

wysokości), Sr_1 (udział nośny wierzchołków), Sk (wysokość rdzenia) – w kontekście elementarnych stałych materiałowych wpływających na odkształcenia powierzchni, jak twardość czy moduł Younga. Dalsze prace będą skoncentrowane na zbudowaniu modelu matematycznego wiążącego wyżej omawiane wielkości. Wydaje się, że metodologia empiryczna jest zasadna w badaniu omawianego zjawiska. Dominujący w literaturze przedmiotu sposób opracowywania modeli teoretycznych [7,8] nie umożliwił do chwili obecnej precyzyjnego opisu tak złożonego zespołu zjawisk, jakim jest rezystancja zestykowa.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Au A., Ciok Z., Maksymiuk J.: *Łączniki elektromagnetyczne średnich napięć*, WNT, Warszawa 1984.
- [2] Dzekcer N., Wislew J.: *Mnogoampernyje kontaknyje sojedinenija*, Energia, Leningrad 1987.

- [3] Holm R.: *Electric contacts*, Springer-Verlag, Berlin 1967.
- [4] Karsznia H., Wojcieszko J.: *Podzespoły stykowe w elektronice*, WKiŁ, Warszawa 1970.
- [5] Kolimas Ł., Kulas S., Piskała M., Zgliński K.: *Laboratorium torów wielkoprądowych i zestyków*, OWPW, Warszawa 2014.
- [6] Kulas S.: *Analiza wpływu struktury powierzchni styczności styków na wartość rezystancji zestykowej*, „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa” 2007, nr 7(438).
- [7] Schoft S., Kindersberger J., Lobl H.: *Joint resistance of busbar-joints with randomly rough surfaces*, 21 ICEC 2002, Zurich 2002.
- [8] Slade P., *Electrical Contacts, Principles and Applications*, Marcel Dekker, New York 1999.
- [9] Stechnij T., Zaborski S., *Zjawisko rezystancji zestykowej w aparatach energetycznych a struktura geometryczna warstwy wierzchniej*, „Energetyka” 2015, nr 11.



Zdzisław Śloderbach¹⁾

Politechnika Opolska

Katedra Zastosowań Chemii i Mechaniki

Niejednoznaczność deformacyjno-wymiarowa wynikająca z dyrektywy UE dotyczącej gięcia rur dla dużych i małych odkształceń

Dimensions-deformation nonuniqueness resulting from the EU directive concerning pipes bending for large and small deformations

Zgodnie z treścią Dyrektywy UE dotyczącej wymagań przy wytwarzaniu urządzeń ciśnieniowych [1, 2], do obliczania odkształcenia podczas gięcia rur wykorzystuje się miarę względnego odkształcenia [3-10], która jest zarazem miarą dla maksymalnej wartości składowej wzdłużnej stanu odkształcenia dla przypadku uproszczenia 1-go rzędu, por. [8-10].

W artykule wyprowadzone zostaną odpowiednie wyrażenia na trzy składowe główne odkształceń względnych, które zgodnie wzorem zawartym w [1,2] także osiągają swoje maksymalne wartości. Następnie wyprowadzone zostanie wyrażenie na minimalną wartość grubości ścianki w strefie zgięcia kolana. Podczas gięcia rur na kolana rurociągów lub innych instalacji

rurowych powstają duże odkształcenia (rzędu kilkudziesięciu procent, maksymalnie nawet >50%) [8-10]. Stosowane wówczas do obliczeń logarytmiczne miary składowych odkształceń i intensywności nie będą równe odpowiednim miarom odkształceń względnych.

Gdy użyje się jednak do obliczeń stanu odkształcenia wyrażenie zamieszczone w Dyrektywie UE [1,2], w celu obliczania minimalnej (dopuszczalnej) grubości ścianki, zgodne z uproszczeniem 1-go rzędu [8-10], to dla przypadku wyrażen słusznych dla dużych deformacji, na podstawie obliczeń okazuje się, że grubości te są równe tym obliczonym w miarach logarytmicznych odkształceń. Także na podstawie obliczeń wymagane minimalne początkowe grubości rur do gięcia będą sobie równe.

