

# Zmiany w projektowaniu powłok stosowanych w bezwykopowej odnowie przewodów infrastruktury podziemnej z zastosowaniem wytycznych amerykańskich i pokrewnych

Changes in design of linings used for trenchless renewal of underground pipelines using American standards and others related to them

ANNA PARKA

DOI 10.36119/15.2022.11.4

W artykule omówiono najważniejsze zmiany w wytycznych amerykańskich i pokrewnych do projektowania powłok stosowanych w bezwykopowej odnowie przewodów grawitacyjnych i ciśnieniowych. Przeanalizowano w nim również wpływ wprowadzonych zmian na ich grubość. Szczególną uwagę zwrócono przy tym możliwe do uzyskania wartości parametrów wytrzymałościowych powłok i ich zmienność w funkcji czasu. Podano też ogólne zalecenia odnośnie do doboru ww. powłok.

*Słowa kluczowe: bezwykopowa odnowa, powłoki, przewody grawitacyjne i ciśnieniowe*

The article discusses the most important changes introduced in the American standards and others related to them as regards design of linings used for trenchless renewal of gravity and pressure pipelines. The article also examines the impact of these changes on their thickness. Peculiar attention was paid to the possible and achieved values of their strength parameters as well as their changes over time. General recommendations on the selection of these linings were given too.

*Keywords: trenchless renewal, linings, gravity and pressure pipelines*

## Wstęp

Projektowanie powłok stosowanych w bezwykopowej odnowie przewodów grawitacyjnych i ciśnieniowych w Polsce realizowane jest głównie w oparciu o wytyczne zagraniczne. W przypadku powłok instalowanych w przewodach grawitacyjnych wykorzystuje najczęściej do tego celu wytyczne niemieckie DWA-A 143-2 [13] wraz z późniejszymi zmianami [14], które zastąpiły ATV-M 127 [6] lub amerykańskie ASTM F1216-07b [3]. W niektórych opracowaniach, w tym np. w [1], podane są również przykłady wymiarowania ww. powłok wykonanych na podstawie wytycznych brytyjskich WRc [34] oraz w oparciu o metodykę zaproponowaną przez Thépota w [30]. Powłoki do zastosowań ciśnieniowych projektuje się natomiast albo w oparciu o wytyczne niemieckie [13,14] lub amery-

kańskie [3], albo na podstawie [7, 8, 19, 24, 33], ewentualnie stosując się do zaleceń i rekomendacji ich producentów.

Ze względu na dużą liczbę dostępnych odmian technologii bezwykopowych wybór odpowiedniego rozwiązania pozwalającego na odnowę przewodu nie zawsze był i jest prosty. W przeszłości zdarzały nie tylko błędy związane z doбором technologii, ale również odpowiedniej klasy powłoki w obrębie tej samej technologii. Niekiedy sugerowano też błędnie sztywność obwodową powłoki, czego konsekwencje zostały opisane w [2,22]. Dość kłopotliwe okazało się w praktyce projektowanie powłok ciśnieniowych klasy B, C i niekiedy A zgodnie z normą PN EN ISO 11295 [25]. Ewentualne trudności z tym związane były następstwem braku jednoznacznych kryteriów projektowych dla powłok ww. klas. Momentem przełomowym pod tym względem było niewąt-

pliwie opublikowanie w 2015 r. wytycznych DWA-A 143-2 [13]. Nowe wytyczne, w przeciwieństwie do ATV-M 127 [6], zawierały już modele obliczeniowe dla wymiarowania różnych powłok do zastosowań ciśnieniowych. W sposób szczegółowy zmiany wprowadzone do wytycznych niemieckich zostały opisane w [28]. Jak zauważono jednak w [28], niektóre informacje dotyczące wymiarowania powłok ciśnieniowych zostały sformułowane w nich w dość lakoniczny sposób. Zaledwie 4 lata później, bo w 2019 r., opublikowano raport [29], w którym doprecyzowano wymagania i kryteria projektowe dla powłok ciśnieniowych klasy I, II, III i IV wg wytycznych [9], które uznaje się za odpowiedniki powłok klasy D, C, B i A wg normy [25]. Podobne wymagania i kryteria projektowe dla powłok ciśnieniowych (przy zachowaniu podziału powłok na powłoki klasy A, B, C i D) uwzględniono

dr inż. Anna Parka <https://orcid.org/0000-0001-9990-0540> – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Sieci i Instalacji Sanitarnych, Adres do korespondencji/Corresponding author: ania.parka@interia.pl

w wytycznych australijskich [32], które ukazały się w 2021 r. Jedyną różnicą pomiędzy ww. opracowaniami dotyczy zaproponowanego sposobu wymiarowania powłok klasy C i B oraz odpowiadającym im powłok II i III. Zgodnie z [32] grubość powłoki klasy B lub C należy ustalać w oparciu o metodykę zaproponowaną przez G.Y. Fu i innych, a opisaną wcześniej w [17]. W przypadku stosowania się do zaleceń z raportu [29] wymiarowanie powłok klasy II i III powinno być realizowane wyłącznie na podstawie wzorów podanych w [3].

W niniejszym artykule omówiono najważniejsze zmiany w wytycznych do projektowania powłok stosowanych w bezwypukłej odnowie przewodów grawitacyjnych i ciśnieniowych, wg wytycznych amerykańskich [3] i pokrewnych [32]. Przedstawiono również szczegółowe kryteria projektowe obowiązujące dla powłok ciśnieniowych a także podano wzory, które mogą być wykorzystane do określenia ich grubości. Wpływ wprowadzonych zmian na grubość powłok został przeanalizowany na wybranym przykładzie.

### Zmiany w projektowaniu ciasnopasowanych powłok żywicznych do zastosowań grawitacyjnych wg wytycznych amerykańskich

Wytyczne amerykańskie ASTM F1216-07b [3] wraz z późniejszymi zmianami stosuje się w wielu krajach do wymiarowania powłok ciasnopasowanych żywicznych typu CIPP lub WHL (powłoki te przypominają swoją konstrukcją wąż pożarniczy i podobnie jak powłoki typu CIPP nasączone są żywicą) przeznaczonych do zainstalowania zarówno w grawitacyjnych jak i ciśnieniowych przewodach o przekroju kołowym. Znane są też przypadki wymiarowania w oparciu o [3] powłok natryskowych na bazie żywicy. Powłoki o przekroju innym niż kołowe można z kolei projektować w oparciu o [31].

Powłoki, o których wspomniano powyżej, mogą być projektowane jako renowacyjne albo rekonstrukcyjne w zależności od tego, czy przewód zostanie uznany za częściowo uszkodzony czy całkowicie zniszczony. Jak wynika z [3,19] w przewodach częściowo uszkodzonych zazwyczaj stwierdza się pęknięcia, rozsunięcia rur na złączach i przesunięcia ich w przekroju poprzecznym. Pomimo ww. uszkodzeń i nieprawidłowości przewodów zachowuje jednak swoją nośność i może dalej przenosić działające na niego obciążenia zewnętrzne. Jeżeli nośność przewodu jest

zachowana, ale przewiduje się, że na powłokę będzie wywierane ciśnienie hydrostatyczne od wody gruntowej, to w takiej sytuacji jej grubość powinna być tak dobrana, aby były spełnione następujące 2 warunki podane w [3]:

$$P = \frac{2 \cdot K \cdot E_L}{(1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{(DR - 1)^3} \cdot \frac{C}{N} \quad (1)$$

$$1,5 \cdot \frac{q}{100} \cdot \left(1 + \frac{q}{100}\right) \cdot DR^2 - 0,5 \cdot \left(1 + \frac{q}{100}\right) \cdot DR = \frac{\sigma}{P \cdot N} \quad \text{dla } \sigma < \sigma_{dop}. \quad (2)$$

gdzie:

- K – współczynnik wpływu usztywnienia, zwykle  $K = 7$  dla powłok ciasno pasowanych;
- $E_L$  – moduł sprężystości powłoki żywicznej CIPP zredukowany ze względu na długotrwały wpływ obciążenia, MPa;
- $\nu$  – współczynnik Poissona, przyjmuje się 0,3 dla powłok żywicznych CIPP lub WHL;
- DR – współczynnik kształtu powłoki żywicznej;
- C – współczynnik odstępstwa od przekroju kołowego;
- N – współczynnik bezpieczeństwa, zwykle przyjmuje się  $N = 1,5$  lub  $N = 2,0$  dla powłok żywicznych CIPP lub WHL;
- q – owalizacja przewodu, %;
- $\sigma$  – wytrzymałość na zginanie powłoki żywicznej, MPa;
- $\sigma_{dop}$  – maksymalna, dopuszczalna wytrzymałość na zginanie powłoki żywicznej, MPa;
- P – dopuszczalne ciśnienie zewnętrzne dla tzw. wyoboczenia nieusztywnionego, MPa.

