

Lucyna PRZYWARA¹, Agnieszka JASZCZUROWSKA²

¹ University of Bielsko-Biala, Department of Environmental Protection and Engineering, Willowa 2,
43-309 Bielsko-Biala, Poland

² Graduate of the University of Bielsko-Biala

ORCID / e-mail:

¹ 0000-0002-7983-1565 / l.przywara@ath.bielsko.pl

² agnieszkasobel@vip.onet.pl

Charakterystyka fizyczna i chemiczna osadów korozyjnych w rurach żelaznych eksploatowanych w obecności przepływu wody

Słowa kluczowe:

korozja, tworzenie zgorzeli, system dystrybucji wody pitnej, żelazna rura

Physical and chemical characteristics of corrosion deposits in iron pipes operated in presence of water flow

Keywords:

corrosion, scale formation, drinking water distribution system, iron pipe

Abstract

The presented paper contains issues related to corrosion of water supply lines formed in cast iron and steel. This process can manifest in different ways, including pipe degradation, release of iron by-products, water flow restriction, microbial growth and the reduction of drinking water safety for consumers, which present a significant threat to water supply safety. The aim of the paper was to show changes that emerged in pipes formed in grey cast iron and steel as a result of potable water flow depending on the duration of their use. The corrosion scales from old water pipe lines were analyzed for their structure and composition. The description of the test methodology presents the procedure regarding, analysis of the inner and outer coating with the use of scanning equipment, and chemical analysis of the corrosion sludge. In this study, corrosion products were carefully collected from four old, corroded iron pipes made of different materials – gray cast iron and steel. It can be concluded that scale characteristics, including micromorphology, porosity and composition, vary significantly due to different pipe materials and times operating. Characteristics of corrosion scales sampled from different pipe segments show obvious differences, both in physical and chemical aspects. Corrosion scales were found highly amorphous. Diverse results can be observed in the case of the test of inner and outer surface of water supply pipes with the use of scanning equipment. The highest quantity of corrosion pits in the structure were present in the line formed in grey cast iron no. 2, while the deepest pits – over 14 mm – were recorded in steel pipe no. 4. Lines with the most reduced cross-section include steel pipe no. 3, which was characterized by presence of sludge sized over 26 mm. When considering the issue of the chemical composition of the formed corrosion sludge, particular attention must be drawn to the elements that may penetrate into water as a result of its flow, thus causing a considerable deterioration of its quality in chemical and physical terms. Among the major constituent elements of the deposits, iron was most prevalent followed, in the order of decreasing prevalence, by silicon, aluminum, sulfur, calcium, manganese, magnesium. Consequently, characterization of corrosion scales is indispensable to water quality protection.

1. WSTĘP

Jedną z podstawowych cech infrastruktury wodociągowej zarówno w kraju, jak i na świecie jest zastosowanie przy jej wykonaniu różnorodnych materiałów. Struktura sieci zwykle oparta jest o materiały takie jak: żeliwo szare, żeliwo sferoidalne, stal, azbestocement, żelbet oraz tworzywa sztuczne – polichlorek winylu (PVC) i polietylen (PE).

Rury żelazne i stalowe były stosowane w systemach dystrybucji wody od ponad pięciu wieków. Na trwałość instalacji wodnych ma wpływ zarówno ograniczenie efektywnej średnicy rur poprzez krystalizujące w nich osady mineralne, jak i korozyjność materiałów, z których jest wykonana instalacja wodna i jej osprzęt. Korozja przewodów wodociągowych wykonanych z żeliwa i stali zachodzi w sposób naturalny w skomplikowanym procesie elektrochemicznym, w którym podłoże zawierające żelazo działa jak anoda lub donor elektronów, podczas gdy związki utleniające zawarte w wodzie działają jak katoda lub akceptor elektronów [Benson i in. 2012, Zhang i in. 2020a]. Do najbardziej powszechnych utleniaczy w systemach dystrybucji wody należą: rozpuszczony tlen, chlor, kwas podchloryny lub jony podchlorynowe, które mogą szybko reagować z żelazem wewnątrz ścianki rury. Tak więc, gdy nowa rura żelazna jest zasilana wodą, zachodzą szybkie reakcje korozji elektrochemicznej.

Korozja w środowisku wodnym może przebiegać równomiernie na całej powierzchni metalu lub nierównomiernie, czyli może występować lokalnie. W wyniku korozji ogólnej osad jednolicie pokrywa ścianki rury, natomiast skutkiem korozji miejscowej są tuberkule tworzące się w obszarze strefy anodowej. Tuberkule mogą rozrastać się do momentu, aż zaczną się wzajemnie ze sobą stykać, tworząc warstwę osadu wypełniającą wewnętrzną powierzchnię przewodu [Li i in. 2018a, Świetlik i in. 2012]. Powszechnie obserwowane rodzaje korozji nierównomiernej obejmują korozję galwaniczną i szczelinową oraz korozję wżerową [Benson i in. 2012].

