Optymalna grubość powłok CIPP stosowanych w bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych

Optimal thickness of cipp liners used in trenchless sewer rehabilitation

ANDRZEJ KULICZKOWSKI

DOI 10.36119/15.2020.5.7

Celem artykułu jest ustalenie wpływu różnych czynników na grubość rehabilitacyjnych powłok w technologii CIPP, która jest obecnie najczęściej stosowana w bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych. Przedstawiono problemy dotyczące wpływu następujących czynników na grubość powłok rehabilitacyjnych: sztywności obwodowej, modułu E, zwierciadła wody gruntowej, materiału rehabilitowanej rury oraz rodzaju zastosowanej żywicy. Sformułowano zalecenia dotyczące ulepszenia obecnie stosowanych metod projektowania powłok żywicznych.
Słowa kluczowe: przewody kanalizacyjne, technologie bezwykopowe, powłoki CIPP, projektowanie

The aim of the article is to determine the impact of various factors on the thickness of rehabilitation liners in CIPP technology, which is currently the most commonly used in trenchless rehabilitation of sewage pipelines. Problems concerning the influence of the following factors on the thickness of rehabilitation liners are presented: stiffness of the pipe, E-modulus, groundwater table, rehabilitated pipe material and the type of resin used. Recommendations have been formulated to improve the current methods of designing resin liners.
Keywords: sewers, trenchless technologies, CIPP liners, design

Uwagi wstępne

Z uwagi na nowość wielu technologii bezwykopowych niezbędne jest podjęcie wielu nowych tematów badawczych mających na celu opracowanie poprawnych metod projektowania rehabilitacyjnych powłok żywicznych CIPP.

Technologie bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych zaczęto powszechniej stosować w niektórych krajach już w latach 70. ubiegłego wieku [17] a w Polsce w latach 90. [4-6]. Najczęściej pojęcie bezwykopowa odnowa ujmuje bezwykopowe naprawy, bezwykopowe rehabilitacje i bezwykopowe wymiany. Z kolei bezwykopowe rehabilitacje mogą być wykonywane w trzech opcjach jako bezwykopowe renowacje (ang. non structural rehabilitation), bezwykopowe częściowe rekonstrukcje (ang. partially or semi structural rehabilitation) oraz pełne rekonstrukcje (ang. fully structural rehabilitation).

Jedną z najbardziej popularnych obecnie technologii bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych jest technologia utwardzanych in situ (na miejscu) powłok żywicznych CIPP (ang. cured in place pipe). Pierwsze jej zastosowanie miało miejsce w 1971 roku a komercyjne jej stosowanie datuje się od 1973 roku. Powszechne stosowanie tej technologii wynika głównie z bardzo wielu jej zalet zestawionych np. w [7,17].

Technologie utwardzanych powłok żywicznych różnią się w chwili obecnej bardzo wieloma czynnikami, w tym m.in.:

- rodzajem materiałów tekstylnych nasączanych żywicami,
- rodzajem żywic stosowanych do nasączania materiałów tekstylnych,
- rodzajem folii ochronnych,
- sposobami nasączania powłok żywicznych,
- sposobami instalacji powłok nasączonych żywicami,
- sposobami utwardzania powłok żywicznych,
- oraz szeregiem innych czynników, takich np. jak: zakres średnic stosowanych powłok, maksymalne długości jednorazowo instalowanych powłok czy ich parametrami wytrzymałościowymi.

Wśród wielu wyzwań dotyczących bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych sformułowanych w [12] jednym z najistotniejszych jest poprawny dobór grubości tychże powłok, gwarantujący ich bezpieczną eksploatację. Celem tego artykułu jest przybliżenie problematyki wpływu niektórych parametrów na grubość projektowanych powłok CIPP a także wskazanie na pewne problemy związane z tym tematem, nadal wymagające rozwiązania.

Wpływ sztywności obwodowej na grubość rehabilitacyjnych powłok CIPP

Sztywność obwodową S_o utwardzonych *in situ* powłok żywicznych oblicza się ze wzoru:

$$S_o = \frac{E_R \cdot J}{d_m^{\,3}} = \frac{E_R}{12}\left(\frac{s}{d_m}\right)^3 \qquad (1)$$

gdzie:

E_R – moduł sprężystości materiału konstrukcyjnego powłoki [N/mm^2],
J – jednostkowy moment bezwładności ścianki powłoki [N/mm^2],
s – grubość powłoki [mm],
d_m – średnia średnica powłoki [mm].

Dla warunków krótkotrwałych do powyższego wzoru podstawia się wartość modułu sprężystości krótkotrwałego E_{RK}, a dla warunków długotrwałych wartość modułu sprężystości długotrwałego E_{RL}. Próbki powłok pobrane z utwardzonej powłoki żywicznej po zakończeniu rehabilitacji prze-

prof. dr hab. inż. Andrzej Kuliczkowski, https://orcid.org/0000 0001 9807 6190 – Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki. Adres do korespondencji/Corresponding author: akuli@wp.pl

wodu, sprawdzane są w warunkach laboratoryjnych czy uzyskały sztywność obwodową obliczaną z powyższego wzoru dla krótkotrwałego modułu sprężystości.

W niektórych przetargach narzuca się *a priori* sztywność obwodową utwardzanych *in situ* powłok żywicznych. Jest to bardzo poważny błąd nie mający jakiegokolwiek uzasadnienia technicznego. Przykładowo w niektórych przetargach zamieszczono następującą informację: „sztywność obwodowa konstrukcji kanału o przekroju kołowym po renowacji nie może być mniejsza niż 7 kN/m^2, a w przypadku kolektorów zlokalizowanych na terenach zielonych sztywność obwodowa powinna wynosić minimum 4 kN/m^2".