Zaobserwowano jednak, że występujące w przewodzie uszkodzenia lub imperfekcje wpływają istotnie na krytyczną wartość ciśnienia wyoboczenia, które może spowodować uszkodzenie powłoki. W literaturze krajowej i zagranicznej opisane są liczne przykłady modyfikacji klasycznego równania dla wyoboczenia nieusztywnionego (wzór 1) uwzględniające m.in. wpływ rodzaju i wielkości imperfekcji na wartość tego ciśnienia. W sposób szczegółowy zagadnienie to zostało przedstawione w [1,11,23,30]. Zauważono też, że istnieje silny związek pomiędzy zainstalowaniem w przewodzie prelinera i możliwą do uzyskania przyczepnością powłoki do ścian przewodu a nośnością układu przewód – powłoka. Przebieg i wyniki badań zmierzających do określenia wpływu zainstalowania prelinera w technologii CIPP na nośność rur betonowych zostały przedsta-

wione w [20]. Jednocześnie w [20] opisano nową metodę wyznaczania grubości powłok instalowanych w rurach betonowych bez prelinera.

W przypadku przewodów całkowicie zniszczonych stwierdza się z kolei poważne uszkodzenia jego konstrukcji, w tym np. pęknięcia, odkształcenia, silne skorodowanie, znaczące ubytki fragmentów rur. Uszkodzony przewód utracił swoją nośność lub znajduje się na granicy jej utraty w związku z czym nie jest on w stanie przenosić dalej działających na niego obciążeń zewnętrznych [3,19]. Jeżeli w tak uszkodzonym przewodzie planuje się zainstalowanie powłoki żywicznej (typu CIPP lub WHL) to jej grubość powinna być tak dobrana, aby były spełnione nie tylko warunki opisane wzorami (1) i (2), ale również (3) i (4) podane w [12]

$$q_t = \frac{1}{N} \cdot \left[ 32 \cdot R_w \cdot B' \cdot E'_s \cdot C \cdot \frac{E_L \cdot I}{D^3} \right]^{0,5} \quad (3)$$

$$\frac{E \cdot I}{D^3} = \frac{E}{12 \cdot DR^3} \geq 0,64 \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

gdzie:

- $q_t$  – całkowite obciążenie zewnętrzne wywierane na powłokę żywiczną CIPP, MPa;
- $R_w$  – współczynnik wyporu wody;
- $B'$  – współczynnik podparcia elastycznego;
- $E'_s$  – moduł reakcji gruntu, zwykle przyjmuje się  $E'_s$  od 5,0 do 10,0 MPa;
- I – moment bezwładności ścianki powłoki żywicznej CIPP,  $\text{mm}^4/\text{mm}$
- D – zewnętrzna średnica powłoki żywicznej odpowiadająca średnicy wewnętrznej przewodu, m
- N, C, DR,  $E_L$  – jak wcześniej.

Wzór (3), w takiej postaci jak to podano powyżej, obowiązuje od 2007 roku [12]. Wcześniej do projektowania powłok żywicznych typu CIPP, ewentualnie WHL, przeznaczonych do zainstalowania w przewodach całkowicie zniszczonych stosowano powszechnie wzór (5) wg [3].

$$q_t = \frac{C}{N} \cdot \left[ 32 \cdot R_w \cdot B' \cdot E'_s \cdot \frac{E_L \cdot I}{D^3} \right]^{0,5} \quad (5)$$

Jak łatwo zauważyć współczynnik na odstępstwo od przekroju kołowego C jest we wzorze (5) wyłączony przed nawias. We wzorze (3) występuje on natomiast w nawiasie, co jak podano w [12] skutkuje zmniejszeniem obliczeniowej grubości powłoki żywicznej. Zmiana ta była jednak konieczna, zważywszy na fakt, że wpływ owalizacji przewodu na wartość krytyczną ciśnienia zewnętrznego dla wyoboczenia nieusztywnionego (wzór 1) jest nieco inny

niz dla wyboczenia elastycznego (wzór 3). Jeżeli przyjmie się tak samo jak w [19], że  $l = t^3/12$ , gdzie  $t$  oznacza poszukiwaną grubość powłoki żywicznej, to wzór (3) można przekształcić do postaci wyrażonej za pomocą wzoru (6). Wzór (6) został wyprowadzony przez autora niniejszego artykułu.

$$t = 0,721 \cdot D \cdot \left( \frac{q_t^2 \cdot N^2}{E_L \cdot R_w \cdot B^1 \cdot E_s^1 \cdot C} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

Wzór (6) umożliwia wyznaczenie grubości powłoki żywicznej, na którą przekazywane są jednocześnie obciążenia od gruntu i taboru samochodowego oraz wywierane jest ciśnienie hydrostatyczne od wody gruntowej. Jest on powszechnie stosowany do wymiarowania powłok rekonstrukcyjnych przeznaczonych do zainstalowania w całkowicie zniszczonych przewodach grawitacyjnych. Wyjątkowo może być on również stosowany w odniesieniu do powłok instalowanych w przewodach ciśnieniowych, ale pod warunkiem, że założy się ich okresowe opróżnianie z medium. Powłoki do zastosowań ciśnieniowych można też projektować w oparciu o wzór (6) w sytuacji, gdy maksymalna wartość ciśnienia roboczego w przewodzie określana jako MAOP nie przekracza całkowitego obciążenia zewnętrznego wywieranego na powłokę  $q_t$  [29,32].

### Uwagi szczegółowe dotyczące sposobu wymiarowania powłok do zastosowań ciśnieniowych klasy D, C, B i A w oparciu o zalecenia amerykańskie i pokrewne

Zgodnie z normą PN EN 11295 [25] powłoki do zastosowań ciśnieniowych dzielą się na powłoki niekonstrukcyjne klasy D, częściowo konstrukcyjne klasy C i B oraz powłoki konstrukcyjne klasy A. Ponieważ wymagania stawiane powłokom ww. klas są podobne do tych, które obowiązują dla powłok klasy I, II, III i IV wymienionych w [9] dlatego też można je dobierać i projektować stosując się do tych samych wytycznych, w tym np. do [3,32].

Wg [25] powłoki niekonstrukcyjne klasy D to przede wszystkim powłoki stosowane w technologiach natryskowych, których podstawowym zadaniem jest zapewnienie przewodom ochrony antykorozyjnej i poprawa hydraulicznych warunków przepływu w ww. przewodach. Ponieważ powłoki te nie są przystosowane do przenoszenia w całości naprężeń od ciśnienia wewnętrznego i obciążeń zewnętrznych dlatego przewody poddawane renowacji

muszą mieć zachowaną nośność. Grubość powłok ww. klasy przyjmuje najczęściej się zgodnie z zaleceniami ich producentów. W przypadku cementyzacji grubość powłok można ustalić w oparciu o [21].

Aby powłoka klasy D mogła spełniać swoją rolę to musi być zapewniona jej adhezja do ścianek wewnętrznych przewodu, w którym została ona zainstalowana. Przyjmuje się, że powłoka ww. klasy nie ulegnie oderwaniu od ścianek przewodu o ile będzie spełniona następująca zależność podana w [29]:

$$\sigma_{ad} \geq P_N \cdot N + 10^3 \cdot \alpha \cdot E_{fh} \cdot \Delta T \rightarrow \sigma_{ad} \geq \left( H_w + \frac{D}{1000} + p_v \right) \cdot N + 10^3 \cdot E_{fh} \cdot \Delta T \quad (7)$$

gdzie:

- $\sigma_{ad}$  – siła adhezji, MPa
- $P_N$  – sumaryczne obciążenie powłoki wynikające z parcia hydrostatycznego wody gruntowej i działającego w przewodzie podciśnienia w przewodzie, MPa
- $N$  – współczynnik bezpieczeństwa, zwykle  $N = 2,0$
- $H_w$  – poziom wody gruntowej nad wierzchołkiem przewodu, m
- $D$  – średnica przewodu, mm
- $p_v$  – podciśnienie w przewodzie, MPa
- $\alpha$  – współczynnik rozszerzalności cieplnej materiału powłoki, mm/mm°C
- $\Delta T$  – różnica temperatur, °C
- $E_{fh}$  – moduł sprężystości powłoki przy zginaniu, GPa.