Korozja równomierna polega na niemal jednostajnym na całej powierzchni niszczeniu metalu w miarę upływu czasu. Szybkość korozji równomiernej jest podawana w $\text{mm}\cdot\text{rok}^{-1}$, niekiedy także w $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-2}\cdot\text{doba}^{-1}$. Gdy szybkość korozji równomiernej wynosi więcej niż $1,5 \text{ mm}\cdot\text{rok}^{-1}$, to takich metali i ich stopów nie można stosować na elementy urządzeń narażone na zniszczenie korozyjne. Korozja lokalna charakteryzuje się natomiast zróżnicowaniem szybkości niszczenia metalu lub stopu w różnych obszarach jego powierzchni. Przykładem takiego uszkodzenia korozyjnego jest korozja wżerowa. Stosunek największej głębokości wżerów do głębokości średniej, wynikającej z ubytku masy próbki, nosi nazwę współczynnika korozji wżerowej (WKW), który dla korozji równomiernej ma wartość równą 1. Innym przykładem korozji lokalnej jest tzw. korozja nożowa przebiegająca w wąskiej strefie granicznej między materiałem macierzystym, a spoiną złącza spawanego lub lutowanego [Dobrzański i Dobrzańska-Danikiewicz 2011].

Skład i struktura osadów utworzonych na skutek korozji wewnętrznej powierzchni rur żeliwnych i stalowych zależy od rodzaju materiału, składu chemicznego wody, jak również od czynników fizycznych, np. temperatury wody, prędkości przepływu czy działalności mikrobiologicznej [Peng i in. 2012]. Osady te stopniowo osadzają się na ściankach rur i mają zazwyczaj budowę warstwową, składającą się przede wszystkim z krystalicznych tlenków żelaza na drugim i trzecim stopniu utlenienia [Cui i in. 2016a]. Najczęściej identyfikowanymi produktami korozji są: getyt, magnetyt, hematyt i maghemit, lepidokrokity, syderyt [Cui i in. 2016b, Guo i in. 2018, Li i in. 2016, Li i in. 2018a, Wang i in. 2014, Zhang i in. 2022].

Powstałe w wyniku korozji osady, zwane także zgorzelinami, zwykle składają się z czterech następujących warstw [Gerke i in. 2008, Jin i in. 2015, Li i in. 2016, Li i in. 2018a, Zhang i in. 2020b]:

- podstawa zgorzeliny – to powierzchnia metalowej rury,
- porowaty rdzeń – to porowata warstwa rdzenia bezpośrednio stykająca się ze ścianą rury,
- zwarta skorupowa warstwa o grubości kilku milimetrów otaczająca warstwę rdzenia,
- luźna i niejednorodna warstwa osadów na powierzchni zgorzeliny występująca na granicy faz ciało stałe-ciecz.

Wytworzone zgorzeliney z reguły mają mikrostruktury w postaci kryształów piasku lub struktur blaszkowatych, kwiatowych i kulistych [Cui i in. 2016a, Jin i in. 2015, Yang i in. 2012a]. W miarę postępu procesu korozji tworzy się skorupowata warstwa mocno przylegająca do powierzchni rury, otaczająca porowate materiały z tlenku żelaza [Zhang i in. 2020a, 2022].

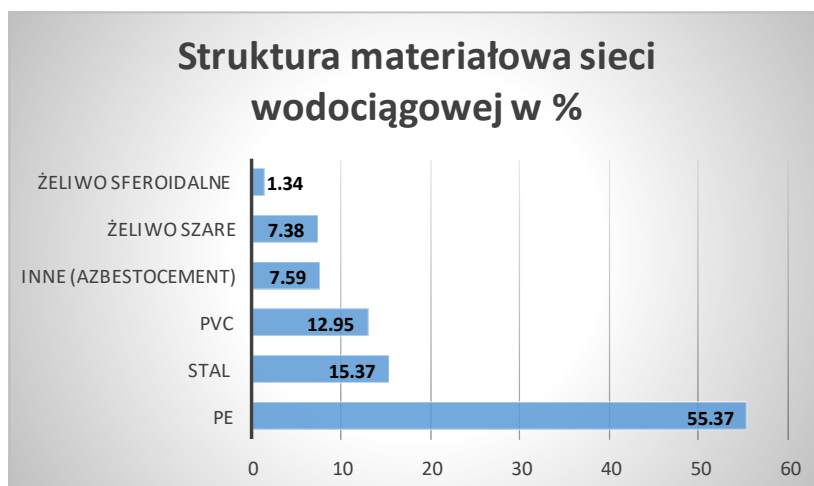
Korozja i osadzanie się kamienia zachodzą w rurach żeliwnych czy stalowych łatwo i jednocześnie, obejmując złożone reakcje między powierzchnią żelaznej rury, a transportowaną wodą. Z jednej strony powstawanie stabilnych zgorzelin korozyjnych może zahamować dalszy rozwój procesu korozji, ograniczyć ilość uwalnianego żelaza do wody i zmniejszyć ryzyko zanieczyszczenia transportowanej wody. Nagromadzenie produktów korozji służy powstaniu warstwy ochronnej, przez co zwiększa odporność na korozję, blokując dyfuzję akceptorów elektronów i tworząc barierę pomiędzy transportowaną wodą a metalową rurą, co dodatkowo spowalnia tempo korozji i dalszy proces niszczenia rur [Zhang i in. 2020b]. Z drugiej strony osady korozyjne, działając jak pochłaniacze dla gromadzenia się zanieczyszczeń i stanowiąc siedlisko dla wzrostu drobnoustrojów, w rezultacie mogą uwalniać zanieczyszczenia z powrotem do otaczającej wody, powodując pogorszenie jej jakości [Gerke i in. 2013, Li i in. 2016, Liu i in. 2017, Peng i in. 2012, Trueman i in. 2016, Wang i in. 2014]. Proces ten może objawiać się na różne sposoby, m.in. degradacją rur, uwalnianiem produktów ubocznych żelaza, ograniczeniem przepływu wody, rozwojem mikroorganizmów i zmniejszeniem bezpieczeństwa wody pitnej dla konsumentów, co stanowi poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa zaopatrzenia w wodę [Baig i in. 2017, Liu i in. 2017, Yang i in. 2012a, 2012b, 2014].

