

Wymagania stawiane powłokom żywicznym typu CIPP i WHL do zastosowań ciśnieniowych w świetle wytycznych amerykańskich i normy PN EN ISO 11298-4 oraz ich wpływ na zakres obliczeń statyczno-wytrzymałościowych

Requirements towards CIPP and WHL resin linings for pressure applications with respect to American standards as well as Polish standard PN EN ISO 11298-4 and their impact on the scope of strength calculations

ANNA PARKA, JUSTYNA LISOWSKA

DOI 10.36119/15.2023.12.14

W artykule omówiono wymagania stawiane powłokom żywicznym typu CIPP i WHL do zastosowań ciśnieniowych w świetle wytycznych amerykańskich (ASTM F1216, ASTM F1743 i ASTM 2019) i normy PN EN ISO 11298-4. Szczególną uwagę zwrócono na przepisy regulujące średnie i minimalne grubości ww. powłok po utwardzeniu. Wyjaśniono przy tym powody, dla których nie można sugerować a priori sztywności obwodowej ww. powłok. Przedstawiono też wątpliwości związane z ustaleniem wartości parametrów wytrzymałościowych powłok dla oddziaływań długotrwałych. Wskazano na celowość zróżnicowania wartości współczynnika redukcyjnego, odzwierciedlającego wpływ zjawiska pełzania na wartości tych parametrów. W artykule poruszono również kwestię zasadności (dla wybranych przypadków) pogrubiania ciśnieniowych powłok renowacyjnych celem uzyskania efektu typowego dla powłok rekonstrukcyjnych.

Słowa kluczowe: bezwykopowa odnowa, powłoki ciśnieniowe, CIPP, WHL

The article discusses the basic requirements towards CIPP and WHL resin linings for pressure applications according to American standards ASTM F1216, ASTM 1743 and ASTM 2019 as well as Polish standard PN EN ISO 11298-4. Peculiar attention was paid to the rules regulating the average and minimum thicknesses of the above mentioned linings after complete cure and the minimum cope of their strength calculations depending on the assumed classes. The reasons for not suggesting the ring stiffness of these linings were also explained. Except this, the doubts regarding the procedure of establishing the long term values of their mechanical parameters were presented. The necessity of assuming different values of creep coefficient was pointed out too. Finally, the article raises an issue related to reasonable thickening of CIPP or WHL linings in order to achieve the effects typical to reconstruction instead of renovation process.

Keywords: trenchless renewal, pressure linings, CIPP, WHL

Uwagi wstępne

Ciśnieniowe powłoki (wykładziny) żywiczne typu CIPP mogą być klasy C, B lub A, natomiast powłoki żywiczne typu WHL są najczęściej klasy C, ewentualnie B, zgodnie z normą PN EN 11295 [30]. Powłoki, o których mowa m.in. w [30], służą głównie do liniowej odnowy (renowacji lub rekonstrukcji) przewodów, przy czym różnią się one od siebie wymaganiami w zakresie przyczepności do ścian wewnętrznych przewodów, możliwościami w zakresie przenoszenia naprę-

żeń od ciśnienia wewnętrznego lub/i obciążeń zewnętrznych oraz sztywności obwodowej. Szczegółowe wymagania, jakie powinny spełniać dodatkowo powłoki klasy B i A, przeznaczone np. do zainstalowania w przewodach wodociągowych, zostały podane w normie PN EN ISO 11298-4 [31]. Szersze wyjaśnienie różnic pomiędzy powłokami poszczególnych rodzajów i klas zamieszczono w dalszej części niniejszego artykułu.

Poza klasycznymi powłokami (wykładziniami) żywicznymi do odnowy liniowej przewodów ciśnieniowych niektóre firmy oferują

również krótkie rękawy typu CIPP do ich naprawy miejscowej. W zależności od rodzaju i wielkości uszkodzeń lub/i nieprawidłowości stwierdzonych w przewodzie mogą być one projektowane tak jak powłoki klasy C, B lub A. Niestety żadna z wymienionych wcześniej norm nie obejmuje swym zakresem tego typu rozwiązań. Natomiast wszelkie kwestie związane zarówno z ich doborem jak i projektowaniem regulują wytyczne amerykańskie ASME PCC – 2 [1].

Wprawdzie podział powłok (wykładzin) żywicznych na 3 klasy obowiązuje już od

dr inż. Anna Parka <https://orcid.org/10.36119/15.2022.11.4>. Adres do korespondencji/ Corresponding author: ania.parka@interia.pl,
dr inż. Justyna Lisowska <https://orcid.org/0000-0002-1777-100X> – Katedra Inżynierii Sanitarnej, Politechnika Świętokrzyska, Kielce.
Adres do korespondencji/ Corresponding author: justyna@tu.kielce.p

kilkunastu lat, to jednak dopiero w 2019 r. zdecydowano się na sprecyzowanie kryteriów projektowych dla każdej z klas. Kryteria te, podobnie jak i pozostałe warunki ograniczające stosowanie ww. powłok, zostały zebrane i opublikowane w raporcie AWWA [11]. Co więcej raport AWWA [11] był pierwszym tego typu opracowaniem, w którym zamieszczono 3 różne toki obliczeniowe, w oparciu o które mogą być projektowane powłoki i rękawy żywiczne. Stanowi to istotną zmianę w porównaniu z wytycznymi ASTM F1216 [8], które zawierają tylko 2 toki obliczeniowe, odnoszące się odpowiednio do powłok przewidzianych do zainstalowania w przewodach częściowo uszkodzonych oraz całkowicie zniszczonych.

W niniejszym artykule omówiono podstawowe wymagania, jakie powinny spełniać powłoki, ewentualnie rękawy do zastosowań ciśnieniowych zgodnie z wytycznymi amerykańskimi ASTM F1216 [8], ASTM F1743 [9], ASTM 2019 [10] i normą PN EN 11298-4 [31]. Szczególną uwagę zwrócono tu na przepisy regulujące średnie i minimalne grubości ww. powłok po utwardzeniu oraz minimalny zakres obliczeń statycznie – wytrzymałościowych w zależności od przyjętej klasy. Wyjaśniono przy tym powody, dla których nie można sugerować a priori sztywności obwodowej powłok lub rękawów. Przedstawiono wątpliwości związane z ustaleniem wartości ich parametrów wytrzymałościowych dla oddziaływań długotrwałych. Wskazano też na celowość różnicowania wartości współczynnika redukcyjnego, powodującego zmniejszenie wartości tych parametrów w funkcji czasu. Oceniono również możliwości pogrubienia ciśnieniowych powłok renowacyjnych celem uzyskania efektu typowego dla powłok rekonstrukcyjnych.

Podział ciśnieniowych powłok żywicznych na rodzaje i klasy

Istnieją dwie niezależne od siebie grupy powłok żywicznych, które mogą być projektowane w oparciu o te same wytyczne amerykańskie [8,9,10]. Pierwszą z nich stanowią

Tabela 1. Właściwości powłok ciśnieniowych różnych klas lub wymagania, jakie powinny one spełniać wg normy PN EN ISO 11295 [30]

Table 1. Properties of pressure linings falling into different classes & requirements they have to meet according to Polish standards PN EN ISO 11295 [30]

Właściwość powłoki / Wymagania stawiane powłoce	Klasa powłoki			
	D	C	B	A
Zapewnia ochronę przed korozją, poprawia hydrauliczne warunki przepływu w przewodzie, zapobiega odkładaniu się osadów w przewodzie	tak	tak	tak	tak
Zapewnia pokrycie otworów i szczelin w przewodzie przy założonej wartości ciśnienia wewnętrznego (P)	nie	tak/nie ¹	tak	tak
Przenosi w całości naprężenia od ciśnienia wewnętrznego (P)	nie	nie	nie	tak
Wymagana jest określona sztywność obwodowa powłoki	nie	nie	tak	tak/nie ²
Wymagane jest zapewnienie adhezji do ścian wewnętrznych przewodów	tak	tak	nie	nie
Istnieje możliwość zainstalowania w przewodzie uznanym za całkowicie zniszczony	nie	nie	nie	tak/nie ²

¹ dotyczy cienkościennych powłok typu NFL

głównie powłoki żywiczne typu CIPP (ang. cure in place pipe), które są wytwarzane na bazie standardowych włókien filcowych, nie tkanych i bez szwu (ang. felt based linings) i które mogą być dodatkowo wzmocnione włóknami szklanymi, węglowymi lub nawet aramidowymi. W zależności od rozpatrywanego wariantu technologii powłoki te spełniają wymagania typowe dla klasy C, B lub A zgodnie z tabelą 1. Do tej grupy można też zaliczyć cienkościennie powłoki typu NFL, które wytwarza się z nietkanej włókniny igłowanej i które wykazują właściwości zbliżone do powłok klasy C. W przeciwieństwie jednak do standardowych powłok typu CIPP klasy C, powłoki typu NFL charakteryzują się bardzo ograniczonymi zdolnościami, ewentualnie zupełnym brakiem zdolności, do przeniesienia naprężeń od ciśnienia wewnętrznego w miejscu stwierdzonych nieciągłości konstrukcji (ang. no pinhole covering under class C). Niekiedy powłoki typu NFL błędnie klasyfikowane są jako powłoki klasy D.

