

NUMERYCZNA SYMULACJA PROCESU GIĘCIA RURY Z NOWOCZESNYCH MATERIAŁÓW DLA ENERGETYKI

W artykule opisano numeryczny model procesu gięcia rur z nadstopu niklu DMV 617 mod. opracowany w oparciu o dane uzyskane w badaniach laboratoryjnych i przemysłowych. Analizując uzyskane wyniki stwierdzono, że symulacje numeryczne dają zbliżone rozkłady grubości ścianek rur do uzyskanych w rzeczywistym procesie. W symulacji uzyskano zbliżony przebieg sprężynowania powrotnego do warunków przemysłowych. Zaobserwowane różnice między modelowaniem a doświadczeniem mogą być spowodowane brakiem możliwości dokładnego wyznaczenia wszystkich warunków brzegowych w rzeczywistym procesie.

Słowa kluczowe: symulacja, gięcie rury, nadstop niklu DMV 617 mod.

NUMERICAL SIMULATION OF BENDING OF PIPES PRODUCED FROM MODERN MATERIALS FOR THE POWER INDUSTRY

The paper deals with the numerical model of nickel superalloy DMV 617 mod. tube bending process developed based on the data obtained in laboratory and industrial experiments. Analysis of the results showed that the numerical simulations give similar distribution of pipe wall thickness to that obtained in the real process. The results of the simulations of the springback effect were close to the behaviour of tubes in industrial experiments. The observed differences between modelling and the results obtained in industrial conditions can be caused by the inability to identify all boundary conditions in the real process.

Keywords: simulation, tube bending, nickel superalloy DMV 617 mod.

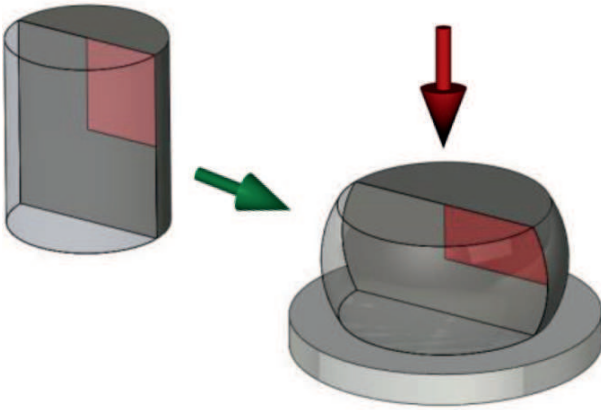
1. WPROWADZENIE

Głównym celem niniejszej pracy było przeprowadzenie symulacji numerycznej gięcia rury grubościenną z nadstopu niklu DMV 617 mod. [1] zgodnie z technologią stosowaną w firmie RAFAKO S.A. Materiał ten jest nowym-perspektywicznym stopem do zastosowań w przemyśle energetycznym [2]. Z uwagi na reologię tego materiału różniącą się istotnie od reologii konwencjonalnych gatunków stali stosowanych w energetyce, parametry procesu gięcia rur powinny zostać zoptymalizowane, co wymaga przeprowadzenia dużej ilości prób przemysłowych połączonych z pomiarem geometrii giętych rur. Z tego powodu do symulacji procesu gięcia zastosowano metodę symulacji numerycznej, gdyż umożliwia ona znaczne zmniejszenie liczby kosztownych prób. Istotnym wynikiem symulacji numerycznej jest również uzyskanie informacji o rozkładzie odkształcenia i naprężenia w rurze. Umożliwia to analizę wpływu operacji gięcia na zmiany struktury stali w strefie odkształconej oraz w badaniach wpływu odkształcenia na odporność materiału na korozję w podwyższonych temperaturach. Niejednorodność odkształcenia plastycznego może wprowadzić zróżnicowanie struktury stali, a w konsekwencji może wpływać na jej zachowanie się w warunkach eksploatacyjnych.