W związku z powyższym zostanie wykazane:

– po pierwsze, iż powyższy zapis jest błędny,
– po drugie, iż brak jest uzasadnienia do oddzielnego traktowania kanałów ułożonych pod i poza terenami zielonymi,
– po trzecie, jakie konsekwencje techniczne i ekonomiczne wynikają z tego błędnego zapisu.

Poniżej zamieszczono przykłady z konkretnych projektów rehabilitacyjnych [9] wykonanych przez autora tego artykułu uzasadniających wyżej sformułowane trzy tezy.

W pierwszym przykładzie pokazanym w tabeli 1 zamieszczono wyniki obliczeń statyczno – wytrzymałościowych wykonanych w oparciu o [1,8] dla utwardzanej *in situ* powłoki żywicznej o średnicy zewnętrznej 400 mm i module sprężystości krótkotrwałej E_{RK} = 3000 N/mm^2. Z obliczeń uzyskano powłokę o grubości 8,5 mm i sztywności obwodowej 2,48 kN/m^2. Z katalogu przyjęto do instalacji powłokę o grubości 9,0 mm i nieznacznie tylko większej sztywności obwodowej równej 2,95 kN/m^2.

Przyjmując natomiast wyżej sformułowane błędne zalecenie należałoby w analizowanym przypadku zastosować powłokę o sztywności obwodowej 7 kN/m^2 (zamiast o sztywności obwodowej równej 2,95 kN/m^2) i odpowiadającej tej sztywności grubości powłoki 11,97 mm (katalogowej 12,0 mm), zamiast o grubości 9,0 mm.

W analizowanym przykładzie zastosowana powłoka byłaby zatem grubsza od wymaganej o 3 mm co w istotnym stopniu zwiększyłoby koszty bezwykopowej rehabilitacji kanału. Parametry analizowanych powłok zestawiono w tab.1.

Sztywności obwodowe utwardzanych *in situ* powłok żywicznych mogą uzyskiwać różne wartości na różnych odcinkach tego samego kanału poddawanego odnowie.

W tab. 2 zamieszczono przykład z obliczeń projektowych dotyczących wymaganych grubości powłok żywicznych wykonanych przez autora tego opracowania dla kanału kamionkowego o średnicy wewnętrznej ϕ200 mm.

Tab.1. Zestawienie parametrów analizowanej powłoki żywicznej ϕ400 mm
Tab. 1. List of parameters of the analyzed resin liner ϕ400 mm

Parametry powłoki	a) dla danych uzyskanych z obliczeń statyczno-wytrzymałościowych	b) dla danych jak w pkt a), ale przyjęte z katalogu producenta	c) ustalone wg wymienionych wcześniej błędnych zaleceń
Grubość [mm]	8,5	9,0	12,0
Sztywność obwodowa [kN/m^2]	2,48	2,95	7,00

Tab. 2 Parametry powłok żywicznych dla kanału ϕ200 mm, uzyskane z obliczeń statyczno-wytrzymałościowych
Tab. 2 Parameters of resin liner for the sewer ϕ200 mm, obtained from static calculations

Wymagana grubość powłoki żywicznej	Wymagana sztywność powłoki żywicznej	Wybrane parametry charakteryzujące odnawiany kanał kamionkowy. Oznaczenia: h – wysokość nadsypki gruntowej, h_w – wysokość zwierciadła wody gruntowej, L – długość kanału
3,0	0,9	kanał częściowo uszkodzony, ulica miejska, h = h_w = 3,40 m (powłoka renowacyjna), L = 713,15 m
4,1	2,3	kanał całkowicie uszkodzony o nieznacznych deformacjach przekroju poprzecznego, ulica miejska, h = h_w = 3,40 m (powłoka rekonstrukcyjna), L = 258,50 m
4,8	3,8	kanał całkowicie uszkodzony o deformacjach przekroju poprzecznego równych około 5%, ulica miejska, h = h_w = 3,02 m (powłoka rekonstrukcyjna), L = 23,00 m
6,3	8,7	kanał całkowicie uszkodzony o znacznej deformacji przekroju poprzecznego wynoszącej około 10%, ulica miejska, h = h_w = 2,72 m (powłoka rekonstrukcyjna), L = 38,00 m

Tab. 3. Parametry żelbetowego kolektora kanalizacyjnego ϕ1200 mm i wymaganej powłoki rehabilitacyjnej
Tab. 3. Parameters of reinforced concrete sewer main Ø1200 mm and the required rehabilitation coating

Parametry odnawianego kolektora				Parametry powłoki rekonstrukcyjnej	
Średnica wewnętrzna [mm]	Wysokość nadsypki oraz zwierciadła wody gruntowej [m]	Deformacja przekroju [%]	Długość kanału [m]	Grubość [mm]	Sztywność obwodowa [kN/m^2]
1200	1,58 – 2,32	2	550,05	18,4	0,94
	3,85 – 4,65		144,37	25,2	2,5
	4,65 – 6,52		206,77	28,8	3,8
	6,52 – 8,17		65,89	31,6	5,0
	9,31 – 10,76		598,62	35,5	7,1

Z analizy obliczeń statyczno – wytrzymałościowych zestawionych w tab. 2 wynika:

– po pierwsze, że dla kanału o tej samej średnicy ułożonego w jednym ciągu na tej samej ulicy, uzyskuje się różne sztywności obwodowe powłok na różnych odcinkach jego ułożenia,
– po drugie, iż sztywność obwodowa uzyskana z obliczeń może być w niektórych przypadkach mniejsza niż wartość 1 kN/m^2 narzucona w normie [16] jako minimalna. Zdaniem autora brak jest jakiegokolwiek uzasadnienia technicznego do zwiększania w takim przypadku sztywności obwodowej do wartości 1,0,
– po trzecie, za nieuzasadnione pod względem technicznym i ekonomicznym należy uznać wspomniane wcześniej błędne zalecenie, wg którego sztywności obwodowe ujęte w pierwszych trzech wierszach tab. 2 należałoby zwiększać kolejno z 0,9, 2,3 i 3,8 do wartości 7,0 kN/m^2 zalecanej tam do przyjmowania dla kanałów ułożonych pod ulicami.