Podstawowym celem pracy było zbadanie skorodowanych rur wykonanych z żeliwa i stali poprzez określenie cech morfologicznych i fizykochemicznych powstałych zgorzelin korozyjnych.

2. METODY BADAŃ

Badania przeprowadzono dla rur z miejskiej sieci wodociągowej o długości 2400 km, która zasila w wodę do spożycia miasto oraz sąsiednie gminy (w sumie ok. 300 tysięcy mieszkańców). Przedmiotem badań były rury stalowe i żeliwne stosowane do dystrybucji wody, których udział wynosi odpowiednio 15,37% i 7,38%, co stanowi niecałe 23% udziału długości sieci wodociągowej. Obecnie istniejąca sieć zbudowana jest głównie z rur polietylenowych (PE) – 55,37%. Drugim przeważającym materiałem jest PVC – 12,95%, a udział rur z żelaza sferoidalnego wynosi zaledwie 1,34%. Pomimo prowadzonych prac związanych z modernizacją sieci wodociągowej, wciąż 7,59% stanowią przewody scharakteryzowane jako „inne”, w tym przewody azbestocementowe (Rys. 1).





Stare odcinki żeliwnych rur (w wieku powyżej 50 lat) zostały wydobyte z dwóch różnych stanowisk w systemie dystrybucji wody w centrum miasta, które określono jako rura żeliwna 1 i rura żeliwna 2. Dodatkowo na terenach podmiejskich wydobyto dwie rury stalowe (rura stalowa 3 i rura stalowa 4), których czas eksploatacji wyniósł odpowiednio 45 i 30 lat. Centrum miasta, jak i pozostałe miejsca, były zaopatrywane w wodę do spożycia z jednego źródła. Zatem analizowane rury różnią się między sobą nie tylko rodzajem materiału, ale również czasem eksploatacji w układzie sieci wodociągowej. Identyfikację każdego odcinka rury i odpowiadającej mu lokalizacji wraz z wymiarami średnic przedstawiono w Tab. 1.



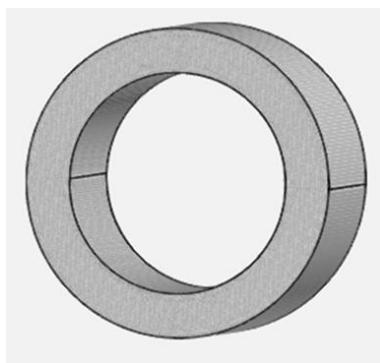
Rys. 1. Struktura materiałowa sieci wodociągowej.
Fig. 1. Material structure of drinking water distribution system.

Tab. 1. Charakterystyka przewodów wodociągowych.

Tab. 1. Characteristics of water pipes.

Przewód wodociągowy	Rodzaj tworzywa	Czas Eksploatacji	Miejsce użytkowania	Średnica wyjściowa zewnętrzna \varnothing_z wewnętrzna \varnothing_w [mm]
 Rura żeliwna 1	Żeliwo szare	62 lata	Centrum miasta	\varnothing_z 116 \varnothing_w 96
 Rura żeliwna 2	Żeliwo szare	50 lat	Centrum miasta	\varnothing_z 120 \varnothing_w 109
 Rura stalowa 3	Stal	45 lat	Tereny podmiejskie	\varnothing_z 48,3 \varnothing_w 41,9
 Rura stalowa 4	Stal	30 lat	Tereny podmiejskie	\varnothing_z 114,3 \varnothing_w 106,3

Powstałe w przewodach wodociągowych osady zostały przeanalizowane pod kątem ich struktury oraz składu chemicznego. W celu oceny powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej analizowanych rur wykorzystano aparaturę skaningową Kreon Baces z głowicą laserową Solano Blue firmy Oberon 3D z dokładnością pomiaru równą 44 μm . Za pomocą narzędzia pomiarowego jakim jest skaner laserowy w krótkim czasie pozyskano dużą ilość punktów 3D. Zebrana za pomocą głowicy laserowej Solano Blue chmura punktów (głowica skanuje 40 punktów na sekundę) posłużyła jako podstawa do dalszych analiz z modelem CAD (ang. Computer Aided Design) rury w postaci pierwotnej (Rys. 2). Analizę przeprowadzono w programie GOM Inspect, służącym do kontroli 3D i analizy kształtu i wymiarów zebranych punktów. Dzięki nałożeniu chmury punktów na model pierwotny przygotowany w środowisku CAD, zaobserwowano ogniska korozji obecne w analizowanych rurach do dystrybucji wody.



Rys. 2. Model CAD do analizy kształtu przewodów wodociągowych.