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Głównym celem badań była symulacja numeryczna procesu gięcia rury z nadstopu niklu DMV 617 mod. z wykorzystaniem programu FORGE [3]. Dla osiągnięcia tego celu w badaniach plastometrycznych, przeprowadzonych za pomocą symulatora Gleeble 3800, opracowano model reologii materiału w trakcie odkształcenia na zimno. Na rysunku 1 przedstawiono ogólny schemat próby plastometrycznej z zaznaczeniem części próbki, wykorzystanej w obliczeniach numerycznych przy wyznaczaniu rzeczywistej reologii materiału. Próbki do badań pobrano z nieodkształconej rury o średnicy zewnętrznej \varnothing 31,5 mm i grubości ścianki 5 mm.

Standardowo analiza wyników badań plastometrycznych rozpoczyna się od wyznaczenia krzywej odkształcenie-naprężenie zgodnie z metodą inżynierską Podejście to nie uwzględnia wpływu tarcia oraz niejednorodnego rozkładu pola prędkości odkształcenia i temperatury na wartość naprężenia uplastyczniającego. W celu określenia rzeczywistej krzywej naprężenie-odkształcenie, w Zakładzie Symulacji Procesów Technologicznych Instytutu Metalurgii Żelaza wykorzystywany jest program komputerowy [4] oparty na metodzie analizy odwrotnej [5, 6].



Rys. 1. Schemat odkształcenia próbki walcowej wraz z zaznaczoną częścią próbki zadaną z uwagi na symetrię w obliczeniach numerycznych

Fig. 1. Scheme of the deformation of cylindrical sample along with the selected part of this sample accounting for the adopted symmetry in numerical calculations

We wstępnej symulacji numerycznej wykorzystano moduł Younga dostępny w literaturze [1], którego wartość wynosi 215 GPa. Wartość ta nie pozwoliła uzyskać w symulacji odpowiedniego kształtu rurki po sprężynowaniu powrotnym w porównaniu do badań doświadczalnych. Stan materiału (historia odkształcenia i obróbka) wpływa na właściwości mechaniczne i plastyczne materiału. Wartość modułu Younga również zależy od stanu wejściowego materiału. W związku z powyższym postanowiono przeprowadzić badania wytrzymałościowe na maszynie ZWICK. Badania wykonano zgodnie z normą PN-En ISO 6892-1 [7]. Próbkę do badań pobrano z rurki (Rys. 2). W wyniku analizy krzywej naprężenie – odkształcenie wyznaczono moduł Younga, którego wartość wyniosła 165 GPa. Uzyskany parametr wykorzystano w symulacji numerycznej, której wyniki przedstawiono w niniejszej pracy.



Rys. 2. Zdjęcie próbki wytrzymałościowej: (a) w stanie wyjściowym; (b) po próbie rozciągania

Fig. 2. Appearance of the tensile specimen: (a) as machined; (b) after tensile test

3. MODEL REOLOGICZNY

Do rzeczywistej krzywej naprężenie-odkształcenie wyznaczonej metodą analizy odwrotnej [6] dopasowano model reologiczny. Na podstawie analizy uzyskanego kształtu krzywych zastosowano model Hensela-Spittela w postaci:

$$\sigma = A \exp(M_1 T) T^{m_3} \epsilon^{m_2} \exp\left(\frac{m_4}{\epsilon}\right) (1 + \epsilon)^{m_5 T} \times \exp(m_7 \epsilon) \dot{\epsilon}^{m_3} \epsilon^{m_8 T} \quad (1)$$

gdzie: $A, m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_7, m_8, m_9$ – współczynniki modelu, ϵ_{soft} – wartość odkształcenia, powyżej której wartość naprężenia pozostaje stała (w przypadku gdy $\epsilon \geq \epsilon_{soft} \cup \epsilon_{soft} \neq 0$ wartość odkształcenia zostaje pomniejszona do wartości ϵ_{soft}).

