dimensions or analysis complexity increase, this difficulty will become more pronounced, providing strong motivation for developing homogenization models for this class of surfaces. The development of such models is currently one of the principal research directions pursued by the authors.

Parametric investigations of the influence of corrugation amplitude and periodic cell dimensions on structural response also appear valuable. These parameters govern the geometry of the corrugated surface, while their relative magnitudes affect its curvature and resulting mechanical properties. Of particular interest is their influence on effective surface stiffnesses and the identification of geometric parameter ranges that provide favourable structural properties. Such findings may help identify potential applications of bidirectionally sinusoidally corrugated surfaces in other thin-walled industrial steel structures, where high stiffness in two mutually perpendicular directions combined with low structural mass is desirable. Parametric analyses of the effects of corrugation geometry on effective structural properties are currently being developed by the authors and constitute a natural continuation of the research presented in this paper.

ścieżek równowagi statycznej. Pozwoli to na rozszerzenie oceny analizowanego rozwiązania o jego zachowanie w fazie krytycznej i nadkrytycznej oraz określenie wpływu pofałdowania na nośność graniczną konstrukcji.

Szczególnie interesującym kierunkiem dalszych badań wydaje się opracowanie modeli homogenizacyjnych umożliwiających zastąpienie rzeczywistej geometrii pofałdowania równoważnymi parametrami efektywnymi. Pozwoliłoby to na określenie zastępczych sztywności płytowo-tarczowych analizowanej powierzchni oraz wykorzystanie ich w uproszczonych modelach całych konstrukcji. Takie podejście mogłoby znacznie ograniczyć złożoność modeli numerycznych oraz koszty obliczeniowe związane z analizą ogromnych konstrukcji wykorzystujących dwukierunkowo sinusoidalnie pofałdowane powierzchnie. Jest to istotne zwłaszcza w przypadku obiektów przemysłowych o bardzo dużych wymiarach, w przypadku których bezpośrednie modelowanie pełnej geometrii pofałdowania może być utrudnione z uwagi na wymagania sprzętowe oraz czas obliczeń. Nawet w analizowanym przykładzie, obejmującym jedynie pięć podstawowych przypadków obciążenia, opracowanie i analiza modelu numerycznego wymagały znacznych zasobów obliczeniowych. Wynikało to m.in. z konieczności zastosowania odpowiednio małego wymiaru elementów skończonych w celu poprawnego odwzorowania lokalnych krzywizn powierzchni związanych z przyjętą geometrią pofałdowania. Wraz ze zwiększeniem wymiarów konstrukcji lub stopnia złożoności analiz, problem ten będzie się dodatkowo nasilał, co stanowi ważną przesłankę do rozwoju modeli homogenizacyjnych przeznaczonych dla tego typu powierzchni. Opracowanie takich modeli stanowi obecnie jeden z głównych kierunków badań prowadzonych przez autorów.

Wartościowe wydaje się również przeprowadzenie analiz parametrycznych obejmujących wpływ amplitudy pofałdowania oraz wymiarów komórki periodycznej na odpowiedź konstrukcji. Parametry te determinują geometrię pofałdowanej powierzchni, a ich wzajemna relacja wpływa na jej krzywiznę i wynikające z niej właściwości mechaniczne. Szczególnie istotne będzie określenie ich wpływu na efektywne sztywności powierzchni oraz wskazanie zakresów parametrów geometrycznych pozwalających na uzyskanie korzystnych właściwości konstrukcyjnych. Otrzymane wyniki mogą stanowić podstawę do określenia potencjalnych obszarów zastosowania dwukierunkowo sinusoidalnie pofałdowanych powierzchni w innych cienkościennych stalowych konstrukcjach przemysłowych, w których istotne znaczenie ma uzyskanie dużej sztywności w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach przy zachowaniu ograniczonej masy konstrukcji. Analizy parametryczne obejmujące wpływ geometrii pofałdowania na właściwości efektywne konstrukcji są obecnie rozwijane przez autorów.