Kolejny trzeci przykład dotyczy również projektu żywicznej powłoki rekonstrukcyjnej utwardzanej *in situ,* ale tym razem zaprojektowanej dla kanału żelbetowego ϕ1200 mm ułożonego w terenie zielonym. Parametry charakteryzujące ten projekt zestawiono w tab. 3.

Z analizy wyników obliczeń statyczno – wytrzymałościowych zestawionych w tab. 3 wynika:

– po pierwsze, że dla tego samego kolektora o średnicy 1200 mm ułożonego w terenie zielonym wraz z jego zagłębianiem się w gruncie zwiększa się grubość, a tym samym sztywność wymaganej powłoki rehabilitacyjnej. Zatem za uzasadnione ekonomicznie należy uznać w przypadku długich kolektorów różnicowanie grubości stosowanych w nich powłok rehabilitacyjnych. Gdyby na trasie całego kolektora przyjęto największą z uzyskanych grubości powłoki tj. 35,5 mm, to np. na trasie 550,05 m gdzie wystarczająca jest powłoka o grubości 18,4 mm zostałaby ona niepotrzebnie pogrubiona o 17,1 mm do grubości 35,5 mm (grubość jej uległaby prawie podwojeniu),

– po drugie, za nieuzasadnione pod względem technicznym i ekonomicznym należy uznać wcześniej podane zalecenie, wg którego sztywności obwodowe ujęte w pierwszych trzech wierszach tab. 3 należałoby zwiększyć kolejno z 0,94, 2,5 i 3,8 do wartości 4,0 kN/m^2 zalecanej tam do przyjmowania dla terenów zielonych.

Z uwagi na bardzo głębokie posadowienie kolektora ϕ1200 mm w gruncie sięgające do 10,76 m (tab.3) uzyskuje się w wyniku przeprowadzonych obliczeń statyczno – wytrzymałościowych bardzo dużą grubość powłoki żywicznej wynoszącą dla tego zagłębienia 35,5 mm. W rzeczywistości obciążenia oddziałujące od ciężaru gruntu na konstrukcję kanału dawno ułożonego w gruncie można przyjąć znacznie mniejsze wg [8], ale tylko wtedy gdy ekspertyza geotechniczna potwierdzi, iż w gruncie zaistniały procesy reologiczne. W tym przypadku wymagana grubość powłoki żywicznej uległaby znaczącemu zmniejszeniu.

Błąd polegający na ustalaniu *a priori* innej sztywności obwodowej powłok żywicznych dla kanałów ułożonych pod terenami zielonymi i ulicami miejskimi wynika z powszechnego przekonania, że obciążenia użytkowe od taboru samochodowego oddziałujące na konstrukcje kanałowe są wyższe w przypadku kanałów ułożonych pod ulicami aniżeli pod terenami zielonymi.

Przykładowo w wyżej zacytowanych błędnych zaleceniach zaproponowano, aby dla kanałów ułożonych pod nawierzchniami ulicznymi przyjmować sztywność obwodową utwardzanych *in situ* powłok żywicznych równą 7 kN/m^2, a pod terenami zielonymi 4 kN/m^2.

Jak już wcześniej stwierdzono, sam fakt ustalania *a priori* sztywności obwodowej powłok należy uznać za metodologicznie błędny. Natomiast różnice w wielkości obu analizowanych obciążeń użytkowych (pod ulicami i terenami zielonymi) są z reguły niewielkie. Często zdarza się, że obciążenia użytkowe od taboru samochodowego pod terenami zielonymi są nawet większe od tych, które występują pod nawierzchniami ulicznymi.

W tabeli 4 podano przykładowe obliczenia obciążeń użytkowych oddziałujących na konstrukcję kanałową, obliczone wg metody ATV 127 P zamieszczonej m.in. w [8], uwzględniając także odciążające oddziaływanie nawierzchni ulicznej. Obciążenia obliczono dla kanału o średnicy 500 mm po przyjęciu nawierzchni ulicznej betonowej oraz gruntów spoistych mieszanych.

Wyniki obliczeń obciążeń użytkowych zestawione w tab. 4 wskazują, że:

– po pierwsze, obciążenia użytkowe od taboru samochodowego przyjmują niewielkie wartości w stosunku do podstawowego obciążenia jakim jest ciężar gruntu. Podczas gdy obciążenie od ciężaru nadsypki gruntu o wysokości 1,0 m wynosi około 20 kN/m^2 obciążenie użytkowe od taboru samochodowego na głębokości np. 4 m w zależności od ciężaru pojazdu i rodzaju użytkowania terenu wynosi tylko 0,7 lub 2,4 kN/m^2, będąc odpowiednikiem nadsypki gruntu równej kolejno 3,5 cm i 12 cm,
– po drugie, obciążenia od samochodu o ciężarze 300 kN pod ulicą miejską są zdecydowanie mniejsze od obciążeń od samochodu o ciężarze 120 kN w terenie zielonym. Brak jest zatem jakichkolwiek podstaw, aby wymagać większą sztywność obwodową powłok żywicznych instalowanych w kanałach ułożonych pod nawierzchniami ulicznymi, od tych które zaleca się dla kanałów ułożonych pod terenami zielonymi.

