

WASILEWSKA Katarzyna¹
GLINICKA Aniela²

Próba ściskania rur ze stali nierdzewnej poddanych działaniu środowisk agresywnych

stal nierdzewna,
korozja,
próby ściskania

Streszczenie

W pracy opisano badania cech mechanicznych krótkich rur ze stali nierdzewnej, które określono na podstawie próby ściskania. Rury te były poddane wcześniej działaniu środowisk agresywnych. Środowiska były następujące: kwas siarkowy 5%, kwas siarkowy 20%, kwas azotowy 20%. Próby ściskania wykonano w maszynie wytrzymałościowej Instron 3382. Następnie przeanalizowano wyniki pomiarów i je zinterpretowano.

THE COMPRESSIVE TEST OF PIPES STAINLESS-STEEL SUBJECTS TO THE OPERATION OF AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

Abstract

In the work one described investigations of features of mechanical short pipes stainless-steel which one determined on the basis compressive tests. These pipes were subjected earlier to the operation of aggressive environments. Environments were following: the vitriolic acid 5%, the vitriolic acid 20%, the nitric acid 20%. Compressive tests were performed in the testing machine Instron 3382. Then one analysed results of measurement and was interpreted it.

1. WSTĘP

Elementy konstrukcji inżynierskich i konstrukcje wykonane ze stali trudno rdzewiejących mają podwyższoną odporność na korozję atmosferyczną, a elementy konstrukcji wykonane ze stali nierdzewnej są odporne na korozję atmosferyczną [1, 2]. Wg monografii [1] stale trudnordzewiejące uzyskuje się przez dodanie takich pierwiastków stopowych jak chrom (Cr), nikiel (Ni), miedź (Cu), fosfor (P), molibden (Mo). Dodanie tych składników powoduje powstanie na powierzchni stali szczelnej warstwy tlenków, co zabezpiecza przed korodowaniem. Granica plastyczności stali trudnordzewiejących według normy PN-EN 10025-5 mieści się w przedziale 235 MPa – 355 MPa. Wg monografii [1] stale nierdzewne zawierają co najmniej 10,5 % chromu jako pierwiastka stopowego. Większość stali zawiera 18% chromu i 10% niklu, a do niektórych dodaje się molibden. Z powodu obecności dodatków stopowych tworzy się na powierzchni stali cienka, przezroczysta, pasywna warstwa tlenków, która zabezpiecza stal przed korozją. W wypadku uszkodzeń stali (np. nacięcia) warstwa ta sama się regeneruje w zetknięciu z powietrzem. Stal ta jest również odporna na większość agresywnych środowisk chemicznych. Pod względem mikrostruktury wyróżnia się stale nierdzewne: ferrytyczne, austenityczne, austenityczno-ferrytyczne. Granica plastyczności stali nierdzewnych według normy PN-EN 1993-1-4 mieści się w przedziale 280 MPa – 480 MPa (w najcieńszych wyrobach). Stale nierdzewne charakteryzuje nieliniowa zależność $\sigma - \epsilon$, naprężenie - odkształcenie, oraz brak wyraźnej granicy plastyczności.

Na konstrukcje stale dobiera się biorąc pod uwagę ich cechy mechaniczne i jeśli potrzeba, skład chemiczny.

Jeśli w eksploatacji konstrukcji wystąpią warunki wyjątkowe, np. działanie kwasów, to stal trudnordzewiejąca w atmosferze może skorodować.

W niniejszej pracy do rozważań przyjęto krótkie rury ze stali nierdzewnej chromowo – niklowo – molibdenowej 0H17N12M2. Poddano je działaniu w czasie trzech środowisk agresywnych, którymi były roztwory wodne kwasów: kwas siarkowy o początkowym stężeniu 5%, kwas siarkowy 20%, kwas azotowy 20%. Próbkę, które poddano działaniu kwasu siarkowego 5% umieszczono pod wyciągiem gdzie na skutek działania wentylacji komory nastąpiło częściowe odparowanie wody destylowanej (wodę okresowo uzupełniano). W rezultacie dla tego środowiska panowały zmienne warunki (różne stężenie kwasu w czasie trwania badań). Dla tak przysposobionych próbek następnie przeprowadzono badania cech mechanicznych. Próby ściskania wykonano w maszynie wytrzymałościowej Instron 3382. Następnie przeanalizowano wyniki pomiarów i je zinterpretowano.