Dugą grupę powłok żywicznych stanowią natomiast powłoki adhezyjne typu WHL (ang. ahesive backed woven hose linings). Powłoki te, w przeciwieństwie do standardowych powłok typu CIPP, są tkane i mają konstrukcję zbliżoną do węza pożarniczego. W przeważającej większości przypadków spełniają one wymagania typowe dla klasy C i wyjątkowo klasy B o ile tylko są wzmocnione np. włóknami szklanymi. W sposób szczegółowy powłoki żywiczne zostały opisane m.in. w [18,34].

Niektóre powłoki ciśnieniowe są na tyle specyficzne, że mogą nie spełniać jednocześnie wszystkich wymagań, określonych dla swojej klasy wg normy [30]. Istnieją powłoki klasy A (np. Primus Line), które nie mają dużej sztywności obwodowej w związku z czym nie mogą być one instalowane w przewodach całkowicie zniszczonych bez zachowanej nośności. Powłoki te stosuje się głównie w przewodach, które muszą być eksploatowane pod ciśnieniem wyższym niż dotychczas. Wątpliwości może budzić też zapis odnośnie do braku adhezji powłok klasy B i A do ścianek wewnętrznych prze-

wodów. W przypadku powłok żywicznych typu CIPP lub WHL, nawet wyższych klas istnieje oczywiście pewna możliwość ich doklejenia do ścianek przewodów. Z uwagi jednak na rodzaj żywicy użytych do ich impregnacji ta adhezja jest zawsze słabsza w porównaniu z powłokami klasy C. Wybraną powłokę powinno się zatem przypisać do danej klasy o ile spełnia przynajmniej 3 wymagania spośród tych, podanych w tabeli 1.

Wymagania dotyczące średnich i minimalnych grubości powłok oraz rękawów żywicznych typu CIPP w świetle wytycznych amerykańskich ASTM F1216, ASTM F1743 i ASTM F2019 oraz normy PN EN ISO 11298-4

Średnia grubość powłoki żywicznej klasy C po utwardzeniu nie może być mniejsza niż ta, wyznaczona w oparciu o wzór (1) podany m.in. w [8,11]. Należy tu jednak podkreślić, że wzór (1) może być stosowany, o ile spełniony jest warunek, opisany nierównością (2).

$$t_{avg} \geq t_l = \frac{D}{\left[\frac{5,33}{P} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot \frac{\sigma_L}{N} \right]^{1/2} + 1} \quad (1)$$

gdzie:

- t_{avg} – średnia grubość powłoki typu CIPP, mm
- t_l – obliczeniowa grubość powłoki typu CIPP, mm
- D – średnica zewnętrzna powłoki, mm
- P – maksymalne, dopuszczalne ciśnienie wewnętrzne, na jakie projektowana jest powłoka, MPa
- d – średnica otworu, występującego w ścianie istniejącego przewodu, mm
- σ_L – wytrzymałość na zginanie powłoki zredukowana ze względu na długotrwały wpływ obciążenia, MPa
- N – współczynnik bezpieczeństwa, przyjmuje się $N \geq 2,0$.

$$\frac{d}{D} \leq \left(\frac{2,67 \cdot \sigma_L}{\sigma_{TL} \cdot DR} \right)^2 \quad (2)$$

gdzie:

- σ – wytrzymałość na zginanie powłoki zredukowana ze względu na długotrwały wpływ obciążenia, MPa
- σ_{TL} – wytrzymałość na rozciąganie powłoki, zredukowana ze względu na długotrwały wpływ obciążenia, MPa
- DR – współczynnik kształtu powłoki ($DR = D/t$, gdzie D – średnica zewnętrzna powłoki, t – grubość powłoki)
- d, D – jak we wzorze (1).

Jeżeli natomiast warunek wyrażony za pomocą nierówności (2) nie byłby spełniony to wówczas powłoki żywiczne powinny być

projektowane tak jak dla klasy A, tj. w oparciu o wzór (3) wg [8,11].

$$t_{avg} \geq t_l = \frac{D}{\left(\frac{2 \cdot \sigma_{TL}}{P \cdot N}\right) + 1} \quad (3)$$

gdzie:

t_{avg} , t_l , D , σ_{TL} , P , N – jak we wzorze (1) i (2).

Ustalenie grubości powłoki żywicznej klasy A tylko w oparciu o wzór (3) nie jest wystarczające. W przypadku ww. powłoki należy bowiem sprawdzić dodatkowy warunek bezpieczeństwa opisany nierównością (4) zgodnie z [11].

$$P \leq \frac{P_B}{PRF} \quad (4)$$

gdzie:

P – jak we wzorze (1), (2) i (3),

P_B – wytrzymałość powłoki na rozzerwaniu, określona zgodnie z ASTM D1599 [5] lub normami [13,14], MPa

PRF – współczynnik korekcyjny, powodujący zmniejszenie wartości ciśnienia po prawej stronie nierówności (4).

Jeżeli powłoka miałaby być zainstalowana na odcinku prostym przewodu to wówczas współczynnik korekcyjny PRF nie powinien być niższy od 4,0 wg [11]. Wyższe wartości współczynnika PRF należałoby zastosować dla odcinka przewodu instalowanego po łuku. Wzór (4) wykazuje przy tym pewne podobieństwo do wzoru (5), podanego w normie PN EN ISO 11298-4 [31].

$$P = PFA = \frac{P_{50,min}}{2,0} \geq 0,25 \text{ MPa} \quad (5)$$

gdzie:

PFA – maksymalne, dopuszczalne ciśnienie, które może być wywierane w sposób ciągły na powłokę, MPa

$P_{50,min}$ – ciśnienie rozzerwania, ustalone dla oddziaływań długotrwałych. Zgodnie z normą [31] nie powinno być ono niższe od 0,25 MPa.

W przypadku przewodu wodociągowego, w którym ciśnienie w trakcie eksploatacji może wzrosnąć do wartości $P + P_s$, średnia grubość powłoki (wykładziny) klasy A nie powinna być mniejsza niż ta wyznaczona ze wzoru (6) wg [11]. Jednocześnie należałoby sprawdzić warunek bezpieczeństwa wyrażony za pomocą nierówności (7) wg [11].

$$t_{avg} \geq t_l = \frac{D}{\left(\frac{2,8 \cdot \sigma_{TL}}{P \cdot N}\right) + 1} \quad (6)$$

$$\frac{P + P_s}{1,4} \leq \frac{P_B}{PRF} \quad (7)$$

gdzie:

t_{avg} , t_l , D , σ_{TL} , P , N – jak we wzorze (1), (2), (3),

P_B , PRF – jak we wzorze (4)

P_s – wzrost ciśnienia w przewodzie wskutek np. uderzenia hydraulicznego, MPa

Jeżeli przewiduje się, że przewód wodociągowy będzie opróżniony z wody na dłuższy okres to wówczas powłokę klasy A należy projektować tak jak powłokę, przewidzianą do zainstalowania w przewodzie grawitacyjnym całkowicie zniszczonym zgodnie z [8]. W tym przypadku należy dodatkowo wykazać, że grubość powłoki spełnia warunek opisany za pomocą nierówności (8) wg [8].