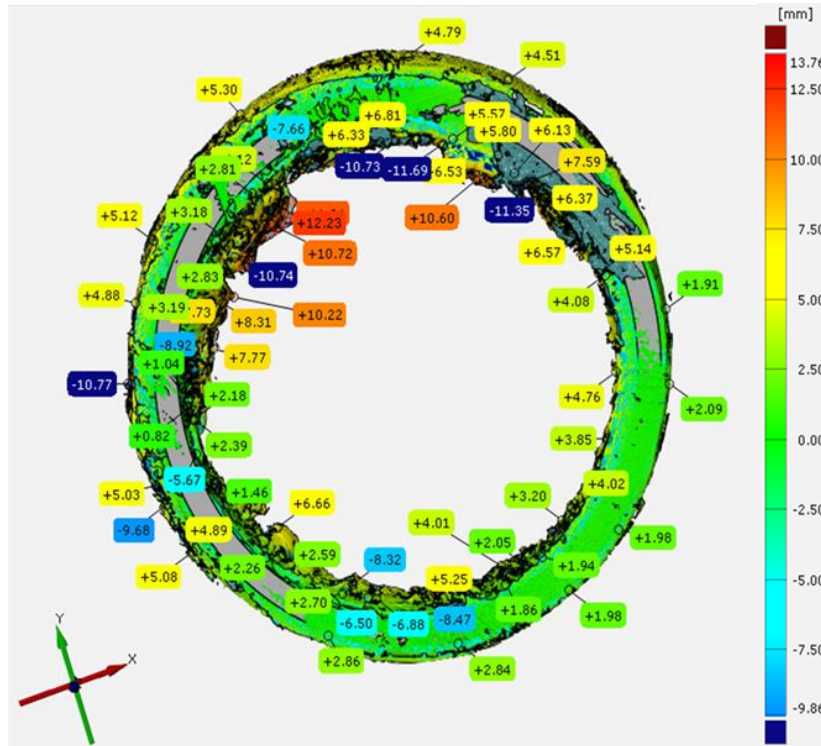
Fig. 2. CAD model for analyzing the shape of water pipes.

Badanie składu chemicznego osadu korozyjnego powstałego wewnątrz badanych rur przeprowadzono na analizatorze Leco ONH836 zgodnie z normą PN-EN ISO 15350:2010 oraz spektrofotometrze rentgenowskim Rigaku. W celu zbadania zawartości wybranych pierwiastków (żelaza, sodu, magnezu, glinu, krzemu, fosforu, chloru, potasu, wapnia, manganu, cynku) pobrano osad wewnętrzny w postaci zgorzeliny korozji, który następnie rozdrobniono w młynku ceramicznym na gładki pył. W laboratoryjnej prasce ręcznej Testchem umieszczono rozdrobniony osad, gdzie pod ciśnieniem 31kN została utworzona pastylka o grubości 1–2 mm, która posłużyła do analizy na spektrofotometrze Rigaku. W celu określenia zawartości siarki próbę osadu pobranego za pomocą stopnika wolframowego umieszczono w tyglu, gdzie następnie został poddany wysokotemperaturowemu spalaniu z detekcją w podczerwieni. Uzyskane wyniki posłużyły do oceny zawartości poszczególnych pierwiastków w pobranym osadzie korozyjnym.

3. WYNIKI I DISKUSJA

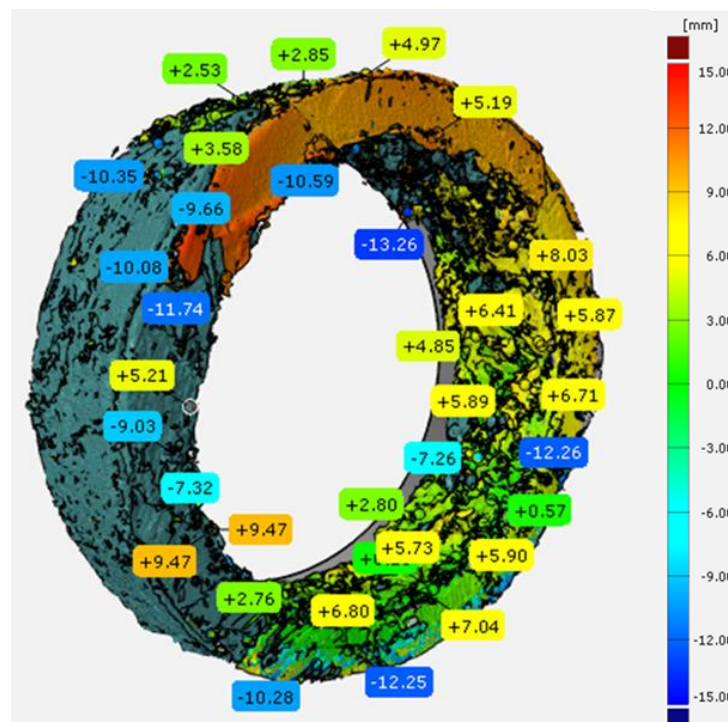
3.1. Analiza skaningowa powierzchni rur

Badanie powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej przewodów wodociągowych za pomocą aparatury skaningowej pozwoliło na ukazanie ognisk postępującej korozji w postaci narośli i wżerów korozyjnych. W przypadku wodociągu żeliwnego 1 zaobserwować można znaczące zmniejszenie się średnicy przewodu spowodowane poprzez jego zarastanie osadami korozyjnymi, których wielkość wynosiła nawet 12 mm, a głębokość ubytków w strukturze wynosiła do -11,69 mm. Jednak powierzchnia wewnętrzna tego przewodu charakteryzowała się głównie naroślami o wielkości do 4 mm i ubytkami w postaci wżerów do -5 mm. Obraz uzyskany z programu GOM Inspect dla rury żeliwny 1 przedstawiono na Rys. 3.



