



ANIELA GLINICKA¹⁾
MAGDALENA KRUK²⁾

ANALIZA EKSPERYMENTALNA WYBOCZENIA NIESPRĘŻYSTEGO PRĘTÓW STALOWYCH PODDANYCH KOROZJI W KOMORZE MGŁY SOLNEJ

STRESZCZENIE. W pracy przedstawiono badania doświadczalne wybooczenia niesprężystego skorodowanych prętów stalowych. Proces korozji zachodził w komorze mgły solnej przez okres 16 dob. Próby wybooczenia przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej Instron 3382. Do badań używano próbek wykonanych z rur stalowych o różnych smukłościach i różnej grubości ścianek. Porównano nośność prętów skorodowanych z nośnością prętów niezniszczonych. W pracy stwierdzono, że wartości siły krytycznej wszystkich skorodowanych prętów były mniejsze od wartości siły krytycznej prętów nieskorodowanych o 2,8% ÷ 28,4%. Przeprowadzono analizę wyznaczonych doświadczalnie zależności siły od skrócenia pręta w pełnym zakresie obciążenia.

1. WSTĘP

Korozja konstrukcji stalowych to proces, który może doprowadzić do zniszczeń powodujących ograniczenia eksploatacyjne. Złożoność zjawiska powoduje, że badania korozji mają charakter interdyscyplinarny zarówno w ujęciu podstawowym jak i inżynierskim [1]. Korozja, w zależności od rodzaju metalu lub stopu oraz intensywności

¹⁾ dr hab. inż. – Wydział Inżynierii Łądowej Politechniki Warszawskiej

²⁾ dr inż. – Wydział Inżynierii Łądowej Politechniki Warszawskiej

oddziaływania środowiska agresywnego w czasie prowadzi do różnego typu zniszczeń w materiale takich jak: zmiana grubości elementu, plamy, szczeliny i wżery korozyjne na powierzchni elementu, a także zniszczenia międzykrystaliczne wewnątrz materiału. Mają one wpływ na eksploatację konstrukcji. Ten wpływ jest pomijalny lub bardzo mały w okresie inicjacji procesu korozji i powiększa się w miarę jego rozwoju. Elementy stalowe zabezpiecza się zwykle pokryciami antykorozyjnymi. Do zabezpieczenia stali gorszych gatunkowo i tańszych stosuje się malowanie powierzchni i cynkowanie. Przykładowo szczegółowe zalecenia w zakresie wykonywania i odbioru antykorozyjnych zabezpieczeń konstrukcji stalowych drogowych obiektów mostowych przedstawione są w opracowaniu [2]. Dla zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji zalecenia powinny być ściśle respektowane. Literatura na temat korozji obejmuje zarówno pozycje praktyczne z technicznego punktu widzenia jak i pozycje z zakresu badań podstawowych. Zagadnienia pracy elementów konstrukcji, które uległy degradacji na skutek korozji w literaturze najczęściej dotyczą stateczności płyt [3 - 5], zginania rur [6, 7] i wybożenia rur [8]. Wymienione publikacje, o charakterze teoretycznym, dotyczą modelowania MES skorodowanych elementów konstrukcji lub zawierają wybrane rozwiązania analityczne takich problemów. Natomiast liczne publikacje na temat eksperymentalnych badań korozyjnych najczęściej pochodzą z zakresu inżynierii materiałowej.

W artykule podjęto tematykę oceny nośności granicznej skorodowanych ściskanych słupów stalowych umieszczonych w środowisku mgły solnej. Środowisko takie występuje w okolicach nadmorskich, a w warunkach laboratoryjnych jest ono symulowane we wnętrzu komory laboratoryjnej. Stale węglowe i niskostopowe, które są metalami aktywnymi w środowisku mgły solnej łatwo ulegają korozji. Rzeczywiste stalowe konstrukcje inżynierskie, a więc w tym także mosty, korodują w środowisku atmosferycznym przez dziesiątki lat [9]. W laboratorium czas korodowania skraca się zwykle do 720 godzin [10] w celu uzyskania stanu skorodowania metalu, który określa norma lub przepisy branżowe. Próbki ze stali S235JR umieszczono w komorze laboratoryjnej w atmosferze mgły solnej. Następnie skorodowane próbki poddano ściskaniu w maszynie wytrzymałościowej. W niniejszej pracy badano wybożenie niesprężyste skorodowanych rur stalowych o zróżnicowanych grubościach ścianek i zróżnicowanych smukłościach.

2. CEL, ZAKRES I PROGRAM BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Celem pracy jest analiza eksperymentalna wpływu korozji zachodzącej w komorze mgły solnej na nośność graniczną ściskanych próbek stalowych. Do badań przyjęto pręty o różnych długościach i zróżnicowanych wymiarach geometrycznych przekroju poprzecznego. Zróżnicowanie wymiarów umożliwiło uzyskanie różnych powierzchni styku stali z ośrodkiem korodującym i jednocześnie otrzymanie różnych smukłości prętów.

Badania zostały przeprowadzone w dwóch etapach:

- etap 1 – korozja próbek w komorze mgły solnej typu MS 600,

etap 2 – ściskanie skorodowanych próbek w maszynie wytrzymałościowej Instron 3382.

Celem przeprowadzonych prób ściskania było:

- otrzymanie dokładnych ścieżek równowagi relacji siła ścisakająca – przemieszczenie pionowe belki maszyny w pełnym zakresie obciążenia,
- wyznaczenie sił krytycznych,
- określenie wpływu pól powierzchni prętów będących w kontakcie z mgłą solną na utratę nośności.

Do badań korozyjnych i mechanicznych przygotowano trzy serie próbek nazwane *A*, *B* i *C*; których wymiary geometryczne zestawiono w tabelicy 1. Ponadto przygotowano próbki – świadki o takich samych wymiarach, które nie były korodowane. W tabelicy 1 zestawiono również smukłości prętowe dla obustronnego utwierdzenia prętów realizowanego w maszynie za pomocą zamocowanych sztywnych talerzy, w których umieszczona była próbka. Serię tworzyły pręty o przekroju pierścieniowym określonym przez średnicę zewnętrzną d , grubość ścianki t i smukłość prętową λ , zawartą w przedziale od około 7 do 40, to jest mniejszą od smukłości granicznej dla stali wynoszącej około 100.

W badanych seriach średnice zewnętrzne i grubości ścianek rur były następujące:

- seria A: $d = 20$ mm, $t = 2$ mm,
- seria B: $d = 20$ mm, $t = 1$ mm,
- seria C: $d = 20$ mm, $t = 0,5$ mm.