$$t_{avg} \geq t_l \geq D \cdot \sqrt[3]{\frac{0,00768}{E}} \quad (8)$$

gdzie:

t_{avg} , t_l , D – jak we wzorze (1) i (2),

E – krótkotrwały moduł sprężystości materiału powłoki, MPa

Z kolei średnia grubość powłok żywicznych klasy B po utwardzeniu nie może być mniejsza niż ta wyznaczona w oparciu o wzór (9) lub (10) oraz (1) spełniony musi być warunek opisany nierównością (2) wg [11]. Jeżeli nierówność (2) nie byłaby spełniona to wówczas grubość ww. powłoki lub rękawa należałoby ustalić ze wzoru (3) wg [11]. Konieczne byłoby też sprawdzenie warunków opisanych za pomocą nierówności (4), (7) i (8) wg [11].

$$t_{avg} \geq t_l = \frac{D}{\left(\frac{2 \cdot K \cdot E \cdot C}{P \cdot N(1 - \nu^2)}\right)^{1/3} + 1} \quad (9)$$

lub

$$t_{avg} \geq t_l = \frac{D}{\left(\frac{2 \cdot K \cdot E_L \cdot C}{P \cdot N(1 - \nu^2)}\right)^{1/3} + 1} \quad (10)$$

gdzie:

D – średnica zewnętrzna powłoki, mm

K – współczynnik wpływu usztywnienia.

Dla powłok typu CIPP lub WHL można przyjąć $K = 7$. Jeżeli przewiduje się, że pomiędzy powłoką a ścianą wewnętrzną rurociągu powstanie szczelina obwodowa to wówczas K musi być mniejsze, np. równe 4;

E – krótkotrwały moduł sprężystości przy zginaniu, MPa

E_L – moduł sprężystości przy zginaniu zredukowany ze względu na długotrwały wpływ obciążenia, MPa

C – poprawka na owalizację,

N – współczynnik bezpieczeństwa, zwykle $N = 2,0$

ν – współczynnik Poissona, dla powłok typu CIPP $\nu = 0,3$

P – parcie hydrostatyczne od wody gruntowej, MPa

Wzór (9) stosuje się do określenia grubości powłoki, poddanej działaniu parcia hydrostatycznego od wody gruntowej w sytuacji, gdy przewód jest opróżniony z medium tylko na krótki okres. W przeciwnym razie należy stosować wzór (10). Zgodnie z wytycznymi ASTM 2019 [10] poziom wody gruntowej nie powinien być mniejszy niż 1,5 m licząc od dna powłoki, ewentualnie nie mniejszy niż 0,1 m licząc od jej wierzchołka. Maksymalny poziom wody gruntowej ustalono z kolei na równy z poziomem terenu. Niezależnie jednak od tego, czy korzysta się ze wzoru (9) czy (10) nie można sugerować a priori wartości modułu sprężystości przy zginaniu E lub E_L powłoki. O ewentualnym zastosowaniu grubszej powłoki z niższym modułem sprężystości powinna zadecydować dalsza analiza hydrauliczna przypadku. Warto też wziąć pod uwagę zalecenia podane w niniejszym artykule.

Grubość powłoki lub rękawa, przewidzianych do zainstalowania w przewodach narażonych na powstawanie podciśnienia, można również wyznaczyć ze wzoru (9) z tą jednak różnicą, że do wartości parcia hydrostatycznego wody P należy dodać założoną wcześniej wartość podciśnienia p_v .

Szczegółowe wymagania odnośnie do minimalnych grubości powłok żywicznych typu CIPP po utwardzeniu zestawiono w tabeli 2.

Grubości nominalne powłok standardowych bez wzmocnienia zwykle zawierają się w przedziale od 4,5 do 20 lub nawet do 30 mm, natomiast powłok wzmocnionych od 3,0 do 15,0 mm w zależności od średnicy.

W podobny sposób, jak to przedstawiono powyżej, można też projektować rękawy, które spełniają wymagania typowe dla klasy C, B lub A.

Tabela 2. Wymagania odnośnie do minimalnych grubości powłok żywicznych typu CIPP – opracowanie własne na podstawie informacji zawartych w [8,9,10,31]

Table 2. Requirements towards the minimum thicknesses of CIPP resin linings – own work done on the basis of information given in [8,9,10,31]

Parametr powłoki typu CIPP	Wartość parametru wg			
	ASTM F1216	ASTM F1743	ASTM F2019	PN ISO 11298-2
Minimalna grubość powłoki typu CIPP po utwardzeniu, t_{min} [mm]	$t_{min} \geq 0,875 \cdot t_l$	$t_{min} \geq 0,8 \cdot t_l$ lub $t_{min} = 3,0 \text{ mm}$	$t_{min} \geq t_l$ lub $t_{min} = 3,0 \text{ mm}$	$t_{min} \geq t_l$ lub $t_{min} = 3,0 \text{ mm}$
ERV [%] ¹⁾	5-10	3-15	nie określono	nie określono

1) dodatkowa ilość żywicy, mająca na celu zrekomensowanie ewentualnych różnic w objętości, wynikających ze zjawiska polimerizacji, rozszerzalności cieplnej lub migracji żywicy przez materiał powłoki (z ang. extra resin volume)

Wymagania w zakresie minimalnych wartości parametrów wytrzymałościowych rękawów i powłok żywicznych typu CIPP do zastosowań ciśnieniowych w świetle wytycznych amerykańskich ASTM F1216, ASTM F1743 i ASTM F2019, normy PN EN ISO 11298-4 i innych instrukcji branżowych

W tabeli 3 zostały zestawione minimalne wymagania w zakresie parametrów wytrzymałościowych dla powłok typu CIPP (po utwardzeniu) w wersji standardowej, tj. bez wzmocnienia oraz wzmocnionych powłok typu GRP – CIPP zgodnie z wytycznymi amerykańskimi ASTM F1216 [8], ASTM F1743 [9] oraz ASTM F2019 [10], a także zgodnie z normą PN EN ISO 11298-4 [31]. Z kolei w tabeli 4 podano minimalne wartości parametrów wytrzymałościowych wybranych powłok typu CIPP w zależności od rodzaju zastosowanej żywicy wg [22].

Tabela 3. Minimalne wartości parametrów wytrzymałościowych powłok żywicznych typu CIPP – opracowanie własne na podstawie informacji zamieszczonych w ASTM F1216[8], ASTM F1743 [9], ASTM 2019 [10] oraz PN EN ISO 11298-4 [31]

Table 3. Minimum values of mechanical parameters of CIPP resin linings – own work done on the basis of information given in ASTM F1216 [8], ASTM F1743 [9], ASTM 2019 [10] and PN EN ISO 11298-4 [31]

Parametr	Minimalna wartość dla powłoki standardowej zgodnie z ASTM F1216 oraz F1743	Minimalna wartość dla powłoki wzmocnionej GRP-CIPP utwardzanej promieniami UV zgodnie z ASTM F2019	Minimalna wartość dla powłoki zgodnie z normą PN EN ISO 11298-1 ¹⁾
1	2	3	4
Krótkotrwała wytrzymałość na zginanie, σ [MPa]	31	45	wg deklaracji producenta
Krótkotrwała wytrzymałość na rozciąganie σ_T [MPa]	21	62	wg deklaracji producenta
Krótkotrwały moduł sprężystości przy zginaniu, E [MPa]	1724	5000	wg deklaracji producenta
Szywność początkowa powłoki po utwardzeniu, S_0 [kPa]	$S_0 \geq 0,64$	nie określono	$S_0 \geq 0,75$

1) dotyczy wyłącznie powłok klasy A i B

Tabela 4. Sugerowane minimalne wartości parametrów wytrzymałościowych standardowych powłok typu CIPP (bez wzmocnienia) w zależności od rodzaju zastosowanej żywicy wg [22]

Table 4. Suggested values of mechanical parameters of standard resin CIPP linings (without reinforcement) depending on the type of resin applied according to [22]

Parametr	Żywica epoksydowa	Żywica epoksywinylo-estrowa	Izoftalowa żywica poliestrowa	Żywica na bazie poliestru izoftalowego
1	2	3	4	5
Krótkotrwała wytrzymałość na zginanie, σ [MPa]	38	38	38	38
Krótkotrwała wytrzymałość na rozciąganie σ_T [MPa]	21-34	21-34	21-34	21-34
Krótkotrwały moduł sprężystości przy zginaniu, E [MPa]	1724-2069	2414-3100	1724-2414	2760

Wg opinii autorów poradnika [22] założenie wartości parametrów wytrzymałościowych powłok w oparciu o tabelę 4 nie jest obarczone dużym błędem. Ich zdaniem wartości rzeczywiste ww. parametrów nie powinny być bowiem wyższe od wartości podanych w ww. tabeli o więcej niż 15-25%. Z drugiej strony, autorzy [22] nie sprecyzowali jednak, kiedy należałoby przyjąć wyższe, a kiedy niższe wartości ww. parametrów zadeklarowanych wcześniej przedziałów.