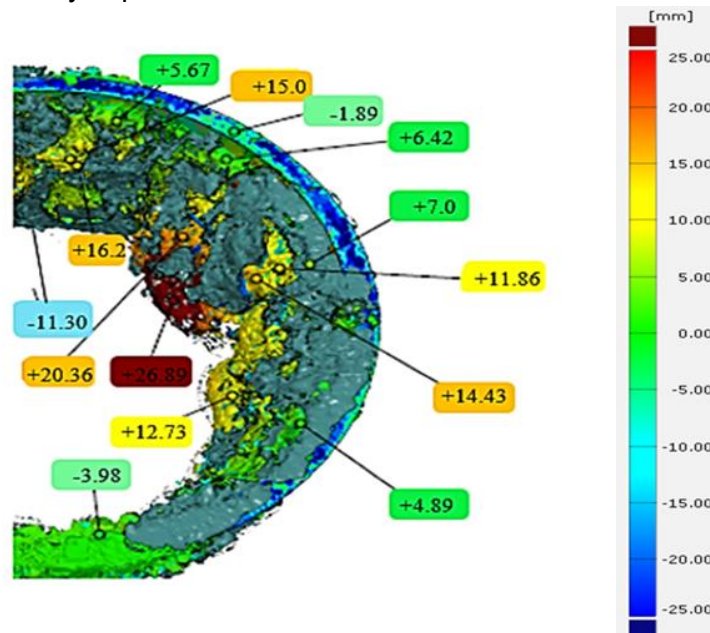
Rys. 3. Przekrój rury żeliwnej 1.
Fig. 3. Cross-section of cast iron pipe 1.

Przewód żeliwny 2, w porównaniu z rurą 1, posiadał znacznie więcej wżerów korozyjnych w swojej strukturze o wielkości od -10 mm do nawet -13 mm. Z tego też powodu światło przewodu nie było nadmiernie zmniejszone. Wewnętrzna powierzchnia rury charakteryzowała się niejednorodną warstwą korozji o grubości od 2 do 9 mm (Rys. 4.)



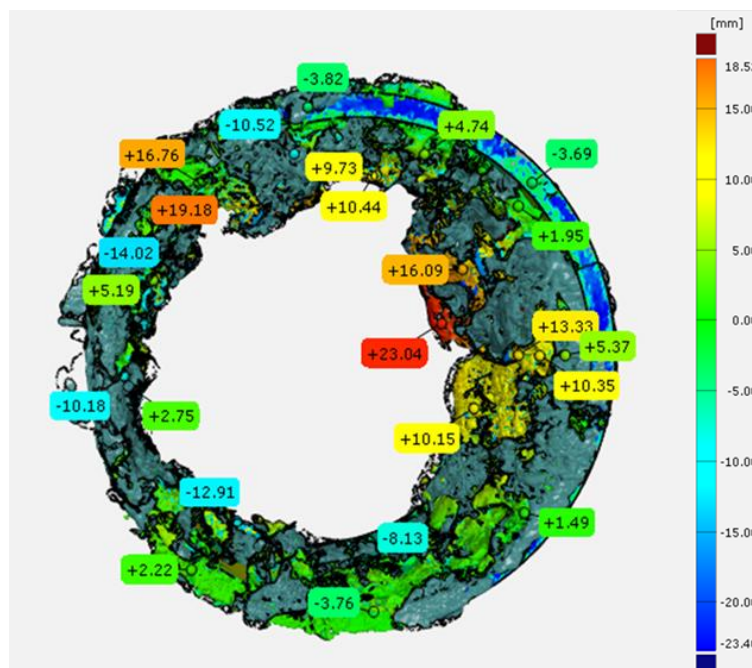
Rys. 4. Przekrój rury żeliwnej nr 2.
Fig. 4. Cross-section of cast iron pipe 2.

Powierzchnia wewnętrzna rury stalowej 3 była pokryta złożami korozyjnymi, których wielkość utrudniła analizę całej średnicy przewodu, dlatego przedstawiono fragment z największymi naroślami wynoszącymi nawet ponad 26 mm (Rys. 5). Ubytki na powierzchni wewnętrznej przewodu w postaci wżerów były obecne, ale w stopniu nieznacznym w porównaniu do pozostałych analizowanych przewodów.



Rys. 5. Przekrój rury stalowej 3.
Fig. 5. Cross-section of steel pipe 3.

Analizując rurę stalową 4 stwierdzono, że głównym problem dotyczącym tego przewodu jest zarastanie osadami korozyjnymi. Wielkość narośli wynosiła ponad 23 mm i były one dominujące na powierzchni wewnętrznej przewodu. Istniały również ubytki w strukturze obecne na ściankach zewnętrznych o wartościach przekraczających -14 mm (Rys. 6).



Rys. 6. Przekrój rury stalowej 4.
Fig. 6. Cross-section of steel pipe 4.

