



ANIELA GLINICKA<sup>1)</sup>  
 CEZARY AJDUKIEWICZ<sup>2)</sup>  
 SZYMON IMIEŁOWSKI<sup>3)</sup>

## EFFECTS OF UNIFORMLY DISTRIBUTED SIDE CORROSION ON THIN-WALLED OPEN CROSS-SECTION STEEL COLUMNS

### SKUTKI RÓWNOMIERNEJ KOROZJI SŁUPÓW STALOWYCH O PRZEKROJACH CIENKOŚCIENNYCH OTWARTYCH

**STRESZCZENIE.** Przedstawiono analizę zagadnienia nośności osiowo ściskanych cienkościennych stalowych słupów, skorodowanych równomiernie na powierzchni na całej ich długości. Słupy o przekrojach cienkościennych są często spotykanym elementem w konstrukcjach budowlanych, kolejowych i drogowych. Ubytki masy spowodowane korozją zmniejszają przekrój poprzeczny słupów, a co za tym idzie wpływają na ich nośność. Modele obliczeniowe ubytków korozyjnych słupów przyjęto na podstawie obserwacji istniejących konstrukcji. Do obliczeń wykorzystano teorię prętów cienkościennych. Rozważono kilka modeli osłabienia ścianek ubytkami korozyjnymi w przykładowo wybranych trzech kształtownikach cienkościennych w postaci: ceownika półzamkniętego, podwójnego ceownika półzamkniętego i dwuteownika HKS. Analizowano kilka wariantów rozwoju korozji i stwierdzono, że ubytki korozyjne powodują zmiany geometrii przekroju cienkościennego. Rozważania teoretyczne dotyczące zagadnienia stateczności skorodowanych ściskanych, cienkościennych słupów zilustrowano wynikami obliczeń ich nośności. Obliczono charakterystyki geometryczne przekrojów poprzecznych i rozwiązano układ równań stateczności. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci wykresów ilustrujących skutki, jakie powoduje zmiana geometrii wywołana ubytkami korozyjnymi. W każdym analizowanym przypadku stwierdzono obniżenie nośności słupa na skutek jego korozji. Ponadto w jednym analizowanym przypadku zauważono zmianę postaci wyboczenia z giętnej na giętno-skrętną. Stwierdzono, że bardziej niebezpieczny jest rozwój korozji powodujący niesymetryczny ubytek grubości, co może wpłynąć na zmianę postaci wyboczenia z giętnej na giętno-skrętną.

**SŁOWA KLUCZOWE:** skorodowane słupy ściskane, symulacja korozji przekrojów, wyboczenie prętów cienkościennych.

**ABSTRACT.** Compressive capacity of the thin-walled steel columns, corroded uniformly over their entire side surface length is analysed in this paper. The thin-walled profile steel columns are often used for bridges, rail and road building constructions. Loss of the profile mass that appears due to corrosion growth reduces the cross-sectional area and influences column compressive capacity. Computational models of the structure are assumed based on the observation of existing corroded columns. The theory of thin-walled profiles is taken for the analysis. Models simulating the walls weakening due to corrosion growth are considered on the example of three thin-walled steel profiles: semi-closed channel section, two semi-closed channel section connected by webs and HKS profiles. Different patterns and degrees of corrosion growth were considered and, as a result, changes of the profile cross-sectional geometry were observed. Theoretical considerations of thin-walled compressed corroded steel columns stability are illustrated by bearing capacity calculations. Geometric cross-sectional characteristics are determined and the system of stability equations is solved. The calculation results are presented in the form of graphs illustrating the effects caused by the geometry change due to corrosion defects. The reduction of column compressive strength in each of the considered case is observed. Moreover a variation of the buckling mode from flexural one into warping is noticed in one of the analysed items. It has been found that more dangerous corrosion growth pattern appears when asymmetric loss of the profile wall thickness arises. That may change the form of buckling from flexural one into warping.

**KEYWORDS:** buckling of thin-walled elastic beams, corroded columns subjected to compression, simulation of corroded sections.

<sup>1)</sup> Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; A.Glinicka@il.pw.edu.pl (✉)

<sup>2)</sup> Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; C.Ajdukiewicz@il.pw.edu.pl

<sup>3)</sup> Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska, ul. Nowowiejska 20, 00-653 Warszawa; szymon.imielowski@is.pw.edu.pl

## 1. WPROWADZENIE

Kształtowniki stalowe o przekrojach cienkościennych i krępych są stosowane w konstrukcjach budowlanych, drogowych i kolejowych jako podpory biegów schodów kładek kolejowych dla pieszych, jako pręty ściskane w tych konstrukcjach, jako słupy w ciągach komunikacyjnych itd. Konstrukcje te podczas eksploatacji ulegają korozji. Na Rys. 1 przedstawiono widok powierzchni skorodowanych elementów konstrukcyjnych kładki dla pieszych nad torami kolejowymi i skorodowanego słupa trakcyjnego znajdujących się na terenie węzła kolejowego Białystok. Konstrukcje te narażone są na korozję atmosferyczną, którą wzmagają czynniki agresywne, takie jak: jony chloru, dwutlenek siarki, tlenki azotu, dwutlenek węgla, sadze, pyły węglowe [1]. Ponadto na skutki korozji ma wpływ podwyższona temperatura i zróżnicowana wilgotność. Korozja może być globalna lub lokalna. Korozja globalna obejmuje całe długości słupów. Tam, gdzie ma miejsce intensyfikacja oddziaływania medium korozyjnego, występuje też korozja lokalna, na przykład w strefach podporowych słupów w drogowym ciągu komunikacyjnym [2], w dolnych częściach filarów mostowych usytuowanych poza nurtem rzeki, które są okresowo zatopione w wodzie [3]. Korozja elementów konstrukcji jest zjawiskiem niepożądanym i niebezpiecznym. Istnieją różne sposoby zapobiegania korozji, do których zaliczamy, między innymi, stosowanie stali trudnordzewiejących (S235JOW, S235J2W, S355JOWP, S355J2WP, S355JOW, S355J2W, S355K2W), stali nierdzewnych (ferrytycznych, austenitycznych, austenityczno-ferrytycznych) oraz stosowanie antykorozyjnych powłok ochronnych. Rozmiar defektów korozyjnych, które mogą pojawić się zarówno na powierzchni, jak i we wnętrzu elementów, zależy przede wszystkim od czasu oraz od intensywności oddziaływania agresywnego medium na konstrukcje.

Obecnie w wielu ośrodkach prowadzone są badania naukowe dotyczące wpływu różnych typów korozji na utratę nośności elementów konstrukcji, zmiany właściwości mechanicznych materiałów i sztywności elementów. Wymienimy niektóre z nich. W pracy [4] przeanalizowano utratę nośności skorodowanych prętów o przekroju dwuteowym, przy różnych przypadkach obciążenia. Przedstawiono wykresy zależności aktualnej nośności prętów od procentowego ubytku powierzchni przekroju. Badania eksperymentalne skorodowanych prętów o przekroju kątownika lub przekroju  $H$  przedstawiono odpowiednio w pracach [3] i [5], gdzie określono nośność na różnym etapie rozwoju korozji lokalnej lub globalnej. W pracy [6] przeprowadzono analizę numeryczną wpływu ubytków materiału na korodujących żebrach na redukcję obciążenia niszczącego płytę warstwową