Nie wyjaśnili oni też kwestii ewentualnej korekty wartości parametrów wytrzymałościowych powłok na wypadek ich niedostatecznego utwardzenia pod wpływem niekorzystnego oddziaływania czynników zewnętrznych. Dość częste powoływanie się na minimalne wartości parametrów wytrzymałościowych powłok z kolumny 2 w tabeli 3 w specyfikacjach projektowych opracowanych w USA lub Kanadzie (zarówno w odniesieniu do przewodów grawitacyjnych jak

konstrukcyjnych klasy C, które w normie [31] po prostu pominięto. W przypadku powłok klasy C sugerowanie zresztą a priori wartości jakiegokolwiek parametru wytrzymałościowego wydaje się zbędne. Dotyczy to zwłaszcza cienkościennych powłok klasy C, które po zainstalowaniu w przewodach zapewniają im głównie ochronę przed korozją i je doszczelniają, natomiast nie spełniają w nich żadnej funkcji nośnej (tabela 5). Ponieważ ich wytrzymałość na zginanie oraz

Tabela 5. Wartości parametrów wytrzymałościowych powłok typu CIPP różnych klas wg [35]

Table 5. The values of mechanical parameters of CIPP linings falling into different classes according to [35]

Powłoka	Klasa powłoki	Parametr						
		Wytrzymałość na rozciąganie		Wytrzymałość na zginanie		Moduł sprężystości przy zginaniu		Współczynnik Poissona
		$\sigma_{th}^{1)}$ MPa	$\sigma_{ta}^{2)}$ MPa	$\sigma_{th}^{1)}$ MPa	$\sigma_{ta}^{2)}$ MPa	$E_{th}^{1)}$ GPa	$E_{ta}^{2)}$ GPa	
CIPP	C	45	30	0	0	0	0	0,5
	B	75	50	40	40	2	2	0,3
	A	75	65	60	60	6	5	0,3

1) wartości obowiązują w kierunku poprzecznym

2) wartości obowiązują w kierunku podłużnym.

moduł sprężystości przy zginaniu są niskie lub nawet bardzo niskie nie stosuje się nawet wzorów (1) i (2) do ustalenia ich grubości.

Z tabeli 5 wynika jakby powłoki klasy C miały zarówno wytrzymałość na zginanie jak i moduł sprężystości przy zginaniu równe dokładnie 0. Założenie to nie jest do końca zgodne z prawdą, ponieważ nawet te najcieńsze powłoki typu NFL klasy C mają moduł oraz wytrzymałość większe od 0. Wszystko zależy jednak od rodzaju żywicy użytej do ich zaimpregnowania oraz ewentualnego zastosowania gumowego coatingu. Jeżeli do zaimpregnowania powłoki użyta byłaby np. plastyczna żywica o dużej elastyczności (ang. ductile resin) i dodatkowo zdecydowano by się na gumowy coating to parametry powłoki po utwardzeniu mogłyby być rzeczywiście bardzo niskie. Niemniej jednak nie byłyby one na pewno równe 0. Sposób, w jaki ustalono wartości parametrów wytrzymałościowych podanych w tabeli 5 został opisany ze szczegółami w [35].

W tabeli 6 zestawiono natomiast przykładowe dane dotyczące powłok standardowych bez wzmocnienia, które mogą być wykorzystane do renowacji częściowo – uszkodzonych przewodów ciśnieniowych. Dla każdej powłoki o średnicy zewnętrznej D i grubości t_n określono zarówno szywność początkową S_0 jak i maksymalny dopuszczalny poziom wody gruntowej P, który może wystąpić powyżej jej dna. Przy ustalaniu szywności S_0 uwzględniono najniższą możliwą wartość modułu sprężystości przy zginaniu dla oddziaływań krótkotrwałych E, która wynika z wytycznych ASTM F1216 [8].

W podobny sposób ustalono szywności początkowe S_0 powłok wzmocnionych włóknami szklanymi typu GRP – CIPP oraz określono maksymalne poziomy zwierciadła

i ciśnieniowych) można wytłumaczyć jedynie koniecznością zapewnienia ochrony praw konkurencji.

Z kolei w normie PN EN ISO 11298-4 [31] nie określono w ogóle wymagań co do minimalnych wartości parametrów wytrzymałościowych powłok. Wyjątek stanowi tu jedynie szywność obwodowa powłok S_0 , która zdaniem autorów normy [31] nie powinna być niższa niż 750 N/m². Wymóg ten nie dotyczy jedynie powłok częściowo –

Tabela 6. Minimalna początkowa sztywność obwodowa S_0 standardowej powłoki typu CIPP bez wzmocnienia, przeznaczonej do zainstalowania w przewodzie częściowo uszkodzonym oraz maksymalny poziom wody gruntowej, który może wystąpić ponad jej dnem – opracowanie własne
Table 6. Minimum initial ring stiffness S_0 of a standard CIPP lining (without additional reinforcement) to be installed in a partially deteriorated pipe and maximum ground water level above its bottom

Średnica przewodu D [mm]	Założona grubość powłoki t_n [mm]	Minimalna początkowa sztywność obwodowa powłoki S_0 przy założonej grubości t_n [kN/m ²]	Maksymalny dopuszczalny poziom wody gruntowej ponad dnem powłoki P [m]
1	2	3	4
6" (ok. 152,4 mm)	4,5 (3,0)	3,9 (1,1)	13,0 (3,8)
8" (203,2 mm)	6,0 (4,0)	3,7 (1,1)	13,0 (3,8)
10" (254 mm)	6,0 (5,0)	1,9 (1,1)	6,6 (3,8)
12" (304,8 mm)	6,0 (6,0)	1,1	3,8
15" (381 mm)	9,0 (7,5)	1,9 (1,1)	6,6 (3,8)
18" (457,2)	9,0 (9,0)	1,1	3,8
18" (457,2 mm)	12,0 (10,0)	2,6 (1,5)	9,1 (5,2)
24" (609,6 mm)	12,0 (12,0)	1,1	3,8
24" (609,6 mm)	15,0 (13,0)	2,1 (1,4)	7,5 (4,8)
30" (762 mm)	15,0 (15,0)	1,1	3,8
30" (762 mm)	18,0 (16,0)	1,9 (1,3)	6,6 (4,6)

Obliczenia minimalnej, początkowej sztywności obwodowej S_0 powłoki wykonano przy założeniu modułu $E = 1724$ MPa (kolumna 3 w tabeli 2) i założonej grubości t_n . Maksymalny poziom wody gruntowej P nad dnem powłoki został ustalony w oparciu o wzór (7) przy założeniu $K = 7$, $E_L = 50\%$, $E = 0,5 \cdot 1724$ MPa = 862 MPa, $\nu = 0,3$, $C = 0,7$ (owalizacja 4%) i $N = 2,0$. Odnosi się on do przewodów, które mogą być wyłączone z eksploatacji na dłuższy okres.