Przy ustalaniu wartości parametru  $P_N$  należy wziąć pod uwagę nie tylko parcie hydrostatyczne od wody gruntowej, które jest wywierane na powłokę z zewnątrz, ale również i podciśnienie występujące w przewodzie. Wartości podciśnienia w przewodach zawierają się zwykle w przedziale od 0 do 0,1 MPa. Jeżeli brak jest dokładnych danych, a przewiduje się, że w przewodzie może powstawać podciśnienie to wówczas należy przyjąć  $p_v = 0,1$  MPa [29]. Drugi składnik sumy występującej z prawej strony nierówności (7) uwzględnia się tylko wtedy, gdy w przewodzie z zainstalowaną powłoką spodziewane są znaczne wahania temperatur.

Powłoki klasy C stosuje się natomiast w technologiach natryskowych oraz w niektórych technologiach typu CIPP. Powłoki tej klasy nie tylko zapewniają przewodom ochronę antykorozyjną i poprawę hydraulicznych warunków przepływu, ale również gwarantują pokrycie występujących w nich drobnych nieciągłości konstrukcji (np. w postaci niewielkich otworów pokorozyjnych lub szczelin obwodowych). Powłoki ww. klasy praktycznie nie mają sztywności obwodowej lub też ich sztyw-

ność jest bardzo mała. W zasadzie nie jest wymagane określanie ich właściwości mechanicznych przy zginaniu. Zamiast nich można podać jedynie ich właściwości przy rozciąganiu. Jak wynika dalej z [25] powłoki klasy C mogą być instalowane jedynie w przewodach, które zachowały swoją nośność.

W przypadku wielu powłok klasy C, w tym w szczególności powłok natryskowych klasy C, nie wykonuje się żadnych obliczeń statycznych – wytrzymałościowych zmierzających do określenia ich grubości. Jeżeli brak jest wytycznych branżowych w tym zakresie to wówczas grubość powłoki ustalana jest indywidualnie po konsultacji z producentem lub w oparciu o udostępniony katalog. Wyjątek stanowią powłoki typu CIPP o znanej długostrzałowej wytrzymałości na zginanie i przeznaczone do zainstalowania w przewodach, w których stwierdzono występowanie niewielkich otworów pokorozyjnych (średnica otworu  $d < 35$  mm). Zgodnie z najnowszymi zaleceniami American Water Works Association grubość takich powłok powinna być ustalana w oparciu o wzór (8) podany w [3].

$$t = \frac{D}{\left[ \frac{5,33}{P} \cdot \left( \frac{D}{d} \right)^2 \frac{\sigma}{N} \right]^{1/2} + 1} \quad (8)$$

gdzie:

- $D$  – średnica zewnętrzna powłoki, mm
- $P$  – dopuszczalne ciśnienie wewnętrzne, MPa
- $d$  – średnica otworu, występującego w ścianie istniejącego przewodu, mm
- $\sigma$  – wytrzymałość na zginanie powłoki zredukowana ze względu na długostrzałowy wpływ obciążenia, MPa
- $N$  – współczynnik bezpieczeństwa, przyjmuje się  $N \geq 2,0$ .

Wzór (8) można stosować o ile spełniona jest nierówność (9) podana również w [3]

$$\frac{d}{D} \leq \left( \frac{2,67 \cdot \sigma}{\sigma_t \cdot DR} \right)^{1/2} \quad (9)$$

gdzie:

- $\sigma_t$  – wytrzymałość na rozciąganie powłoki, zredukowana ze względu na długostrzałowy wpływ obciążenia, MPa
- $DR$  – współczynnik kształtu powłoki ( $DR = D/t$ , gdzie  $D$  – średnica zewnętrzna powłoki,  $t$  – grubość powłoki)  $d$ ,  $\sigma$  – jak we wzorze (8).

Jeżeli nierówność (9) nie jest spełniona to powłoki należy projektować już zgodnie z zaleceniami obowiązującymi dla klasy A.

W przypadku powłok klasy C musi być też sprawdzony warunek opisany wzorem (7) i zaproponowany w [29].

Z kolei wg wytycznych australijskich [32] powłoka żywiczna klasy C będzie mogła spełniać swoją rolę i nie ulegnie uszkodzeniu pod wpływem ciśnienia wewnętrznego o ile naprężenia powstające w niej w miejscu występowania w przewodzie nieciągłości konstrukcji (w postaci np. otworu pokorozyjnego) i określone jako  $\sigma_{\max}$  nie będą większe od jej długotrwałej wytrzymałości na rozciąganie  $\sigma_{\text{fl}}$ . W tym przypadku wartość parametru  $\sigma_{\max}$  powinna być ustalana w oparciu o wzór (10) zgodnie z [17,32].

$$\frac{\sigma_{\max}}{P_{\max}} = \frac{1,45 \cdot \left(\frac{E_p}{E \cdot f}\right)^{-0,183} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{-1,13} \cdot (1 - 0,068 \cdot f) \cdot N}{\left[1 + 21,94 \cdot e^{-20,63 \cdot \frac{t}{D}}\right] \cdot \left[\frac{T}{D} + 2 \cdot \left(\frac{T}{D}\right)^{-0,052}\right]} \quad (10)$$

gdzie:

- $\sigma_{\max}$  – maksymalne naprężenia w powłoce klasy C od ciśnienia wewnętrznego, MPa
- $P_{\max}$  – maksymalne ciśnienie wewnętrzne, MPa
- $E_p$  – moduł sprężystości materiału rury, z której wykonany jest przewód, GPa
- $E$  – krótkotrwały moduł sprężystości materiału powłoki, GPa
- $f$  – współczynnik pęczania;
- $D$  – średnica wewnętrzna przewodu, mm
- $T$  – grubość ścianki rury, z której wykonany jest przewód, mm
- $t$  – grubość powłoki żywicznej typu CIPP lub WHL, mm
- $f_l$  – współczynnik tarcia pomiędzy przewodem a powłoką,
- $d$  – średnica otworu pokorozyjnego stwierdzonego w ściance przewodu, mm
- $N$  – współczynnik bezpieczeństwa, np.  $N = 2,0$ .

Wzór (10) został opracowany przez G. Y. Fu i innych [17] z myślą o powłokach typu CIPP instalowanych w przewodach ciśnieniowych i wykonanych z rur z żeliwa szarego, rur stalowych lub z żeliwa sferoidalnego, dla których krótkotrwały moduł sprężystości materiału wynosi odpowiednio 100, 200 i 165 GPa. Niezbędny do ustalenia wartości parametru  $\sigma_{\max}$  współczynnik tarcia  $f_l$  należy przyjmować z zakresu od 0 do 0,577 w zależności od siły adhezji pomiędzy powłoką a rurą. W przypadku powłok instalowanych w przewodach

wykonanych z rur metalicznych przyjmuje się zwykle  $f_l = 0,3-0,4$ , natomiast z rur z wewnętrzną warstwą na bazie zaprawy cementowej  $f_l = 0,1-0,2$ . Wartości współczynnika pęczania dla powłok różnego typu podano z kolei w punkcie 4.

Jeżeli w przewodzie stwierdzone byłyby natomiast szczeliny obwodowe o szerokości nie większej niż 35 mm to wówczas do ustalenia wartości naprężeń  $\sigma_{\max}$  należałoby się posłużyć zależnością [32]:

$$\frac{\sigma_{\max}}{P_{\max}} = \frac{2,33 \cdot \frac{u_g}{t} \cdot (1 + 0,52 \cdot f_l - 0,15 \cdot f_l^2)}{1 + 0,39 \cdot \left(1 - 0,002 \cdot \left(\frac{E_p}{f \cdot E}\right)^{0,5}\right) \cdot N} \cdot e^{-2,7 \cdot \frac{f \cdot E}{P_{\max} \cdot N}} \quad (11)$$

gdzie:

- $u_g$  – szerokość szczeliny obwodowej, mm
- $P_{\max}$ ,  $f_l$ ,  $E_p$ ,  $E$ ,  $f$  – jak we wzorze (10).

Jeżeli natomiast szerokość szczeliny  $u_g$  okazałaby się większa od 35 mm to wówczas powłokę należałoby zaprojektować zgodnie z zaleceniami obowiązującymi dla klasy A wg [3,32].