Tab. 4. Wartości obciążeń użytkowych oddziałujących na kanał
Tab. 4. The values of the traffic loads affecting the sewer

Wysokość nadsypki nad wierzchołkiem kanału [m]	Ulica miejska Samochód 300 kN				Teren zielony nieutwardzony, pojazd awaryjny (eksploatacyjny) 120 kN			
	Obciążenie użytkowe wyjściowe kN/m^2	Współcz. dynamiczny [-]	Współcz. odciążający [-]	Obciążenie użytkowe [kN/m^2]	Obciążenie użytkowe wyjściowe kN/m^2	Współcz. dynamiczny [-]	Współcz. odciążający [-]	Obciążenie użytkowe [kN/m^2]
1,0	23,5	1,4	0,08	2,6	19,0	1,0	1,0	19,0
2,0	12,2			1,4	5,7			5,7
3,0	8,4			0,9	3,4			3,4
4,0	6,1			0,7	2,4			2,4
5,0	4,4			0,5	1,8			1,8
6,0	3,3			0,4	1,2			1,2

Wpływ modułu E na grubość powłok CIPP

Moduł Younga E (modulus of elasticity, elastic modulus) nazywany inaczej modułem odkształcalności liniowej, albo modułem (współczynnikiem) sprężystości podłużnej jest to wielkość określająca sprężystość materiału. Wyraża ona, charakterystyczną dla danego materiału, zależność względnego odkształcenia liniowego ε materiału od naprężenia σ, jakie w nim występuje w zakresie odkształceń sprężystych. Stosunek naprężenia do odkształcenia ma stałą wartość w zakresie odkształceń sprężystych materiału i zmniejsza się gdy występuje odkształcenie plastyczne.

W materiałach sztywnych w pierwszym etapie przy rosnących naprężeniach zachowują się one sprężyście tj. odkształcają się nietrwale. W pewnym zakresie odkształcenie jest proporcjonalne do naprężenia i obowiązuje wtedy prawo Hooke'a:

$$\sigma = E\,\varepsilon \qquad (2)$$

Większość tworzyw stosowanych w budownictwie jest typu sprężystego lub prawie sprężystego co oznacza, że niezależnie od czasu obciążania, zależność pomiędzy naprężeniami a występującymi w nich odkształceniami jest liniowa, ale tylko do pewnej wielkości naprężeń. Po odciążeniu takie tworzywo może odzyskać swój pierwotny kształt. Inaczej jest w przypadku tworzyw sztucznych, z których także produkowane są powłoki rehabilitacyjne stosowane w bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych. W tym przypadku odkształcenie nie jest proporcjonalne do naprężenia i jest zależne od czasu trwania obciążenia. W tworzywie sztucznym występuje wtedy zjawisko pełzania, które zwiększa się ze wzrostem naprężeń i temperatury.

W przypadku powłok rehabilitacyjnych z tworzyw sztucznych podawane są dwa moduły, pierwszy krótkoterminowy oraz drugi długoterminowy ustalony dla okresu 50 lat przy założeniu ich eksploatacji w temperaturze 20°C.

Moduły E powłok rehabilitacyjnych z tworzyw sztucznych są bardzo różne. Wartości tych modułów dla powłok CIPP także mogą znacząco różnić się między sobą. Poniżej podano moduły E dla trzech różnych odmian technologii CIPP:

a. $E_K = 3000$ N/mm^2, $E_L = 1500$ N/mm^2,
b. $E_K = 11400$ N/mm^2, $E_L = 8571$ N/mm^2,
c. $E_K = 20500$ N/mm^2, $E_L = 16016$ N/mm^2.

W tab. 5 i 6 zamieszczono przykład pokazujący wpływ wielkości modułu E na grubość powłok rehabilitacyjnych, kolejno renowacyjnej i rekonstrukcyjnej. Do obliczeń przyjęto powłoki rehabilitacyjne o trzech różnych modułach wyżej podanych, kanały o trzech różnych średnicach: 200 mm, 800 mm i 1500 mm, nadsypkę gruntu wynoszącą 5,0 m, poziom zwierciadła wody gruntowej nad wierzchołkiem kanału równy 2,5 m, grunty piaszczyste i obciążenie użytkowe samochodem o ciężarze 100 kN.

Z tabel 5 i 6 wynika, że nie jest opłacalne stosownie powłok rehabilitacyjnych zarówno renowacyjnych jak i rekonstrukcyjnych w przypadku kanałów o niewielkich średnicach. Przykładowo dla powłoki renowacyjnej (tab. 5) uzyskano dla kanału o średnicy 200 mm i modułu E równego 16016 N/mm^2, grubość powłoki renowacyjnej równą

1,32 mm dla modułu E wynoszącego 16016 N/mm^2, a ze względów technologicznych należy przyjąć grubość najmniejszą z oferowanych tj. 3,0 mm. W tym przypadku ponosi się niepotrzebnie dodatkowe koszty materiałowe z uwagi na konieczność zastosowania ponad dwukrotnie grubszej tkaniny i ponad dwukrotnie większej ilości żywicy.

Z kolei w przypadku kanałów o dużych średnicach zastosowanie powłok rehabilitacyjnych o wyższych modułach może przynieść szereg korzyści wynikających z ich mniejszej grubości w odniesieniu do grubości powłok o niższym module E. Przykładowo dla powłoki rekonstrukcyjnej (tab. 6) uzyskano dla kanału o średnicy 1 500 mm i dla modułu E powłoki równego 16016 N/mm^2, grubość powłoki rekonstrukcyjnej 15,0 mm, podczas gdyby zastosowano powłokę o module 1 200 N/mm^2 jej grubość wyniosłaby 36,0 mm. W tym przypadku lżejszy jest transport nasączonych żywicą powłok na miejsce ich wbudowania oraz istnieje w związku z tym możliwość ich zainstalowania na dłuższych odcinkach.