Analiza skaningowa za pomocą aparatury Kreon Baces z głowicą laserową Solano Blue umożliwiła zbadanie nie tylko wielkości powstałych wżerów korozyjnych, ale również wielkości osadów zarastających wnętrza rurociągów. Porównując model pierwotny utworzony w środowisku CAD z chmurą punktów uzyskaną w wyniku przeskanowania przewodu wodociągowego, uzyskano obraz ukazujący zmiany w strukturze badanych przewodów. Po kilkudziesięciu latach eksploatacji wewnętrzne ściany rur żelaznych były skorodowane i pokryte zgorzelinami, co również stwierdzili w swoich badaniach m.in. Zhang i in. [2016] lub Li i in. [2018a]. Typową wielowarstwową budowę zgorzelin potwierdzili również w badaniach Zhang i in. [2022].

Największą liczbą wżerów korozyjnych na całej swojej powierzchni cechowała się rura żeliwna 2, natomiast najgłębsze ubytki w strukturze odnotowano dla rury stalowej 4 (ponad 14 mm). Zarastanie przewodów ze stopów żelaza wiąże się ze zmniejszeniem prędkości przepływu wody poprzez zwiększenie oporów jej przepływu. Każdy z przewodów w mniejszym i większym stopniu posiadał pomniejszoną średnicę wewnętrzną na skutek zarastania przewodu naroślami korozyjnymi. Największe wartości odnotowano dla rury stalowej 3 i 4, odpowiednio ponad 26 mm i 23 mm. Zarastanie przewodów oraz ilość wżerów korozyjnych niekoniernie musi być utożsamiana z czasem eksploatacji przewodu w sieci, co potwierdzają uzyskane wyniki również innych badaczy [Baig i in. 2017, Lytle i in. 2020]. Przewody użytkowane w czasie ponad 50 i 60 lat posiadały mniej osadów, aniżeli rurociągi działające w sieci w przedziale czasowym 30–45 lat. Należy jednak zauważyć, że na sposób osadzania się nalotów oraz powstawania wżerów wpływa nie tylko agresywność środowiska, działalność życiowa bakterii czy rozbiory wody w sieci, ale także rodzaj materiałów i ochrony antykorozyjnej w zastosowanych przewodach wodociągowych. Wprawdzie analizowane przewody były rurami, których głównym składnikiem było żelazo, ale jedne z nich były żeliwne, a drugie stalowe.

Wielkość powierzchni powstałych zgorzelin korozyjnych wewnątrz rur stalowych była większa niż dla rur żeliwnych. Zarastanie tych przewodów w tym przypadku najprawdopodobniej jest wynikiem zwiększonego zapotrzebowania na wodę na terenach podmiejskich, gdzie woda dodatkowo zużywana jest na potrzeby utrzymania zieleni. Ogólnie rzecz biorąc, grubość warstwy korozyjnej była mniejsza w rurach żeliwnych niż w rurach stalowych, co zostało również potwierdzone w literaturze [Zhang i in. 2016].

3.2. Analiza chemiczna zgorzeliny

Przeprowadzona analiza chemiczna osadu korozyjnego obecnego na wewnętrznej powierzchni przewodów wodociągowych pozwoliła na określenie składu chemicznego osadu. W literaturze chemizm osadów korozyjnych nie jest do końca poznany i budzi wiele kontrowersji. Zawartość poszczególnych pierwiastków w osadzie jest niezwykle ważna, w szczególności, jeśli przez przewody przepływa woda przeznaczona do spożycia przez ludzi. Powstałe osady tworzą tuberkule – specyficzne formy osadów (Rys. 7 i 8).



Rys. 7. Osad korozyjny wewnątrz rury żeliwnej (fot. A. Jaszczurowska).

Fig. 7. Corrosive deposit inside the cast iron pipe (photo by A. Jaszczurowska) .



Rys. 8. Osad korozyjny wewnątrz rury stalowej (fot. A. Jaszczurowska).
Fig. 8. Corrosive deposit inside the steel pipe (photo by A. Jaszczurowska).

Reakcje zachodzące pomiędzy osadem a przepływającą wodą mogą znacząco wpływać na jej jakość. Skutkiem tych reakcji może być powstanie tak zwanej czerwonej wody, niepożądanego jej zapachu oraz uwalnianie niektórych pierwiastków bezpośrednio do przepływającej wody. Produkty korozji znajdujące się wewnątrz przewodów wodociągowych są niewątpliwie przyczyną wtórnego zanieczyszczenia wody, gdzie, oprócz żelaza, znajdują się w osadzie takie pierwiastki jak: sód, magnez, glin, krzem, fosfor, siarka, chlor, wapń, mangan, cynk oraz potas. Należy jednak wspomnieć, że wymienione pierwiastki mają dwa źródła pochodzenia – jedno z przepływającej wody, a drugie z korodującego rurociągu. Wapń, magnez, glin, chlor głównie pochodzą z przepływającej wody, w tym z jej uzdatniania, a mangan, fosfor, cynk, nikiel, żelazo, siarka z korodujących przewodów [Li i in. 2016, Li i in. 2018, Wang i in. 2014, Sheing i in. 2021, Zhang i in. 2021]. Skład chemiczny osadów korozyjnych obecnych w badanych przewodach wodociągowych przedstawiono w Tab. 2.

Tab. 2. Skład chemiczny osadów korozyjnych obecnych w badanych przewodach wodociągowych.
Tab. 2. Chemical composition of corrosive deposits present in the tested water pipes.