Z kolei, gdy przewód narażony byłby na powstawanie szczelin obwodowych wskutek np. przemieszczeń podłużnych spękanych fragmentów jego konstrukcji to wówczas maksymalną wartość naprężeń  $\sigma_{\alpha, \max}$  powstających w powłoce należałoby określić ze wzoru (12) zaproponowanego też w [32]:

$$\frac{\sigma_{\alpha, \max}}{P_{\max}} = 31,5 \cdot \left(\frac{u_{gp}}{t}\right)^{0,5} \cdot f_l^{0,5} \cdot \left(\frac{f \cdot E_{\text{ta}}}{P_{\max} \cdot N}\right)^{0,43} \cdot \left(\frac{E_p}{f \cdot E_{\text{ta}}}\right)^{-0,02} \cdot N \quad (12)$$

gdzie:

- $\sigma_{\alpha, \max}$  – maksymalne naprężenia, które powstają w powłoce w miejscu tworzenia się szczeliny obwodowej, MPa
- $u_{gp}$  – szerokość szczeliny powstałej wskutek np. przemieszczeń podłużnych spękanych fragmentów konstrukcji przewodu, mm
- $E_{\text{ta}}$  – krótkotrwały moduł sprężystości powłoki w kierunku podłużnym, GPa
- $E_p$  – krótkotrwały moduł sprężystości materiału rury, z której wykonano przewód, GPa
- $f$  – współczynnik pęczania,

$f_l$  – współczynnik tarcia pomiędzy powłoką a rurą uwzględniający wpływ adhezji.

W przeciwieństwie do powłok klasy C powłoki klasy B mają określoną sztywność obwodową i nie muszą być ściśle „doklejone” do ścianek wewnętrznych przewodów (adhezja w tym przypadku może być mniejsza lub w ogóle nie występować). Podobnie jednak jak poprzednie mogą być one instalowane wyłącznie w przewodach, które zachowały swoją nośność. Powłoki tej klasy stosuje się zarówno w technologiach ciasnopasowanych (żywicznych i nieżywicznych), jak i natryskowych czy nawet w sliplingu.

Sposób projektowania powłok żywicznych klasy B zależy nie tylko od rodzaju materiału powłoki i przyjętej technologii, ale również od rodzaju konstrukcji przewodu poddawanej renowacji. Jeżeli przewód o konstrukcji sztywnej, w którym zaplanowano instalację powłoki tego typu, ma być okresowo opróżniany z medium to wówczas grubość ww. powłoki należy ustalać w oparciu o wzór (1) podany m.in. w [3,29,32], z tą jednak różnicą, że zamiast modułu sprężystości  $E_l$  zredukowanego ze względu na długotrwały wpływ obciążenia należy w nim uwzględnić giętny moduł sprężystości  $E$  dla oddziaływań krótkotrwałych. W przypadku natomiast przewodów o konstrukcji podatnej grubość powłoki powinna być określona ze wzoru (13) podanego w [32]. Obowiązuje przy tym założenie, że na powłokę wywierane jest nie tylko ciśnienie hydrostatyczne od wody gruntowej i ewentualnie podciśnienie, ale również przekazywana jest dodatkowo połowa rzeczywistego obciążenia od taboru samochodowego  $W_s$ .

$$P + \frac{W_s}{2} = \frac{2 \cdot K \cdot E}{(1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{(DR - 1)^3} \cdot \frac{C}{N} \quad (13)$$

gdzie:

- $W_s$  – obciążenie od taboru samochodowego, MPa
- $E$  – giętny moduł sprężystości dla działań krótkotrwałych, MPa
- $P$  – obciążenie zewnętrzne działające na powłokę, na które składa się parcie hydrostatyczne od wody gruntowej i ewentualnie podciśnienie, MPa
- $K$ ,  $DR$ ,  $C$ ,  $N$ ,  $\nu$  – jak we wzorze (1).

Może się jednak zdarzyć, że przewód będzie opróżniany z medium na dłuższy czas. W takiej sytuacji grubość powłoki nie powinna być mniejsza niż ta wynikająca ze wzoru (1) zgodnie z [3]. Jeżeli natomiast przewiduje się, że w przewodzie będą występować zmienne warunki temperatu-



we to powłoka powinna być tak zaprojektowana, aby spełniona była nierówność (14) podana w [32]:

$$\sigma_A \geq \alpha \cdot E_A \cdot \Delta T \quad (14)$$

gdzie:

- $\sigma_A$  – wytrzymałość na rozciąganie powłoki, MPa
- $\alpha$  – współczynnik rozszerzalności termicznej powłoki, mm/mm/°C
- $E_A$  – moduł sprężystości przy rozciąganiu, MPa
- $\Delta T$  – zmiana temperatury w sytuacji, gdy przewód wyłączony jest z eksploatacji, °C.

Jednocześnie należy wyznaczyć grubość powłoki korzystając ze wzoru (8), ewentualnie (10), (11) lub (12), po czym wybrać wartość największą. Dla powłok klasy B nie sprawdza się już warunku wyrażonego za pomocą nierówności (7).

Z kolei powłoki natryskowe klasy B na bazie żywic mogą być projektowane zgodnie z metodyką zaproponowaną przez Boot'a i Toporovą a przedstawioną w [15], ewentualnie w oparciu o zalecenia ich producentów. Znane są też przypadki stosowania wytycznych amerykańskich [3] do wymiarowania powłok natryskowych klasy B a nawet i A (np. powłoki ACURO). Poniżej podano wzór umożliwiający określenie grubości powłoki natryskowej na bazie polimocznika przewidzianej do zainstalowania w przewodzie, w którym stwierdzono uszkodzenie w postaci otworu pokorozyjnego o średnicy  $d$  wg [35].

$$d = \left( \frac{60 \cdot \sigma \cdot f \cdot t}{P \cdot N} \right)^{0,5} \quad (15)$$

gdzie:

- $d$  – średnica otworu pokorozyjnego stwierdzonego w ścianie przewodu, mm
- $\sigma$  – długotrwała wytrzymałość na zgięcie powłoki natryskowej, MPa
- $f$  – współczynnik redukcji,
- $t$  – grubość powłoki natryskowej na bazie polimocznika, mm
- $P$  – maksymalne ciśnienie robocze w przewodzie, przyjmowane do celów projektowych, bar
- $N$  – współczynnik bezpieczeństwa, np.  $N = 2,0$ .

Powłoki ciasnopasowane nieżywiczone klasy B można projektować natomiast w oparciu o [24,33].

Powłoki klasy A instaluje się z kolei w przewodach, które są na granicy utraty nośności lub też utraciły swoją nośność. W związku z tym powłoki te muszą być przystosowane do przenoszenia w całości

zarówno naprężeń od ciśnienia wewnętrznego jak i obciążeń zewnętrznych. Wyjątek stanowią tu jedynie elastyczne powłoki wysokociśnieniowe bez sztywności obwodowej. Co więcej, powłoki klasy A nie muszą być ściśle „doklejone” do ścianek wewnętrznych przewodów.

Aby powłoka ww. klasy nie uległa uszkodzeniu pod wpływem ciśnienia wewnętrznego o wartości  $P_w$  jej minimalna grubość  $t$  nie może być mniejsza niż ta wynikająca ze wzoru (16) podanego w [3]. Wzór (16) stosuje się powszechnie do wymiarowania powłok typu CIPP i WHL oraz niektórych powłok natryskowych (powłoka ACURO klasy A).

$$t = \frac{D}{\left( \frac{2 \cdot \sigma_{THL}}{P_w \cdot N} \right) + 1} \quad (16)$$

gdzie:

- $D$  – średnica zewnętrzna powłoki, mm;
- $\sigma_{THL}$  – wytrzymałość na rozciąganie powłoki zredukowana ze względu na długotrwały wpływ obciążenia, MPa;
- $P_w$  – ciśnienie wewnętrzne w przewodzie, najczęściej przyjmuje się  $P_w = MAOP$ , gdzie MAOP – maksymalne dopuszczalne ciśnienie robocze, MPa;
- $N$  – współczynnik bezpieczeństwa, zwykle  $N = 2,0$ .