Należy jednak pamiętać, że wraz ze wzrostem modułu E zwiększa się sztywność i kruchość powłok rehabilitacyjnych. Stąd też bezpieczne jest ich wbudowywanie tylko w kanały szczelne ułożone w stabilnych gruntach powyżej zwierciadła wody gruntowej. W pozostałych przypadkach może pojawić się ryzyko pękania tych powłok z uwagi na fakt, iż są one projektowane tylko na dopuszczalne naprężenia w kierunku obwodowym a nie na dopuszczalne wytężenia, które uwzględniają poza naprężeniami obwodowymi także naprężenia oddziałujące w kierunku podłużnym oraz naprężenia ścinające.

Zwierciadło wody gruntowej a grubość powłok CIPP

Rehabilitacyjne powłoki żywiczne projektowane są w różnych krajach w oparciu o różne metody. W [10] dokonano analizy porównawczej trzech metod: amerykańskiej [1], duńskiej [3] i niemieckiej [2] stwierdzając, iż różnią się one w zakresie rodzaju uszkodzeń przyporządkowujących przewody do tzw. grup stanu technicznego, wielkością wstępnej deformacji linerów przyjmowanej w obliczeniach, metodami ustalania obciążeń od gruntu i taboru samochodowego, a także zaleceniami dotyczącymi przyjmowania w obliczeniach wysokości zwierciadła wody gruntowej.

Zalecenia w zakresie przyjmowania zwierciadła wody gruntowej są następujące:

- wytyczne amerykańskie zalecają przyjmowanie zwierciadła wody gruntowej liczonego od dna linera do powierzchni terenu, o ile brak jest dokładnych danych dotyczących wieloletnich jego zmian w funkcji czasu,
- wytyczne duńskie zalecają przyjmowanie zwierciadła wody gruntowej podobnie jak wytyczne amerykańskie liczonego od dna linera do powierzchni terenu, o ile brak jest dokładnych danych dotyczących wieloletnich jego zmian w funkcji czasu, a w przypadku gdy zwierciadło wody gruntowej jest poniżej dna kanału jego wysokość równą średnicy wewnętrznej kanału,
- wytyczne niemieckie zalecają przyjmowanie zwierciadła wody gruntowej (w przypadku gdy zwierciadło wody gruntowej jest poniżej wierzchołka kanału) równego średnicy zewnętrznej kanału powiększonej o 0,1 m licząc od dna linera, przy czym ta wysokość nie może być mniejsza od 1,5 m.

Autor spotkał się już kilkukrotnie z przypadkami, że na etapie prac badawczych przed wykonaniem projektu rehabilitacyjnego dokonywano pomiarów zwierciadła wody gruntowej, w różnych porach roku, nie zawsze wtedy gdy poziom zwierciadła wody gruntowej był najwyższy i te dane przyjmowano następnie przy obliczaniu grubości rehabilitacyjnych powłok. Podejście takie jest błędne ponieważ:

- w cyklu rocznym w zależności od różnych uwarunkowań poziom zwierciadła wody gruntowej może ulegać dużym zmianom,
- w okresie długotrwałych opadów w niektórych gruntach, poziom wody gruntowej może przez pewien czas osiągać poziom terenu,
- w większości przypadków poddawane rehabilitacji przewody kanalizacyjne są nieszczelne i występuje w nich zjawisko infiltracji wody gruntowej do wnętrza kanałów a po ich rehabilitacji następuje ich uszczelnienie co skutkuje podniesieniem się zwierciadła wody gruntowej.

Biorąc pod uwagę powyższe trzy czynniki oraz fakt, że powłoki żywiczne CIPP projektuje się na okres minimum 50 lat, autor zalecałby przyjmowanie zwierciadła wody gruntowej do wysokości poziomu terenu, a w sytuacjach odpowiednio udokumentowanych (po dokładnym przeanalizowaniu wyżej wymienionych trzech czynników) o wysokościach odpowiednio mniejszych.

W tabelach 7 i 8 zamieszczono przykłady dotyczące ustalania grubości kolejno powłok renowacyjnych i rekonstrukcyjnych dla różnych wysokości zwierciadła wód gruntowych nad wierzchołkiem kanału oraz innych danych zamieszczonych w opisach tabel.

Tab. 5. Grubości powłok renowacyjnych dla trzech różnych modułów E, trzech różnych średnic kanałów, wysokości nadsypki gruntu 5,0 m i zwierciadła wody gruntowej 2,5 m nad wierzchołkiem kanału [15]
Table 5. Thickness of non structural liners for three different E modules, three different sewer diameters, soil height of 5.0 m and groundwater table 2.5 m above the top of the sewer [15]

L.p.	Średnica, [mm]	Wartość modułu sprężystości powłoki E, [N/mm^2]	Obliczeniowa grubość powłoki, [mm]	Dobrana grubość powłoki renowacyjnej, [mm]
1	200	1 200	3,09	4,5
2		11 180	1,48	3
3		16 016	1,32	3
4	800	1 200	13,29	13,5
5		11 180	6,37	7
6		16 016	5,66	6
7	1500	1 200	26,62	27
8		11 180	12,77	13,3
9		16 016	11,34	12

Tab. 6. Grubości powłok rekonstrukcyjnych dla trzech różnych modułów E, trzech różnych średnic kanałów, wysokości nadsypki gruntu 5,0 m, zwierciadła wody gruntowej 2,5 m nad wierzchołkiem kanału, dla gruntów piaszczystych i taboru samochodowego 100 kN [15]
Tab. 6. Thicknesses of fully structural liners for three different E modules, three different sewer diameters, soil height of 5.0 m, groundwater table 2.5 m above the sewer top, for sandy soil and 100 kN traffic loads [15]