Received: 30.06.2026
Revised: 24.08.2026
Published: 21.10.2026

Artykuł wpłynął do redakcji: 30.06.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 24.08.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

Literature

[1] Thanga T. Design methods for large rectangular industrial ducts. Master's thesis. Hamilton: McMaster University; 2012. https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/12276, dostęp: 14.06.2026.

[2] Pošta R, Dolejš J. Steel reinforced ducts stressed by temperature. Procedia Engineering. 2012;40:410–415. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.111.

[3] El Aghoury IM, Galal K. Design of rectangular industrial duct plates subjected to out-of-plane pressure considering nonlinear large deformations. Thin-Walled Structures. 2014;75:82–92.

[4] Rezaiefar A, Galal K. Structural design of stiffened plates of industrial duct walls with relatively long panels undergoing large deformations. Thin-Walled Structures. 2016;104:116–129.

[5] Feng L, Sun T, Ou J. Method of determining the minimum number of stiffeners for stiffened corrugated steel walls. Structures. 2021,34:3487-3500. https://doi.org/10.1016/j.struc.2021.09.092.

[6] Xia Y, Friswell MI, Saavedra Flores EI. Equivalent models of corrugated panels. International Journal of Solids and Structures. 2012;49(13):1453–1462. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.02.023.

[7] Briassoulis D. Equivalent orthotropic properties of corrugated sheets. Computers & Structures. 1986;23(2):129–138. https://doi.org/10.1016/0045-7949(86)90207-5.

[8] Eldib MH. Shear buckling strength and design of curved corrugated steel webs for bridges. Journal of Constructional Steel Research. 2009;65(12):2129–2139. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.07.002.

[9] Gajdzicki M, Perliński W, Michalak B. Stability analysis of bi-directionally corrugated steel plates with orthotropic plate model. Engineering Structures. 2018;160:519–534.

[10] Perliński W. Stateczność jedno- oraz dwukierunkowo wstępnie pofałdowanych sinusoidalnie ścianek kształtowników stalowych. Rozprawa doktorska. Łódź: Politechnika Łódzka; 2017.

[11] Kozanecki D, Wirowski A, Rabenda M. Static and dynamic analysis of bidirectionally sinusoidal corrugated steel shells – Comparative FEA study. Applied Sciences. 2024;14(17):7936. https://doi.org/10.3390/app14177936.

[12] Kiymaz G, Coskun E, Cosgun C, Seckin E. Transverse load carrying capacity of sinusoidally corrugated steel web beams with web openings. Steel and Composite Structures. 2010;10(1): 69–85.

[13] Che Q, Xu P, Li Z, Ma W, Yao S. Crashworthiness analysis of a multi-layered bi-directionally corrugated steel plates structure. Science Progress. 2020;103(3):0036850420950158. https://doi.org/10.1177/0036850420950158.

[14] Aoki Y, Maysenhölder W. Experimental and numerical assessment of the equivalent-orthotropic-thin-plate model for bending of corrugated panels. International Journal of Solids and Structures. 2017;108:129–137. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.07.042.

[15] Lang K, Su M. Equivalent orthotropic model for corrugated plates based on simplified constitutive relation. Heliyon. 2022;8(10):e11096. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11264.

[16] Yang X, Ma J, Shi Y, Sun Y, Yang J. Crashworthiness investigation of the bi-directionally corrugated core sandwich panel under quasi-static crushing load. Materials & Design. 2017;135:275-290. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.09.040.

[17] Zhang Y, Chen Y, Yun L, Liang X. Mechanical performance of bio-inspired bidirectional corrugated sandwich pressure shell under external hydrostatic pressure. China Ocean Engineerig. 2024;38:297-312. https://doi.org/10.1007/s13344-024-0025-y.

[18] Dlubal Software GmbH. RFEM 6 – Structural Analysis and Design Software, Version 6.14. Tiefenbach: Dlubal Software GmbH. https://www.dlubal.com/en/products/rfem-fea-software/what-is-rfem, dostęp: 14.06.2026.