2. PRÓBA ŚCISKANIA KRÓTKICH RUR UPRZEDNIO KORODOWANYCH

Do badań przygotowano serie rur o średnicach nominalnych: DN15, DN18, DN22, DN28, DN35. Były to rury bardzo krótkie tj., takie gdzie stosunek długości do średnicy DN wynosi 1,5. Proporcję 1,5 przyjęto tak jak dla próbek o przekroju kołowym pełnym przeznaczonych do ściskania [3]. Ponieważ w próbie ściskania osiowego rur w maszynie

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, Warszawa 00-637, Al. Armii Ludowej 16. E-mail: wasilewska.katarzyna.1@gmail.com

² Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Łądowej, Warszawa 00-637, Al. Armii Ludowej 16. Tel.: + 48 22 234 65 14. E-mail: a.glinicka@il.pw.edu.pl oraz Szkoła Wyższa im. Bogdana Jańskiego w Warszawie Wydz. Zarządzania.

wytrzymałościowej, nastąpi utrata ich stateczności określono wielkości opisujące wyboczenie z następujących wzorów [4]:

$$\lambda = \frac{L}{i} = 0,5l/i \quad (1)$$

gdzie: λ – smukłość prętowa,

L – długość wyboczeniowa pręta,

i – promień bezwładności,

l – długość pręta,

0,5 – wartość współczynnika wyboczeniowego pręta przy jego obustronnym utwierdzeniu na obu końcach.

Pole przekroju poprzecznego A , moment bezwładności J_y oraz promień bezwładności i rur obliczono ze znanych wzorów:

$$A = \pi(R^2 - r^2), J_y = \frac{\pi}{4}(R^4 - r^4),$$

$$i = \sqrt{J_y/A}$$

W tab. 1 zamieszczono wymiary próbek i obliczone ich smukłości.

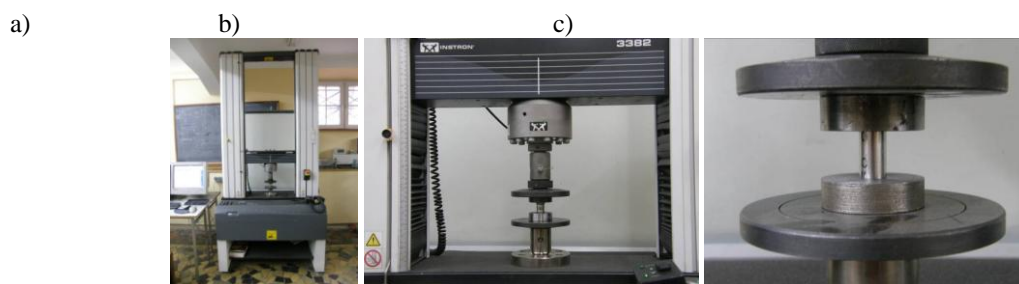
Tab. 1 Zestawienie wymiarów rur i ich smukłości

Nazwa rury	Długość rury [mm]	Ilość próbek	Średnica zewnętrzna rury [mm]	Grubość ścianki rury [mm]	Pole przekroju poprzecznego rury [mm ²]	Promień bezwładności [mm]	Smukłość
DN15	25	9	15	1,2	52	4,90	2,55
DN18	30	9	18	1,2	63,3	5,95	2,52
DN22	35	9	22	1,5	96,6	7,27	2,41
DN28	42	9	28	1,5	124,8	9,38	2,24
DN35	53	9	35	1,5	157,8	11,85	2,24

Jak widać w zestawieniach tablicy 1 wartości smukłości prętowej wszystkich próbek są bardzo małe; ok. 2,5. Tak krótkie rury wybaczą się nie jak pręty, a jak powłoki, tzn. ulegają wyboczeniu lokalnemu.

Przygotowane krótkie rury przed próbą ściskania były poddane działaniu środowiska agresywnego, tj.: kwasu siarkowego 5%, kwasu siarkowego 20%, kwasu azotowego 20%.