L.p.	Średnica, [mm]	Wartość modułu sprężystości powłoki E, [N/mm^2]	Obliczeniowa grubość powłoki, [mm]	Dobrana grubość powłoki renowacyjnej, [mm]
1	200	1 200	4,72	4,5
2		11 180	2,24	3
3		16 016	1,99	3
4	800	1 200	18,89	21
5		11 180	8,98	9,1
6		16 016	7,96	8
7	1500	1 200	35,42	36
8		11 180	16,83	17,5
9		16 016	14,93	15

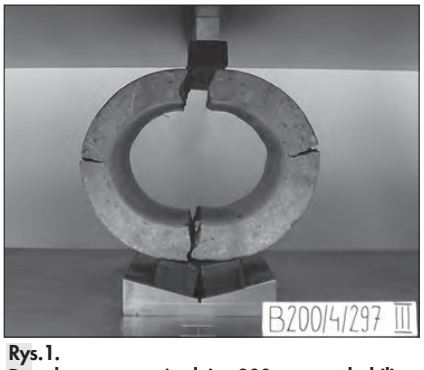
Tab. 7. Grubości powłok renowacyjnych dla modułu E = 1100 N/mm^2, średnicy kanału równej 800 mm, wysokości nadsypki gruntu 4,7 m i pięciu różnych poziomów zwierciadła wody gruntowej nad wierzchołkiem kanału [13]
Tab. 8. Thicknesses of non structural liners for module E = 1100 N/mm^2, sewer diameter equal to 800 mm, heights of ground soil 4.7 m, and five different levels of groundwater table over the top of the sewer 100 kN [13]

Wariant	Wysokość zwierciadła wody gruntowej [m]	Obliczone grubości powłoki [mm]	Przyjęte z katalogu grubości powłoki [mm]
1	0,94	11,16	12
2	1,88	12,81	13,5
3	2,82	14,04	15
4	3,76	15,15	18
5	4,70	16,09	18

Z tabel 7 i 8 wynika, że wysokość zwierciadła wody gruntowej nad wierzchołkiem kanału ma bardzo istotny wpływ na grubość zarówno powłok renowacyjnych jak i rekonstrukcyjnych. W obu przypadkach wzrost zwierciadła wody gruntowej z 0,94 m do 4,70 m spowodował wzrost grubości powłok w pierwszym przypadku o 50%, a w drugim o 33,3%.

Wpływ rodzaju rehabilitowanej rury oraz rodzaju żywicy w powłoce CIPP na jej grubość

Zacytowane wcześniej wytyczne projektowania grubości powłok rehabilitacyjnych amerykańska [1], duńska [3] czy niemiecka [2] nie biorą pod uwagę dwu istotnych dla ustalania grubości powłok czynników tj. rodzaju rur zastosowanych do budowy przewodu kanalizacyjnego oraz rodzaju zastosowanej żywicy w powłokach rehabilitacyjnych. W Politechnice Świętokrzyskiej zrealizowany został szeroki zakres badań [11,14] dotyczący nośności rehabilitacyjnych powłok żywicznych CIPP na bazie żywicy epoksydowej (rys. 1) doklejanych do wewnętrznej



Rys.1.
Rura betonowa o średnicy 200 mm z rehabilitacyjną epoksydową powłoką CIPP bez inlinera w trakcie jej niszczenia w laboratorium Politechniki Świętokrzyskiej (zdjęcie własne)
Fig.1. Concrete pipe with a diameter of 200 mm with a rehabilitation epoxy liner CIPP without inliner during its destruction in the laboratory of the Kielce University of Technology (own photo)

Tab. 8. Grubości powłok rekonstrukcyjnych dla modułu E = 1 100 MPa, średnicy kanału równej 800 mm, wysokości nadsypki gruntu 4,7 m, i pięciu różnych poziomów zwierciadła wody gruntowej nad wierzchołkiem kanału, dla gruntów piaszczysto gliniastych i taboru samochodowego o ciężarze 100 kN [13]
Tab. 8. Thicknesses of fully structural liners for module E = 1 100 MPa, sewer diameter equal to 800 mm, heights of ground soil 4.7 m, five different levels of groundwater table over the top of the sewer for sandy loamy soils and traffic loads of weight 100 kN [13]

Wariant	Wysokość wody gruntowej H_w [m]	Obliczone grubości powłoki t [mm]	Przyjęte z katalogu grubości powłoki t_{KAT} [mm]
1	0,94	17,26	18,0
2	1,88	18,20	18,0
3	2,82	19,18	21,0
4	3,76	20,13	21,0
5	4,70	21,46	24,0

powierzchni rur (czyli bez tzw. prelinerów). Badania zostały wykonane na rurach betonowych, kamionkowych i PVC.

Wyniki tych badań wskazały, że przyczepność tych powłok jest największa w rurach betonowych, mniejsza w rurach kamionkowych a najmniejsza w rurach wykonanych z PVC. W [14] zamieszczono wykresy i wzory umożliwiające w przypadku zastosowania powłok żywicznych CIPP bez „prelinerów" przy zastosowaniu żywicy epoksydowanej obliczenie ich grubości. Jest ona każdorazowo mniejsza niż ta uzyskiwana z obliczeń wg. wytycznych [1-3].

Wyniki tych badań zostały m.in. zaprezentowane w Stanach Zjednoczonych podczas konferencji bezwykopowej No-Dig w Sacramento [11] oraz w czasopiśmie z listy filadelfijskiej [14] wydawanym przez Zrzeszenie Amerykańskich Inżynierów Lądowych. We wniosku końcowym publikacji [14] zalecone zostało uzupełnienie wytycznych amerykańskich [1] o opracowaną metodykę projektowania grubości rehabilitacyjnych powłok żywicznych w przypadku zastosowania w nich żywicy epoksydowej. Podobne uzupełnienia wskazane byłyby także w wytycznych duńskich i niemieckich.