Powłoki nieżywiczone można również wymiarować w oparciu o wzór (16). Należy tylko pamiętać o tym, by zamiast  $\sigma_{THL}$  uwzględnić we wzorze (16) parametr MRS lub HDB, ewentualnie wartość wyrażenia  $HDB \times E_{TH}$ , gdzie HDB/MRS oznacza długotrwałą wytrzymałość powłoki na rozciąganie w kierunku poprzecznym, a  $E_{TH}$  to jej moduł sprężystości przy rozciąganiu. Dotyczy to w szczególności powłok wykonanych np. z rur polietylenowych lub modułów GRP. W przypadku elastycznych powłok wysokociśnieniowych o dużej wytrzymałości na rozciąganie, ale bez sztywności obwodowej (np. powłoka Primus Line) powinien być natomiast spełniony następujący warunek zaproponowany przez autora.

$$P_{w,max} \geq P_w \quad (17)$$

gdzie:

- $P_{w,max}$  – maksymalne 17 ciśnienie robocze, przy którym może być eksploatowana powłoka wg deklaracji producenta, bar
- $P_w$  – założone ciśnienie robocze w przewodzie, bar.

Dla powłok tego typu nie ma już potrzeby wyznaczania jej grubości w oparciu o wzór (16).

Przy wymiarowaniu powłok klasy A należy wziąć też pod uwagę możliwość wzrostu ciśnienia w przewodzie o charakterze okresowym lub incydentalnym. Wg najnowszych wytycznych australijskich [32] powłoka żywiczna typu CIPP lub WHL klasy A powinna zachować trwałość na wypadek wzrostu ciśnienia w przewodzie do wartości PC wynikającej ze wzoru (17) i podanego w [10]. Stanowi to wyraźne nawiązanie do rekomendacji American Water Works Association w zakresie wymiarowania powłok klasy IV i informacji zawartych w raporcie [29].

$$PC = \frac{P_w + P_s}{1,4} \quad (18)$$

gdzie:

- PC – maksymalna wartość ciśnienia, które może wystąpić w przewodzie, MPa
- $P_w$  – ciśnienie robocze w przewodzie w normalnych warunkach eksploatacyjnych, MPa.
- $P_s$  – nadciśnienie w przewodzie, MPa

Jeżeli za  $P_w$  do wzoru (16) podstawimy się wyrażenie  $(P_w + P_s)/1,4$  to wówczas otrzyma się następującą zależność pozwalającą na określenie minimalnej grubości powłoki klasy A podaną m.in. w [29,32]

$$t = \frac{D}{\left[ \frac{2,8 \cdot \sigma_{THL}}{(P_w + P_s) \cdot N} \right] + 1} \quad (19)$$

Stosowanie wzoru (19) wydaje się uzasadnione jedynie w odniesieniu do powłok żywicznych na bazie włókien szklanych. Za takim stwierdzeniem przemawia fakt, że do wyprowadzenia wzoru (19) wykorzystano zależność (18), którą powszechnie stosuje się przy wymiarowaniu ciśnieniowych rur żywicznych wzmocnianych włóknem szklanym GRP wg AWWA M45 [10]. W przypadku powłok nie zawierających w swej strukturze włókien szklanych należałoby raczej sprawdzić, czy powłoka nie ulegnie uszkodzeniu wskutek wzrostu ciśnienia w przewodzie do wartości PC wynikającej ze wzoru (20) zaproponowanego przez autora. Niestety autorzy raportu [29] oraz wytycznych [32] pozostawili tę kwestię bez komentarza.

$$PC = P_w + P_s \quad (20)$$

gdzie:

- $P_w$   $P_s$  – jak we wzorze (18).

Wartość  $P_s$  do wzoru (18) lub (19) powinna być ustalana w oparciu o dane eksploatacyjne. Jedynie w przypadku braku danych należy korzystać z wytycznych branżowych lub norm przedmiotowych.

Dla powłok nieżywiczych (np. z rur polietylenowych) wartość parametru  $P_s$  można określić w oparciu o zalecenia podane w wytycznych AWAA C906 [7], tj.:  $P_s = 0,5 \times MAOP$  o ile zjawisko, które powoduje wzrost ciśnienia w przewodzie, ma charakter powtarzalny oraz  $1,0 \times MAOP$  o ile zjawisko ma charakter incydentalny.

Z kolei dla elastycznych powłok wysokościennionych bez sztywności obwodowej ogólny warunek bezpieczeństwa na wypadek wzrostu ciśnienia w przewodzie przedstawiałby się wg autora niniejszego artykułu następująco:

$$P_r \geq P_w + P_s \quad (21)$$

gdzie:

- $P_r$  – ciśnienie rozrywające powłokę wg deklaracji producenta, bar
- $P_w$  – założone ciśnienie robocze w przewodzie, bar
- $P_s$  – nadciśnienie w przewodzie, bar.

Jeżeli przewiduje się, że przewód może być opróżniony z medium na dłuży czas lub gdy całkowita wartość obciążenia zewnętrznego  $q_t$  przewyższy wartość MAOP to wówczas grubość powłoki klasy A należy też ustalić w oparciu o wzór (1) i (3).

Grubość rzeczywista powłoki zwykle jest większa od tej otrzymanej z podanych wcześniej wzorów. Efekt pogrubienia powłoki można uzyskać np. poprzez zastosowanie dodatkowej warstwy materiału filcowego w przypadku wyboru niektórych powłok typu CIPP lub naniesienie dodatkowej warstwy w przypadku powłok natryskowych stosowanych w wersji high – built. Dzięki takiemu rozwiązaniu wzrasta sztywność obwodowa powłoki i tym samym jej odporność na wyboczenie pod wpływem obciążenia zewnętrznego lub/i parcia hydrostatycznego wody gruntowej. Z drugiej strony obserwuje się spadek jej wytrzymałości na rozciąganie. Projektując jednak powłoki ciśnieniowe należy mieć zawsze na uwadze ich zdolność do przenoszenia naprężeń od ciśnienia wewnętrznego.

### Uwagi dotyczące sposobu ustalania wartości modułu sprężystości $E_L$ zredukowanego ze względu na długotrwały wpływ obciążenia oraz współczynnika pełzania $f$

Wartość modułu  $E$  występującego we wzorze (4), (10), (11) czy (12) określa się zgodnie z metodyką opisaną w normach [26,27], która jest zbliżona do tej przedstawionej w wytycznych [5]. Aby ustalić wartość modułu  $E_L$ , który jest z kolei niezbędny do policzenia grubości powłoki ze

wzoru (1), (6) lub (13) należy wyniki oznaczeń modułu  $E(t)$  uzyskane dla  $t = 10\,000$  godzin interpolować liniowo na skali logarytmicznej aż do osiągnięcia czasu  $t = 438\,000$  godzin (50 lat) [4]. Można też wartość modułu  $E_L$  ustalić w oparciu o wzór (22) wg [18], pod warunkiem że znany jest współczynnik redukcji  $f$  uwzględniający wpływ zjawiska pełzania na właściwości materiału powłoki.

$$E_L = E \cdot f \quad (22)$$

gdzie:

- $E$  – moduł sprężystości przy zginaniu dla oddziaływań krótkotrwałych, MPa
- $f$  – współczynnik redukcji uwzględniający długotrwały wpływ obciążenia.

Do tej pory powszechnie przyjmowano taką samą wartość współczynnika  $f$  dla wszystkich powłok typu CIPP i WHL bez względu na rodzaj zastosowanej w nich żywicy ( $f = 0,5$ ). Wraz z pojawieniem się nowych odmian technologii i bardziej różnorodnych materiałów stopniowo odchodzono od tego typu praktyk, ponieważ ist-

powłok wzmacnianych włóknami szklanymi i nasączone żywicą epoksydową. Należy przy tym podkreślić, że im wyższa wartość współczynnika  $f$  tym ryzyko powstania znacznej deformacji przekroju powłoki pod wpływem długotrwałego działającego obciążenia jest mniejsze. W rezultacie powłoki z wyższym współczynnikiem  $f$  mogą być cieńsze.

Konieczność uwzględniania współczynnika redukcji  $f$  w obliczeniach powłok żywiczych typu CIPP lub WHL jest związana bezpośrednio ze zjawiskiem pełzania, którego one doświadczają a które polega na powolnym ich odkształceniu wskutek długotrwałego oddziaływania obciążenia o wartości mniejszej od ich granicy sprężystości. Warto dodać, że zwykle przyjmuje się taką samą wartość współczynnika redukcji  $f$  do ustalenia obliczeniowej wytrzymałości  $\sigma_L$  lub  $\sigma_{tL}$  dla działań długotrwałych, co w przypadku modułu  $E_L$ . Rzeczywiste wartości ww. parametrów mogą być jednak inne, ponieważ na przebieg zjawiska pełzania ma wpływ wiele czynników, w tym stopień utwardzenia żywicy, temperatura i skład chemiczny medium transportowanego przewodem lub wielkość przyłożonego obciążenia.