Tabela 7. Minimalna początkowa sztywność obwodowa S_0 powłoki typu GRP – CIPP, przewidzianej do zainstalowania w przewodzie częściowo uszkodzonym oraz maksymalny poziom wody gruntowej ponad jej dnem – opracowanie własne
Table 7. Minimum initial ring stiffness S_0 of a GRP-CIPP lining to be installed in a partially deteriorated pipe and maximum ground water level above its bottom – own work

Średnica przewodu D	Założona grubość powłoki t_n [mm]	Minimalna początkowa sztywność obwodowa powłoki S_0 przy założonej grubości t_n [kN/m ²]	Maksymalny dopuszczalny poziom wody gruntowej ponad dnem powłoki P [m]
1	2	3	4
6" (ok. 152,4 mm)	3,0	3,2	13,0
8" (203,2 mm)	3,0	1,3	5,4
10" (254 mm)	4,0	1,6	6,6
12" (304,8 mm)	5,0	1,8	7,5
15" (381 mm)	6,0	1,6	6,6
18" (457,2)	7,0	1,5	6,1
18" (457,2 mm)	8,0	2,2	9,1
24" (609,6 mm)	9,0	1,3	5,4
24" (609,6 mm)	10,0	1,8	7,5
30" (762 mm)	11,0	1,3	5,1
30" (762 mm)	12,0	1,6	6,6

Obliczenia minimalnej, początkowej sztywności obwodowej S_0 powłoki wykonano przy założeniu modułu $E = 5000$ MPa (kolumna 4 w tabeli 1). Maksymalny poziom wody gruntowej P nad dnem powłoki został ustalony w oparciu o wzór (7) dla $K = 7$, $E_L = 60\%$, $E = 0,6 \cdot 5000$ MPa = 3000 MPa, $\nu = 0,3$, $C = 0,7$ (przy owalizacji 4%) i $N = 2,0$ zgodnie z ASTM F2019 [1].

wody Hw powyżej ich dna. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 7.

Analizując dane zamieszczone w tabeli 3 łatwo zauważyć, że wszystkie powłoki o założonej grubości t_n (kolumna 2) i module E równym 1724 MPa mają sztywność początkową S_0 nie mniejszą niż 750 N/m² tj. 0,75 kN/m². Dotyczy to zarówno powłok, których grubość nominalną przyjęto w oparciu o wytyczne [8] jak i powłok, których grubość celowo zmniejszono. Zastosowanie w omawianym przykładzie mniejszych grubości nominalnych t_n skutkuje oczywiście zmniejszeniem dopuszczalnej wartości parcia hydrostatycznego, które może być wywierane na powłokę z zewnątrz, a które ma związek z poziomem wody gruntowej powyżej jej dna. Jest to jednak do zaakceptowania, zważywszy, że np. większość przewodów wodociągowych nie jest układanych na głębokościach przekracza-

jących 2,0 m i raczej nie w miejscach, gdzie woda sięga powyżej poziomu terenu. Przypadki przewodów ułożonych w miejscach narażonych na podtopienia i na większych głębokościach należy rozpatrywać indywidualnie. W razie potrzeby można zawsze rozważyć zastosowanie grubszej powłoki. Należy jednak podkreślić, że wartości P w kolumnie 4 w tabeli 3 zostały wyznaczone przy założeniu owalizacji $q = 4\%$, dla której poprawka C jest równa 0,7. Jeżeli owalizacja q przewodu byłaby mniejsza od 4% to wówczas dopuszczalna wartość P byłaby wyższa, natomiast przy q większym od 4% niższa. Oczywiście zastosowanie powłok o grubościach nominalnych, takich jak podanych w tabeli 3 miałyby sens, o ile te grubości nie byłyby mniejsze od tych, wyznaczonych w oparciu o wzór (1), (3) i (6) dla ustalonych warunków obciążenia. W związku z powyż-

szym odradza się narzucanie a priori sztywności obwodowej powłoki bez wykonania stosownych obliczeń. Co najwyżej można powołać się na normę PN EN ISO 11298-4 [31] i zasugerować, że sztywność obwodowa powłoki klasy B i A nie powinna być niższa od wartości podanej w tabeli 3. Wymóg ten nie dotyczy oczywiście powłok klasy C.

Z kolei powłoki wzmocnione o wyższych modułach sprężystości E czy E_L mogą być po prostu cieńsze (tabela 4). Jeżeli jednak powłoki są poprawnie dobrane, zaprojektowane i zainstalowane to niezależnie od wartości ich modułów i grubości i tak powinny one zachować stateczność w ustalonych warunkach obciążenia przez zadeklarowany przez ich producentów okres. Teza ta jest słuszna o ile np. nie dojdzie do poważnych awarii przewodów wraz z zainstalowanymi w nich powłokami lub też do uszkodzenia samych powłok. Jak wynika z [21] uszkodzenia powłok typu CIPP mogą powstać już na etapie ich instalowania, ewentualnie mogą też pojawić się po upływie określonego czasu. W związku z powyższym trwałość takich powłok może być różna i znacznie odbiegać od wartości sugerowanych przez producentów.

Uwagi dotyczące sposobu ustalania wartości parametrów wytrzymałościowych powłok dla oddziaływań długotrwałych do celów projektowych

Przez wiele lat dość powszechną praktyką, stosowaną również w Stanach Zjednoczonych czy w Kanadzie, było projektowanie powłok typu CIPP przy założeniu, że wartości ich modułów sprężystości oraz wytrzymałości na zginanie dla tzw. oddziaływań długotrwałych stanowią około 50% ich wartości początkowych zgodnie ze wzorem (10) i (11) lub (12) wg [12] i to bez względu na rodzaj rozpatrywanej powłoki.

$$E_L = 50\% \cdot E = 0,5 \cdot E \quad (10)$$

$$\sigma_L = 50\% \cdot \sigma = 0,5 \cdot \sigma \quad (11)$$

ewentualnie

$$\sigma_{TL} = 50\% \cdot \sigma_T = 0,5 \cdot \sigma_T \quad (12)$$

gdzie:

- E – krótkotrwały moduł sprężystości przy zginaniu powłoki typu CIPP, MPa
- E_L – długotrwały moduł sprężystości przy zginaniu powłoki typu CIPP, MPa
- σ – wytrzymałość na zginanie powłoki typu CIPP, MPa
- σ_L – długotrwała wytrzymałość na zginanie powłoki typu CIPP, MPa
- σ_T – krótkotrwała wytrzymałość na zginanie powłoki typu CIPP, MPa
- σ_{TL} – długotrwała wytrzymałość na rozciąganie powłoki, MPa

W miarę postępu technologicznego i pojawienia się na rynku nowych wariantów powłok ciśnieniowych typu CIPP, a później powłok typu WHL, podejście do kwestii ich projektowania mocno ewoluowało. Pojawiły się m.in. zalecenia, by przy wymiarowaniu powłok wzmocnionych np. włóknami szklanymi stosować wartości parametrów wytrzymałościowych zredukowane do 80% ich wartości początkowych, a nie jak wcześniej do 50% [12]. Jedynie powłoki wykonane jako standardowe, tj. bez dodatkowego wzmocnienia, mogły być wymiarowane na dotychczasowych zasadach. Obecnie powłoki ciśnieniowe typu CIPP lub WHL projektuje się zgodnie z zaleceniami podanymi np. w [11]. Za dopuszczalne uznaje się przy tym stosowanie do celów projektowych parametrów wytrzymałościowych powłok, wyznaczonych w oparciu o wzory (13), (14) i (15) wg [35,36], ale pod warunkiem, że znana jest wartość współczynnika redukcyjnego f . Występujący w ww. wzorach współczynnik redukcyjny f uwzględnia spadek wartości ww. parametrów w funkcji czasu wskutek tzw. zjawiska pełzania (z ang. *creep factor*, *creep retention factor* lub po prostu *long term retention factor*). Powinien być on już ustalany indywidualnie dla każdej powłoki z osobna.

$$E_L = f \cdot E \quad (13)$$

$$\sigma_L = f \cdot \sigma \quad (14)$$

$$\sigma_{TL} = f \cdot \sigma_T \quad (15)$$

gdzie:

- E_L – długotrwały moduł sprężystości przy zginaniu powłoki CIPP, MPa
- E – krótkotrwały moduł sprężystości przy zginaniu powłoki typu CIPP, MPa
- σ_L – wytrzymałość na zginanie powłoki CIPP dla oddziaływań długotrwałych, MPa
- σ – krótkotrwała wytrzymałość na zginanie powłoki CIPP, MPa
- σ_{TL} – wytrzymałość na rozciąganie powłoki CIPP dla oddziaływań długotrwałych, MPa
- σ_T – krótkotrwała wytrzymałość na zginanie powłoki CIPP, MPa
- f – współczynnik redukcyjny właściwy dla danego rodzaju powłoki.