Dyskusja z podsumowaniem

Jak to wykazano powyżej nie można z góry ustalać sztywności powłok CIPP stosowanych w bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych. Należy obliczać ich grubość. Sztywność obwodową można dopiero później obliczać ze wzoru (1). Narzucenie z góry sztywności obwodowej rehabilitacyjnych powłok żywicznych narzuca z góry określoną grubość powłok wyliczaną ze wzoru (1). Poprawna grubość powłok jest funkcją oddziałujących na nią obciążeń i w zależności od zwierciadła wody gruntowej, zagłębienia przewodu i oddziałujących na niego obciążeń użytkowych z reguły obciążeń komunikacyjnych może ona przyjmować różne wartości. Z analiz ujętych syntetycznie w tabelach 1,2,3 wynika, że obciążenia od ciężaru gruntu i obciążenia użytkowe od taboru samochodowego mają najistotniejszy wpływ na grubość powłok rehabilitacyjnych wykonywanych w opcji rekonstrukcyjnej.

W przypadku powłok rehabilitacyjnych nie konstrukcyjnych (renowacyjnych) wpływ na ich grubość ma wyłącznie poziom zwierciadła wody gruntowej co wykazano w tabeli 7. Poziom zwierciadła wody gruntowej ma także istotny wpływ na grubość powłok rekonstrukcyjnych (tab. 8).

Grubość powłok rehabilitacyjnych zarówno renowacyjnych jak i rekonstrukcyjnych zależy także od wielkości modułu E. Im wyższy jest moduł E tym mniejsza jest grubość powłok co zilustrowano w tabelach 5 i 6.

Badania wykonane w Politechnice Świętokrzyskiej wykazały, że grubość powłok żywicznych zależy także od rodzaju zastosowanej w nich żywicy. W przypadku zastosowania żywicy epoksydowej i przyczepności tych powłok do wnętrza rehabilitowanych rur uzyskuje się pewne redukcje grubości powłok w stosunku do alternatywnych powłok poliestrowych czy winyloestrowych w różnym stopniu zależnym od tego do jakich rur wprowadzana jest powłoka rehabilitacyjna, do betonowych, kamionkowych czy wykonanych z PVC. Odpowiednie zalecenia projektowe w tym zakresie zamieszczono w [14].

Aktualnie rury projektuje się na warunek naprężeń obwodowych [8] pomijając w toku obliczeń naprężenia działające w kierunku podłużnym i naprężenia ścinające od sił poprzecznych. Założenie to jest możliwe do zaakceptowania w przypadku rur o konstrukcji sztywnej (np. rur betonowych czy kamionkowych) łączonych w kielichach czy rur sprężystych (np. stalowych spawanych ze sobą) a także rur lepko-sprężystych (np. PVC łączonych w kielichach czy PE-HD zgrzewanych ze sobą). Rury łączone kielichowo można traktować jako tzw. łańcuch kinematyczny. Mogą one obracać się wokół siebie w złączach a także przemieszczać się liniowo oczywiście tylko w pewnych granicach. Po zastosowaniu powłoki rehabilitacyjnej efekt wspomnianego łańcucha kinematycznego zanika. Usztywniająca je powłoka rehabilitacyjna bardziej lub mniej – w zależności od wielkości jej modułu E – uniemożliwia obrót lub wzdłużne przemieszczenia wzajemne rur. Brak lub znaczące ograniczenie takiej możliwości wskazuje, iż wymiarowanie powłok rehabilitacyjnych wyłącznie na warunek dopuszczalnych naprężeń jest obarczone w tym przypadku zdecydowanie większym błędem niż ma to miejsce w przypadku projektowania rur.

Należałoby zatem powłoki rehabilitacyjne projektować nie na warunek dopuszczalnych naprężeń lecz na warunek dopuszczalnych wytężeń. W przypadku obliczeń wytężenia uwzględnia się nie tylko naprężenia obwodowe, ale także naprężenia podłużne i naprężenia ścinające. Ponieważ metoda wymiarowania na wytężenia nie została opracowana w odniesieniu do projektowania konstrukcji rur a także powłok rehabilitacyjnych, należałoby w przypadku projektowania powłok rehabilitacyjnych zwiększyć obecnie stosowane współczynniki bezpieczeństwa dotyczące projektowania ich grubości w związku z nie uwzględnianiem w toku obliczeniowym naprężeń podłużnych i sił ścinających. Wskazane byłoby podjęcie prac badawczych umożliwiających projektowanie powłok rehabilitacyjnych na warunek naprężeń.

Nadal aktualne jest także zalecenie sformułowane już w 2010 roku [10] dotyczące potrzeby ujednolicenia metod stosowanych w różnych krajach, a dotyczących ustalania obciążeń oddziałujących na rehabilitacyjne powłoki żywiczne.

Zrozumienie istoty modułu E w doborze rozwiązań materiałowych rur i rehabilitacyjnych powłok stosowanych w bezwykopowej odnowie przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych jest istotne przy podejmowaniu decyzji o doborze najkorzystniejszych rozwiązań.

Szczególnie istotne jest nie utożsamienie wielkości modułu E z wytrzymałością stosowanych powłok oraz nie uznawanie za lepsze powłok, w których różnica między wartością długookresową modułu E_L a jego wartością krótkookresową E_K jest mniejsza od tych powłok, w których jest ona większa. W każdym z tych przypadków powłoka rehabilitacyjna projektowana jest na długookresową wartość modułu E i tym samym na ten sam współczynnik bezpieczeństwa.

LITERATURA

[1] ASTM International (American Society for Testing and Materials). 2009. "Standard practice for rehabilitation of existing pipelines and conduits by the inversion and curing of a resin-impregnated tube", *ASTM F 1216-09*, West Conshohocken, PA.