Środowisko kwaśne zostało utworzone poprzez zmieszanie w kuwetach w odpowiednim stężeniu kwasu z wodą destylowaną według normy [5]. Proces korozji był prowadzony w temperaturze otoczenia przez okres 720 godzin (30 dób). Próby ściskania zostały wykonane w maszynie wytrzymałościowej Instron 3382. Założono, że prędkość przemieszczenia przy ściskaniu próbek będzie stała i równa 5,0 mm/min. Pomiary opracowano wykorzystując program BlueHill, sterujący maszyną. Na rys. 1 pokazano widok próby ściskania w w/w maszynie.



Rys. 1. Widok próby ściskania w maszynie Instron 3382: a) widok ogólny, szczegół – sposób mocowania próbek, c) szczegół – specjalny talerzyk do mocowania próbek

Razem przeprowadzono badania 51 próbek; tj. tych po korozji i ich niekorodowanych świadków. Na rys. 2 zamieszczono przykładowe zdjęcia próbki nieskorodowanej podczas próby ściskania. Uległa ona zniszczeniu na skutek wyboczenia lokalnego, tzn. pojawiły się kołnierze w sąsiedztwie górnego i dolnego utwierdzenia próbki, które powiększały się przy narastającej sile.



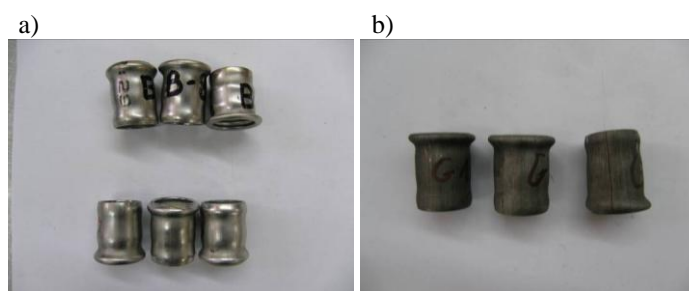
Rys.2. Widoki nieskorodowanej próbki podczas ściskania.

Na rys. 3 zamieszczono przykładowe zdjęcie próbki skorodowanej w 20% kwasie siarkowym podczas próby ściskania. Korozja jest tu równomierna.



Rys. 3. Widok skorodowanej próbki w 20% kwasie siarkowym podczas próby ściskania.

Typ zniszczenia próbek był taki sam. Na rys. 4 zamieszczono próbki nieskorodowane oraz próbki po procesie korozji wyjęte z maszyny wytrzymałościowej po zakończonej próbie ściskania.



Rys.4. Próbkę ściskane w maszynie wytrzymałościowej: a) próbki nieskorodowane i skorodowane w 5% kwasie siarkowym, b) próbki skorodowane w 20% kwasie siarkowym.

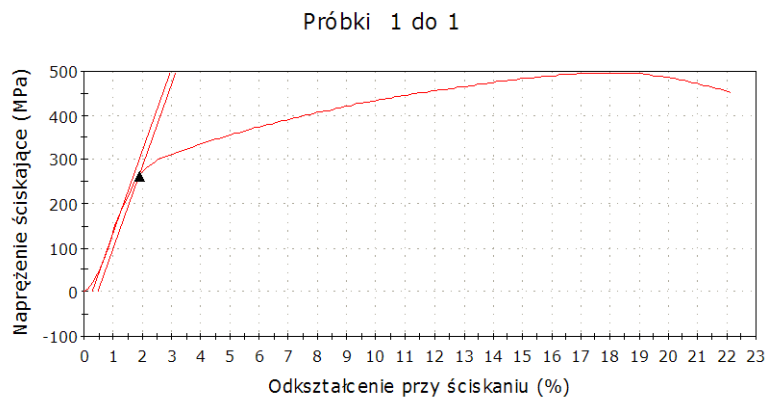
W dalszym ciągu przedstawiono wykresy naprężenie – odkształcenie, $\sigma - \epsilon$, uzyskane z pomiarów ściskania rur w maszynie Instron. Klasyczny sposób rejestrowania wyników takich pomiarów to wykresy siła – przemieszczenie pionowe (skrócenie próbki), $P - \Delta l$, na podstawie których określa się wartości siły krytycznej powodującej wyboczenie rury. Oprogramowanie BlueHill umożliwia przeskalowanie wykresów siła – przemieszczenie na wykresy naprężenie – odkształcenie. Przy czym naprężenie zostało obliczone jako $\sigma = P/A$, a odkształcenie, jako odkształcenie średnie całej bazy pomiarowej, czyli $\epsilon = \Delta l/l$. Przeskalowanie takie zapewnia zachowanie takiego samego kształtu wykresu, a jednocześnie umożliwia łatwiejszą ocenę naprężenia krytycznego. Wszystkie zależności $\sigma - \epsilon$ zarejestrowano w pełnym ich zakresie, tj. w fazie dokrytycznej i w fazie pokrytycznej. Obydwie fazy oddziela od siebie siła krytyczna, której wartość określa się, jako granicę przejścia fazy liniowej wykresu w fazę nieliniową [6]. Ponieważ przy ściskaniu krótkich rur skorodowanych, nie idealnych, obserwuje się nieliniowość na wykresie $P - \Delta l$ już przed przejściem w drugą fazę [6], to przydatne będzie przyjęcie umownej wielkości granicznego przejścia jednej fazy w drugą. Jako tę wielkość przyjęto naprężenie krytyczne odpowiadające umownej granicy plastyczności.