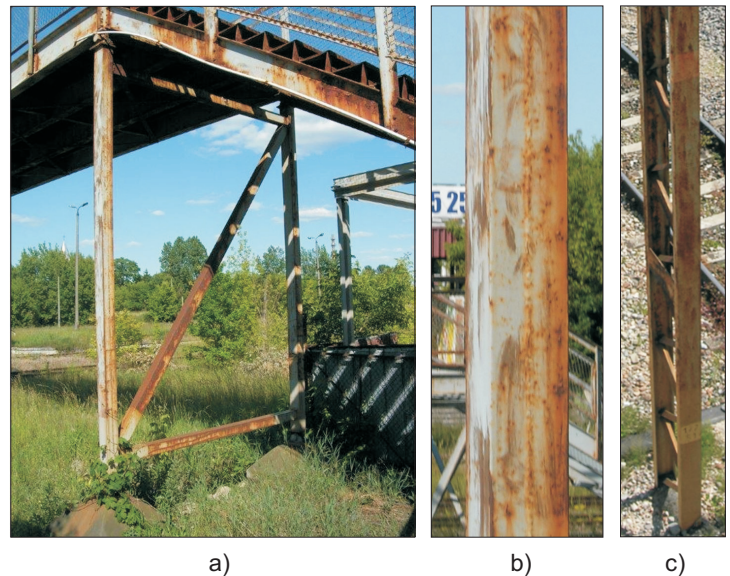
## 1. INTRODUCTION

Structural steel sections of thin or thick cross-sections can be found in building, road and railway structures as stair supports in railway pedestrian bridges, as struts in these structures, in columns along tracks, etc. All such structures suffer corrosion attack during their service life. Fig. 1 shows the effect of corrosion attack on railway footbridge components and on a catenary pole located in the area of the railway junction in Białystok, Poland. The effects of open air corrosion can be aggravated by the presence of aggressive substances, such as chloride ions, sulphur dioxide, nitrogen oxides, carbon dioxide, soot, coal dust [1]. Corrosion increase follows as well higher temperature and humidity/moisture variations. Global and localised corrosion can be distinguished. The first one, i.e. global corrosion extends over the entire length of column. It can be accompanied by localised corrosion in areas of higher rate of attack, for example at supports of road overpasses [2], and in the lower parts of landside piers which from time to time are submerged under water [3]. In the case of structural members corrosion, besides other undesirable effects, it can also be a cause of safety hazard. There are various measures to inhibit corrosion, such as the use of improved corrosion resistance steels (grades S235JOW, S235J2W, S355JOWP, S355J2WP, S355JOW, S355J2W, S355K2W), stainless steels (ferritic, austenitic, duplex) and various anti-rust coating systems. The severity of surface and internal corrosion defects depends primarily on the duration and intensity of attack.

There are many on-going research projects to determine the deteriorating effect of the various forms of aggression on the strength and rigidity of structural members and on the different mechanical properties of materials they are made of. Let us start with a review of some of them. The study reported in [4] analyses the reduction of the bearing capacity of elastic I-beams for different load cases. The actual decrease of strength is presented in relation to the section loss expressed in percent. The results of experimental studies of corroded angles and wide flange I-beams are presented in [3] and [5] respectively, including determination of the bearing capacity at different stages of development of both localised and global corrosion. Numerical analysis of the effect of corrosion-section loss of ribs on the failure load of a ribbed composite panel is shown in [6]. Section loss may result in shifting of the cross-section centroid, resulting in eccentricity and inducing an additional bending moment significantly increasing the maximum deflection [7], as well as potentially

wzmocnioną żebrami. Korozja części przekroju poprzecznego może spowodować przesunięcie jego środka ciężkości, a w konsekwencji powstanie mimośrod i pojawienie się dodatkowego momentu zginającego, powodującego znaczne zwiększenie strzałki ugięcia [7] oraz możliwość znacznie szybszego osiągnięcia stanu granicznego użytkowania. Przedstawione w [7] badania dotyczyły stateczności prętów o przekroju krępych, w którym uwzględniono różne modele ubytków przekrojów spowodowanych korozją. Z korozją należy się też liczyć przy projektowaniu elementów żelbetowych narażonych na obciążenia sejsmiczne. W celu przeanalizowania tego problemu w pracy [8] przeprowadzono analizę wyoboczenia niesprężystego skorodowanych prętów zbrojenia. Wpływ korozji na nośność prętów ściskanych o krępych przekroju poprzecznym opisano w artykułach [2, 7]. Wpływ ten zależy od kształtu przekroju poprzecznego oraz od lokalizacji i głębokości skorodowania powierzchni przekroju poprzecznego. Zależy on też od miejsca przekazywania siły ściskającej na przekrój poprzeczny. Powierzchniowa równomierna korozja prętów osiowo ściskanych o przekrojach cienkościennych pierścieniowych powoduje przede wszystkim obniżenie ich nośności [9], ale może również spowodować zmianę postaci wyoboczenia [10]. Możliwości przeprowadzenia oceny elementów konstrukcji w procesie ich eksploatacji, w tym korodujących, są przedstawione w pracy [11].

Fig. 1. Corroded elements of pedestrian bridge over railway tracks and corroded column (photo: author): a) bridge support truss, b) bridge support column, c) column along the track  
Rys. 1. Widok powierzchni skorodowanych elementów konstrukcyjnych kładki dla pieszych nad torami kolejowymi i skorodowanego słupa (fotografia własna): a) układ prętów podporowych kładki, b) słup podporowy kładki, c) słup w ciągu torów kolejowych



W tym artykule rozpatruje się możliwe globalne defekty korozyjne na powierzchni słupów ściskanych o przekrojach cienkościennych. Zakłada się, że następuje równomierny ubytek masy w przekrojach poprzecznych prętów na całej ich długości. Defekty te prowadzą ogólnie do pocienienia przekrojów poprzecznych. W artykule przedstawiono wyniki symulacji wpływu defektów korozyjnych na nośność i postać wyoboczenia prętów cienkościennych. W obliczeniach wykorzystano teorię prętów cienkościennych Własowa. Do rozważań wybrano z katalogów technicznych dwa ceowniki i jeden dwuteownik HKS opisane w dalszej części artykułu.

shortening the time to serviceability limit state. The studies presented in [7] concerned stability of elastic beams with a not thin-walled cross-section area considering various section loss patterns. The effects of corrosion should be taken into account in the design of reinforced concrete elements subject to seismic loading. This problem is studied in [8] by analysing inelastic buckling of corroded reinforcement bars. The effect of corrosion on the bearing capacity of compressed elastic rods of a not thin-walled cross-section is described in [2, 7]. It depends on the cross-section shape, as well as on the location and depth of corrosion damage to the cross-section. The point of application of the compressive force is relevant as well. With the bearing capacity reduction being the primary effect of uniform surface corrosion of axially compressed thin-walled circular sections [9] it can also alter the buckling mode [10]. Evaluation of structural members in service, including members affected by corrosion, is the subject of [11].

The present paper considers the possible global surface defects due to corrosion attack on thin-walled columns in compression. It is assumed that the section loss progresses evenly over the whole length. Generally, these defects lead to thinning of the corrosion affected members. The paper presents the results of simulation of corrosion defects on the bearing capacity and on the buckling mode of thin-walled elastic beams. The computations are based on the Vlasov's thin-walled elastic beam theory. The analysed materials are two different structural channel sections and one I-beam, namely HKS cross-section, selected from technical catalogues and described in the next chapters.

## 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Rozważany jest pręt prosty osiowo ściskany o ugięciach i skręceniach swobodnie ograniczonych na obu końcach [12]. Schemat statyczny pręta przedstawiono na Rys. 2a. Analizę przeprowadzono na przykładach prętów stalowych o trzech różnych przekrojach poprzecznych. Pierwszy to ceownik czterogięty (Rys. 2b), drugi to para ceowników czterogiętych połączonych środnikami (Rys. 2c), a trzeci to dwuteownik spawany (Rys. 2d).

Fig. 2. a) Diagram of elastic beam with deflections and torsions restricted by simply supported ends, b), c), d) thin-walled sections used in the computational analysis

Rys. 2. a) Schemat statyczny pręta o ugięciach i skręceniach swobodnie ograniczonych, b), c), d) przyjęte do obliczeń cienkościennie przekroje poprzeczne

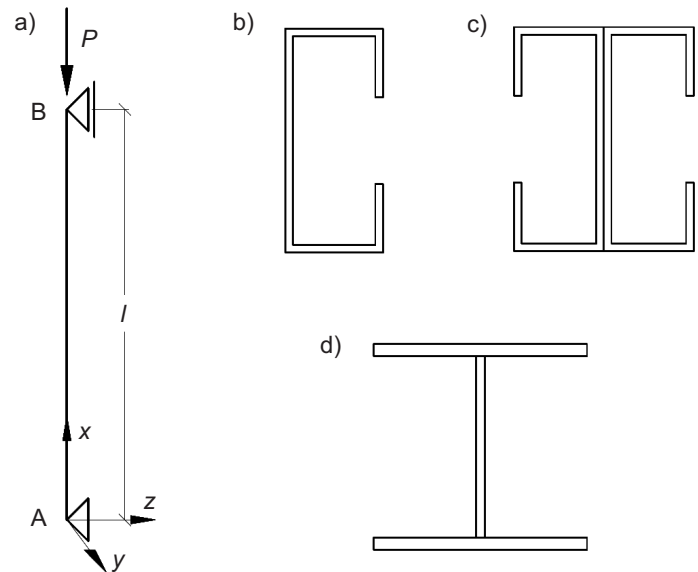
W analizie wykorzystano teorię prętów cienkościennych o przekroju otwartym [12 - 14]. Uwzględniono następujące założenia:

- materiał pręta jest jednorodny, jego cechy mechaniczne nie ulegają zmianom wskutek korozji,
- korozja jest powierzchniowa i ma charakter globalny, czyli występuje w przekrojach poprzecznych na całej długości słupa,
- korozja w przekrojach poprzecznych jest równomierna, to znaczy powodująca równomierne zmniejszenie grubości ścianki, występuje ona na wszystkich ściankach lub na wybranych ściankach przekroju (trzy warianty rozkładów ubytków korozyjnych w przekrojach będą pokazane w dalszym ciągu artykułu),
- siła ściskająca jest przyłożona w środku ciężkości,
- przekrój poprzeczny jest profilem cienkościennym w rozumieniu teorii Vlasowa.