[2] ATV-DVWK (German Association for Water, Wastewater and Waste). 2000. "Static calculation for the rehabilitation os drains and sewers using lining and assembly procedures." *ATV-DVWG-M127-2P*, Hennef, DE.

[3] Danish standards. 2001. "Static calculation of Liners for the Gravitational Sewers", Taastrup.

[4] Kuliczkowski Andrzej, Rybiński Stanisław, Dyrda Robert. 1992. „Renowacja przewodów kanalizacyjnych systemem "krótki relining' w Tarnowie". *Gaz, Woda i Technika Sanitarna,* (7): 162-164.

[5] Kuliczkowski Andrzej, Rybiński Stanisław, Książek Wiesława. 1993. „Bezodkrywkowe uszczelnianie kanału sanitarnego w Nowym Sączu". *Gaz, Woda i Technika Sanitarna,* (5): 128-130.

[6] Kuliczkowski Andrzej, Rybiński Stanisław, Dyrda Robert. 1994. „Bezodkrywkowe powiększanie przewodów kanalizacyjnych na przykładzie Dębicy". *Gaz, Woda i Technika Sanitarna,* (3): 73-76.

[7] Kuliczkowski Andrzej. 1998. „Problemy bezodkrywkowej odnowy przewodów kanalizacyjnych". Monografia nr 13, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce: 245.

[8] Kuliczkowski Andrzej. 2004. "Rury kanalizacyjne, tom II, Projektowanie konstrukcji". Monografia nr 42, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce: 507.

[9] Kuliczkowski Andrzej. 2010. „Błędy w ustalaniu wymagań dotyczących wartości sztywności obwodowej utwardzanych in situ powłok żywicznych". *Instal* (4), 63-67.

[10] Kuliczkowski Andrzej, Kubicka Urszula, Parka Anna. 2010. The comparative analysis of standards used in Poland for trenchless rehabilitation of sewage pipes and the problems in design of resin lines. *Tunelling and Underground Space Technology,* (25): 795 – 801.

[11] Kuliczkowski Andrzej, Mogielski Kamil. 2013. "Results of laboratory tests of concrete, vitrified clay and PVC sewer pipes with CIPP liners", North American Society for Trenchless Technology, No-Dig Conference, Sacramento, Kalifornia, Paper TM2-T1-03.

[12] Kuliczkowski Andrzej. 2018. "Wyzwania dotyczące bezwykopowej odnowy przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych". *Gaz, Woda i Technika Sanitarna,* (20), 50-57.

[13] Kwiecień Ewa. 2019. Bezwykopowa rehabilitacja przewodu kanalizacyjnego metodą firmy Per Aarsleff Sp. z o.o. dla różnych poziomów wód gruntowych. Praca dyplomowa magisterska, (promotor prof. A. Kuliczkowski), Politechnika Świętokrzyska, Kielce.

[14] Mogielski Kamil, Kuliczkowski Andrzej, Kuliczkowska Emilia. 2017. Change in Toughness Parameters of Sewer Pipes Rehabilitated with Two Types of Epoxy CIPP Liners. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice,* 8(4), 04017015,1-15.

[15] Mroczkowska Agnieszka. 2019. Bezwykopowa rehabilitacja przewodu kanalizacyjnego metodą CIPP dla różnych modułów E. Praca dyplomowa magisterska, (promotor prof. A. Kuliczkowski), Politechnika Świętokrzyska, Kielce.

[16] PN – EN 13566-1. 2004. Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych do renowacji podziemnych bezciśnieniowych sieci kanalizacji deszczowej i sanitarnej część 1: Postanowienia ogólne .

[17] Praca zbiorowa pod redakcją Andrzeja Kuliczkowskiego. 2019. „Technologie bezwykopowe w Inżynierii Środowiska". Wydawnictwo Seidel – Przywecki Sp. z o.o.: 735.

■

UWAGA: W związku z pandemią COVID-19 zmiana kwietniowego terminu konferencji na październik.

Organizator: Politechnika Śląska, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków

Patronat medialny: INSTAL, Wydawnictwo Seidel Przywecki, technologia wody

zaprasza do udziału w:

X OGÓLNOPOLSKIEJ KONFERENCJI NAUKOWO - TECHNICZNEJ

Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody

3rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENCE AND TECHNOLOGY

Current issues in water treatment and water distribution

objętej patronatem naukowym Sekcji Inżynierii Sanitarnej Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, która odbędzie się w dniach 19- 21 października 2020 roku w Brennej.

Wychodząc naprzeciw aktualnym wyzwaniom warunkującym zarządzanie i eksploatację systemów wodociągowych i kanalizacyjnych, tematem przewodnim tegorocznej edycji jest:

Rzeczywistość polskiego sektora wodociągowo-kanalizacyjnego w uwarunkowaniach europejskiej polityki zrównoważonego rozwoju.

Integralnym elementem Konferencji będą warsztaty dotyczące opracowywania i wdrażania systemów zarządzania ryzykiem zgodnie z najnowszymi zaleceniami Unii Europejskiej, przekładającymi się na zmiany legislacyjne związane m.in. z zaopatrzeniem w wodę przeznaczoną do spożycia przez ludzi. Warsztaty wpisują się w nowe podejście do bezpieczeństwa wody, oparte na zarządzaniu ryzykiem w zaopatrzeniu w wodę, nakładające odpowiedzialność i obowiązki zarówno na organy rządowe, samorządowe jak i dostawców wody. Publikacje zakwalifikowane przez Komitet Naukowy będą publikowane w czasopiśmie Applied Water Science (lista MNiSW 70 pkt).

Więcej informacji na:

http://www.konferencje.polsl.pl/woda2020; https://www.facebook.com/woda2020/