¹⁾ E-mail: z.sloderbach@po.opole.pl

Inna sytuacja występuje w przypadku użycia wyrażen w miarach odkształceń względnych słusznych dla małych odkształceń. Wówczas na podstawie obliczeń okazuje się, że grubości te nie są równe tym obliczonym w miarach logarytmicznych odkształceń. Obliczone minimalne (dopuszczalne) grubości ścianki, zgodne z uproszczeniem 1-go rzędu [8-10] w miarach odkształceń względnych są mniejsze, a odpowiednio wymagane (minimalne) początkowe grubości rur do gięcia będą większe od tych obliczonych w miarach logarytmicznych.

W Dyrektywie UE zamieszczono także empiryczne wyrażenia do obliczania wymaganych minimalnych grubości ścianki w warstwach rozciąganych i ściskanych zgiętego kolana. Wyrażenia te są identyczne jak wyrażenia zamieszczone w pracach [11, 12] z tą różnicą, że w miejsce grubości obliczeniowej stosuje się grubość rzeczywistą (porównaj uwagi zamieszczone w [2]). Zamieszczone wyrażenia mogą być użyteczne i zarazem będą stanowić pewne kryterium dla doboru odpowiedniej metody (technologii) gięcia rur na elementy urządzeń ciśnieniowych (np. z zastosowaniem ciągnięcia lub popychania, z zastosowaniem trzpienia lub bez trzpienia, por. [13-17]). Dotyczy to w szczególności stawianych warunków i wymagań służących do kwalifikowania procesu gięcia rur oraz oceny giętych rur i kolan przeznaczonych np. na elementy kotłów wodnorurkowych [1, 2].

Celem pracy jest zwrócenie uwagi na ewentualne następstwa, jakie mogą wyniknąć w konsekwencji użycia wyrażen do obliczania odkształcenia, zgodnie z Dyrektywą UE. Podana zależność do obliczania odkształcenia wyrażona jest w miarach odkształceń względnych, w zależności od d_{ext} i odnosi się do warstw rozciąganych. Wyrażenie to jest równe zmodyfikowanemu wyrażeniu na składową wzdłużną dla uproszczenia 1-go rodzaju zawartego w pracach [8-10] w momencie osiągnięcia w punktach warstw rozciąganych stanu maksymalnych odkształceń, gdy ($a = b = 0^\circ$ i $ka_g = 180^\circ$). W praktyce produkcyjnej, badaniach doświadczalnych, obliczeniach analitycznych i numerycznych stosuje się najczęściej logarytmicz-

ne miary odkształcenia, które są słuszne dla małych i dużych odkształceń [8-10, 13, 20].

Podstawowe założenia i zależności

W pracach [1, 2] przedstawione zostało wyrażenie na obliczanie odkształcenia w procesie gięcia rur w warstwach rozciąganych zgodnie z dyrektywą UE

$$O = \frac{d_{ext}}{2R_m}, \quad (1)$$

gdzie:

O – odkształcenie rozciągające wzdłużne w miarach względnych,
 d_{ext} – średnica zewnętrzna rury przeznaczonej do gięcia,
 R_m – średni (mean) promień gięcia, $R_m \in \langle R - y_{0max}; R \rangle$.

Parametry geometryczne procesu gięcia przedstawiono na rysunku 1.

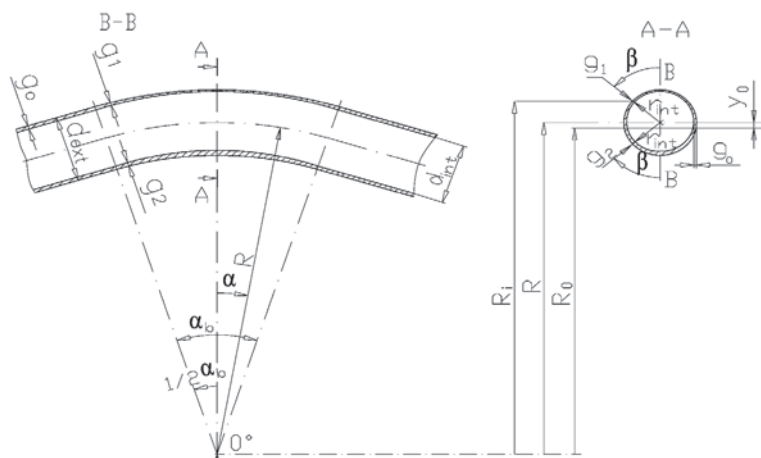
Jak wynika z rysunku 1 wyrażenie (1) uwzględnia przesunięcie osi obojętnej gięcia poprzez średni promień gięcia R_m , ponieważ w ogólności $R \neq R_m$. Gdy $y_0 = 0$ to $R = R_m$.