$$R_k = R_{02} \quad (2)$$

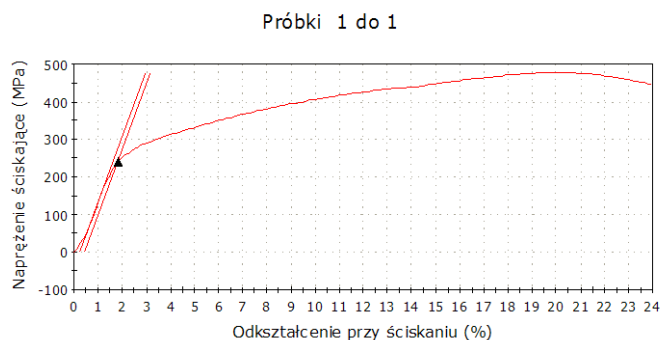
gdzie: R_k – naprężenie krytyczne,

R_{02} – naprężenie odpowiadające umownej granicy plastyczności.

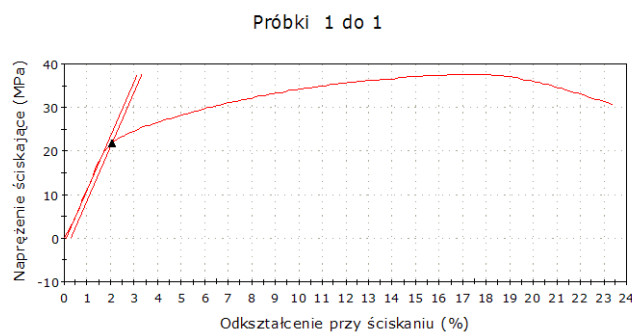
Na kolejnych rysunkach, rys. 5 – rys. 8, pokazano wybrane wykresy $\sigma - \epsilon$. Wartość naprężenia krytycznego jest określona jako rzędna wykresu wynikająca z przecięcia krzywej ściskania z linią równoległą do pierwszego prostoliniowego odcinka, któremu odpowiadają odkształcenia plastyczne równe 0,2% (strzałka na rysunkach). Należy tutaj nadmienić, że przed przystąpieniem do badań wytrzymałościowych próbki zostały zważone i zmierzone w celu oceny ubytku masy i wymiarów geometrycznych.