Układ równań stateczności sprężystej pręta cienkościennego ściskanego przyjęto w postaci [14]:

## 2. PROBLEM FORMULATION

Let us consider a straight axially compressed elastic beam with deflections and torsions restrained by simply supported ends [12]. The load diagram of the analysed elastic beam is presented in Fig. 2a. Three different sections were considered: channel with stiffened flanges (Fig. 2b), double (back-to-back) stiffened channels (Fig. 2c) and welded I-beam (Fig. 2d).



The theory of thin-walled elastic beams with open cross-section was applied in the analysis [12 - 14]. It was assumed that:

- the beam material is homogeneous and corrosion does not change its mechanical properties,
- corrosion is limited to the surface and is global, i.e. occurs throughout the entire column length,
- corrosion progresses evenly, resulting in uniform loss across all or chosen cross-section walls thickness (three progression patterns are analysed further in the paper),
- compression force is applied at the cross-section centroid,
- the section classifies as a thin-walled beam according to Vlasov.

The following system of equations is adopted to describe the elastic stability of thin-walled elastic beams in compression [14]:

$$EI_z v'''' + Pv'' + Pz_A \theta'' = 0, \quad (1.1)$$

$$EI_y w'^v + Pw'' - Py_A \theta'' = 0, \quad (1.2)$$

$$EI_\omega \theta'^v - (GI_0 - Pr_o^2) \theta'' - Py_A w'' + Pz_A v'' = 0, \quad (1.3)$$

gdzie:

where:

- $P$  – siła ściskająca,  
 $y, z$  – osie główne środkowe,  
 $O, A$  – oznaczenia środka ciężkości i środka skręcania przekroju,  
 $v, w$  – odpowiednio przemieszczenia liniowe w kierunku osi głównych środkowych  $y, z$ ,  
 $\theta$  – kąt skręcenia przekroju poprzecznego względem środka skręcania  $A$ ,  
 $I_y, I_z, I_\omega$  – odpowiednio momenty bezwładności przekroju poprzecznego względem osi  $y, z$  i wycinkowy moment bezwładności względem punktu  $A$ ,  
 $y_A, z_A$  – współrzędne środka skręcania  $A$ ,  
 $E, G$  – odpowiednio moduł sprężystości i moduł ścinania,  
 $I_O = K_S$  – wskaźnik sztywności przy skręcaniu,  
 $r_o$  – umowny promień bezwładności przekroju poprzecznego,  $r_o^2 = \frac{(I_y + I_z)}{F} + y_A^2 + z_A^2$ ,  
 $F$  – pole przekroju poprzecznego.

- $P$  – compression force,  
 $y, z$  – principal centroidal axes,  
 $O, A$  – designations of the centroid and of the shear centre,  
 $v, w$  – displacement along the principal centroidal axes  $y, z$ ,  
 $\theta$  – angle of torsion about the shear centre  $A$ ,  
 $I_y, I_z, I_\omega$  – second moments of area about axes  $y, z$  and warping constant of torsion about point  $A$ ,  
 $y_A, z_A$  – coordinates of the shear centre  $A$ ,  
 $E, G$  – elasticity and shear modulus respectively,  
 $I_O = K_S$  – torsional modulus of elasticity,  
 $r_o$  – polar radius of gyration of the cross-section,  
 $r_o^2 = \frac{(I_y + I_z)}{F} + y_A^2 + z_A^2$ ,  
 $F$  – cross-sectional area.

For cross-section with one symmetry axis, for example when  $z_A = 0$ , the above set of equations is reduced to:

W przypadku przekroju z jedną osią symetrii, tj. np. gdy  $z_A = 0$ , układ równań upraszcza się do postaci:

$$EI_z v'^v + Pv'' = 0, \quad (2.1)$$

$$EI_y w'^v + Pw'' - Py_A \theta'' = 0, \quad (2.2)$$

$$EI_\omega \theta'^v - (GI_0 - Pr_o^2) \theta'' - Py_A w'' = 0. \quad (2.3)$$

Natomiast w przypadku przekroju bisymetrycznego, tj. gdy  $z_A = y_A = 0$ , układ ma postać trzech równań niezależnych:

Furthermore, for doubly symmetric cross-sections for which  $z_A = y_A = 0$ , the system of equations comprises three independent equations:

$$EI_z v'^v + Pv'' = 0, \quad EI_y w'^v + Pw'' = 0, \quad EI_\omega \theta'^v - (GK_S - Pr_o^2) \theta'' = 0. \quad (3)$$

Uwzględniając warunki brzegowe pręta o ugięciach i skręceniach swobodnie ograniczonych (swoboda obrotu i deplacji), uzyskuje się:

Considering the boundary conditions for the beam with restrained deflections and torsions by simple supports (allowing free rotation and warping), we obtain:

$$w = v = \theta = 0, \quad w'' = v'' = \theta'' = 0. \quad (4)$$

Funkcje własne przyjęto w postaci:

$$w = C_1 \sin ax, \quad v = C_2 \sin ax, \quad \theta = C_3 \sin ax, \quad (5)$$

gdzie:  $\alpha = \frac{\pi}{l}$ .

Rozwiązaniem nietrywialnym układów równań (1.1 ÷ 1.3) i (2.1 ÷ 2.3) są siły krytyczne będące pierwiastkami równania charakterystycznego, które powstaje z rozwinięcia wyznacznika układu równań. Wynikiem rozwiązania układu równań (1.1 ÷ 1.3) jest najmniejszy spośród pierwiastków będący wartością siły krytycznej postaci wybożenia giętno-skrętnego. W rezultacie rozwiązania równania (2.1) otrzymuje się siłę krytyczną przy giętnej postaci wybożenia, a z układu równań (2.2 i 2.3) siły krytyczne przy giętno-skrętnej postaci wybożenia. Rozwiązaniem równań (3) są siły  $P_y, P_z, P_\omega$ , odpowiadające trzem niezależnym postaciom wybożenia; dwie postacie giętne  $P_y, P_z$  oraz jedna skrętna  $P_\omega$ .

Założmy, że pręt ściskany uległ korozji równomiernej, która spowodowała ubytki materiału przekroju poprzecznego. Początkowe położenie punktu przyłożenia pionowej siły  $P$  na słup nie uległo zmianie, co odpowiada rzeczywistym warunkom. Siła jest przekazywana na słup np. przez płytę, przy czym położenie punktu podparcia płyty nie zmienia się. Określenie zmian nośności słupa wskutek postępującej korozji dla różnych symulacji ubytków pola przekroju jest celem niniejszego opracowania. Należy podkreślić, że korzystanie z teorii Własowa [12 - 14] jest możliwe przy założeniu liniowo-sprężystej zależności naprężenie-odkształcenie, dlatego też w przyjętych do rozważań słupach smukłości dobrano tak, aby były większe od smukłości granicznej. Ponadto warto nadmienić, że w normach do projektowania konstrukcji stalowych nazwa przekrój cienkościenny (występująca w tablicach do klasyfikacji przekrojów poprzecznych) nie jest tożsama z definicją przekroju cienkościennego według Własowa; por. np. [15].