W Dyrektywie EU brak jest w jednoznaczności określenia dla wyrażenia R_m . Może to być np. średnia arytmetyczna lub geometryczna promienia gięcia R i promienia ($R - y_{0max}$) lub też inna wartość z przedziału $R_m \in \langle R; R - y_{0max} \rangle$.

Analiza wyrażen dla przypadku dużych odkształceń

Według umownego przyjęcia duże odkształcenia występują wówczas, gdy są większe od 5%.

Ponieważ gięta rura jest elementem przestrzennym, więc prawidłowa analiza stanu odkształceń plastycznych wymaga określenia trzech głównych składowych odkształcenia.



Rys. 1. Geometryczno-wymiarowe wielkości występujące podczas gięcia rur

- d_{ext} i d_{int} – zewnętrzna i wewnętrzna średnica giętej rury,
- g_0 – początkowa grubość ścianki giętej rury,
- g_i – bieżąca i aktualna grubość ścianki rury w strefie ($i = 1$ dla warstw rozciąganych, $i = 2$ dla warstw ściskanych),
- r_{ext} i r_{int} – zewnętrzny i wewnętrzny promień giętej rury,
- R i R_0 – promień gięcia i promień położenia warstwy neutralnej giętej rury,
- R_i – aktualny i bieżący promień związany z odkształceniem wzdłużnym,
- y_0 – przesunięcie osi obojętnej gięcia plastycznego. Na tej osi odkształcenia są równe zero.

Litery greckie

- α – bieżący kąt w strefie gięcia określony w głównej płaszczyźnie gięcia i w płaszczyznach do niej równoległych, $\alpha \in \langle 0^\circ; \alpha_b/2 \rangle$, gdzie α_b – kąt gięcia plastycznego, $\alpha_b \in \langle 0^\circ; 180^\circ \rangle$,
- α_0 – kąt zgięcia (kąt obrotu wzornika, ciągadła giętarki itp) i w praktyce, $\alpha_0 \in \langle 0^\circ; 180^\circ \rangle$. W strefie gięcia zachodzi równość kątów zgięcia i gięcia, więc ($\alpha_0 = \alpha_b$),
- β – bieżący kąt określony w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny gięcia, $\beta \in \langle 0^\circ; 90^\circ \rangle$, gdy ($y_0 \neq 0$), wówczas $\beta \equiv \beta_i$, gdzie $\beta_i \in \langle 90^\circ \pm \beta_0 \rangle$, $i = 1, 2$ ($i = 1$, znak (+) dla warstw rozciąganych oraz $i = 2$ i znak (-) dla ściskanych) oraz $\sin \beta_0 = y_0/r_{ext}$, por. [9].

Składowe te we względnych i logarytmicznych miarach zgodnie z przyjętą w mechanice ciała stałego symboliką i zgodnie z oznaczeniami, przyjętymi w pracach [8-10], gdy ($a = b = 0^\circ$ i $ka_b = 180^\circ$) po przekształceniu mają dla przypadku uproszczenia 1-go rodzaju, por. [10] następujące postacie.

Gdy ($v_0 \neq 0$ to $R_m \neq R$)

$$\varepsilon'_1 = \frac{d_{ext}}{2R_m}, \quad \varepsilon'_2 = \frac{d'_{1r} - d_{ext}}{d_{ext}}, \quad \varepsilon'_3 = \frac{g'_{1r} - g_0}{g_0}. \quad (2)$$

$$\varphi'_1 = \ln \frac{2R_m + d_{ext}}{2R_m}, \quad \varphi'_2 = \ln \frac{d'_{1r}}{d_{ext}}, \quad \varphi'_3 = \ln \frac{g'_{1l}}{g_0}, \quad (3)$$

gdzie:

d'_{1r} i d'_{1l} – zewnętrzna minimalna średnica kolana w warstwach rozciąganych określona dla przypadku uproszczenia 1-go rodzaju odpowiednio we względnych (relative) i logarytmicznych miarach odkształcenia, gdzie $d'_{1r} = d_{int} + 2g'_{1r}$ i $d'_{1l} = d_{int} + 2g'_{1l}$,

g'_{1r} i g'_{1l} – minimalna grubość ścianki zgiętego kolana w warstwach rozciąganych określona dla przypadku uproszczenia 1-go rodzaju odpowiednio we względnych i logarytmicznych miarach odkształcenia.