Pierwiastek	Zawartość pierwiastków [%]			
	Osad Rura żeliwna 1	Osad Rura żeliwna 2	Osad Rura stalowa 3	Osad Rura stalowa 4
Na	<0,1	<0,1	6,90	6,60
Mg	1,20	0,93	0,37	–
Al	2,10	5,50	2,57	3,6
Si	4,40	6,00	7,20	10,9
P	0,38	0,90	<0,1	1,3
S	1,90	1,80	1,60	1,33
Cl	0,68	0,62	0,23	<0,1
K	0,12	0,20	<0,1	0,27
Ca	0,29	0,50	0,93	0,47
Mn	1,20	1,60	0,34	0,26
Fe	76,6	77,9	78,2	73,9
Zn	–	–	–	1,00

Wśród głównych pierwiastków składowych w analizowanych zgorzelinach dominowało żelazo (73,9–78,2%), a następnie w kolejności malejącego występowania Si, Al, S, Mn, Mg dla rur żeliwnych oraz Si, Na, Al, S dla rur wykonanych ze stali. Udział masowy pozostałych analizowanych pierwiastków nie przekroczył 1%. Li i in. [2016, 2018] oraz Yang i in. [2012a, 2012b] w swoich badaniach również potwierdzili dominującą zawartość Fe w zgorzelinach powstałych na starych, skorodowanych rurach żeliwnych, ze znacznymi zawartościami Ca, S, Mn, Zn, P, Mg, Al. W przeprowadzonych przez wielu naukowców badaniach w obrębie osadów

korozyjnych stwierdza się, że pierwiastki takie jak magnez i wapń nie stwarzają zagrożenia dla zdrowia ludzi. Bardzo ważnym pierwiastkiem jest mangan, którego obecność podawano w literaturze na 0,01–10% [Li i in. 2018b]. W przeprowadzonej analizie zawartość manganu wynosiła 0,26–0,36% dla rur stalowych i 1,2–1,6% dla rur żeliwnych. Wchłanianie przez organizm zwiększonych dawek manganu może powodować zaburzenia neurologiczne przypominające objawy choroby Parkinsona. W literaturze podkreśla się związek pomiędzy neurotoksycznością manganu, a występowaniem chorób neurologicznych. Nadmiar manganu może również spowodować ograniczone wchłanianie żelaza przez organizm, co prowadzi ostatecznie do anemii [Li i in. 2018b].

Siarka obecna w osadzie korozyjnym w ilości 0,33–1,9% jest niekorzystnym składnikiem uwalnianym głównie z rur żeliwnych (będąc dodatkiem stopowym), pogarszającym jakość przewodu. Innym zwracającym uwagę pierwiastkiem jest fosfor, którego zawartość dla rur żeliwnych wyniosła 0,38–0,90%, a dla rur stalowych do 1,3%. Jego obecność wiąże się z działalnością życiową mikroorganizmów obecnych w przewodach, ale jest też uwalniany z korodujących rur jako jeden z dodatków stopowych stali i żeliwa.

W oparciu o uzyskane wyniki można spekulować, że przestarzała infrastruktura wodociągowa przyczynia się do niekorzystnego wpływu na parametry hydrotechniczne i jakość dostarczanej wody do odbiorcy końcowego. Należy również pamiętać, iż wybór odpowiednich materiałów budujących sieć wodociągową sprzyja poprawie wydajności, jak i ogranicza awaryjność eksploatowanej sieci. Również dobór odpowiedniego monitoringu sieci przez instytucje wodociągowe oraz wymiana przestarzałych i skorodowanych przewodów może poprawić jakość dostarczanej wody, ograniczyć niezadowolenie konsumentów, a także zmniejszyć koszty związane z awariami wynikającymi ze złego stanu infrastruktury wodociągowej.

4. WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania dostarczyły cennych informacji na temat systemów dystrybucji wody wykonanych z żeliwa i stali, w których w wyniku eksploatacji nastąpił proces korozji i wytworzenie zgorzelin oraz wżerów.
2. W oparciu o morfologię powierzchni rur żeliwnych i stalowych zbadaną za pomocą aparatury skaningowej stwierdzono znaczące różnice pod względem produktów korozji. Dla tego typu przewodów korozja wżerowa okazała się formą dominującą.
3. W oparciu o analizę składu chemicznego nie stwierdzono znaczących różnic pod względem produktów korozji dla różnych materiałów, lokalizacji i czasu eksploatacji.
4. W większości rurociągów rozprowadzających wodę wykonanych zarówno z żeliwa, jak i stali, wewnątrz rur gromadzą się produkty korozji (głównie w postaci żelaza), które nie tylko ograniczają przepływ wody, ale ze względu na możliwość uwalniania pierwiastków mogą pogarszać jej jakość.

LITERATURA

- Baig S., Lou Z., Baig M., Qasim M., Shams D., Mahmood Q., Xinhua Xu X. 2017. Assessment of tap water quality and corrosion scales from the selected distribution systems in northern Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189: 194.
- Benson A., Dietrich A., Gallagher D. 2012. Evaluation of iron release models for water distribution systems. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42, 44–97.
- Cui Y., Liu S., Smith K., Hu H., Tang F., Li Y., Yu K. 2016a. Stainless steel corrosion scale formed in reclaimed water: Characteristics, model for scale growth and metal element release. *Journal of Environmental Sciences*, 48, 79–91.
- Cui Y., Liu S., Smith K., Yu K., Hu H., Jiang W., Li Y. 2016b. Characterization of corrosion scale formed on stainless steel delivery pipe for reclaimed water treatment. *Water Research*, 88, 816–825.