Tablica 1. Zestawienie wymiarów próbek przygotowanych do badań korozyjnych i mechanicznych oraz ich smukłości prętowych
Table 1. Dimensions and slenderness of specimens prepared for corrosion and mechanical tests

Nazwa próbki	Długość rury [mm]	Grubość ścianki [mm]	Powierzchnia styku rury z mgłą solną [mm ²]	Smukłość prętowa przy ścisaniu
AI2	111,0	2,06	$1,25 \cdot 10^4$	7,8
AI3	111,0	2,05	$1,25 \cdot 10^4$	7,8
AI4	112,0	2,04	$1,26 \cdot 10^4$	7,8
AII2	158,0	1,96	$1,78 \cdot 10^4$	11,5
AII3	159,0	1,96	$1,79 \cdot 10^4$	11,5
AII4	159,0	1,96	$1,79 \cdot 10^4$	11,5
AIII2	237,0	1,97	$2,67 \cdot 10^4$	17,6
AIII3	236,5	1,96	$2,66 \cdot 10^4$	17,6
AIII4	236,5	1,97	$2,67 \cdot 10^4$	17,6
AIV2	320,0	1,96	$3,60 \cdot 10^4$	24,1

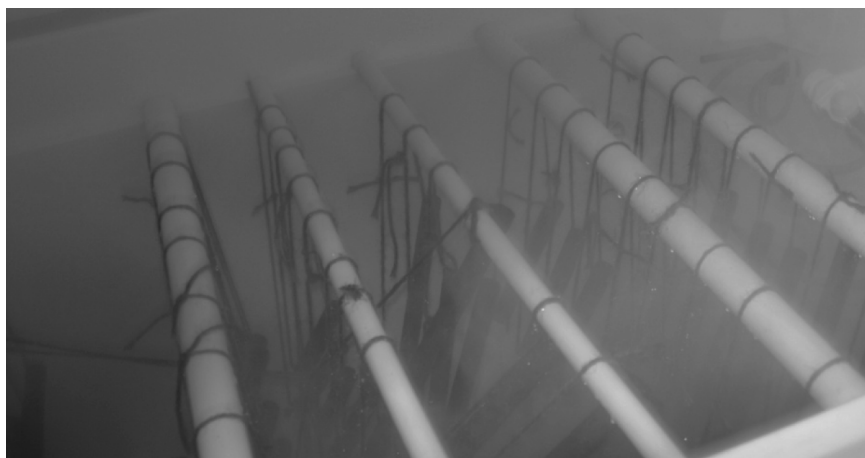
Nazwa próbki	Długość rury [mm]	Grubość ścianki [mm]	Powierzchnia styku rury z mgłą solną [mm ²]	Smukłość prętowa przy ścisnaniu
AIV3	320,0	1,96	$3,60 \cdot 10^4$	24,1
AIV4	320,0	1,97	$3,60 \cdot 10^4$	24,1
AV2	519,0	2,06	$5,84 \cdot 10^4$	39,8
AV3	521,5	2,04	$5,88 \cdot 10^4$	39,9
AV4	520,0	1,97	$5,87 \cdot 10^4$	39,8
B14	108,9	0,97	$1,27 \cdot 10^4$	7,4
B15	108,9	1,01	$1,29 \cdot 10^4$	7,3
B16	108,9	0,96	$1,28 \cdot 10^4$	7,4
B24	166,0	0,94	$1,99 \cdot 10^4$	11,4
B25	165,5	0,95	$1,99 \cdot 10^4$	11,3
B26	165,3	0,98	$1,98 \cdot 10^4$	11,3
B34	247,3	0,99	$2,98 \cdot 10^4$	17,3
B35	247,2	1,00	$2,98 \cdot 10^4$	17,3
B36	247,0	1,02	$2,96 \cdot 10^4$	17,4
B44	335,0	1,01	$4,03 \cdot 10^4$	23,8
B45	335,5	1,03	$4,04 \cdot 10^4$	23,8
B46	335,5	1,03	$4,04 \cdot 10^4$	23,9
C12	111,2	0,53	$1,36 \cdot 10^4$	7,2
C13	111,6	0,53	$1,36 \cdot 10^4$	7,3
C31	254,8	0,47	$3,10 \cdot 10^4$	17,7
C32	255,0	0,47	$3,10 \cdot 10^4$	17,7
C33	254,5	0,48	$3,10 \cdot 10^4$	17,7
C41	344,5	0,47	$4,20 \cdot 10^4$	24,2
C42	345,0	0,49	$4,20 \cdot 10^4$	24,3
C43	344,5	0,45	$4,20 \cdot 10^4$	24,2
C51	565,2	0,52	$6,88 \cdot 10^4$	40,3
C52	565,5	0,49	$6,88 \cdot 10^4$	40,3
C53	565,5	0,47	$6,88 \cdot 10^4$	40,3

3. KOROZJA PRÓBEK STALOWYCH W KOMORZE MGŁY SOLNEJ

Próbki stalowe były korodowane przez okres 384 godzin (16 dób) w komorze mgły solnej typu MS 600 [11] w Laboratorium Katedry Inżynierii Materiałów Budowlanych Wydziału Inżynierii Ładowej Politechniki Warszawskiej. Warunki badania w komorze przyjęto zgodnie z normą PN-ISO 7253:2000 [12]. Trzeba nadmienić, że najdłuższy czas korodowania w komorze tego typu wg przepisów normalizacyjnych

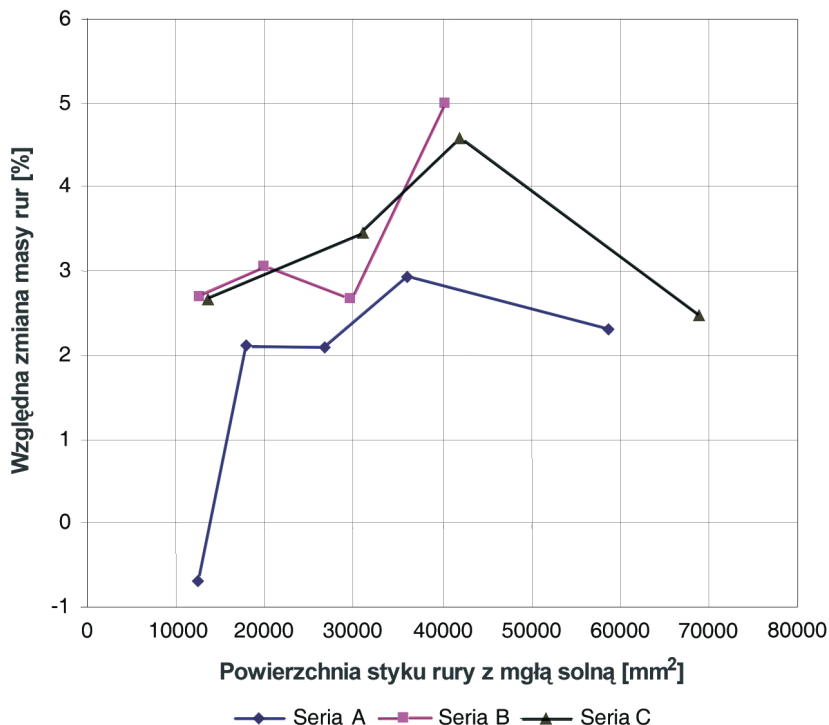
wynosi 720 godzin (30 dób). O przyjęciu krótszego czasu korodowania rur stalowych zdecydowały wyniki uzyskane w pracy [13], według których korodowane w laboratorium przez 720 godzin rury ze stali RST34, następnie poddane próbie osiowego rozciągania, w znaczącym stopniu utraciły odkształcalność i znacznie obniżyła się ich wytrzymałość na rozciąganie (zwykle w opracowaniach czas prób korozyjnych przyjmuje się od 360 do 720 godzin).