Warunki plastycznej nieściśliwości materiału dla przypadku dużych odkształceń plastycznych mają następującą postać

$$\begin{cases} \varepsilon'_1 + \varepsilon'_2 + \varepsilon'_3 + \varepsilon'_1 \varepsilon'_2 + \varepsilon'_1 \varepsilon'_3 + \varepsilon'_2 \varepsilon'_3 + \varepsilon'_1 \varepsilon'_2 \varepsilon'_3 = 0, \\ \varphi'_1 + \varphi'_2 + \varphi'_3 = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Wzory na intensywność odkształcenia plastycznego dla przypadku dużych odkształceń mają postać następującą

$$\begin{cases} \varepsilon'_{(i)} = \exp \sqrt{\frac{2}{3} (\ln^2(1 + \varepsilon'_1) + \ln^2(1 + \varepsilon'_2) + \ln^2(1 + \varepsilon'_3))} - 1, \\ \varphi'_{(i)} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varphi_1'^2 + \varphi_2'^2 + \varphi_3'^2)}. \end{cases} \quad (5)$$

Podstawiając odpowiednio wyrażenia (2) i (3) do warunku nieściśliwości (4) i po wykonaniu obliczeń otrzymano następujące rezultaty jak na rysunkach 2 i 3. Podstawiając zaś wyrażenia (2) i (3) do wyrażeń (5) po wykonaniu obliczeń otrzymano następujące wykresy przedstawione na rysunku 4.

Analiza wyrażeń ważnych dla małych odkształceń

W tym przypadku wyrażenia na nieściśliwość plastyczną materiału oraz intensywność odkształceń plastycznych i mają następującą postać

$$\varepsilon'_1 + \varepsilon'_2 + \varepsilon'_3 = 0, \quad (6)$$

oraz

$$\varepsilon'_{(i)s} = \sqrt{\frac{2}{3} (\varepsilon_1'^2 + \varepsilon_2'^2 + \varepsilon_3'^2)}. \quad (7)$$

Natomiast formalna postać wyrażeń na składowe stanu odkształcenia (2)-(3) pozostaje bez zmian. Podstawiając formalnie wyrażenia (2) do warunku na nieściśliwość plastyczną (6), po wykonaniu przekształceń otrzyma się następujące wyrażenie

$$g'_{1rs} = g_0 - \frac{g_0 d_{ext}^2}{2R_m (d_{ext} + 2g_0)} \quad (8)$$

gdzie:

g'_{1rs} – minimalna grubość ścianki zgiętego kolana w warstwach rozciąganych określona dla przypadku uproszczenia 1-go rodzaju odpowiednio we względnych miarach odkształcenia dla przypadku małych (small) odkształceń.

Rozwiązując formalnie wyrażenie (8) względem g_0 i odpowiednio zmieniając indeksy w wielkościach na grubości początkowe (wyjściowe g'_{0rs}) i wymagane g_1 , po przekształceniach otrzyma się

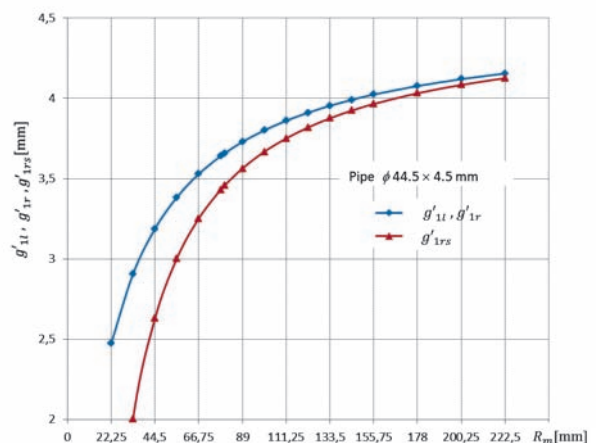
$$\begin{aligned} g'_{0rs} = & \frac{-[2R_m(d_{ext} - 2g_1) - d_{ext}^2]}{8R_m} + \\ & + \frac{\sqrt{[2R_m(d_{ext} - 2g_1) - d_{ext}^2]^2 + 32R_m^2 d_{ext} g_1}}{8R_m}, \end{aligned} \quad (9)$$

Wyrażenia do obliczenia odpowiednich grubości ścianek giętych rur używając miar logarytmicznych pozostają bez zmian. Jak stwierdzono we wstępie pracy logarytmiczne miary odkształceń są słuszne zarówno dla małych jak i dla dużych odkształceń.