### 3. SYMULACJA DEFECTÓW KOROZYJNYCH W PRZEKROJU POPRZECZNYM

W teorii prętów cienkościennych Własowa rozwiązanie problemu stateczności rozpoczyna się od obliczenia charakterystyk geometrycznych przekroju poprzecznego pręta i wyznaczenia osi głównego układu współrzędnych uogólnionych. Zatem potrzebne jest poznanie rozkładu i wymiarów ubytków korozyjnych w przekroju. Defekty w postaci ubytków masy elementu o ustalonych wymiarach na skutek

The following eigen-functions were adopted:

where:  $\alpha = \frac{\pi}{l}$ .

The non-trivial solution of the above systems of equations (1.1 ÷ 1.3) and (2.1 ÷ 2.3) are critical loads calculated as roots of the characteristic equation obtained by expansion of the determinant of the system of equations. The solution of the systems of equations (1.1 ÷ 1.3) is the smallest root being the value of critical load of the warping mode. Solving the equation (2.1) gives the critical load for flexural buckling mode and the system of equations (2.2 and 2.3) provides the critical loads for the warping mode. Solving the equation (3) gives forces  $P_y, P_z, P_\omega$ , corresponding to three independent buckling modes: two flexural  $P_y, P_z$  and one torsional  $P_\omega$ .

Let us assume uniform corrosion of the member in compression, resulting in the loss of the cross-sectional area. The initial point of application of vertical force  $P$  to the column has not changed, which represents real-life situation. The force is transmitted into the column through other members, such as a slab whose point of support is not displaced. The objective of this analysis is to determine the change of the column bearing capacity affected by progressing corrosion attack for different simulations of the loss of cross-sectional area. Note that the Vlasov theory [12 - 14] is possible to apply assuming linear elastic stress-strain behaviour and, as such, the slenderness ratios of the analysed columns are bigger than the specified limit value. Note also that in the steel design codes the name of thin-walled cross-section (that appears in cross-section classification tables), differs from the Vlasov's definition, for example [15].

### 3. SIMULATION OF CROSS-SECTIONAL CORROSION DEFECTS

In the Vlasov's theory of thin-walled elastic beams the solution of stability problem starts with computation of the geometric parameters of the beam cross-section, and defining the axes of the principal coordinate system. For this purpose it is necessary to identify the distribution and dimensions of corrosion damage across the cross-section. Corrosion damage resulting from uniform surface corrosion defined by loss of cross-sectional area of an element of specified initial dimensions is taken into account in various bearing capacity analyses, including the projects reported in [3, 4, 16, 17]. This study provides a systematic

powierzchniowej korozji równomiernej są brane pod uwagę w obliczeniach wytrzymałościowych przez różnych autorów, por. np. [3, 4, 16, 17]. W tej pracy przeprowadzono systematyczną symulację ubytków korozyjnych przekroju kształtownika cienkościennego. Rozważono trzy możliwe warianty ubytków korozyjnych, zilustrowane na Rys. 3, 4 i 5, które wywołują następujące skutki:

- wariant 1, Rys. 3 – równomierne zmniejszenie grubości ścianek od strony zewnętrznej całego przekroju cienkościennego, które nie skutkuje zmianą położenia środka ciężkości  $O$  i środka skręcania  $A$ ,
- wariant 2, Rys. 4 – równomierne zmniejszenie grubości jednej lub obu półek przekroju pręta cienkościennego, które skutkuje przesunięciem środka ciężkości  $O$  i środka skręcania  $A$  wzdłuż jednej z osi głównych środkowych,
- wariant 3, Rys. 5 – równomierne zmniejszenie grubości ścianki na wydzielonym odcinku w przekroju pręta cienkościennego, które skutkuje przesunięciem środka ciężkości  $O$ , obrotem osi głównych środkowych  $y, z$  oraz przesunięciem środka skręcania  $A$ .

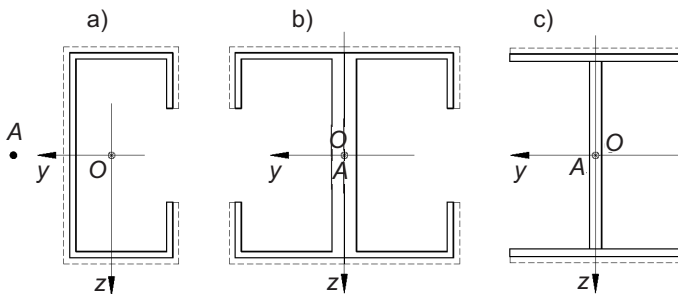


Fig. 3. Corrosion progression pattern No. 1 in thin-walled elastic beam; no change in positions of  $A, O$  points

Rys. 3. Pierwszy wariant symulacji ubytków korozyjnych w przekrojach poprzecznych pręta cienkościennego; punkty  $A, O$  nie zmieniają położenia

Fig. 5. Corrosion progression pattern No. 3 in thin-walled elastic beam; points  $A, O$  are shifted eccentrically, accompanied with rotation of the principal centroidal axes  $y, z$   
Rys. 5. Trzeci wariant symulacji ubytków korozyjnych w przekrojach poprzecznych pręta cienkościennego; punkty  $A$  i  $O$  przesuwają się mimośrodowo i zachodzi obrót osi głównych środkowych  $y, z$

W związku ze zmianami w geometrii przekroju poprzecznego na skutek korozji należy wyznaczyć ponownie położenie środka ciężkości  $O$ , położenie osi głównych środkowych  $y, z$  oraz położenie bieguna głównego  $A$  i obliczyć nowe wartości charakterystyk geometrycznych.

simulation of corrosion progression in a thin-walled structural section. Three corrosion progression patterns are considered, as presented in Fig. 3, 4 and 5:

- progression pattern No. 1, Fig. 3 – uniform reduction of the wall thickness from the outside, covering the entire thin-walled elastic beam cross-section without displacement of the centroid  $O$  and of the shear centre  $A$ ,
- progression pattern No. 2, Fig. 4 – uniform reduction of the wall thickness of one or two flanges of the thin-walled elastic beam cross-section, causing displacement of the centroid  $O$  and of the shear centre  $A$  along one of the principal centroidal axes,
- progression pattern No. 3, Fig. 5 – uniform reduction of the wall thickness on a specific area of the thin-walled elastic beam cross-section causing displacement of the centroid  $O$ , rotation of the principal centroidal axes  $y, z$  and displacement of the shear centre  $A$ .

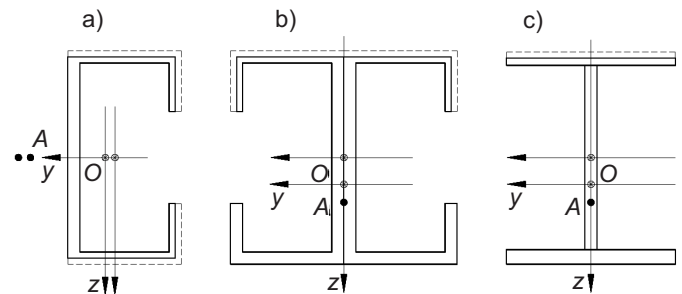
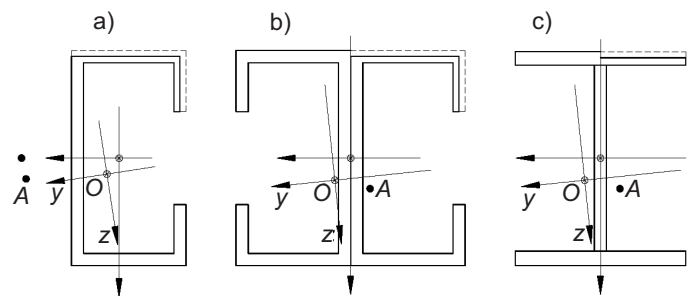


Fig. 4. Corrosion progression pattern No. 2 in thin-walled elastic beam; points  $A$  and  $O$  are shifted along one of the principal centroidal axes

Rys. 4. Drugi wariant symulacji ubytków korozyjnych w przekrojach poprzecznych pręta cienkościennego; punkty  $A$  i  $O$  przesuwają się wzdłuż jednej z osi głównych środkowych



As a result of the changes in the cross-section geometry due to corrosion it is necessary to once again determine the position of the centroid  $O$ , location of the principal centroidal axes  $y, z$  and position of the main pole  $A$ , as well as calculate the changed values of the geometric parameters.