**Tabela 1. Minimalne wartości współczynnika pełzania  $f$  zalecane do celów projektowych [16]**  
**Table 1. Minimum values of creep factor  $f$  recommended for design purposes [16]**

Rodzaj żywicy	Żywica epoksydowa	Żywica winyloestrowa	Izoftalowa żywica poliestrowa	Wypełniona izoftalowa żywica poliestrowa
$f$	0,25-0,6	0,5-0,6	0,4-0,5	0,4-0,5

**Tabela 2. Dane dotyczące przewodów, warunków ich ułożenia i eksploatacji**  
**Table 2. Data on pipelines, their bedding conditions and exploitation**

Parametr	Przewód I	Przewód II
Materiał rur	beton	beton
Średnica wewnętrzna $D_i$ , mm	200	600
Owalizacja $q$ , %	2	5
Współczynnik odstępstwa od przekroju kołowego $C$	0,84	0,64
Orientacyjna szerokość wykopu $B_d$ , m	0,70	1,40
Wysokość nadsypki $h$ , m	2,80	3,60
Gęstość gruntu $w$ , g/cm <sup>3</sup>	1,80	
Moduł reakcji gruntu $E'$ , MPa	7,00	
Współczynnik podparcia elastycznego $B'$	0,312	0,350
Poziom wody gruntowej nad wierzchem rury $h_w$ , m	1,00	
Współczynnik wpływu usztywnienia $K$	7,00	
Współczynnik wyporu wody, $R_w$	0,88	0,91
Ciśnienie hydrostatyczne od wody gr. $P$ , kPa	9,81	
Obciążenie od gruntu $q$ , kPa	43,61	58,00
Obciążenie komunikacyjne $W_s$ , kPa	12,90	5,00

niało ryzyko przewymiarowania niektórych powłok, zwłaszcza tych wzmacnianych włóknami szklanymi. W tabeli 1 zestawiono minimalne wartości współczynnika  $f$  obowiązujące dla 4 wybranych rodzajów żywic wg [16].

Wyższe wartości współczynnika  $f$  (np.  $f = 0,7$ ) obowiązują jedynie dla niektórych

### Przykłady obliczeń minimalnej grubości powłok na potrzeby renowacji i rekonstrukcji przewodów

#### Przykład 1

Do pełnej rekonstrukcji przewidziano 2 przewody grawitacyjne o średnicach DN200 i DN600 ułożone na głęboko-

ściach 2,8 i 3,6 m licząc do wierzchu rur. Oba przewody zostały ułożone na podłożu piaskowym, poniżej zwierciadła wody gruntowej ( $h_w = 1,0$  m). Podstawowe dane dotyczące analizowanych przewodów, jak również warunków w jakich były one eksploatowane, zestawiono w tabeli 2. W żadnym przypadku obciążenie eksploatacyjne nie mogło być mniejsze niż  $5 \text{ kN/m}^2$ . Wstępnie założono, że rekonstrukcja ma być przeprowadzona z zastosowaniem 1 spośród 2 powłok, których właściwości podano w tabeli 3. Szczegółowe wyniki przeprowadzonych obliczeń

(dla  $N=2,0$ , gdzie  $n$  – współczynnik bezpieczeństwa) zestawiono natomiast w tabeli 4 i 5.

### Przykład 2

Do pełnej rekonstrukcji przewidziano 2 przewody ciśnieniowe z rur żeliwnych o średnicach DN200 i DN600 ułożone na głębokościach 1,75 i 2,10 m licząc do wierzchu rur. Oba przewody zostały ułożone na podłożu piaskowym, poniżej zwierciadła wody gruntowej ( $h_w = 1,0$  m). Podstawowe dane dotyczące warunków ułożenia i eksploatacji ww. przewodów

**Tabela 3. Dane dotyczące zastosowanych powłok żywicznych**  
**Table 3. Data on the applied resin linings**

Parametr	Powłoka 1	Powłoka 2
Moduł sprężystości przy zginaniu $E$ , MPa	3000	2100
Moduł sprężystości przy zginaniu zredukowany dla działań długotr. $E_L$ , MPa	1500	840
Wytrzymałość na zginanie $\sigma$ , MPa	31	35
Współczynnik $f$ (wartość rzeczywista)	0,5	0,4
Współczynnik Poissona $\nu$	0,3	

**Tabela 4. Zestawienie uzyskanych wyników dla przewodów grawitacyjnych I i II**  
**Table 4. The results obtained for gravity pipelines I and II**

Parametr	Przewód I		Przewód II	
	Powłoka 1	Powłoka 2	Powłoka 1	Powłoka 2
Teoretyczna grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (5) <sup>1</sup> , mm	3,0	3,6 (3,3) <sup>2</sup>	10,8	13,1(12,1)
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (6), mm	2,8	3,4 (3,1)	9,3	11,3 (10,4)
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (1), mm	2,1	2,6 (2,4)	7,7	9,3 (8,6)
Minimalna grubość powłoki $t_L$ , mm	2,8	3,4	9,3	11,3
Współczynnik kształtu DR	71,43	58,82	64,52	53,10
Dopuszczalne ciśnienie, które może być wywierane na powłokę $P$ , MPa	2,87	1,82	9,41	6,21
Szywność powłoki uzyskana w oparciu o wzór (4), MPa	$0,69 \cdot 10^{-3}$	$0,86 \cdot 10^{-3}$	$0,93 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$
Ugięcie powłoki wg Spanglera, %	0,904	0,901	1,117	1,111

<sup>1</sup> wzór (5) już nie obowiązuje

<sup>2</sup> w nawiasie podano teoretyczne grubości powłok, które uzyskano by dla współczynnika redukcyjnego  $f = 0,5$  przyjmowanego dawniej do celów projektowych, a nie dla współczynnika deklarowanego przez producenta.

**Tabela 5. Dane dotyczące przewodów ciśnieniowych, w tym warunków ich ułożenia i eksploatacji**  
**Table 5. Data on pipelines, their bedding conditions and exploitation**

Parametr	Przewód III	Przewód IV
Materiał rur	żeliwo	żeliwo
Średnica wewnętrzna $D_i$ , mm	200	600
Klasa ciśnienia rur, bar	64	64
Owalizacja $q$ , %	2	5
Współczynnik odstępstwa od przekroju kołowego $C$	0,84	0,64
Orientacyjna szerokość wykopu $B_d$ , m	0,70	1,40
Wysokość nadsypki $h$ , m	1,75	2,10
Gęstość gruntu $w$ , $\text{g/cm}^3$	1,80	
Moduł reakcji gruntu $E'$ , MPa	7,00	
Współczynnik podparcia elastycznego $B'$	0,266	0,281
Współczynnik wpływu uszywnienia $K$	7,00	
Poziom wody gruntowej nad wierzchem rury $h_w$ , m	1,00	
Współczynnik wyporu wody, $R_w$	0,81	0,84
Ciśnienie hydrostatyczne od wody gr. $P$ , kPa	9,81	
Obciążenie od gruntu $q$ , kPa	25,10	31,22
Obciążenie komunikacyjne $W_s$ , kPa	18,89	7,56
Maksymalne ciśnienie robocze MOP, MPa	0,38	0,56
Maksymalne dopuszczalne ciśnienie robocze, MAOP, MPa	0,46	0,67
Nadciśnienie $P_s$ , MPa	0,46	0,67

**Tabela 6. Dane dotyczące zastosowanych powłok żywicznych**

**Table 6. Data on the applied resin linings**

Parametr	Powłoka 3	Powłoka 4
Moduł sprężystości przy zginaniu $E$ , MPa	6400	2200
Moduł sprężystości przy zginaniu zredukowany dla działań długotr. $E_L$ , MPa	3810	1100
Wytrzymałość na zginanie $\sigma$ , MPa	161	66
Wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_T$ , MPa	94	120
Współczynnik $f$ (wartość rzeczywista)	0,595	0,5
Współczynnik Poissona $\nu$	0,3	

zestawiono w tabeli 5. Wstępnie założono, że rekonstrukcja ma być przeprowadzona z zastosowaniem 1 spośród 2 powłok, których właściwości podano w tabeli 6. Szczegółowe wyniki przeprowadzonych obliczeń zestawiono natomiast w tabeli 7.