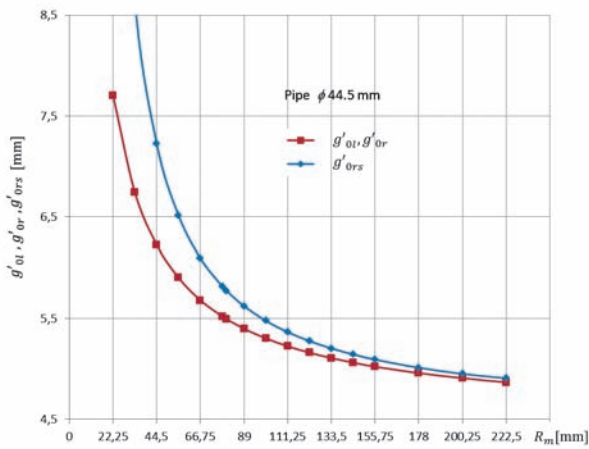
Analiza otrzymanych wyników obliczeniowych

Podstawiając odpowiednio wyrażenia (2) i (3) do warunków nieściśliwości (4) i (6) oraz wykorzystując wyrażenie (8), po wykonaniu obliczeń otrzymano rozkłady grubości ścianki w wierzchołku kolana, jak na rysunku 2.

Następnie podstawiając odpowiednio wyrażenia (2) i (3) do warunku nieściśliwości (4) i (6) oraz wykorzystując wyrażenie (9), po wykonaniu obliczeń otrzymano rozkłady wyjściowej grubości ścianki rury do gięcia przy wymaganej w wierzchołku kolana grubości $g'_1 = 4,5$ mm, jak na rysunku 3.

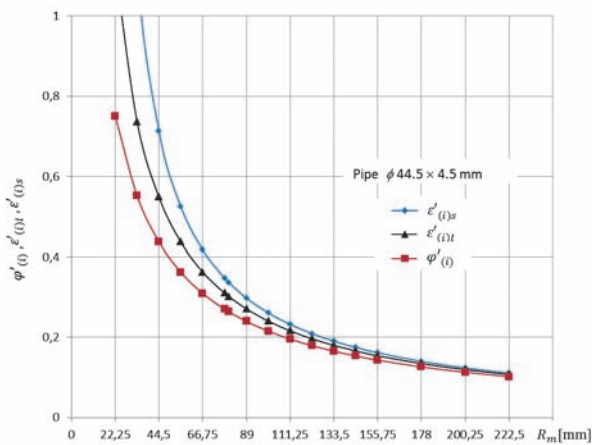


Rys. 2. Zmiany wartości minimalnych grubości ścianki zgiętego kolana (g'_{1l} , g'_{1r} , g'_{1rs}) w zależności od wartości średniego promienia gięcia R_m dla giętej rury o wymiarach $\phi 44,5 \times 4,5$



Rys. 3. Zmiany wartości początkowych grubości ścianki rury (g'_{0r} , g'_{0l} i g'_{0rs}) przeznaczanej do gięcia w zależności od wartości średniego promienia gięcia R_m dla giętej rury o wymiarach $\phi 44.5 \times 4.5$

Podstawiając zaś wyrażenia (2) i (3) do wyrażeń (5) i (7) po wykonaniu obliczeń otrzymano wykresy przedstawione na rysunku 4.



Rys. 4. Zmiana wartości intensywności plastycznych odkształceń ($\varphi'_{(i)}$, $\varepsilon'_{(i)}$ i $\varepsilon'_{(is)}$) w zależności od wartości średniego promienia gięcia R_m dla giętej rury o wymiarach $\phi 44.5 \times 4.5$

Z przeprowadzonych obliczeń i wykresów na rysunkach 2, 3 i 4 wynikają następujące nierówności (i równości) dla przypadku dużych i małych odkształceń

$$(g'_{lr} = g'_{ll}) > g'_{lrs} \quad \text{i} \quad g'_{0rs} > (g'_{0r} = g'_{0l}). \quad (10)$$

$$\varepsilon'_{(is)} > \varepsilon'_{(i)} > \varphi'_{(i)}. \quad (11)$$

$$\varepsilon'_1 > \varphi'_1 < \varepsilon'_{1s}, \quad |\varepsilon'_2| < |\varphi'_2| < |\varepsilon'_{2s}|, \quad (12)$$

$$|\varepsilon'_3| < |\varphi'_3| < |\varepsilon'_{3s}|,$$

Powyższe nierówności (i równości) są słuszne dla wszystkich średnich i wyjściowych promieni gięcia, gdy ($R > y_{0max}$), por. [9].