Środowisko mgły solnej zostało utworzone przez rozpuszczenie chlorku sodu w wodzie destylowanej do stężenia 50 g/l. Solanka była rozpylona w sposób ciągły przy pomocy dyszy. Roztwór gromadzący się na dnie komory był odprowadzany na zewnątrz komory. Temperatura we wnętrzu komory wynosiła $+35^{\circ}\text{C}$, a ciśnienie powietrza zasilającego rozpylacz 0,7 bara. Próbkę przymocowano za pomocą bawełnianego sznurka do rusztu odpornego na korozję (rys. 1).



Rys. 1. Próbkę we wnętrzu komory mgły solnej
Fig. 1. Samples inside the salt spray chamber

Po zakończeniu procesu korodowania próbki wysuszono, zważono i zmierzono. Na całej długości rur, zarówno na wewnętrznej jak i na zewnętrznej powierzchni, stwierdzono istnienie osadu solanki. Korozja rury tzw. „podosadowa” [14] zachodziła pod tym osadem. W dalszej części, do badań wybożenia, warstwy osadu nie usuwano z próbek. Na rysunku 2 przedstawiono uzyskane zależności względnego przyrostu masy próbek serii *A*, *B*, *C* od pola powierzchni próbek stykającego się z mgłą solną. Każdy punkt doświadczalny pochodzi z pomiarów na trzech próbkach. Wykresy mają początkowo charakter rosnący (serie *A*, *B*, *C*), a następnie malejący (serie *A* i *C*). Podobny kształt wykresów tej samej zależności otrzymano w pracy [15] dla rur stalowych w jednostronnym antykorozyjnym płaszczu ochronnym. Spośród wszystkich badanych próbek najmniejsza względna zmiana masy wystąpiła w przypadku rur serii *A* o najgrubszych ściankach, nie przekroczyła ona 3%. Natomiast względna zmiana masy w przypadku rur serii *B* i *C* zawarta była w przedziale $2,5\% \div 5\%$.



Rys. 2. Doświadczalna zależność: względny przyrost masy rury – pole powierzchni stali, na które działała mgła solna

Fig. 2. Experimental relation between the relative increase in mass of the pipe and the surface area of steel exposed to salt fog

4. BADANIA WYBOCZENIA SKORODOWANYCH PRĘTÓW

4.1. UWAGI OGÓLNE

Badania doświadczalne wybooczenia skorodowanych próbek przeprowadzono w maszynie wytrzymałościowej Instron 3382 [16] w Laboratorium Zakładu Wytrzymałości Materiałów Wydziału Inżynierii Lądowej PW. W badaniach przyjęto: prędkość przemieszczenia trawersu 5 mm/min i częstotliwość zbierania danych 5 punktów/s. Zastosowano sterowanie przemieszczeniem głowicy maszyny.

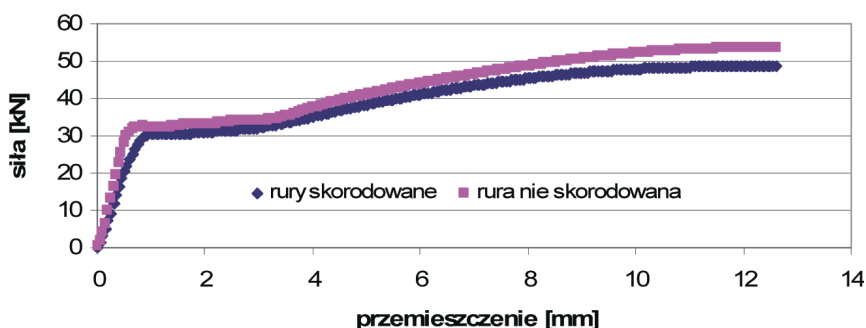
Oprócz prób stateczności skorodowanych prętów wykonano próby ściskania nieskorodowanych próbek referencyjnych, tj. próbek o wymiarach takich, jak pierwotne wymiary próbek skorodowanych. Przedstawiono kolejno wyniki badań próbek serii A, B, C.

Ściskane pręty cienkościennie ulegały wybooczeniu giętnemu lub giętnemu i jednocześnie lokalnemu lub tylko lokalnemu. Przy danych warunkach brzegowych prętów ściskanych z wybranego materiału zależy to od ich długości i od wymiarów przekroju

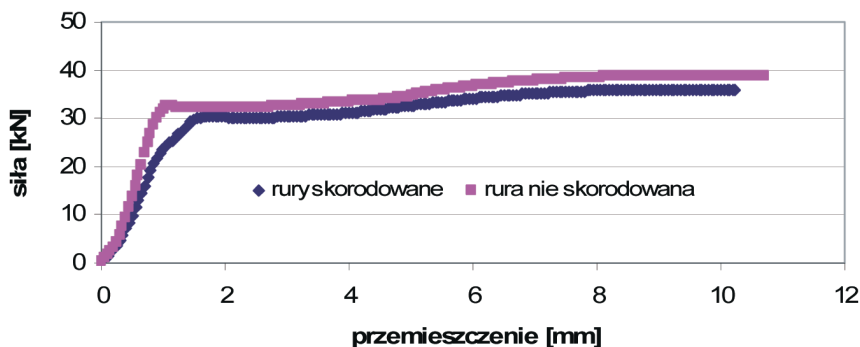
poprzecznego. Przykładowe badania doświadczalne wybozczenia niesprężystego prętów o przekrojach symetrycznych i smukłościach takich samych jak w niniejszej pracy można znaleźć w opracowaniu [17].