### Przykład 3

Tym razem przewód wodociągowy z rur z żeliwa sferoidalnego o średnicy DN600 miał być poddany renowacji z zastosowaniem powłoki klasy B. W ww. przewodzie stwierdzono kilka otworów pokorozyjnych, z których największy miał średnicę 30 mm oraz nieznaczny ubytek grubości ścianki rur (minimalna grubość ścianki rur  $T = 15,3$  mm). Przeprowadzona kontrola wykazała też owalizację jego przekroju poprzecznego ( $C = 2\%$ ). Warunki ułożenia i eksploatacji przewodu okazały się praktycznie takie same jak w przypadku przewodu IV. Jedynie  $P_s$  było równe 0. W tabeli 8 zestawiono parametry analizowanych powłok (2 żywicznych i 1 natry-

**Tabela 7. Zestawienie uzyskanych wyników dla przewodów ciśnieniowych III i IV**

**Table 7. The results obtained for pressure pipelines III and IV**

Parametr	Przewód III		Przewód IV	
	Powłoka 3	Powłoka 4	Powłoka 3	Powłoka 4
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (16), mm	1,6 (1,9) <sup>3</sup>	1,5	7,1 (8,4)	6,6
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (19), mm	2,3 (3,8)	2,2	10,1 (12,0)	9,4
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (1), mm	1,3	1,9	4,7	6,8
Teoretyczna grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (5), mm	1,7	2,5	5,6	8,0
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (6), mm	1,6	2,3	4,8	6,9
Minimalna grubość powłoki $t_L$ , mm	2,3	2,3	10,1	9,4
Współczynnik kształtu DR	86,96	86,96	59,41	63,83
Dopuszczalne ciśnienie, które może być wywierane na powłokę $P$ , MPa	4,49	4,49	7,90	9,19
Szywność powłoki uzyskana w oparciu o wzór (4), MPa	$0,81 \cdot 10^{-3}$	$0,27 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$0,70 \cdot 10^{-3}$
Ugięcie powłoki wg Spanglera, %	0,864	0,864	0,816	0,845

<sup>3</sup> w nawiasie podano teoretyczne grubości powłok, które uzyskano by dla współczynnika redukcyjnego  $f = 0,5$  przyjmowanego wcześniej do celów projektowych, a nie dla współczynnika deklarowanego przez producenta.

**Tabela 8. Dane dotyczące zastosowanych powłok klasy B**  
**Table 8. Data on the applied linings falling into class B**

Parametr	Powłoka 5	Powłoka 6	Powłoka 7
Typ powłoki	CIPP	CIPP	SIPP <sup>4</sup>
Moduł sprężystości przy zginaniu $E$ , MPa	1724	4000	3900
Moduł sprężystości przy zginaniu zredukowany dla działań długotr. $E_L$ , MPa	575	2000	1950
Wytrzymałość na zginanie $\sigma$ , MPa	44,8	120	53
Wytrzymałość na rozciąganie $\sigma_T$ , MPa	34,5	20	35
Współczynnik $f$	0,333	0,5	0,5
Współczynnik Poissona $\nu$	0,3		

<sup>4</sup> powłoka natryskowa

**Tabela 9. Zestawienie uzyskanych wyników dla przewodu V**  
**Table 9. The results obtained for a pipeline V**

Parametr	Przewód V		
	Powłoka 5	Powłoka 6	Powłoka 7
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (8), mm	3,9	1,9	nie dotyczy
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (10), mm	3,5 <sup>4</sup>	4,9 <sup>4</sup>	nie dotyczy
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (11), mm	6,7	5,07	5,11
Grubość powłoki $t$ uzyskana w oparciu o wzór (15), mm	nie dotyczy	nie dotyczy	2,8
Minimalna grubość powłoki $t_L$ , mm	6,7	5,07	5,11
Współczynnik kształtu DR	89,55	118,34	117,42
Dopuszczalne ciśnienie, które może być wywierane na powłokę $P$ , MPa	6,39	11,78	11,58

<sup>4</sup> Obliczenia wykonano przy założeniu współczynnika tarcia pomiędzy powłoką a przewodem  $f_1 = 0,2$  i  $P_{max} = MAOP = 0,67$  MPa

skowej) natomiast w tabeli 9 podano wyniki przeprowadzonych obliczeń (przy  $N=2,0$ )

## Dyskusja i wnioski

Ze względu na szereg istotnych podobieństw w sposobie doboru oraz wymiarowania powłok niekonstrukcyjnych i konstrukcyjnych do zastosowań ciśnieniowych przedstawionych w [3,29,32] nie ma większego znaczenia, którym opracowaniem będzie posługiwał się projektant. Wyjątek od tej reguły stanowią powłoki częściowo – konstrukcyjne, które wg [3,29] projektuje się inaczej aniżeli na podstawie [32]. W przypadku powłok do zastosowań grawitacyjnych należy już stosować się do zaleceń podanych w [3].

Spośród wielu aktualizacji wytycznych amerykańskich [3], w oparciu o które powstał raport [29] a później także [32], na szczególną uwagę zasługuje ta dotycząca warunku stateczności powłoki na wyboczenie elastyczne (wzór 3) oraz ustalenia grubości powłoki w przypadku wystąpienia w przewodzie nadciśnienia (wzór 19).

Przeprowadzona analiza wyników potwierdziła, że zmiana dotycząca lokalizacji współczynnika  $C$  we wzorze (3) w porównaniu ze wzorem (5) wg [3] spowodowała wyraźne zmniejszenie obliczeniowej grubości powłok rekonstrukcyjnych 1 i 2 poddanych jednoczesnemu oddziaływaniu obciążenia od gruntu, taboru samo-

chodowego i ciśnienia hydrostatycznego od wody gruntowej. W przypadku przewodu grawitacyjnego I minimalna grubość powłoki 1 wg wzoru (3) oraz później (6) okazała się o 6,7% a powłoki 2 o 5,6% mniejsza niż tej, którą uzyskano w oparciu o wzór (5) obowiązujący do 2008 r. Jeśli chodzi o przewód grawitacyjny II to ta różnica wyniosła odpowiednio 13,9% dla powłoki 1 oraz 13,7% dla powłoki 2. Podobny trend zaobserwowano również w przypadku rekonstrukcyjnych powłok ciśnieniowych 3 i 4. W ramach prowadzonych analiz nie określono wpływu zmian ciśnienia w przewodzie o tej samej średnicy na grubość powłoki.

Jak można było się spodziewać duży wpływ na ostateczną grubość powłok przeznaczonych do zainstalowania w przewodach grawitacyjnych miał moduł  $E$  oraz przyjęty współczynnik  $f$  uwzględniający wpływ zjawiska pęcznienia. W przypadku powłok ciśnieniowych kluczowa okazała się wytrzymałość na rozciąganie (powłoki konstrukcyjne) lub zginanie (powłoki częściowo – konstrukcyjne o ile spełniony był warunek opisany wzorem (9). Dlatego tak ważne jest, aby nie sugerować apriori rodzaju czy sztywności obwodowej powłoki bez zapoznania się z jej właściwościami mechanicznymi i bez sprawdzenia warunków, o których wspomniano wcześniej. Szczególną ostrożność należy zachować zwłaszcza przy ustalaniu wartości współczynnika  $f$ . O ile dawniej dopuszczalne było przyjęcie do celów pro-

jektowych  $f = 0,5$  bez względu na rodzaj powłoki tak teraz wskazana jest jego weryfikacja. Założenie bowiem innej wartości  $f$  niż rzeczywista może doprowadzić do przewymiarowania, albo do niedowymiarowania powłok. Zazwyczaj przewymiarowanie powłoki obserwuje się, gdy  $f_{rzecz} > f$ , a niedowymiarowanie gdy  $f_{rzecz} < f$ , gdzie  $f_{rzecz}$  – rzeczywista wartość współczynnika redukcyjnego wg deklaracji producenta. Im większa będzie różnica pomiędzy  $f_{rzecz}$  a  $f$ , tym większe będą rozbieżności w otrzymywanych grubościach powłok. Przykładowo, jeśli do rekonstrukcji przewodu grawitacyjnego I o  $C = 2\%$  zastosowana byłaby powłoka 1 o module  $E = 3000$  MPa i  $f = 0,5$  a nie powłoka 2 o module  $E = 2100$  MPa i  $f = 0,4$  to jej minimalna grubość wynosiłaby 2,8 a nie 3,4 mm, co zapewniłoby redukcję grubości o 21,4%. Z kolei przewód II o  $C = 5\%$  mógłby być poddany rekonstrukcji z zastosowaniem powłoki 2 o grubości 11,3 mm zamiast powłoki 1 o grubości 9,3 mm. W tym przypadku redukcja grubości powłoki wyniosłaby 21,5%. W przewodzie ciśnieniowym III można byłoby natomiast zastosować powłokę 3 o minimalnej grubości 2,3 mm. Grubość powłoki 4 okazała się co prawda identyczna jak powłoki 3 ale niestety nie zagwarantowała ona spełnienia warunku wyrażonego za pomocą wzoru (4) wg [3]. Jest to szczególnie przypadki wynikające z niższej wartości modułu  $E$  powłoki 4 w porównaniu z powłoką 3. W przypadku przewodu IV wystarczyłaby natomiast powłoka 4 o minimalnej grubości 9,4 mm zamiast powłoki 3 o grubości 10,1 mm (redukcja grubości o 7,4%). Konsekwencje zastosowania innej niż rzeczywista wartości współczynnika  $f$  pokazano najpierw na przykładzie powłoki 2, dla której  $f_{rzecz} < f$ , a później powłoki 3, dla której  $f_{rzecz} > f$ .