Stosowanie tej samej wartości współczynnika f do wzoru (13), (14) i (15) w odniesieniu do wybranej powłoki typu CIPP lub WHL przez pewien czas nie budziło aż tak dużych zastrzeżeń i było dość powszechne. Niektórzy producenci powłok do dziś preferują ten sposób ich wymiarowania, co znajduje też odzwierciedlenie w opublikowanych przez nich wytycznych [22]. Poniżej, w tabeli 6, podano przykładową charakterystykę powłoki ciśnieniowej typu CIPP klasy A do zastosowań ciśnieniowych, zamieszczoną w raporcie z 2019 r. [11]

Tabela 8. Parametry wybranej powłoki ciśnieniowej klasy A wg [11]
Table 8. Parameters of a chosen pressure lining falling into class A according to [11]

Lining System Characteristics:			
Initial flexural modulus (hoop)	$E_{FHS} =$	300,000 psi	
Initial flexural strength (hoop)	$\sigma_{FHS} =$	10,000 psi	
Initial flexural modulus (axial)	$E_{FAS} =$	300,000 psi	
Initial flexural strength (axial)	$\sigma_{FAS} =$	5,000 psi	
Long-term retention of flexural properties			
Long-term flexural modulus (hoop)	$E_{FHL} =$	150,000 psi	→ $f = 0,5$
Long-term flexural strength (hoop)	$\sigma_{FHL} =$	5,000 psi	
Long-term flexural modulus (axial)	$E_{FAL} =$	150,000 psi	
Long-term flexural strength (axial)	$\sigma_{FAL} =$	2,500 psi	
Tensile modulus (hoop)	$E_{TH} =$	1,000,000 psi	
Initial tensile strength (hoop)	$\sigma_{THS} =$	12,000 psi	
Tensile modulus (axial)	$E_{TA} =$	500,000 psi	
Initial tensile strength (axial)	$\sigma_{TAS} =$	6,000 psi	
Long-term retention of tensile properties			
Long-term tensile strength (hoop)	$\sigma_{THL} =$	6,000 psi	→ $f = 0,5$
Long-term tensile strength (axial)	$\sigma_{TAL} =$	3,000 psi	
Compression modulus (axial)		300,000 psi	
Coefficient of thermal expansion/contraction	$\alpha =$	0.00005 in/in/°F	
Poisson's Ratio of lining system	$\nu =$	0.30	
Hydrostatic design basis - stress basis (psi)	$HDB_\sigma =$	N/A psi	
Hydrostatic design basis - strain basis (in/in)	$HDB_\epsilon =$	0.0065 in/in	
Short-term burst pressure (ASTM D1599)	$P_B =$	600 psi	
Pressure rating factor (straight alignment)	$PRF_S =$	4.0	
Pressure rating factor (through bends)	$PRF_B =$	5.0	
Adhesion strength of liner to host pipe substrate	$\sigma_{ad} =$	500 psi	

Najnowsze badania w tym zakresie, których wyniki przedstawiono m.in. w [23], wykazały natomiast, że wartości parametrów wytrzymałościowych powłok ciśnieniowych dla oddziaływań długotrwałych, nie zawsze odpowiadają 50% a tym bardziej 80% ich wartości początkowych. Co więcej, badania te dowiodły, że możliwy do uzyskania stopień redukcji wytrzymałości na rozciąganie ww. powłok nie pokrywa się z przewidywanym stopniem redukcji ich wytrzymałości na zginanie czy modułu sprężystości przy zginaniu. Zaobserwowano także dużą rozbieżność w wynikach nawet w grupie podobnych do siebie powłok. Zdaniem autora pracy [23] wpływ na to miał nie tylko rodzaj zastosowanej do nasączania powłoki żywicy, ale również obecność lub brak w niej dodatkowego wzmocnienia.

Dość oryginalne podejście do kwestii projektowania powłok żywicznych typu CIPP oraz powłok natryskowych SIPP, w tym również do ustalania wartości ich parametrów wytrzymałościowych dla oddziaływań długotrwałych, zaprezentowano w raporcie [36]. Zgodnie z [36] długotrwała wytrzymałość powłok na rozciąganie $\sigma_{i,r}$, powinna być ustalona w oparciu o wzór (16) lub (17). Dopiero tak wyznaczoną wartość parametru $\sigma_{i,r}$ można dalej podstawić do wzoru (2) lub (3) za σ , aby móc wyznaczyć minimalną grubość powłoki t_{avg} .

$$\sigma_{i,r} = \sigma_i (x_i \cdot \ln(t_h) + c_i) \quad (16)$$

$$\sigma_{i,r} = \sigma_i (x_i \cdot t_h^{c_i}) \quad (17)$$

gdzie:

- σ_i – krótkotrwała wytrzymałość powłoki na rozciąganie, MPa

t_h – założony czas eksploatacji wyrażony w godz. ($t = 50 \text{ lat} = 438\,000 \text{ godz.}$)

x_i, c_i – współczynniki redukcyjne, uwzględniające długotrwały wpływ obciążenia wg [36]

Wzór (16) lub (17) może być również stosowany do wyznaczenia wartości wytrzymałości na zginanie dla oddziaływań długotrwałych. Należy tylko pamiętać, by zamiast σ_i podstawić do ww. wzorów krótkotrwałą wytrzymałość na zginanie σ . Z kolei do określenia wartości modułu sprężystości przy rozciąganiu dla oddziaływań długotrwałych E_{iL} autorzy raportu [36] sugerują stosować wzór (18).

$$E_{iL} = f \cdot E_i = x_{i,c} \cdot t_h^{c_c} \quad (18)$$

gdzie:

E_{iL} – współczynnik redukcyjny, uwzględniający długotrwały wpływ obciążenia,

E_i – krótkotrwały moduł sprężystości przy zginaniu, MPa,

t_h – założony czas eksploatacji wyrażony w godz. ($t = 50 \text{ lat} = 438\,000 \text{ godz.}$),

$x_{i,c}, c_c$ – współczynniki redukcyjne do ustalenia wartości modułu sprężystości przy rozciąganiu dla oddziaływań długotrwałych wg [36].

W swoim raporcie [36] autorzy zwracają jednak uwagę, że dokładność modelu prognostycznego wyrażonego za pomocą wzoru (18) maleje istotnie już po przekroczeniu $t_h = 1000 \text{ godz.}$ dla powłok typu CIPP oraz $t_h = 100 \text{ godzin}$ dla powłok typu SIPP (powłoki natryskowe). Kolejnym mankamentem ww. modelu

Tabela 9. Karta danych o ciśnieniowym rękawie żywicznym typu CIPP klasy C – opracowanie własne
Table 9. Data card for pressure CIPP resin lining falling into class C – own work

Parametr	Rękaw CIPP / Powłoka CIPP klasy C
Krótkotrwały moduł sprężystości przy zginaniu, E	nie jest wymagany ¹⁾
Współczynnik redukcji f_{CR}	nie jest wymagany ¹⁾
Długotrwały moduł sprężystości przy zginaniu, E_L [MPa]	nie jest wymagany ¹⁾
Krótkotrwała wytrzymałość na zginanie, $\sigma_1^{(1)}$ [MPa]	wg ASTM D790 [3] wg PN-EN ISO 178:2003+A1 [25]
Współczynnik redukcji $f_{SR}^{(1)}$	wg ASTM D2290 [6] PN EN ISO 899-2 [29]
Długotrwała wytrzymałość na zginanie, $\sigma_L^{(1)}$ [MPa]	$\sigma_L = f_{SR} \cdot \sigma$
Krótkotrwała wytrzymałość na rozciąganie, σ_T [MPa]	wg ASTM D638 [2] lub PN-EN ISO 527-4 [26] PN-EN ISO 527-5:2022-06 [27] PN-EN 2561 [24]
Współczynnik redukcji f_{TSR}	wg ASTM D2290 [6] lub PN-EN ISO 899-1 [28]
Długotrwała wytrzymałość na rozciąganie, σ_{TL} [MPa]	$\sigma_{TL} = f_{TSR} \cdot \sigma_T$
Wytrzymałość na oderwanie, σ_{ad} [MPa]	wg ASTM D903 [4] lub ISO 8510-1 [32,33]
Krótkotrwała wytrzymałość na rozerwanie, P_B [MPa]	wg ASTM D1599 Procedura A [5]
Współczynnik rozszerzalności cieplnej, α [1/K]	wg ASTM E831 [7] wg ISO 11359-2 [16]
Współczynnik Poissona	wg ASTM D638 [2] lub PN EN ISO 527-4 [26] lub PN EN ISO 527-5 [27]
Owalizacja powłoki ¹⁾ [%]	min. 2% wg [12]
Minimalny okres trwałości powłoki [lata]	50 wg [8,9,10,17]
Współczynnik bezpieczeństwa SF	2,0 wg [8,9,10,17]

1) pod warunkiem, że grubość rękawa liczy się w oparciu o [8] i nie przewiduje się, że przewód będzie opróżniony z wody na dłuższy czas. W przypadku korzystania z metody, zaprezentowanej w [37] ten moduł jest potrzebny do określenia możliwości rękawa do pokrywania otworów o średnicy d.