#### 4. ROZWIĄZANIE PROBLEMU

W rozwiązaniu problemu wykorzystano definicje charakterystyk geometrycznych przekroju pręta cienkościennego [12 - 14] i odpowiednie układy równań stateczności (1.1 ÷ 1.3), (2.1 ÷ 2.3), (3). Grubość początkowa ścianek przekroju poprzecznego wynosi  $g_i = \text{const}$ , a ich grubość po korozji  $\eta g_i$ , gdzie  $\eta < 1$ . Przeanalizujemy kolejno trzy wyżej wymienione warianty ubytków korozyjnych w przekroju. W przypadku przekrojów bisymetrycznych przedstawionych na Rys. 3b, 3c pojawienie się korozji równomiernej obu półek nie powoduje zmian położenia środka ciężkości  $O$  i środka skręcania  $A$  – pierwszy wariant ubytków korozyjnych. Uwzględniając, że  $z_A = y_A = 0$  siłę krytyczną należy wyznaczyć z układu równań (3) jako najmniejszą wartość spośród trzech wyznaczonych niezależnie sił:  $P_y$  (siły krytycznej wybożenia giętnego w płaszczyźnie  $x, y$ ),  $P_z$  (siły krytycznej wybożenia giętnego w płaszczyźnie  $x, z$ ) i  $P_\omega$  (siły krytycznej wybożenia skrętnego wokół osi  $x$ ). W tym przypadku możliwe są postacie wybożenia giętnego pręta i postać skrętna.

W przypadku przekroju z jedną osią symetrii, Rys. 3a, położenie punktów  $O$  i  $A$  przekroju określono ze wzorów:

$$y_O = \frac{S_z}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n \eta g_i \int_0^l y ds}{\sum_{i=1}^n \eta g_i \int_0^l ds} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \int_0^l y ds}{\sum_{i=1}^n g_i \int_0^l ds}, \quad (6)$$

$$y_A = y_O + \frac{I_{\omega Oz}}{I_y} = y_O + \frac{\sum_{i=1}^n \eta g_i \int_0^l \omega z ds}{\sum_{i=1}^n \eta g_i \int_0^l z^2 ds}, \quad (7)$$

gdzie:

- $y_O$  – współrzędna środka ciężkości  $O$ ,
- $y_A$  – współrzędna środka skręcania  $A$ ,
- $S_z$  – moment statyczny,
- $I_{\omega Oz}$  – wycinkowy moment bezwładności względem bieguna pomocniczego  $O$ ,
- $s$  – miara wzdłuż linii środkowej ścianek przekroju poprzecznego.

Z wzorów (6) i (7) wynika, że współrzędne punktów  $O, A$  po korozji równomiernej obu półek i środnika tego przekroju nie zmieniały się (Rys. 3a).

#### 4. SOLUTION OF THE FORMULATED PROBLEM

Definition of the geometric parameters of the thin-walled elastic beam [12 - 14] and appropriate sets of stability equations: (1.1 ÷ 1.3), (2.1 ÷ 2.3), (3) were used in finding solution to the formulated problem. The initial (uncorroded) thickness of the cross-section walls is  $g_i = \text{const}$  and corroded thickness is  $\eta g_i$ , where  $\eta < 1$ . Let us consider the three above-mentioned corrosion progression patterns one by one. In the case of doubly symmetric cross-sections, as presented in Fig. 3b and Fig. 3c, uniform corrosion of the two flanges does not change the positions of the centroid  $O$  and of the shear centre  $A$  – as represented by the progression pattern No. 1. Taking into account that  $z_A = y_A = 0$ , the critical loads should be determined with the system of equations (3) as the smallest of the following three independently determined forces:  $P_y$  (critical load of flexural buckling in  $x, y$  plane),  $P_z$  (critical load of flexural buckling in  $x, z$  plane) and  $P_\omega$  (critical load of torsional buckling about  $x$  axis). Flexural and torsional buckling modes are possible in this case.

For cross-sections with one axis of symmetry as presented in Fig. 3a the positions of points  $O$  and  $A$  were determined from the following equations:

where:

- $y_O$  – coordinate of the centroid  $O$ ,
- $y_A$  – coordinate of the shear centre  $A$ ,
- $S_z$  – first moment of area,
- $I_{\omega Oz}$  – second moment of sectoral area about auxiliary pole  $O$ ,
- $s$  – distance along the centre line of the cross-section walls.

According to equations (6) and (7) the coordinates of points  $O, A$  have not changed as a result of uniform corrosion of both flanges and web of the analysed cross-section (Fig. 3a).



Wartości momentów bezwładności przekrojów zilustrowanych na Rys. 3 zmniejszyły się  $\eta$ -krotnie, a stała skręcania zmniejszyła się  $\eta^3$ -krotnie, co opisują wzory:

$$I_z = \sum_{i=1}^n \eta g_i \int_0^l y^2 ds,$$

$$I_\omega = \sum_{i=1}^n \eta g_i \int_0^l \omega^2 ds,$$

Ubytki grubości przekrojów poprzecznych zilustrowane na Rys. 4, przedstawione jako drugi wariant ubytków korozyjnych, powodują przesunięcie środka ciężkości i środka skręcania wzdłuż jednej z osi głównych środkowych pokrywającej się z osią symetrii. Wobec tego pojawia się mimośrodowość działania obciążenia  $\Delta z_0$  lub odpowiednio  $\Delta y_0$ . Siłę krytyczną należy wyznaczyć jako najmniejszą z wartości z rozwiązania układu równań (2.1 ÷ 2.3). W tym przypadku możliwa jest postać wybożenia giętna lub giętno-skrętne.

W trzecim z analizowanych wariantów ubytków korozyjnych, przedstawionym na Rys. 5, niesymetrycznie rozłożone ubytki korozyjne powodują zmianę położenia środka ciężkości i obrót osi głównych środkowych oraz zmianę położenia środka skręcania. Jest to najbardziej ogólny charakter zmian związanych z powstaniem ubytków korozyjnych przekroju. Wówczas wartości momentów bezwładności  $I_y, I_z, I_\omega$  oraz sztywności przy skręcaniu  $K_s$  zmniejszają się i pojawiają się mimośrodowość działania obciążenia  $\Delta z_0$  i  $\Delta y_0$ . Siły krytyczne należy wyznaczyć z układu równań (1.1 ÷ 1.3). W tym przypadku możliwa jest tylko postać wybożenia giętno-skrętnego pręta, a wartość siły krytycznej jest najmniejszą spośród wyznaczonych trzech pierwiastków równania charakterystycznego. Oznacza to niekiedy znaczne obniżenie nośności pręta. Trzeci wariant ubytków korozyjnych pociąga za sobą największe zmiany.

Ważnym, wymagającym podkreślenia problemem, jest liczbowo ocena ubytku grubości w czasie. W normie ISO 9223 [1] przedstawiono pięciostopniową skalę klasyfikacji korozji różnych metali w atmosferze miast przemysłowych. Szybkość korozji liniowej  $v_{cor}$  [mm/rok] mieści się w przedziale:  $0,00127 \leq v_{cor} \leq 0,191$ ; gdzie wartość pierwsza obejmuje metale bardzo odporne na korozję, a druga metale mało odporne na korozję. Na podstawie znajomości szybkości korozji można zbudować model, który pozwoli na określenie ilościowych zmian korozyjnych nośności słupa w zadanym czasie, co nie weszło w zakres tego opracowania. W wykonanych przykładach ogólnie brano pod uwagę ubytki narastające.

The second moments of area of the cross-sections presented in Fig. 3 have decreased  $\eta$ -times and the torsional stiffness decreased  $\eta^3$ -times, as per the following equations:

$$I_y = \sum_{i=1}^n \eta g_i \int_0^l z^2 ds, \quad (8)$$

$$K_s = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n I_i (\eta g_i)^3. \quad (9)$$

The section loss presented schematically in Fig. 4 as the second progression pattern results in a displacement of the centroid and of the shear centre along one of the principal centroidal axes coinciding with the symmetry axis. This induces loading eccentricity equal to  $\Delta z_0$  or  $\Delta y_0$  as appropriate. The critical load is determined as the smallest of the values obtained by solving the system of equations (2.1 ÷ 2.3). Flexural or warping modes are possible in this case.