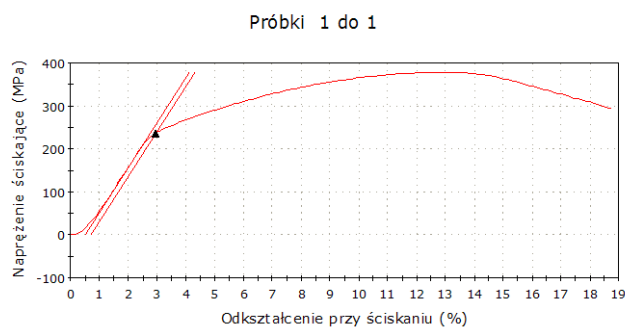
Rys. 5. Zależność naprężenie – odkształcenie przy ściskaniu z badania próbki DN15 niekorodowanej



Rys. 6. Zależność naprężenie – odkształcenie przy ściskaniu z badania próbki DN15 korodowanej w 5% kwasie siarkowym przez 720h



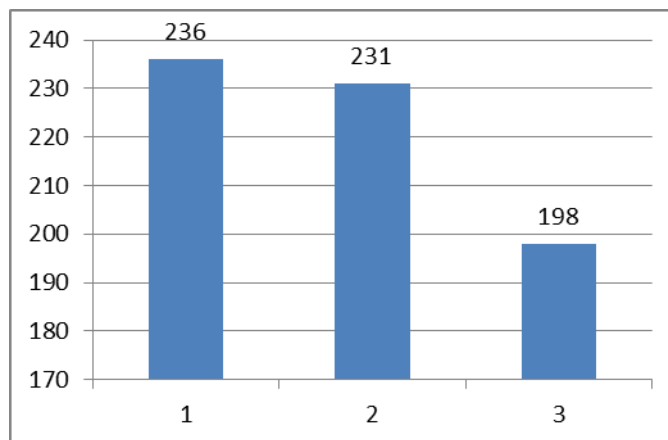
Rys. 7. Zależność naprężenie – odkształcenie przy ściskaniu z badania próbki DN15 korodowanej w 20% kwasie siarkowym przez 720h



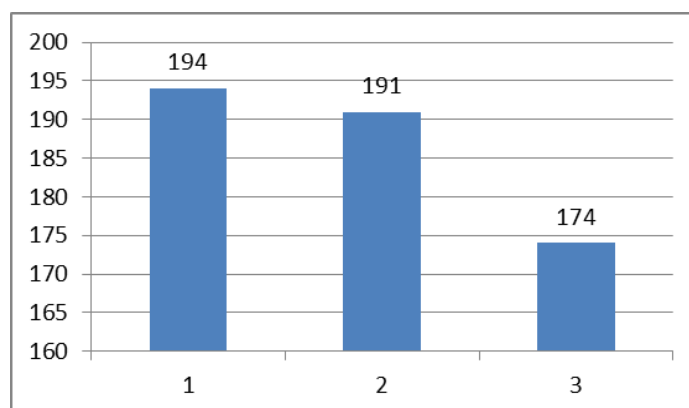
Rys. 8. Zależność naprężenie – odkształcenie przy ściskaniu z badania próbki DN18 korodowanej w 20% kwasie azotowym przez 1228h

Ścieżki równowagi statycznej pokazane na rys. 5 – 8 mają dwie fazy, przy czym faza pokrytyczna jest krzywą rosnącą, co jest charakterystyczne przy ściskaniu krótkich próbek [6, 7].

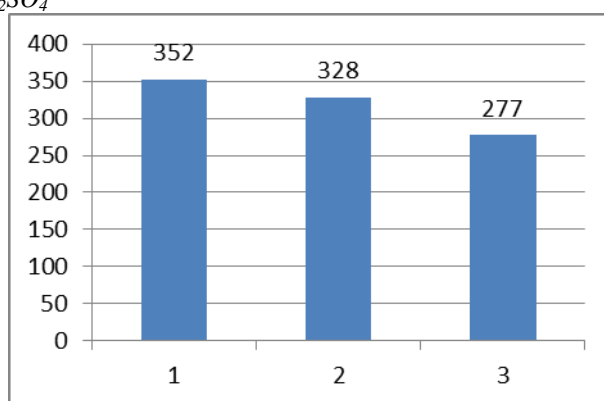
Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów, porównano średnie wartości naprężenia krytycznego ($R_k = R_{02}$) próbek niekorodowanych i korodowanych. W efekcie pomiarów masy po procesie korozji stwierdzono, że w wypadku próbek korodowanych w kwasie azotowym jej ubytek nie nastąpił, czyli w tym środowisku stal nierdzewna nie koroduje. Wobec tego, w dalszym ciągu zostaną pokazane wyniki określające obniżenie naprężenia krytycznego próbek ściskanych po procesie korozji w roztworach kwasu siarkowego trwającym 720h, rys. 9 – rys. 13.