4.2. PRÓBY ŚCISKANIA RUR SERII A

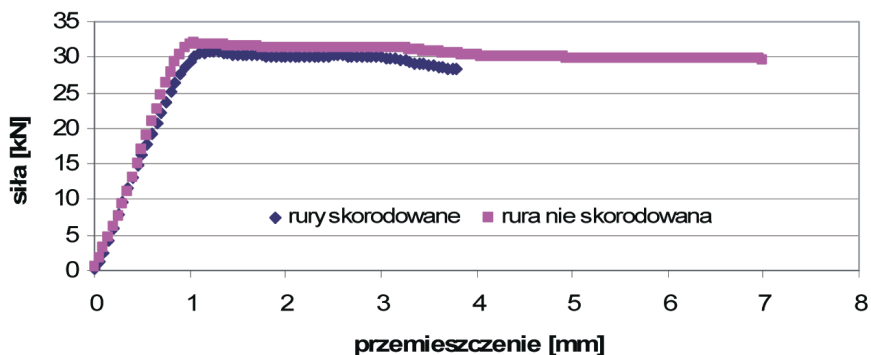
Seria A obejmowała rury o grubości ścianek $t = 2$ mm, średnicy zewnętrznej $d = 20$ mm i o smukłościach prętowych: 7,8; 11,5; 17,6; 24,1 i 39,8. Zarejestrowano ścieżki równowagi statycznej w ich pełnym zakresie, tj. w fazie dokrytycznej i pokrytycznej; zilustrowano je na wykresach przedstawionych na rysunkach 3 ÷ 7. Siła krytyczna oddziela zakres fazy pierwszej od fazy drugiej.



Rys. 3. Zależności: siła ściskająca – przemieszczenie próbek skorodowanych i próbkii nieskorodowanej o jednakowych smukłościach 7,8
Fig. 3. Relationship between the compressive load and the displacement for corroded and non-corroded specimens of the same slenderness 7.8

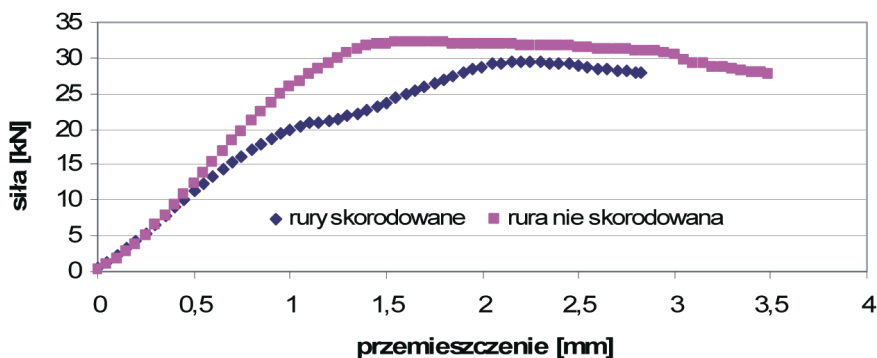


Rys. 4. Zależności: siła ściskająca – przemieszczenie próbek skorodowanych i próbkii nieskorodowanej o jednakowych smukłościach 11,5
Fig. 4. Relationship between the compressive load and the displacement for corroded and non-corroded specimens of the same slenderness 11.5



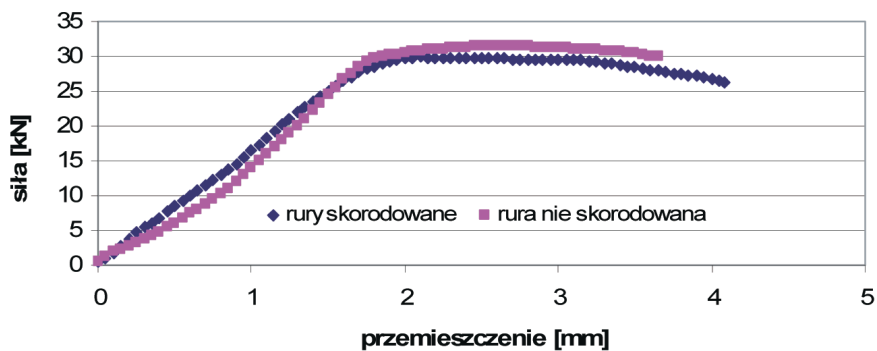
Rys. 5. Zależności: siła ściskająca – przemieszczenie próbek skorodowanych i próbki nieskorodowanej o jednakowych smukłościach 17,6

Fig. 5. Relationship between the compressive load and the displacement for corroded and non-corroded specimens of the same slenderness 17.6



Rys. 6. Zależności: siła ściskająca – przemieszczenie próbek skorodowanych i próbki nieskorodowanej o jednakowych smukłościach 21,4

Fig. 6. Relationship between the compressive load and the displacement for corroded and non-corroded specimens of the same slenderness 21.4



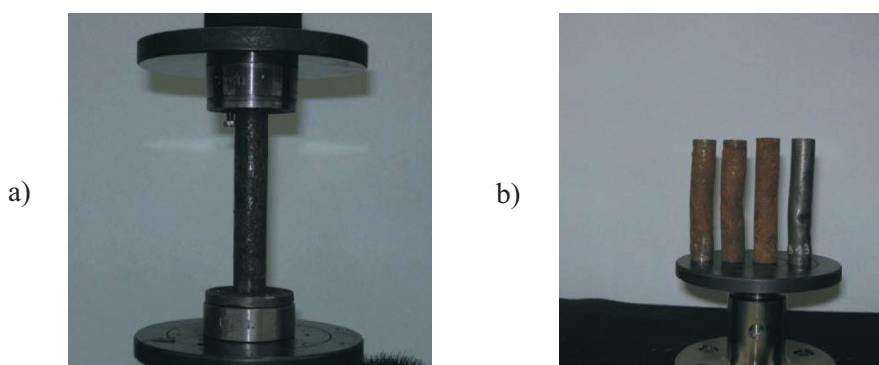
Rys. 7. Zależności: siła ściskająca – przemieszczenie próbek skorodowanych i próbki nieskorodowanej o jednakowych smukłościach 39,8

Fig. 7. Relationship between the compressive load and the displacement for corroded and non-corroded specimens of the same slenderness 39.8

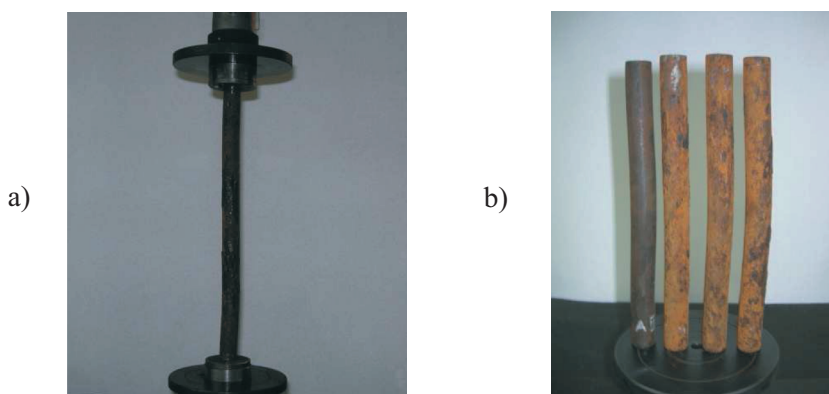
Z porównania przedstawionych na rysunkach 3 ÷ 7 ścieżek równowagi statycznej wynika, że:

- wartości sił krytycznych rur skorodowanych są niższe od wartości sił krytycznych rur nieskorodowanych o takich samych wymiarach,
- ścieżki równowagi statycznej grupy rur zilustrowanych na rysunkach 3 i 4 przedstawiają wzrost siły po osiągnięciu wartości krytycznej, natomiast ścieżki równowagi statycznej grupy rur zilustrowanych na rysunkach 5 ÷ 7 przedstawiają spadek siły po osiągnięciu wartości krytycznej.