The third of the analysed corrosion progression patterns presented in Fig. 5 features non-symmetrical distribution of corrosion damage, resulting in changed positions of the centroid and shear centre, as well as rotation of the principal centroidal axis. This case provides the most general nature of changes due to corrosion damage to the cross-section. The values of the second moment of area  $I_y, I_z, I_\omega$  and torsional stiffness  $K_s$  decrease and loading eccentricities  $\Delta z_0$  and  $\Delta y_0$  are induced. The critical loads should be derived from the system of equations (1.1 ÷ 1.3). Only warping mode is possible in this case and the critical load is the smallest of the three roots of characteristic equation. This situation can sometimes lead to a considerable decrease of the ultimate bearing strength of the elastic beam. The third corrosion progression pattern involves the greatest changes.

Attention is drawn to the important issue of quantitative evaluation of the loss of thickness due to corrosion over time. ISO 9223 [1] gives a five-category rating system for corrosion of different metals in industrial cities. The linear corrosion rate  $v_{cor}$  [mm/year] falls in the range of  $0.00127 \leq v_{cor} \leq 0.191$  with the first value relating to metals with high corrosion resistance and the second value relating to metals with poor corrosion resistance. Knowing the corrosion rate one can build a model enabling quantitative determination of corrosion induced decrease of the column strength over time which, however, is beyond the scope of this paper. Generally the performed analyses concerned progressing loss of material.

## 5. PRZYKŁADY OCENY NOŚNOŚCI PRĘTÓW ŚCISKANYCH

Do analizy obliczeniowej przyjęto dwa kształty przekrojów poprzecznych: ceownik półzamknięty i dwuteownik HKS stosowany na słupy. Wyniki analizy przedstawiono w postaci wykresów zamieszczonych w dalszej części tekstu, obrazujących wpływ ubytku pola przekroju na nośność pręta ściskanego. Przez nośność rozumie się tutaj najmniejszą wartość spełniającą przyrównany do zera wyznacznik z równań stateczności ( $1.1 \div 1.3$ ) lub ( $2.1 \div 2.3$ ). Na wykresach na osi pionowej odnoszono tzw. współczynnik pozostałej nośności, czyli stosunek nośności pręta skorodowanego do nośności pręta nieskorodowanego, a na osi poziomej współczynnik ubytku pola przekroju, czyli stosunek ubytku pola przekroju do pola przekroju nieskorodowanego.

W ceownikach półzamkniętych  $80 \times 80 \times 25 \times 3$  i  $100 \times 60 \times 25 \times 3$  symulację korozji założono w postaci przedstawionej na Rys. 6. Pola przekrojów poprzecznych tych ceowników są prawie jednakowe (odpowiednio  $8,7 \text{ cm}^2$  i  $8,27 \text{ cm}^2$ ), ich grubości są jednakowe, a proporcje wymiarów wysokości średnicy do długości półek są odpowiednio: 1:1 i 1:0,6 (Rys. 6). Długość ceowników przyjęto równą 400 cm tak, że smukłości ceownika  $80 \times 80 \times 25 \times 3$  przy zmieniającym się przekroju związanym z ubytkami korozyjnymi mieściły się w zakresach  $\lambda_y = 118,3 \div 102,3$  i  $\lambda_z = 132,6 \div 111$ , a decydująca o nośności smukłość ceownika  $100 \times 60 \times 25 \times 3$  była w zakresie  $\lambda_z = 168,3 \div 102,1$ . Na Rys. 7 linią przerywaną (czerwoną) przedstawiono wpływ ubytku pola przekroju poprzecznego na zdefiniowany już wcześniej współczynnik pozostałej nośności ściskanego pręta wykonanego z ceownika  $80 \times 80 \times 25 \times 3$ . Na rysunku tym, w celach porównawczych, przedstawiono dodatkowo trzy inne zależności obrazujące wpływ ubytku przekroju na wielkości pozostałe: pole przekroju, Eulerowską siłę krytyczną skrętną oraz mniejszą giętną. Trzeba zauważyć, że przy ubytku powierzchni wynoszącym około 0,1 (10%) nastąpiła zmiana postaci wyboczenia z giętej na skrętną. Na Rys. 8 przedstawiono wykresy tych samych zależności otrzymane dla ceownika  $100 \times 60 \times 25 \times 3$ . Wskazują one na monotoniczny spadek nośności przy ściskaniu. W całym badanym zakresie ubytku masy występuje tylko wyboczenie giętne, dlatego że wartość momentu bezwładności względem osi  $z$  jest zdecydowanie mniejsza od wartości momentu bezwładności względem osi  $y$ .

W przypadku słupów o przekrojach dwuteowych HKS 300-10-300-20, przedstawionych na Rys. 9, przyjęto dwa przypadki symulacji efektów korozyjnych w przekroju poprzecznym. Pierwszy w postaci korozji całej górnej półki

## 5. EXAMPLES OF EVALUATION OF THE BEARING CAPACITY OF ELASTIC BEAMS IN COMPRESSION

Two sections were considered in this computational analysis: channel with stiffened flanges and HKS cross-section used for columns. The outputs of the analysis in the form of graphs, presented in the following part of the article, are showing the effect of section loss on the bearing capacity of the elastic beam in compression. Hereof the bearing capacity is taken as the smallest value satisfying zero determinant of the stability equations ( $1.1 \div 1.3$ ) or ( $2.1 \div 2.3$ ). The parameter plotted on the vertical axis is the residual bearing capacity calculated as the ratio between the corroded and initial bearing capacities, and the horizontal axis is used for plotting the section loss ratio between the corroded and initial cross-section areas.

In channels with stiffened flanges of  $80 \times 80 \times 25 \times 3$  and  $100 \times 60 \times 25 \times 3$  the corrosion progression was assumed to follow the pattern presented in Fig. 6. The cross-sectional areas of these channels are almost the same ( $8.7 \text{ cm}^2$  and  $8.27 \text{ cm}^2$  respectively), their thickness is the same, with the web height to flange length ratios of 1:1 and 1:0.6 (Fig. 6). The lengths  $80 \times 80 \times 25 \times 3$  of structural channels were taken at 400 cm, so that the slenderness ratios changing due to corrosion section loss fall in the ranges of  $\lambda_y = 118.3 \div 102.3$  and  $\lambda_z = 132.6 \div 111$  and the slenderness ratio of the  $100 \times 60 \times 25 \times 3$  channel which defines its ultimate strength falls in the range of  $\lambda_z = 168.3 \div 102.1$ . The dashed (red) line in Fig. 7 represents the effect of the section loss on the previously determined residual strength of compressed beam made of  $80 \times 80 \times 25 \times 3$  channel. The graph shows also, for the sake of comparison, three additional relationships representing the effect of the section loss on the other relevant values: cross-section area, critical Euler torsional load and smaller bending load. Note that following a ca. 10% section loss the buckling mode changes from flexural to torsional. Fig. 8 shows the same curves, yet obtained for a  $100 \times 60 \times 25 \times 3$  channel. These curves indicate a steady decrease of the ultimate compressive strength. Flexural buckling is the only buckling mode occurring over the whole analysed section loss resulting in the value of the second moment of area about axis  $z$  being considerably smaller than about axis  $y$ .