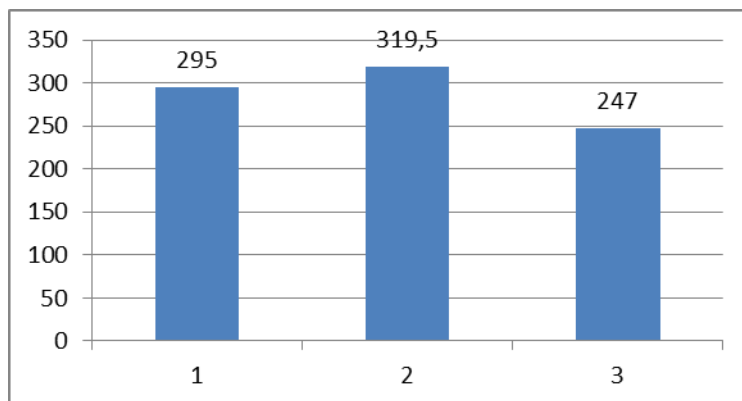
Rys. 9. DN15, naprężenie krytyczne [MPa]: 1 - próbek niekorodowanych, 2 – próbek korodowanych w 5% H₂SO₄, 3 – próbek korodowanych w 20% H₂SO₄



Rys.10. DN18, naprężenie krytyczne [MPa]: 1 - próbek niekorodowanych, 2 – próbek korodowanych w 5% H₂SO₄, 3 – próbek korodowanych w 20% H₂SO₄

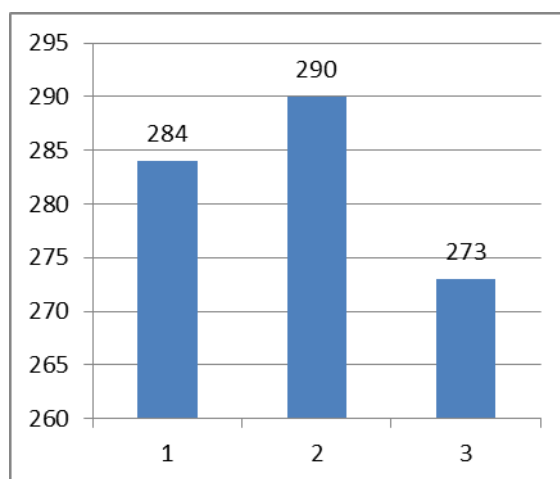


Rys.11. DN22, naprężenie krytyczne [MPa]: 1 - próbek niekorodowanych, 2 – próbek korodowanych w 5% H₂SO₄, 3 – próbek korodowanych w 20% H₂SO₄

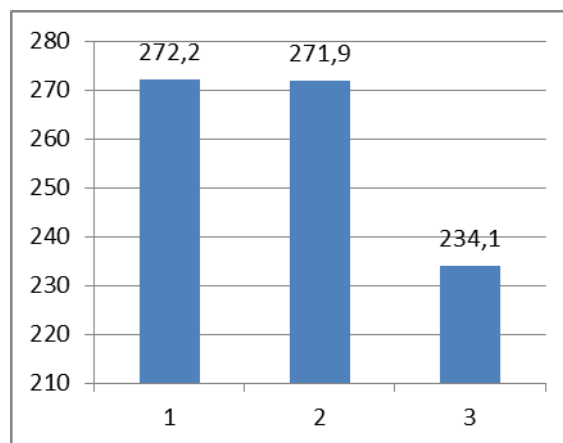


Rys.12. DN28, napężenie krytyczne [MPa]: 1 - próbek niekorodowanych, 2 – próbek korodowanych w 5% H₂SO₄, 3 – próbek korodowanych w 20% H₂SO₄