- Dobrzański L., Dobrzańska-Danikiewicz A. 2011. Obróbka powierzchni materiałów inżynierskich. Rozdział 8 – Zmiany struktury i własności powierzchni materiałów inżynierskich w wyniku eksploatacji. *Open Access Library*, 5, 368–416.
- Gerke T., Maynard J., Schock M., Lytle D. 2008. Physicochemical characterization of five iron tubercles from a single drinking water distribution system: Possible new insights on their formation and growth. *Corrosion Science*, 50, 2030–2039.
- Gerke T., Little B., Luxton T., Scheckel K., Maynard J. 2013. Strontium concentrations in corrosion products from residential drinking water distribution systems. *Environmental Science & Technology*, 47, 5171–5177.
- Guo P., Callagon La Plante E., Wang B., Chen X., Balonis M., Bauchy M., Sant G. 2018. Direct observation of pitting corrosion evolutions on carbon steel surfaces at the nano-to-microscales. *Scientific Reports*, 8: 7990.
- Jin J., Wu G., Guan Y. 2015. Effect of bacterial communities on the formation of cast iron corrosion tubercles in reclaimed water. *Water Research*, 71, 207–218.
- Li M., Liu Z., Chen Y., Hai Y. 2016. Characteristics of iron corrosion scales and water quality variations in drinking water distribution systems of different pipe materials. *Water Research*, 106, 593–603.
- Li M., Liu Z., Chen Y. 2018a. Physico-chemical characteristics of corrosion scales from different pipes in drinking water distribution systems. *Water*, 10, 931–945.
- Li G., Ding Y., Xu H., Jin J., Shi B. 2018b. Characterization and release profile of (Mn, Al)-bearing deposits in drinking water distribution systems. *Chemosphere*, 197, 73–80.
- Liu J., Shentu H., Chen H., Ye P., Xu B., Zhang Y., Bastani H., Peng H., Chen L., Zhang T. 2017. Change regularity of water quality parameters in leakage flow conditions and their relationship with iron release. *Water Research*, 124, 353–362.
- Lytle A., Tang M., Francis A., O'Donnell A., Newton J. 2020. The effect of chloride, sulfate and dissolved inorganic carbon on iron release from cast iron. *Water Research*, 183: 116037.
- Norma PN-EN ISO 15350:2010 Stal i żelazo – Oznaczanie całkowitej zawartości węgla i siarki – Metoda absorpcji w podczerwieni po spaleniu w piecu indukcyjnym (metoda rutynowa). Data publikacji: 09-06-2010.
- Peng C.Y., Korshin G.V., Valentin R.L., Hill A.C., Friedman M.J., Reiber S.H. 2010. Characterization of elemental and structural composition of corrosion scales and deposits formed in drinking water distribution systems. *Water Research*, 44, 4570–4580.
- Peng C., Hill A., Friedman M., Valentine R., Larson G., Romero A., Reiber S., Korshin G. 2012. Occurrence of trace inorganic contaminants in drinking water distribution systems. *Journal American Water Works Association*, 104, 181–193.
- Sheng D., Zhu S., Zhang W., Bu L., Wu Y., Wang J., Zhou S. 2021. Degradation of carbamazepine and disinfection byproducts formation in water distribution system in the presence of copper corrosion products. *Chemosphere*, 282: 131066.
- Świetlik J., Raczyk-Stanisławiak U., Piszora P., Nawrocki J. 2012. Corrosion in drinking water pipe: the importance in green ruts. *Water Research*, 46, 1–10.
- Trueman B., Gagnon G. 2016. Understanding the role of particulate iron in lead release to drinking water. *Environmental Science & Technology*, 50, 9053–9060.
- Wang H., Masters S., Edwards M., Falkinham J., Pruden A. 2014. Effect of disinfectant, water age, and pipe materials on bacterial and eukaryotic community structure in drinking water biofilm. *Environmental Science & Technology*, 48, 1426–1435.
- Yang F., Shi B., Gu J., Wang D., Yang M. 2012a. Morphological and physicochemical characteristics of iron corrosion scales formed under different water source histories in a drinking water distribution system. *Water Research*, 46, 5423–5433.
- Yang F., Shi B., Wang D., Gu J., Cao N. 2012b. Effect of water chemistry changes on iron release and corrosion scale properties of old cast iron pipes. *China Water & Wastewater*, 28, 23, 59–64.
- Yang F., Shi B., Bai Y., Sun H., Lytle D., Wang D. 2014. Effect of sulfate on the transformation of corrosion scale composition and bacterial community in cast iron water distribution pipes. *Water Research*, 59, 46–57.
- Zhang H., Liu D., Zhao L., Zhang X., Wang J., Chen Ch. 2020a. Corrosion mechanisms of ductile iron pipes in water distribution system: impacts of ionic strength and cement mortar lining coverage. *Desalination and Water Treatment*, 197, 237–248.
- Zhang H., Zhao L., Liu D., Wang J., Zhang X., Chen Ch. 2020b. Early period corrosion and scaling characteristics of ductile iron pipe for ground water supply with sodium hypochlorite disinfection. *Water Research*, 176: 115742.
- Zhang H., Liu D., Zhao L., Wang J., Xie S., Liu S., Lin P., Zhang X., Chen C. 2022. Review on corrosion and corrosion scale formation upon unlined cast iron pipes in drinking water distribution. *Journal of Environmental Sciences*, 117, 173–189.