In case of columns made of I-beams of HKS 300-10-300-20 cross-section, presented in Fig. 9, the effects of two simulated section corrosion patterns were considered. In the first pattern corrosion affects the entire upper flange of I-beam, as presented in Fig. 9a, and in the second case

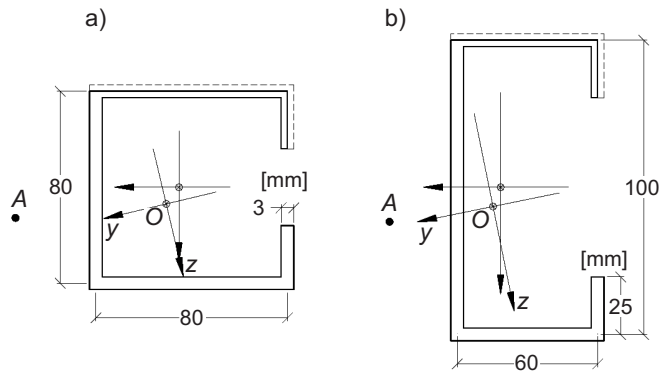


Fig. 6. Section loss simulation in two structural channels with 80-80-25-3 and 100-60-25-3 cross-sections

Rys. 6. Symulacja ubytków korozyjnych ceowników 80-80-25-3 i 100-60-25-3

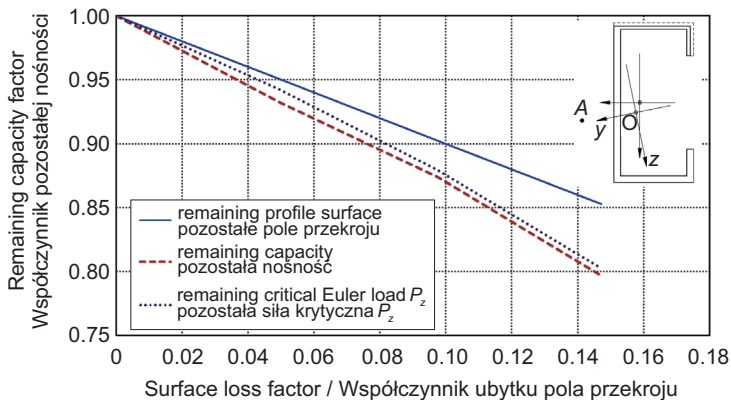


Fig. 8. Decrease of the bearing capacity of structural channel with 100x60x25x3 cross-section subjected to compression due to section loss

Rys. 8. Wpływ ubytku pola przekroju na spadek nośności ściskanego ceownika 100x60x25x3

dwuteownika jak na Rys. 9a, drugi w postaci korozji tylko prawej górnej półki jak na Rys. 9b. Przy uwzględnionej w obliczeniach długości pręta 1200 cm i przy różnych wartościach ubytków korozyjnych – smukłości  $\lambda_z$  mieściły się w granicach 150÷162, czyli mieliśmy do czynienia z wyboczeniem sprężystym. Wyniki obliczeń przedstawiono na Rys. 10 i 11 w podobny sposób jak na Rys. 8. Przedstawione na obydwu rysunkach wykresy wskazują na zmniejszenie nośności słupa bez zmiany postaci wyboczenia i pokazują, który rozkład ubytku masy w przekroju poprzecznym ma większy wpływ na spadek nośności, czyli jest bardziej niebezpieczny. Trzeba zauważyć, że przy ubytku pola przekroju wynoszącym na przykład 0,12 (12%) wartości spadków nośności są:

- 15%, gdy koroduje cała górna półka dwuteownika (Rys. 10),

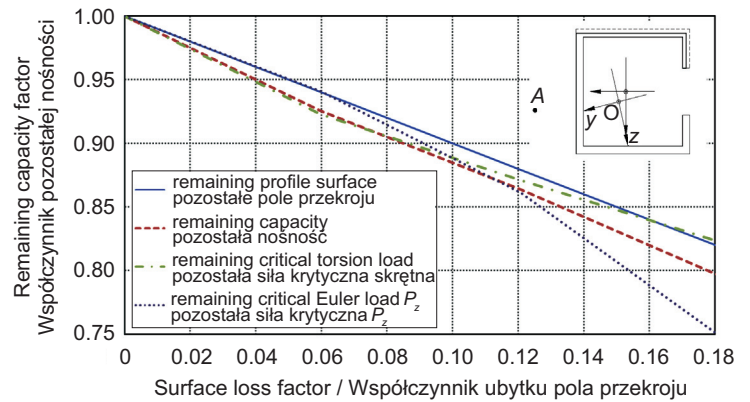


Fig. 7. Decrease of the bearing capacity of structural channel with 80x80x25x3 cross-section subjected to compression due to section loss

Rys. 7. Wpływ ubytku pola przekroju na spadek nośności ściskanego ceownika 80x80x25x3

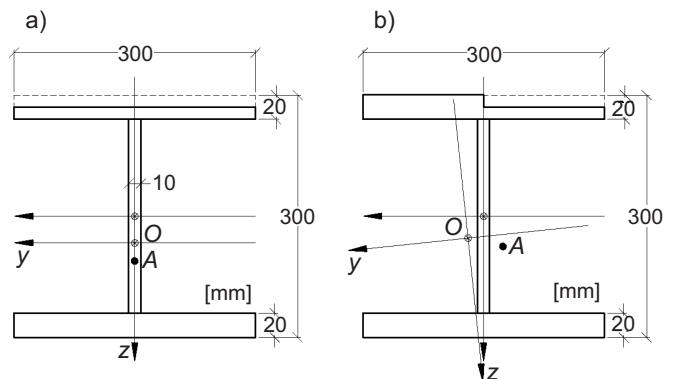


Fig. 9. Simulation of the effects of corrosion of I-beam with HKS 300-10-300-20 cross-section: a) corrosion of the entire upper flange, b) corrosion of the right-hand half of the upper flange

Rys. 9. Symulacja efektów korozyjnych dwuteownika HKS 300-10-300-20: a) korozja całej górnej półki, b) korozja prawej części górnej półki

corrosion is limited to the right-hand half of the upper flange, as in Fig. 9b. For the considered length of 1200 cm and different corrosion section loss ratios the slenderness ratio  $\lambda_z$  falls in the range 150÷162, hence we deal with flexural buckling. The results of these computations are presented graphically in Fig. 10 and in Fig. 11 similarly to Fig. 8. The curves in both graphs indicate decreasing bearing capacity of the column without a change in the buckling mode and show which section decrease pattern is more severe in terms of the bearing capacity decrease (i.e. more dangerous). For example, 12% section loss decreases the bearing capacity by:

- 15% – for corrosion affecting the entire upper flange of I-beam (Fig. 10),

- 20%, gdy koroduje prawa górna półka dwuteownika (Rys. 11).

Otrzymana różnica świadczy o tym, że przypadek zmniejszenia grubości połowy półki jest bardziej niebezpieczny od przypadku zmniejszenia grubości całej półki, czyli niesymetryczny rozkład ubytku korozyjnego w ścianie jest bardziej niebezpieczny od przypadku symetrycznego ubytku korozyjnego.

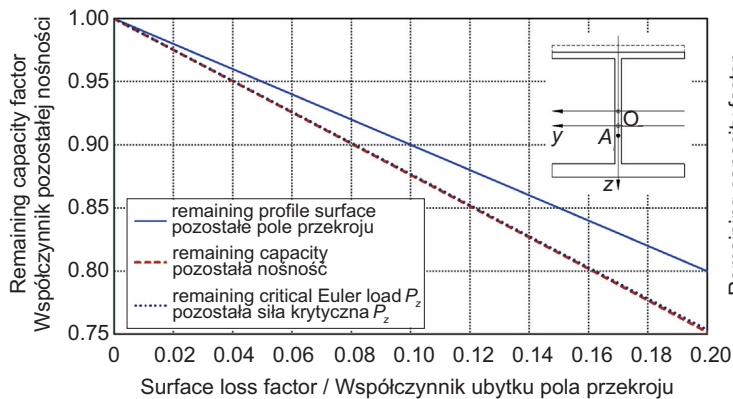


Fig. 10. Decrease of the bearing capacity of compressed I-beam with HKS 300-10-300-20 cross-section due to section loss in the entire upper flange

Rys. 10. Wpływ ubytku pola przekroju w całej górnej półce na spadek nośności ściskanego dwuteownika HKS 300-10-300-20

## 6. WNIOSKI

Przeprowadzona analiza wykazała istotny wpływ ubytków materiału, powstałych w wyniku równomiernej globalnej korozji powierzchniowej na stateczność słupów wykonanych ze stalowych kształtowników cienkościennych. Wykazano, że analizowane ubytki korozyjne spowodowały: pojawianie się mimośrodków obciążenia, obniżenie wartości siły krytycznej, możliwość zmiany postaci wybočenja. Przeprowadzono rozwiązania układów równań stateczności dla dwóch ceowników półzamkniętych i dwuteownika HKS. Otrzymane wykresy zależności utraty nośności na ściskanie jako funkcji utraty pola przekroju poprzecznego pozwalają na śledzenie tych zależności w miarę narastania ubytku korozyjnego. Pozwalają też ocenić, jaki rozkład ubytków na powierzchni przekroju poprzecznego jest bardziej bezpieczny, a jaki mniej bezpieczny. Badany zakres ubytków korozyjnych pola przekroju poprzecznego w przykładach obliczeniowych mieścił się w przedziałach: 0 ÷ 18%, 0 ÷ 15%, 0 ÷ 12%. Wyznaczony spadek nośności na ściskanie słupów mieścił się odpowiednio w przedziałach: 0 ÷ 25%, 0 ÷ 22%, 0 ÷ 20%.