Różne przebiegi wykresów w fazie pokrytycznej zawiązane są z innymi postaciami wybooczenia; w wybooczeniu najkrótszych rur dominuje lokalna utrata stateczności (rys. 8), a w wybooczeniu rur dłuższych dominuje wybooczenie giętne (rys. 9).



Rys. 8. Widok ściskanych prętów o smukłościach 7,8: a) próbka w uchwytach maszyny, b) kształty próbek skorodowanych i próbki nieskorodowanej po wybooczeniu
 Fig. 8. View of compressed bars with slenderness 7.8: a) specimen in handles of the machine, b) shape of corroded and non-corroded specimens after buckling



Rys. 9. Widok ściskanych prętów o smukłościach 39,8: a) próbka w uchwytach maszyny, b) kształty próbek skorodowanych i próbki nieskorodowanej po wybooczeniu
 Fig. 9. View of compressed bars with slenderness 39.8: a) specimen in handles of the machine, b) shape of corroded and non-corroded specimens after buckling

W tabelicy 2 zestawiono wartości siły krytycznej i wartości względnego spadku siły krytycznej na skutek korozji próbek. Względny spadek siły krytycznej określono według następującego wzoru:

$$\frac{\Delta P_{cr}}{P_{cr}^{nc}} \cdot 100\% = \frac{(P_{cr}^c - P_{cr}^{nc})}{P_{cr}^{nc}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

ΔP_{cr} – różnica siły krytycznej prętów korodowanych i nieskorodowanych,

P_{cr}^c – siła krytyczna prętów korodowanych,

P_{cr}^{nc} – siła krytyczna prętów nieskorodowanych.

Tablica 2. Zestawienie wartości sił krytycznych i ich względnych spadków na skutek korozji próbek serii A

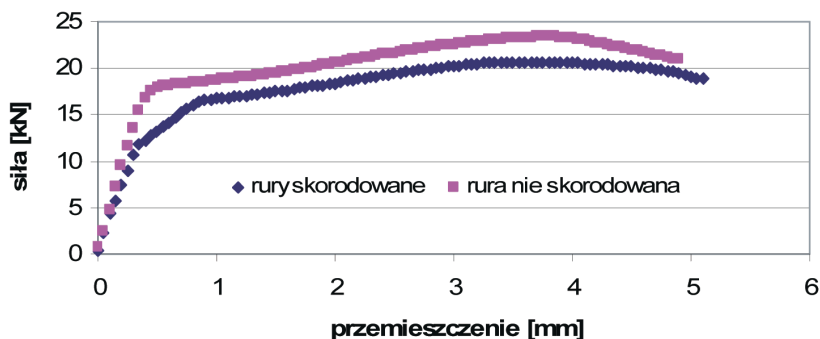
Table 2. Critical load and its relative reduction for corroded specimens of series A

Nazwa próbki w serii A	Smukłość λ	Korozja K lub jej brak BK	Siła krytyczna [kN]	Odchylenie standardowe siły krytycznej	Względny spadek siły krytycznej [%]
AI1	7,8	BK	53,8		
AI2, AI3, AI4	7,8	K	48,6; średnia	0,51	9,8
AII1	11,5	BK	38,9		
AII2, AII3, AII4	11,5	K	36,1; średnia	0,23	7,2
AIII1	17,6	BK	32		
AIII2, AIII3, AIII4	17,6	K	31; średnia	0,25	3,1
AIV1	24,1	BK	32,3		
AIV2, AIV3, AIV4	24,1	K	30,5; średnia	0,59	2,8
AV1	39,8	BK	31,5		
AV2, AV3, AV4	39,8	K	30,3; średnia	0,41	3,8

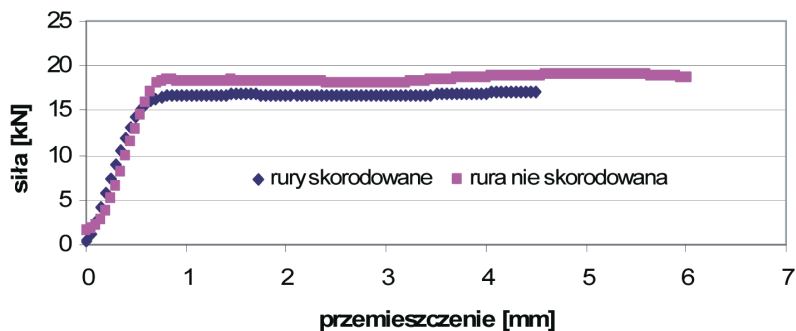
Z tabelicy 2 wynika, że największa wartość względnego spadku siły krytycznej nastąpiła w przypadku najkrótszych rur w serii. Obliczone odchylenie standardowe od wartości średniej siły krytycznej nie przekracza 2%.

4.3. PRÓBY ŚCISKANIA RUR SERII B

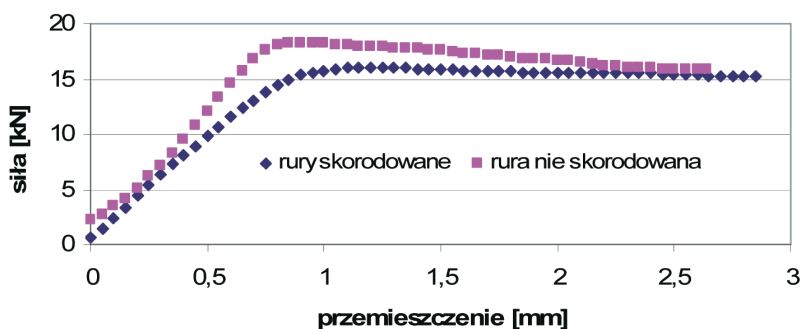
Seria B obejmowała rury o grubości ścianek $t = 1$ mm, średnicy zewnętrznej $d = 20$ mm i o smukłościach prętowych: 7,4; 11,3; 17,3 i 23,8. Ścieżki równowagi statycznej zilustrowano przykładowo na rysunkach 10 ÷ 12.