Minimalne grubości powłok 6 i 7 uzyskane w oparciu o wzór (1) okazały się praktycznie takie same, co było spowodowane małą różnicą (jedynie 2,5%) pomiędzy wartościami ich modułów sprężystości  $E$ . Z kolei grubość powłoki 5 o znacznie niższym module  $E$  okazała się o 23,7% większa od powłoki 7 i o 24,3% większa od powłoki 6. Dość dużą różnicę, tj. około 51,3%, zaobserwowano w grubościach powłok 5 i 6 wyznaczonych w oparciu o wzór (8). Nie powinno to dziwić, biorąc pod uwagę, że długotrwała wytrzymałość na zginanie powłoki 6 jest o 75,2% większa od wytrzymałości powłoki 5 (wytrzymałość na zginanie jest uwzględniana we wzorze na grubość powłoki klasy B). W przypadku powłoki 6 różnica w grubościach uzyskanych w oparciu o wzór (8)



i (10) jest największa i wynosi 157,9%. Powłoka ta jednak ma 6 razy większą wytrzymałość na zginanie niż wytrzymałość na rozciąganie. Jest to bardzo istotne, ponieważ we wzorze (8) przy określaniu grubości powłoki uwzględnia się długotrwałą wytrzymałość powłoki na zginanie, natomiast we wzorze (10) długotrwałą wytrzymałość na rozciąganie.

#### LITERATURA

- [1] Abel T.: Laboratory tests and analysis of CIPP epoxy resin internal liners used in pipelines – part II: comparative analysis with the use of the FEM and engineering algorithms, *Studia Geotechnica et Mechanica*, 2021; 43(3): 307–322
- [2] Abel T.: Analiza stateczności konstrukcji zespolonej „rura-wykładzina ściśle pasowana” na podstawie wytycznych DWA-A 143-2, *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA*, t. XXXIII, z. 63 (2/II/16), 2016, str. 7-20
- [3] ASTM F1216-07b. Standard Practice for Rehabilitation of Existing Pipelines and Conduits by the Inversion and Curing of a Resin-Impregnated Tube, Publication by ASTM International, 2007.
- [4] ASTM D2990-01. Standard Test Methods for Tensile, Compressive and Flexural Creep and Creep-Rapture of Plastics, Publication by ASTM International, 2017
- [5] ASTM D790-17. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Publication by ASTM International, 2017
- [6] ATV-M 127-2. Static calculations for the rehabilitation of sewers with lining and assembly procedures, Hennef, 2000
- [7] AWWA C906-15 Polyethylene (PE) pressure pipe and fittings, 4 in. through 65 in. (100 mm through 1,650 mm) for waterworks, Publication by ANSI/AWWA, 1999
- [8] AWWA C950-20 Fiberglass pressure pipe, Published by ANSI/AWWA, Edition approved April 20, 2020.
- [9] AWWA M28 Manual: Rehabilitation of water mains, 3 Edition, Published by ANSI/AWWA, 2014
- [10] AWWA M45 Manual: Fiberglass Pipe Design, 3 Edition, Published by ANSI/AWWA, 2012
- [11] Boot, J.C.: Elastic buckling of cylindrical pipe linings with small imperfections subject to external pressure. *Trenchless Technology Research* 12 (1-2): 3-15, 1998, [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(98\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(98)00018-2)
- [12] Doherty I.J.: CIPP liner changes under F1216-07b, *Materiały konferencyjne*, 2008 No-Dig Conference & Exhibition, Texas, Dallas, 27.04-02.05. 2008, USA
- [13] DWA-A 143-2: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und – kanälen mit Lining – und Montageverfahren, Juli 2015
- [14] DWA-A 143-21: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 21: Bauliche Sanierungsplanung – Juni 2021
- [15] Ellison D., Sever F., Oram P., Lovins W., Romer A., Global review of spray – on structural lining technologies, Publication sponsored by Water Research Foundation, 2010, p. 159
- [16] Engineering design guide for rehabilitation with cured – in – place pipe Second edition, Publication sponsored by LANZO Lining Services, Inc., 2010, str. 48
- [17] Fu, Guoyang & Shannon, Benjamin & Azoor, Rukshan & Deo, Ravin & Kodikara, Jayantha. Equations for gap-spanning design of underground cast iron pipes lined with thermosetting polymeric liners. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 119, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104234>
- [18] Ji, H.W.; Koo, D.D.; Kang, J.-H. Short – and Long-Term Structural Characterization of Cured-in-Place Pipe Liner with Reinforced Glass Fiber Material. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 2073. <https://doi.org/10.3390/ijerph17062073>
- [19] Kuliczkowski A.: *Rury kanalizacyjne t.II. Projektowanie konstrukcji*, Monografia nr 42, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, str. 507
- [20] Kuliczkowski A., Mogielski K.: Wpływ instalacji prelinera w technologii CIPP na nośność rur betonowych, 2014, *Instal*, 4, str. 69-75
- [21] Kuliczkowski A. i inni: *Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska wyd. II*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, 2019, s. 735
- [22] Kuliczkowski A.: Optymalna grubość powłok CIPP stosowanych w bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych, *Instal*, 5, 2020, str. 41-46
- [23] Moore, I.D.: Tests for pipe liner stability: What we can and cannot learn. *Proc. North American NO-DIG '98 Conference*, Albuquerque: 444-457, 1998
- [24] Moser A.P.: *Buried pipe design*. Second Edition, Published by the McGraw – Hill Companies, Inc., 1990, p. 608
- [25] PN-EN ISO 11295:2018-02 – Wytyczne do klasyfikacji i projektowania systemów przewodów rurowych z tworzyw sztucznych stosowanych do renowacji
- [26] PN-EN ISO 14125:2001 – Kompozyty tworzywowe wzmocnione włóknem – Oznaczenie właściwości przy zginaniu
- [27] PN-EN ISO 178:2019-06 – Tworzywa sztuczne – Oznaczenie właściwości przy zginaniu
- [28] Przybyła B.: Wytyczne ATV-M 127-2 i DWA-A 143-2. Podstawowe Zmiany w zasadach wymiarowania linerów na potrzeby renowacji technicznej rurociągów, *Inżynieria Bezwykopowa*, 3, 2017, str. 48 – 56.
- [29] Structural classification of pressure pipe linings. Suggested protocol for product classification, Publication by American Water Works Association, 2019, p. 44
- [30] Thépot O.: International Comparison of Methods for the Design of Sewer Linings, *Erschienen in 3R International* 8-9/2004, p. 8
- [31] Thépot, O.: A new design method for non-circular sewer linings. *Trenchless Technology Research* 15 (200) No. 1 pp. 25-41
- [32] Water Industry Standard for Cured-in-place pipes (CIPP) used for the renovation of drinking water pipes, Publication by Water Services Association of Australia Limited, 2021, p. 47
- [33] WL Plastics HDPE Pressure Pipe – Determining Pressure Ratings for Applications, Publication by NSF, American Water Works Association and Plastic Pipe Institute, 2008, p. 4
- [34] WRc/WAA 4th ed. *Sewerage Rehabilitation Manual (SRM)*, UK Water Research Centre/Water Authorities Association, Swindon, 2001.
- [35] 3M™ Scotchkote™ Pipe Renewal Liner 2400 Brochure