- 20% – for corrosion limited to the right-hand half the upper flange of I-beam (Fig. 11).

The above difference shows that loss of thickness of a half of flange has more detrimental effect than loss of thickness spread over the whole flange. In other words: non-symmetrical pattern of corrosion section loss is more dangerous than symmetrical one.

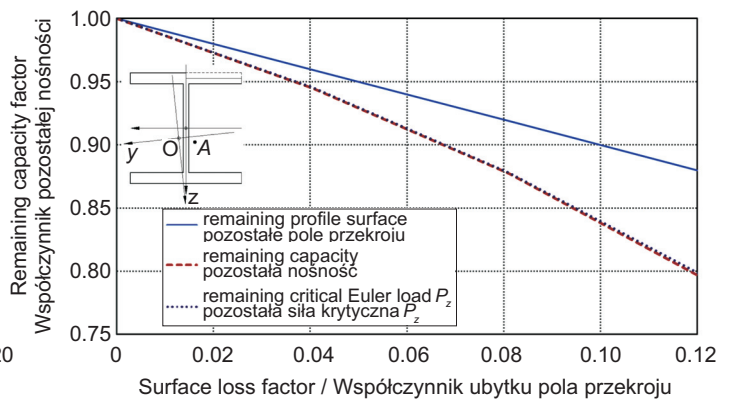


Fig. 11. Decrease of the bearing capacity of compressed I-beam with HKS 300-10-300-20 cross-section due to section loss in the right-hand half of the upper flange

Rys. 11. Wpływ ubytku pola przekroju w prawej części górnej półki na spadek nośności ściskanego dwuteownika HKS 300-10-300-20

## 6. CONCLUSIONS

The above described analysis showed a considerable detrimental effect of the material loss due to global surface corrosion on the stability of columns made of thin-walled steel structural sections. It has been demonstrated that the analysed corrosion damage induced loading eccentricities, reduced the critical load value and possibly changed also the buckling mode. Systems of stability equations were solved for two stiffened channels and one HKS cross-section. The obtained curves representing the relationship between the decrease of ultimate compressive strength and section loss enable tracking this relationship against the progress of corrosion damage. Moreover, it is possible to assess which of the corrosion progression patterns is more and which is less detrimental from the structural safety perspective. The analysed reductions of the cross-sectional area due to corrosion were in the ranges of 0 ÷ 18%, 0 ÷ 15% and 0 ÷ 12%. The corresponding reductions of the ultimate compressive strength of the columns were in the ranges of 0 ÷ 25%; 0 ÷ 22% and 0 ÷ 20% respectively.

Przyjęte modele ubytku grubości przekroju poprzecznego były symulowane w taki sposób, żeby wywoływały trzy warianty zmian charakterystyk geometrycznych przekrojów cienkościennych:

- wariant 1 – równomierne zmniejszenie grubości ścianek całego przekroju cienkościennego,
- wariant 2 – równomierne zmniejszenie grubości jednej lub obu półek przekroju cienkościennego,
- wariant 3 – równomierne zmniejszenie grubości ścianki dowolnie wydzielonej w przekroju.

Największe zmiany, w odniesieniu do przekroju nieskorodowanego, stwierdzono w wariantcie trzecim, a najmniejsze w pierwszym. Na podstawie analizy wariantu trzeciego w przekroju pręta nastąpiły zmiany jak niżej:

- układ osi głównych środkowych zmienił położenie początkowe i uległ obrotowi oraz zmienił położenie środek skręcania,
- wartości charakterystyk geometrycznych zmniejszyły się,
- pojawiały się mimośrodowość działania obciążenia ściskającego,
- w szczególności przekrój bisymetryczny osiowo ściskany przekształcił się w przekrój niesymetryczny mimośrodowo ściskany, tj. dwuteownik HKS ze skorodowaną połową półki.

Założona i przeprowadzona trójwariantowa symulacja ubytków grubości materiału w przekroju poprzecznym może być przeniesiona na inne kształty przekrojów poprzecznych.

## BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Roberge P.R.*: Corrosion engineering. Principles and Practice. McGraw-Hill, USA, 2008
- [2] *Glinicka A., Imielowski S.*: Ocena zmian nośności słupów stalowych w ciągach komunikacyjnych na skutek korozji. Monografia: Aktualne zagadnienia budownictwa komunikacyjnego. Seria Monografie Zakładu Mechaniki Teoretycznej i Mechaniki Nawierzchni Komunikacyjnych, OW PW, Warszawa, 2015, 71-80
- [3] *Karagah H., Shi C., Dawood M., Belarbi A.*: Experimental investigation of short steel columns with localized corrosion. *Thin-Walled Structures*, **87**, 2015, 191-199
- [4] *Rahgozar R.*: Remaining capacity assessment of corrosion damaged beams using minimum curves. *Journal of Constructional Steel Research*, **65**, 2009, 299-307
- [5] *Beaulieu L.V., Legeron F., Langlois F.*: Compression strength of corroded steel angle members. *Journal of Constructional Steel Research*, **66**, 2010, 136-137

The assumed section loss models were simulated, so that to obtain the following three progression patterns:

- progression pattern No. 1 – uniform reduction of wall thickness on the entire thin-walled structural section,
- progression pattern No. 2 – uniform reduction of wall thickness on only one or both flanges of a thin-walled structural section,
- progression pattern No. 3 – uniform reduction of wall thickness on an arbitrarily chosen part of the structural section wall.

The greatest and the smallest changes, in relation to the uncorroded section, occurred in patterns No. 3 and No. 1 respectively. The progression pattern No. 3 was found to:

- displace and rotate the system of the principal centroidal axes and displace the shear centre,
- decrease the values of geometric parameters,
- induce compression loading eccentricities,
- this is particularly evident in the case of HKS cross-section in which corrosion on one half of the flange resulted in a change from axially compressed doubly symmetric section to non-symmetric eccentrically compressed section.

The analysis comprising three corrosion progression patterns, designed and performed under this research, can be adapted and used for other cross-sections.

- [6] *Jelovica J., Romanoff J., Remes H.*: Influence of general corrosion on buckling strength of laser-welwed web-core sandwich plate. *Journal of Constructional Steel Research*, **101**, 2014, 342-350
- [7] *Glinicka A., Imielowski S.*: Wpływ zmiany przekroju poprzecznego skorodowanych prętów ściskanych na nośność. *Logistyka*, **4**, 2015, 3411-3416
- [8] *Kashani M.M., Crewe A.J., Alexander N.A.*: Nonlinear stress-strain behavior of corrosion-damaged reinforcing bar including inelastic buckling. *Engineering Structures*, **48**, 2013, 417-429
- [9] *Glinicka A., Kruk M.*: Analiza eksperymentalna wybożenia niesprężystego prętów stalowych poddanych korozji w komorze mgły solnej. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **9**, 3, 2010, 5-22

- [10] *Glinicka A., Imielowski S., Ajdukiewicz C.*: Influence of uniformly distributed corrosion on the compressive capacity of selected thin walled metal columns. *Procedia Engineering*, **111C**, 2015, 262-268
- [11] *Bień J.*: Modelowanie obiektów mostowych w procesie ich eksploatacji. OW Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002
- [12] *Jastrzębski P., Mutermilch J., Orłowski W.*: Wytrzymałość Materiałów, 2. Arkady, Warszawa, 1986
- [13] *Kollbrunner C.F., Hajdin N.*: Dünnwandige Stäbe. Band 1. Springer – Verlag, Berlin Heidelberg, New York, 1972
- [14] *Yu W.W., LaBoube R.A.*: Cold-Formed Steel Design. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2010
- [15] *Biegus A.*: Nośność graniczna stalowych konstrukcji prętowych. PWN, Warszawa - Wrocław, 1997
- [16] *Bień J.*: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. WKŁ, Warszawa, 2010
- [17] *Lutes L.D., Kohutek T.L., Ellison B.K., Konen K.F.*: Assessing the compressive strength of corroded tubular members. *Applied Ocean Research*, **23**, 2001, 263-268