Rys. 10. Zależności: siła ściskająca – przemieszczenie próbek skorodowanych i próbki nieskorodowanej o jednakowych smukłościach 7,4
 Fig. 10. Relationship between the compressive load and the displacement for corroded and non-corroded specimens of the same slenderness 7.4



Rys. 11. Zależności: siła ściskająca – przemieszczenie próbek skorodowanych i próbki nieskorodowanej o jednakowych smukłościach 11,3
 Fig. 11. Relationship between the compressive load and the displacement for corroded and non-corroded specimens of the same slenderness 11.3



Rys. 12. Zależności: siła ściskająca – przemieszczenie próbek skorodowanych i próbki nieskorodowanej o jednakowych smukłościach 17,3
 Fig. 12. Relationship between the compressive load and the displacement for corroded and non-corroded specimens of the same slenderness 17.3

Z porównania przebiegu tych krzywych wynika, że:

- wartości sił krytycznych rur skorodowanych są niższe od wartości sił krytycznych rur nieskorodowanych o takich samych wymiarach; zostały one zestawione w tabelicy 3,
- ścieżki równowagi statycznej grupy rur, zilustrowanych na rysunkach 10 i 11, przedstawiają rosnącą siłę po osiągnięciu wartości krytycznej, a ścieżki równowagi statycznej z rysunku 12 przedstawiają malejącą siłę po osiągnięciu wartości krytycznej; oznacza to zmianę postaci wyboczenia drugiej grupy rur w odniesieniu do grupy pierwszej.

Z tabelicy 3 wynika, że najmniejsza wartość względnego spadku siły krytycznej nastąpiła w przypadku najkrótszych rur serii. Obliczone w tej tabelicy wartości odchylenia standardowego zawarte są w przedziale 1,5% ÷ 6,8%.

Tablica 3. Zestawienie wartości sił krytycznych i ich względnych spadków na skutek korozji próbek serii B

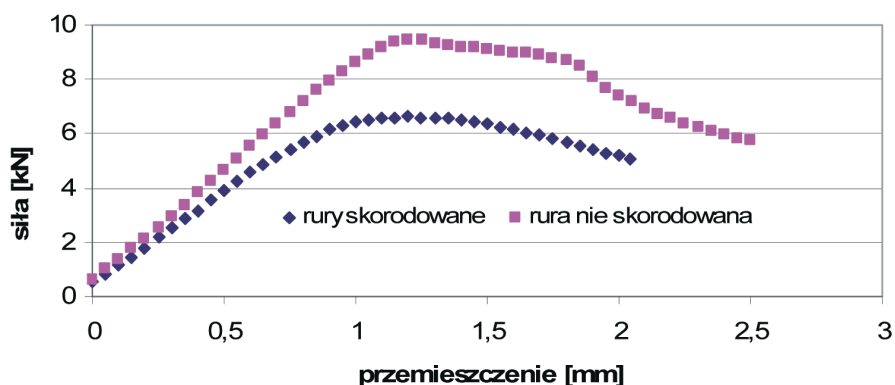
Table 3. Critical load and its relative reduction for corroded specimens of series B

Nazwa próbki w serii B	Smukłość λ	Korozja K lub jej brak BK	Siła krytyczna [kN]	Odchylenie standardowe siły krytycznej	Względny spadek siły krytycznej [%]
B13	7,4	BK	23,4		
B14, B15, B16	7,4	K	21,7; średnia	1,47	7,2
B21	11,3	BK	19,1		
B24, B25, B26	11,3	K	17,2; średnia	0,6	9,6
B31	17,3	BK	18,3		
B34, B35, B36	17,3	K	16,2; średnia	0,25	11,5
B41	23,8	BK	17		
B44, B45, B46	23,8	K	15,4; średnia	0,4	9,4

4.4. PRÓBY ŚCISKANIA RUR SERII C

Seria C obejmowała rury o grubości ścianek $t = 0,5$ mm, średnicy zewnętrznej $d = 20$ mm i o smukłościach prętowych: 7,2; 17,7; 24,2 i 40,3. Przykładową ścieżkę równowagi statycznej w jej pełnym zakresie zilustrowano na wykresie (rys. 13) dla $\lambda = 40,3$. W tej serii ścieżki równowagi statycznej przedstawiają tylko malejącą siłę w fazie pokrytycznej.

Z porównania wynika, że wartości sił krytycznych rur skorodowanych są niższe od wartości sił krytycznych rur nieskorodowanych i różnice między nimi są większe od różnic otrzymanych w przypadku rur serii A i B; zestawiono je w tabelicy 4.



Rys. 13. Zależności: siła ściskająca – przemieszczenie próbek skorodowanych i próbek nieskorodowanej o jednakowych smukłościach 40,3

Fig. 13. Relationship between the compressive load and the displacement for corroded and non-corroded specimens of the same slenderness 40.3

Tablica 4. Zestawienie wartości sił krytycznych i ich względnych spadków na skutek korozji próbek serii C
Table 4. Critical load and its relative reduction for corroded specimens of series C

Nazwa próbki w serii C	Smukłość λ	Korozja K lub jej brak BK	Siła krytyczna [kN]	Odchylenie standardowe siły krytycznej	Względny spadek siły krytycznej [%]
C14	7,2	BK	10,0		
C11, C12, C13	7,2	K	8,6; średnia	0,1	14
C34	17,7	BK	9,6		
C32, C33, C34	17,7	K	7,1; średnia	0,99	26
C44	24,2	BK	9,3		
C41, C42, C43	24,2	K	7,3; średnia	0,4	22
C54	40,3	BK	9,5		
C51, C52, C53	40,3	K	6,8; średnia	0,2	28,4

Z tablicy 4 wynika, że względny spadek siły krytycznej jest znaczny, bo wynosi od 14% do 28,4%. Najmniejsza wartość względnego spadku siły krytycznej nastąpiła w wypadku najkrótszych rur. Obliczone w tej tablicy wartości odchylenia standardowego mieszczą się w zakresie 1,2% ÷ 13,9%.

5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ RUR SKORODOWANYCH

Poniżej przedstawiono analizę wyników badań korozyjnych i mechanicznych. Jej celem było określenie wpływu wymiarów geometrycznych próbek na zmianę ich masy w wyniku korozji i na zmianę wartości siły krytycznej.