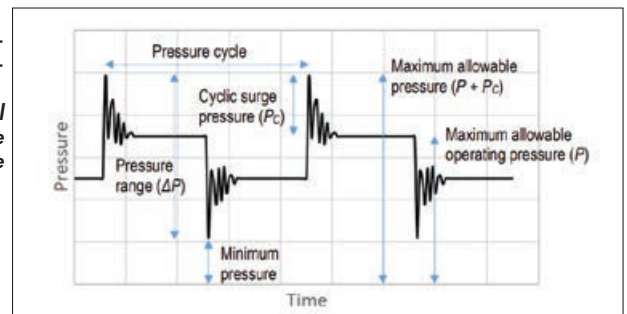
jest także to, że został on opracowany w oparciu o wyniki badań przeprowadzonych z wykorzystaniem zaledwie 6 różnych powłok (3 powłok typu CIPP i 3 powłok typu SIPP). Aby uniknąć dalszych nieporozumień, za celowe uznaje się poszerzenie zakresu dotychczasowych badań w tym zakresie i wprowadzenie karty danych o powłoce, w której oprócz wartości jej parametrów wytrzymałościowych podane byłyby również wartości wszystkich współczynników redukcyjnych (tabela 7).

Dla powłok klasy B lub A moduł sprężystości przy zginaniu E należy ustalić w oparciu o [3] lub [25].

Ocena możliwości pogrubienia powłok ciśnieniowych stosowanych w ramach jednej technologii

Z uwagi na duże zróżnicowanie powłok ciśnieniowych typu CIPP i WHL i różne wymagania, jakie muszą one spełniać w ramach poszczególnych klas zgodnie z normą [30] zaleca się zachowanie szczególnej ostrożności przy podejmowaniu decyzji o ewentualnym pogrubieniu powłok niższej klasy celem uzyskania efektu statycznie – wytrzymałościowego typowego dla powłok klasy wyższej. W przypadku powłok klasy B dopuszcza się możliwość ich pogrubienia w stopniu umożliwiającym przystosowanie ich do przenoszenia w całości naprężeń od ciśnienia wewnętrznego. Dodatkową korzyścią, wynikającą z zastosowania takiego rozwiązania, jest wzrost sztywności obwodowej ww. powłok, a tym samym ich możliwości do przenoszenia obciążeń zewnętrznych (ang. external load – resisting capacity). Celowe zwiększenie grubości powłok typu CIPP lub WHL może jednak prowadzić do spadku ich całkowitej wytrzy-

Rys. 1. Wahania ciśnienia w przewodzie w trakcie jego eksploatacji wg [35]
Fig 1. Changes in the internal pressure values during the exploitation of a pipeline according to [35]



małości na rozciąganie. Odradza się natomiast pogrubiania powłok klasy C, które zwykle mają niższe moduły sprężystości przy zginaniu, niższą wytrzymałość na rozciąganie i większą przyczepność do ścian wewnętrznych przewodów w porównaniu z powłokami klasy B lub A. Nie bez znaczenia jest tu fakt, że większość powłok klasy C nie ma dodatkowego wzmocnienia np. z włókien szklanych.

Spadek wytrzymałości na rozciąganie powłok wskutek ich pogrubienia nie musi jednak od razu wiązać się z pogorszeniem ich zdolności do przenoszenia naprężeń od ciśnienia wewnętrznego. Jeżeli znana jest rzeczywista wytrzymałość takiej pogrubionej powłoki to ciśnienie P, które może być na nią wywierane, da się oszacować w oparciu o wzór (18) wg [8,11]. Wartość ww. ciśnienia może być zbliżona lub nawet większa od tej, która obowiązywałaby dla powłok o standardowej grubości i wytrzymałości.

$$P = \frac{2 \cdot \sigma_{TL}^i}{\left(\frac{D}{t_{zat.}} - 1\right) \cdot N} \quad (18)$$

gdzie:

P – maksymalne ciśnienie robocze, które może być wywierane na powłokę w sposób ciągły, MPa

σ_{TL}^i – prognozowana wytrzymałość na rozciąganie pogrubionej powłoki dla działań długotrwałych, MPa

D – średnica zewnętrzna powłoki, mm

$t_{zat.}$ – założona grubość powłoki, mm

N – współczynnik bezpieczeństwa, zwykle N = 2,0.

Maksymalne ciśnienie, jakie może być wywierane na pogrubioną powłokę podczas np. uderzenia hydraulicznego można z kolei oszacować ze wzoru (20) wg [8,11]

$$P_s + P = \frac{2,8 \cdot \sigma_{TL}^i}{\left(\frac{D}{t_{zat.}} - 1\right) \cdot N} \quad (20)$$

gdzie:

P_s – wzrost ciśnienia w przewodzie wskutek np. uderzenia hydraulicznego, MPa

P, D, $t_{zat.}$, N, σ_{TL}^i – jak we wzorze (18) lub (19).

Decydując się na ewentualne pogrubienie powłoki niższej klasy i przystosowanie jej do przenoszenia w całości naprężeń od ciśnienia wewnętrznego należy liczyć się z koniecznością zweryfikowania jej wytrzy-

małości zmęczeniowej zgodnie z procedurą A wg ASTM D2990 [6] lub ISO 13003 [15]. Jest to szczególnie ważne w przypadku powłok, które planuje się zainstalować w przewodach, w których ciśnienie zmienia się cyklicznie od wartości P_{min} do $P + P_c$ zgodnie z rys. 1 wg [35].

Dla takiej powłoki powinien być też opracowany wykres naprężeń w funkcji liczby cykli do zniszczenia zgodnie z [13,14]. Wskazane byłoby też sprawdzenie, czy przypadkiem wytrzymałość zmęczeniowa powłoki dla tzw. oddziaływań długotrwałych $\sigma_{thl,f}$ nie jest mniejsza od jej wytrzymałości na rozerwanie przy rozciąganiu, $\sigma_{thl,r}$. Jeśli taka sytuacja miałaby miejsce to wówczas należałoby przeprowadzić dla niej obliczenia sprawdzające z uwzględnieniem tym razem wartości $\sigma_{thl,f}$ [35]. Każda powłoka klasy B i A musi mieć natomiast określoną wytrzymałość ścianki na rozciąganie w kierunku obwodowym, wyrażoną w N/mm zgodnie z normą [31]. O ewentualnym zastosowaniu grubszej powłoki hydraulicznej. Ograniczenia dotyczące stosowania powłok żywicznych np. w przewodach o mniejszych średnicach zostały omówione ze szczegółami w [20].

Podsumowanie

Powłoki lub rękawy żywiczne do odnowy przewodów ciśnieniowych mogą stanowić zarówno rozwiązania niekonstrukcyjne jak i konstrukcyjne. Dobór odpowiedniej powłoki zależy od stanu technicznego przewodu, w którym mają być one zainstalowane, rodzaju i geometrii ubytku stwierdzonego w przewodzie oraz wysokości ciśnienia, które może być wywierane na nie w sposób ciągły. Stosownie do potrzeb należy również wybrać odpowiednią metodę obliczeniową, ewentualnie przeprowadzić dodatkowe badania powłok pozwalające na weryfikację ich wytrzymałości w zadanych warunkach eksploatacyjnych. Planując zastosowanie powłok lub rękawów żywicznych należy mieć też na uwadze inne kryteria, w tym w szczególności kryterium hydrauliczne oraz kryterium trwałości, rozumiane tu przez pryzmat dopasowania rozwiązania do warunków pracy i możliwości zabezpieczenia przewodu przed agresywnością transportowanego w nim medium. Zaletą współcześnie stosowanych powłok i rękawów do zastosowań ciśnieniowych jest niewątpliwie to, że posiadają one zwykle zintegrowaną dodatkową warstwę ochronną, wykonaną z polietylenu, polipropylenu lub innego termoplastycznego elastomeru. Coraz częściej do wykonania takich warstw ochronnych wykorzystuje się jednak termoplastyczne elastomery poliestrowe lub poliuretanowe, które charakteryzują się podwyższoną odpornością na ścieranie czy odpornością chemiczną. Innym rozwiązaniem jest wcześniejsze zainstalowanie w przewodzie prelinera (dotyczy zarówno przewodów kanalizacyjnych jak i wodociągowych).