1. Powyższe, przykładowe rezultaty obliczeniowe wykazują, że dla przypadku dużych odkształceń wartości minimalnej grubości ścianki obliczone wg Dyrektywy UE są równe tym, otrzymanym z użycia miar odkształceń logarytmicznych (rzeczywistych), natomiast wartości odkształceń są różne. Natomiast w przypadku użycia miar odkształceń względnych słusznych dla małych odkształceń grubości ścianek są różne. Grubości ścianki podczas gięcia są mniejsze, a odpowiednio wyjściowe grubości rury do gięcia są większe od tych uzyskanych z miar logarytmicznych (por. wykresy na rys. 2 i 3). Są to więc pewnego rodzaju oszacowania górne, a więc bardziej bezpieczne z punktu widzenia wytrzymałości doraźnej i trwałości eksploatacyjnej od tych obliczanych według logarytmicznych miar odkształceń.
2. Logarytmiczne miary odkształceń, ze względu na swoje praktyczne właściwości, są najczęściej stosowane do opisu stanu odkształcenia w wielu procesach obróbki plastycznej, w tym i podczas gięciu rur [8-10,13-20]. Wydaje się, że ten fakt powodować może pewne dylematy i problemy natury projektowej, technologicznej oraz eksploatacyjno-wytrzymałościowej [9, 12, 20].
3. Aby więc otrzymać wymagane (zgodnie z wyrażeniem w Dyrektywie UE dotyczącej urządzeń ciśnieniowych i wymagań dotyczących wytwarzania [1,2]), wartości składowych odkształcenia i intensywności odkształcenia oraz grubości ścianki zgiętych kolan, a także grubości początkowe rur przeznaczonych do gięcia, wówczas należy korzystać z zależności (2), (4), (6) i (7), które przedstawiono w niniejszej pracy. Jak widać z rysunków 2-4 i wzorów (8)-(10) grubości ścianek są równe, lecz wartości składowych i intensywności odkształcenia są różne.
4. Praca jest pewnego rodzaju podsumowaniem i syntezą rezultatów otrzymanych we wcześniejszych pracach autora, por. [9, 20].

PIŚMIENNICTWO

- [1] EN 13445-4 „Unfired Pressure Vessels” – Part 4: Fabrication, (point 9.2.4 Tube Bents, expression 9.2-4), 2009 or earlier: Draft Standart EN UFPV “Unfired Pressure Vessels” – Part 4. “Manufacture”, CEN/TC54/267 JWGB N277, rev. 5, May, 1996.
- [2] Zdankiewicz M., *Dyrektywa dotycząca urządzeń ciśnieniowych. Wymagania dotyczące wytwarzania*, „Dozór Techniczny” 1998, nr 2, s. 25-33.
- [3] Hill R., *Mathematical Theory of plasticity*, Oxford, At the Clarendon Press, 1980.
- [4] Johnson W.; Mellor P.B., *Engineering Plasticity*, van Nostrand Reinhold Company, London 1975.
- [5] Lubliner J., *Plasticity Theory*, Macmillan, New York 1990.
- [6] Mendelson A. *Plasticity-Theory and Applications*, Mc Millan Company, New York 1998.
- [7] Życzkowski M., *Combined Loading in the Theory of Plasticity*, PWN - Nijhoff, Warszawa-Alpen aan den Rijn, 1981.
- [8] Śloderbach Z., Strauchold S., *Przybliżone metody obliczania odkształceń w procesie gięcia rur*, „Dozór Techniczny” 1999, nr 1, s. 1-6.