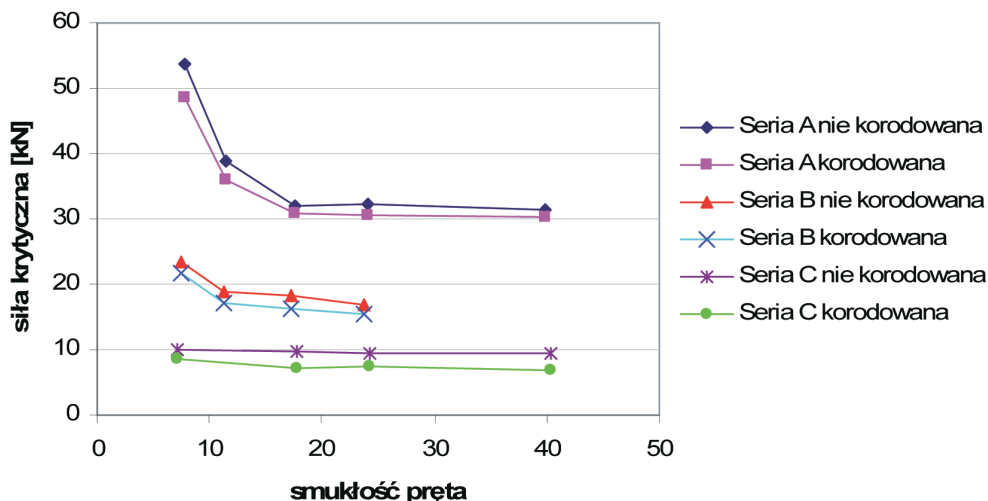
Dwie niezależnymi zmiennymi, które zostały wzięte pod uwagę były:

- grubość ścianki rury,
- pole powierzchni styku rury z ośrodkiem agresywnym.

Pole powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej rur jest wprost proporcjonalne do ich długości, a więc jednocześnie do długości wyboczeniowej oraz smukłości prętowej, co uzasadnia wyżej przyjęte powiązanie wielkości. Na rysunku 14 zilustrowano zależności siły krytycznej od smukłości wszystkich ściskanych prętów, tj. skorodowanych i nie korodowanych. Wszystkie krzywe na tym rysunku wyznaczone w przypadku prętów skorodowanych leżą poniżej odpowiednich krzywych wyznaczonych w badaniach prętów nie poddanych korozji, a więc w każdym przypadku siła krytyczna prętów skorodowanych była mniejsza.

Względny spadek siły krytycznej w badanych seriach rur (tabl. 2 ÷ 4) wynosi:

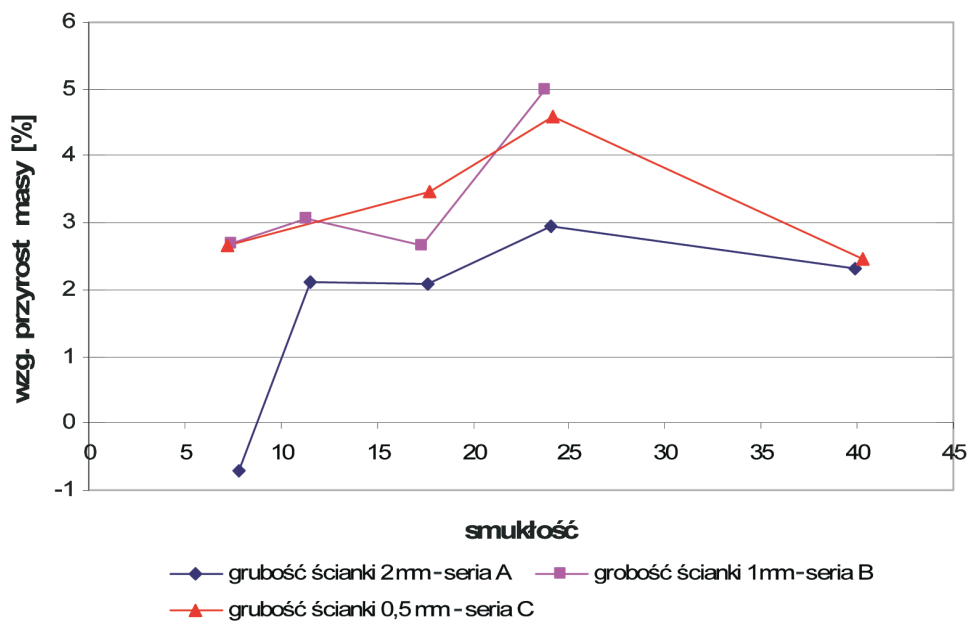
- seria A: w granicach 2,8% ÷ 9,6%,
- seria B: w granicach 7,2% ÷ 11,5%,
- seria C: w granicach 14% ÷ 28,4%.



Rys. 14. Zależności: siła krytyczna – smukłość prętowa dla trzech serii prętów

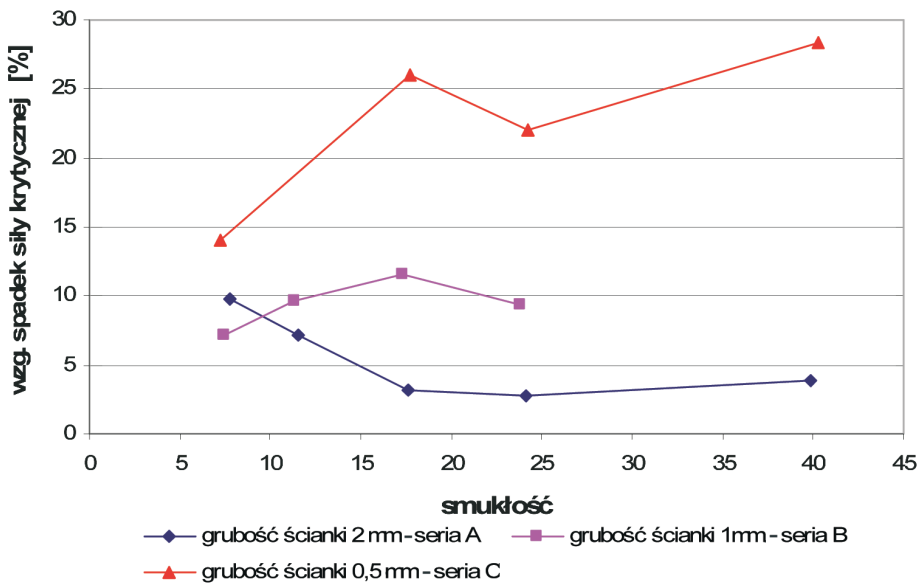
Fig. 14. Relationship between the critical load and the bar slenderness for three series of bars

Na rysunku 15 zilustrowano zależność względnego przyrostu masy korodowanych próbek od ich smukłości prętowej, a na rysunku 16 zależność względnego spadku siły krytycznej od smukłości prętowej. Przedstawione zależności są nieliniowe i mają różny przebieg, co oznacza, że nie mogą być jednakowo opisane. Zależność: smukłość prętowa – względny przyrost masy – względny spadek siły krytycznej byłaby złożona. Nie można po prostu określić, że badane zmiany rosną wraz ze wzrostem pola styku próbek z ośrodkiem agresywnym. Decydującym wymiarem geometrycznym okazuje się tu być grubość ścianki rury. W wypadku rur serii *A*, o najgrubszych ściankach, zarówno względny przyrost masy jak i względny spadek siły krytycznej okazał się najmniejszy. Natomiast najbardziej niebezpieczna okazała się korozja rur serii *C* o najcieńszych ściankach; właśnie ona spowodowała duże spadki wartości siły krytycznej. Wyniki badania rur serii *B* znalazły się pośrodku wyników między wymienionymi wyżej seriami.