Odradza się jednak sugerowanie lub narzucanie sztywności obwodowej powłoki bez wcześniejszego zweryfikowania stanu technicznego przewodu wodociągowego, warunków jego eksploatacji, a także określenia ostatecznego efektu statycznie – wytrzymałościowego, jaki planuje się dzięki niej osiągnąć. Jest to niezwykle ważne biorąc pod uwagę fakt, że niektóre powłoki wcale nie muszą mieć np. dużej sztywności obwodowej lub wysokiego modułu sprężystości przy zginaniu, aby mogły spełniać swoją rolę. W przypadku powłok renowacyjnych klasy C lub krótkich rękawów spełniających wymagania typowe dla klasy C zarówno moduł E jak i sztywność obwodowa S mogą być nawet niskie lub nawet bardzo niskie. Nie powinno to jednak dziwić zważywszy na fakt, że powłoki te mogą być instalowane wyłącznie w przewodach, które zachowały swoją nośność i zwykle nie wymagają dodatkowego wzmocnienia na obwodzie. Na pewno należy zwracać uwagę na ich wytrzymałość na rozciąganie i zginanie, a także na wytrzymałość na oderwanie. W przypadku przewodów, w których ciśnienie może wzrosnąć do wartości $P_w + P_s$ powinno się też zweryfikować wytrzymałość ww. powłok na

rozerwanie. Do cienkościennych powłok typu NFL należy podchodzić indywidualnie.

Zainstalowanie powłok (wykładzin) lub rękawów żywicznych w przewodach wodociągowych, które zachowały swoją nośność nie zwalnia przedsiębiorstw wodociągowo – kanalizacyjnych z monitorowania stanu technicznego ww. przewodów. Jest to szczególnie ważne zważywszy na fakt, że przewody te mogą być poddane oddziaływaniu różnych czynników na zewnątrz – i wewnątrz przewodowych, powodujących często pogorszenie tego stanu [19]. Nie można też wykluczyć zdarzeń losowych, które mogą prowadzić do wystąpienia poważnej awarii przewodu i wymusić np. wymianę przewodu na pewnej długości L.

LITERATURA

- [1] ASME PCC-2-2018: Repair of Pressure Equipment and Piping
- [2] ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
- [3] ASTM D790-17: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
- [4] ASTM D-903-17: Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds
- [5] ASTM D1599-18: Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings
- [6] ASTM D2290-17: Standard Test Methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics
- [7] ASTM E831 – 19: Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis
- [8] ASTM F1216-22: Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube
- [9] ASTM F1743-22: Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by Pulled-in-Place Installation of Cured-in-Place Thermosetting Resin Pipe (CIPP)
- [10] ASTM 2019-20: Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Pulled in Place Installation of Glass Reinforced Plastic Cured-in-Place (GRP-CIPP) Using the UV-Light Curing Method
- [11] AWWA Report: Structural classification of pressure pipe linings, 2019, p. 44
- [12] Doherty, I., Downey, D., Macey, C., Rahaim, K., and Sarrami, K.: NASTT's Cured-In-Place Pipe (CIPP) Good Practices Guidelines, 2017
- [13] ISO 7509:2015 Plastics piping systems. Glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) pipes. Determination of time to failure under sustained internal pressure
- [14] ISO 10928:2016 Plastics piping systems. Glass – reinforced thermosetting plastics (GRP) pipes and fittings. Methods for regression analysis and their use
- [15] ISO 13003: 2003: Fibre-reinforced plastics. Determination of fatigue properties under cyclic loading conditions
- [16] ISO 11359-2:2021: Plastics – Tworzywa sztuczne – Analiza termomechaniczna (TMA) – Część 2: Wyznaczanie współczynnika liniowego rozszerzalności cieplnej i temperatury zeszczenia
- [17] Kuliczkowski A.: Rury kanalizacyjne t. 2. Projektowanie konstrukcji, Monografia nr 42, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2004
- [18] Kuliczkowski A. i inni: Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska, Wydawnictwo Seidel – Przywecki, 2019
- [19] Kuliczkowski A.: Ekspertyzy konstrukcyjne przewodów wodociągowych sposobem na eliminację ich awarii, Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Nr 6(57), 2011, str. 90-94
- [20] Kuliczkowski A.: Optymalna grubość powłok CIPP stosowanych w bezwykopowej rehabilitacji przewodów ciśnieniowych, Instal 5/2020, s. 41-46 DOI 10.36119/15.2020.5.7
- [21] Kuliczkowski A., Kuliczkowska E.: Uszkodzenia i awarie rur i powłok z tworzyw sztucznych w bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych, Instal 10/2023, s. 21-26 DOI 10.36119/15.2023.10.4
- [22] Lanzo engineering design guide for rehabilitation with cured-in-place pipe second edition, 2010
- [23] Olukayode Awe: Cured-in-place pipe pressure liner experimental study. A thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Waterloo, Ontario, Canada, 2023
- [24] PN-EN 2561:1999: Lotnictwo i kosmonautyka – Tworzywa sztuczne wzmocnione włóknem węglowym. Laminy jednodierunkowe. Próba rozciągania równoległe do kierunku włókna
- [25] PN-EN ISO 178:2003+A1:2005 Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości przy zginaniu.
- [26] PN-EN ISO 527-4:2022-04: Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości przy rozciąganiu Część 4: Warunki badania kompozytów tworzywowych izotropowych i ortotropowych wzmocnionych włóknem
- [27] PN-EN ISO 527-5:2022-06: Tworzywa sztuczne – Oznaczanie właściwości przy rozciąganiu – Część 5: Warunki badania kompozytów tworzywowych wzmocnionych jednodierunkowo włóknem
- [28] PN-EN ISO 899-1:2005: Tworzywa sztuczne – Oznaczanie charakterystyki pełzania – Część 1: Pełzanie przy rozciąganiu
- [29] PN-EN ISO 899-2:2002: Tworzywa sztuczne – Oznaczanie pełzania – Część 2: Pełzanie podczas zginania przy trzypunktowym obciążeniu
- [30] PN-EN ISO 11295:2022-07 – Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych stosowane przy rehabilitacji technicznej rurociągów – Klasyfikacja i przegląd działań strategicznych, taktycznych i operacyjnych
- [31] PN EN ISO 11298-4: 2021-09 – Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do renowacji podziemnych sieci wodociągowych – Część 4: Wykładanie rękawami utwardzanymi na miejscu
- [32] PN – EN ISO 8510-1:2014-05: Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na oddzielenie połączeń elementu giętkiego ze sztywnym – Część 1: Oddzielenie pod kątem 90°
- [33] PN-EN ISO 8510-1:2010 Kleje – Oznaczanie wytrzymałości na oddzielenie połączeń elementu giętkiego ze sztywnym – Część 2: Oddzielenie pod kątem 180 stopni
- [34] Selvakumar A., Morrison R., Sangster T., Downey D. B., Matthews J. C., Condit W.: State of Technology for Rehabilitation of Water Distribution Systems, Technical Report, March 2013
- [35] Shannon B., Guoyang Fu, Deo R., Azoor R., Kodikara J.: Theory Manual. Module 4 – Lined pipe analysis, 2021
- [36] Shannon, B., Fu, G., Azoor, R., Deo, R., & Kodikara, J.: Long-term properties of cured-in-place pipe liner material, Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(7)
- [37] WSA Water Industry Standard for Cured-in-place pipes (CIPP) used for the renovation of drinking water pipes, Published by Water Services Association of Australia, 2021