- [9] Śloderbach Z., Wybrane zagadnienia mechaniki gięcia łuków gładkich rurociągów, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002, s. 1-218.
- [10] Śloderbach Z., Derivation of relations and analysis of tube bending processes using discontinuous fields of plastic strains. Part I. Derivation of the geometric-analytic relationships. Part II. Discussion and analysis of the obtained results. "International Journal of Applied Mechanics and Engineering" 2015, vol. 20, No 2, p. 417-435.
- [11] Praca zbiorowa, Obliczenia wytrzymałościowe. No 030010-2215 00L/00, Fabryka Kotłów Parowych „RAFAKO” S.A., Racibórz.
- [12] Praca zbiorowa, Wymagania techniczne Nr WT-1/0/R: Obliczenie i sprawdzanie grubości ścianki rur zgiętych, Fabryka Kotłów Parowych „RAFAKO” S.A., Racibórz.
- [13] Franz W.D., Das Kalt-Biegen von Rohren, Springer-Verlag, Berlin 1961.
- [14] Korzemeski J.W., Gięcie rur cienkościennych, WNT, Warszawa 1971.
- [15] Wick CH., Benedict J.T., Veilleux R.F., Tool and manufacturing engineers handbook. A reference book for manufacturing engineers, managers and technicians, Volume II, Forming, Fourth Edition, Society of Manufacturing Engineers, One SME Drive, Dearborn, Michigan, USA, 2001.
- [16] Zhang Z., Yang H., Li H., Ren N., Tian Y., *Bending behaviors of large diameter thinwalled CP-Ti tube in rotary draw bending*, *Progress in Natural Science*, "Materials International" 2011, 21, p. 401-412.
- [17] Zhiqiang J., Mei Z., He Y., Xudong X., Guangjun L., *Deformation Behavior of Medium strength TA18 High-pressure Tubes During NC Bending, with Different Bending Radii*, "Chinese Journal of Aeronautics" 2011, vol. 24, p. 657-664.
- [18] Tang N.C., *Plastic-deformation analysis in tube bending*, "International Journal of Pressure Vessels and Piping" 2000, vol. 77, No. 12, Publisher: Elsevier, UK, p. 751-759.
- [19] Grunow O., *Praktisches Rohrbiegen*, Springer-Verlag, Berlin 1985.
- [20] Śloderbach Z., *Odkształceniowo-wymiarowy efekt wynikający z dyrektywy UE dotyczącej gięcia rur dla dużych odkształceń*, „Energetyka” 2015, nr 10, s. 677-680.



Paweł Ziółkowski, Janusz Badur, Grzegorz Bzymek
 Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN
 Zakład Konwersji Energii

Modelowanie węzła stopnia regulacyjnego turbin typu 360 MW

Modelling of the steam turbine control stage of turbine type 360 MW

Ze względu na dostosowywanie energetyki zawodowej do zmiennych warunków pracy następuje odstrojenie bloków energetycznych od projektowych parametrów pracy. Analizując stan obciążenia poszczególnych elementów obiegu należy stwierdzić, że szczególnie narażone na zmienne parametry pary są zawory [1] oraz pierwsze stopnie turbiny [2,3]. Wychodząc naprzeciw tym zagrożeniom podnosi się bezpieczeństwo eksploatacji turbin parowych typu 18K370 [4]. Pracują one w różnych reżimach obciążenia węzła stopnia regulacyjnego, a zatem staje się zasadne sięganie po coraz dokładniejsze narzędzia obliczeniowe [5,6]. Rozważać należy zarówno prognozowanie dalszej bezpiecznej eksploatacji wirników turbin parowych po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy [7], jak i zagadnienia wzmoczonego zużycia, a nawet wejścia w rezonans wynika-

jący z niestacjonarnych warunków pracy [8, 9]. Dodatkowym aspektem oceny trwałości obiektów energetycznych jest interakcja zmęczenia i pełzania [9,10].

Szerokie możliwości analizy zapewniają narzędzia obliczeniowe typu FSI (Fluid Solid Interacion) pozwalające określić oddziaływania płyn - ciało stałe [3-6]. Szczególnie istotna jest analiza zjawisk na powierzchni międzyfazowej (czynnik roboczy – konstrukcja), która stanowi połączenie i jednocześnie warunek brzegowy między CSD (Computational Solid Dynamic) i CFD (Computational Fluid Dynamic). Zatem analizy wytrzymałościowe CSD czerpią dane z CFD i mogą równocześnie na skutek przemieszczeń wpływać na charakter przepływu. Z kolei analizy CFD oddziałują na ciało stałe zmieniając w nim stan naprężeń w różnych reżimach pracy.