Rys. 15. Zależności: smukłość prętowa – względny przyrost masy próbek skorodowanych
 Fig. 15. Relationship between the bar slenderness and the relative increase in mass of the corroded specimens

Uzyskane wyniki tylko jakościowo odpowiadają rzeczywistości konstrukcyjnej. ilościowe przybliżone przenoszenie wyników tych badań na pręty kratownicy o wymiarach rzeczywistych korodujących w atmosferze mgły solnej, byłoby możliwe po opracowaniu odpowiedniej formuły empirycznej [9] zawierającej dane związane z długim czasem badań. Ponadto korozja może wpływać na sam materiał konstrukcji metalowych i go zmieniać [18].



Rys. 16. Zależności: smukłość prętowa – względny spadek siły krytycznej próbek skorodowanych

Fig. 16. Relationship between the bar slenderness and the relative reduction of the critical force of corroded specimens

6. WNIOSKI

Z przeprowadzonych badań korozyjnych wykonanych w komorze mgły solnej przez okres 16 dób na rurach ze stali S235JR o różnych długościach, takiej samej średnicy zewnętrznej równej 20 mm i o trzech różnych grubościach ścianek wynika, że najmniejsza względna zmiana masy nastąpiła w przypadku korodowania rur o najgrubszych ściankach (tj. 2 mm) i nie przekroczyła 3%.

Z przeprowadzonych badań ściskania w maszynie wytrzymałościowej skorodowanych trzech serii próbek rurowych i nieskorodowanych próbek referencyjnych wynika, że w każdym przypadku nastąpił spadek siły krytycznej, który w zależności od grubości ścianki rury wynosił:

- seria A, o grubości ścianki 2 mm – od 2,8% do 9,6%,
- seria B, o grubości ścianki 1 mm – od 7,2% do 11,5%,
- seria C, o grubości ścianki 0,5 mm – od 14% do 28,4%.

Najmniejszy spadek nośności granicznej przy ściskaniu stwierdzono w przypadku rur o najgrubszych ściankach.

Otrzymane zależności: względny przyrost masy – smukłość i względny spadek siły krytycznej – smukłość są nieliniowe. Nie stwierdzono, że względny spadek siły krytycznej zwiększa się wraz ze wzrostem pola powierzchni styku próbek z ośrodkiem agresywnym.

Stwierdzono, że parametrem decydującym o najmniejszym wpływie skutków korozji i o najmniejszym spadku siły krytycznej była grubość rur. Rury skorodowane o najgrubszych ściankach w najmniejszym stopniu utraciły nośność graniczną na ściskanie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Bala K.*: Korozja materiałów – teoria i praktyka. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Seria: Inżynieria Materiałowa nr 5, Częstochowa 2002
- [2] *Królikowska A.*: Zalecenia do wykonywania i odbioru antykorozyjnych zabezpieczeń konstrukcji stalowych drogowych obiektów mostowych. IBDiM, Warszawa 2006
- [3] *Adhithya Plato Sidharth A.*: Effect of pitting corrosion on ultimate strength and buckling strength of plates – a review. Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 4, 4, 2009, 783 - 788.
- [4] *Sadovsky Z., Drdacky M.*: Buckling of plate strip subjected to localized corrosion – a stochastic model. Thin-Walled Structures, 39, 2001, 247 - 259
- [5] *Duo Ok, Yongchang Pu, Atilla Incecik*: Computation of ultimate strength of locally corroded unstiffened plates under uniaxial compression. Marine Structures, 20, 2007, 110 - 114
- [6] *Katsumasa Miyazaki, Satoshi Kanno, Masayuki Ishiwata, Kunio Hasegawa, Soek Hwan Ahn, Kotoji Ando*: Fracture behavior of carbon steel pipe with local wall thinning subjected to bending load. Nuclear Engineering and Design, 191, 1999, 195 - 204
- [7] *Jianghong Xue, Michelle S. Hoo Fatt*: Symmetric and anti-symmetric buckle propagation modes in subsea corroded pipelines. Marine Structures, 18, 2005, 43 - 61
- [8] *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
- [9] *Townsend H.E (editor)*: Outdoor Atmospheric Corrosion. ASTM Special Technical Publication, 1421, USA 2002
- [10] PN-76/H-04624 Badania laboratoryjne przyspieszone w kwaśnej mgle solnej
- [11] Instrukcja obsługi komory mgły solnej MS 600, www.mawro.wroclaw.pl, Warszawa 1986
- [12] PN-ISO 7253:2000 Farby i lakiery. Oznaczanie odporności na rozpyloną obojętną solankę (mgłę)
- [13] *Glinicka A., Wasilewska K.*: Badanie efektów korozji rur stalowych małych średnic w osiowym rozciąganiu. XXIV Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Wrocław 2010
- [14] *Gurrappa I., Malakondaiah G.*: Corrosion characteristics of DMR-1700 steel and comparison with different steels in marine environment. Materials Science and Engineering, A 391, 2005, 235 - 242

- [15] *Glinicka A., Wasilewska K.*: Wybrane efekty korozji rur stalowych w płaszczu ochronnym. *Logistyka* nr 6/2009
- [16] Instron, Series IX Software: Reference Manual - Software, M12 - 13984 - EN, Instron Corporation 2002
- [17] *Glinicka A.*: Doświadczalna analiza wyboczenia niesprężystego kształtowników o przekrojach rurowych czworobocznych. *Drogi i Mosty* 2/2005, 5 - 37
- [18] *Glinicka A., Kruk M.*: Ocena wpływu małego stopnia korozji próbek na właściwości mechaniczne stali niskostopowej. *Przegląd Mechaniczny* 6/2010, 42 - 44

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF INELASTIC BUCKLING OF STEEL COLUMNS SUBJECTED TO CORROSION IN THE SALT SPRAY CHAMBER

Abstract

Experimental investigation of inelastic buckling of previously corroded steel bars is described. The process of the corrosion was conducted in the salt spray chamber during 16 days. Buckling tests on slender bars were conducted in testing machine Instron 3382. Reduction of critical force of the corroded bars in comparison to critical force for non-corroded bars ranged from 2.8% to 28.4% and was found to increase for decreasing wall thickness of specimens. Results of critical load tests are presented for corroded and non-corroded specimens.