Wykresy pokazane na rys. 9, rys. 10 i rys. 11 (rury DN15, DN18, DN22) wskazują na spadek napężenia krytycznego skorodowanych próbek ściskanych w zależności od zwiększającego się stopnia stężenia kwasu siarkowego. Ilościowo spadek ten jest różny dla różnych średnic rur. Natomiast wykresy pokazane na rys. 12 i rys. 13 wskazują spadek napężenia krytycznego skorodowanych próbek ściskanych dopiero przy stężeniu kwasu siarkowego 20%. Przy stężeniu 5% kwasu siarkowego wystąpił wzrost napężenia (w wypadku rury DN28 o 2%, a rury DN35 o 7,5%), co świadczy o słabym działaniu tego kwasu na próbki (potwierdza to rys. 4) i mieści się w granicach błędów pomiarowych. Po to, aby ocenić globalnie, niezależnie od średnicy DN, skutek działania coraz mocniejszego kwasu na wynik próby ściskania sporządzony został wykres rys. 14.



Rys.13. DN35, napężenie krytyczne [MPa]: 1 - próbek niekorodowanych, 2 – próbek korodowanych w 5% H₂SO₄, 3 – próbek korodowanych w 20% H₂SO₄



Rys.14. DN15, DN18, DN22, DN28, DN35, średnie napężenie krytyczne [MPa]: 1 - próbek niekorodowanych, 2 – próbek korodowanych w 5% H₂SO₄, 3 – próbek korodowanych w 20% H₂SO₄

Z wykresu pokazanego na rys. 14 wynika, że w przypadku badanych rur każdej średnicy DN spadek naprężenia krytycznego następuje zawsze przy działaniu na nie kwasem siarkowym. W odniesieniu do rur niekorodowanych względne wartości spadku naprężenia krytycznego rur korodowanych wynoszą:

- 0,11% - przy uprzednim działaniu na nie kwasem siarkowym 5%,
- 15,5% - przy uprzednim działaniu na nie kwasem siarkowym 20%.

3. WNIOSKI

Stwierdzono, że działanie użytych kwasów w czasie 720 h i 1228h na krótkie rury ze stali nierdzewnej 0H17N12M2 miało różne skutki. Kwas azotowy o stężeniu 20% nie spowodował zmian korozyjnych tych rur, a kwas siarkowy zarówno o stężeniu 5% jak i stężeniu 20% je spowodował. Zmiany te oceniono ilościowo z wytrzymałościowego punktu widzenia; w próbie osiowego ściskania. Określono zmianę naprężenia krytycznego ściskanych rur po uprzednio przeprowadzonym procesie korozji, w odniesieniu do naprężenia krytycznego rur niekorodowanych. Stwierdzono, że wartości te są zależne od średnicy DN rury i od stężenia kwasu siarkowego działającego na nie przed próbami ściskania. Największe zmiany spowodował 20% kwas siarkowy. Względny średni spadek naprężenia krytycznego rur wszystkich średnic DN wynosił wtedy 15,5%. Zmiany spowodowane przez 5% kwas siarkowy były bardzo małe, tj. względny średni spadek naprężenia krytycznego rur wszystkich średnic DN wynosił wtedy 0,11%.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Giżejowski M, Ziółko J. (red.): *Budownictwo ogólne. Tom 5. Stalowe konstrukcje budynków projektowanie według eurokodów z przykładami obliczeń*. Arkady 2010.
- [2] Włodarczyk W.: *Konstrukcje stalowe*. WSiP. Warszawa 2000.
- [3] Wichniewicz S.: *Ćwiczenia laboratoryjne z wytrzymałości materiałów*. OW PW. Warszawa 2008.
- [4] P. Jastrzębski, J. Mutermilch, W. Orłowski: *Wytrzymałość materiałów. Tom 2*. Arkady 1986.
- [5] PN-76/H-04601 „*Korozja metali. Badania laboratoryjne w cieczach i roztworach o temperaturze otoczenia*”.
- [6] Glinicka A., Kruk M.: *Analiza eksperymentalna wyboczenia niesprężystego prętów stalowych poddanych korozji w komorze mgły solnej*. Drogi i mosty. 5/2010 s. 5 – 22.
- [7] Glinicka A.: *Doświadczalna analiza wyboczenia niesprężystego kształtowników o przekrojach rurowych czworobocznych*. Drogi i mosty. 2/2005, s. 5 – 37.