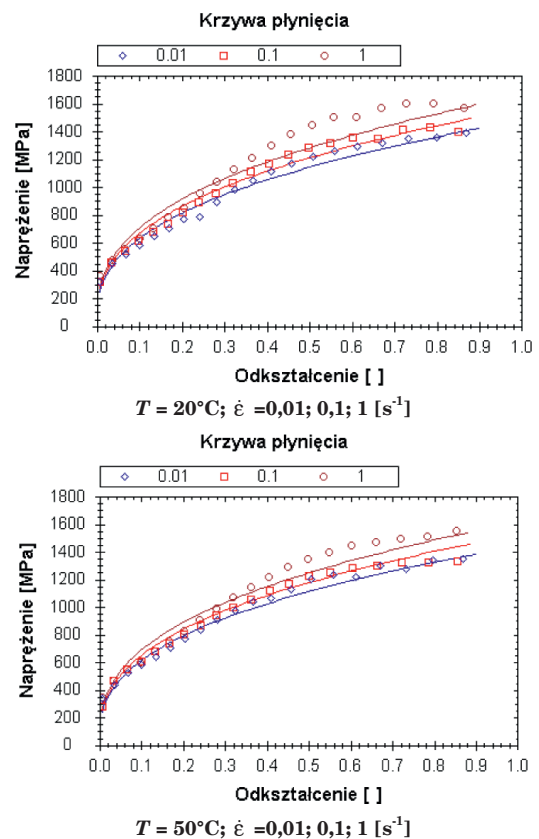
Porównanie dopasowania modelu do danych uzyskanych z wykorzystaniem analizy odwrotnej przedstawiono na rysunku 3, zaś optymalne współczynniki modelu podano w tabeli 1. Z uwagi na niewielki wpływ na jakość dopasowania, współczynniki $m_5 - m_8$ oraz ϵ_{soft} nie były optymalizowane i przyjęto dla nich wartość 0. Takie założenie w przypadku ϵ_{soft} ma uzasadnienie brakiem stabilizacji naprężenia podczas próby ściskania. Optymalne współczynniki wyznaczono z wykorzystaniem metody simplex [8].

Tabela 1. Optymalne parametry modelu reologicznego dla nadstopu niklu DMV 617 mod

Table 1. Optimal parameters of the rheological model for the nickel superalloy DMV 617 mod

A	m_1	m_2	m_3	m_4
1687,169	$-9,11 \cdot 10^{-4}$	0,3725	0,0251	$2,2 \cdot 10^{-5}$

Opracowany model reologiczny stopu DMV 617 mod. zastosowano w obliczeniach numerycznych procesu gięcia przeprowadzonych za pomocą programu FORGE [3].



Rys. 3. Porównanie dopasowania modelu Hensela-Spittela (linie) do danych uzyskanych za pomocą analizy odwrotnej (symbole)

Fig. 3. Comparison of the Hensel-Spittel equation (lines) model fitting to the data obtained by applying inverse analysis (symbols)

4. WYNIKI BADAŃ

Proces gięcia rury w łuk składa się z kilka etapów. W początkowym etapie następuje dociśnięcie rurki szczęką do segmentu, a następnie dojazd sanek do rury. W trakcie końcowego dociśnięcia sanek następuje ruch obrotowy segmentu wraz ze szczękami. Na rysunku 4 przedstawiono etapy procesu gięcia rury w łuk.

W celu zamodelowania procesu gięcia cały proces został podzielony na 4 etapy:

- dojazd szczęki i zacieśnienie rury pomiędzy szczęką a segmentem;
- dojazd sanek i docisk rury;
- gięcie rury;
- zdjęcie obciążenia.

Kształt szczęki został tak zaprojektowany, aby ścisnąć rurkę nie całą powierzchnią, lecz kontaktowo na powierzchni bocznej, wytwarzając przy tym stan naprężenia przeciwdziałający spłaszczeniu rurki w procesie gięcia.

W badaniach przemysłowych zastosowano kilka wariantów gięcia rury w łuk, modyfikując szybkość procesu i promień. Rurkę zginano w łuk o promieniach 40 i 160 mm z zastosowaniem kąta gięcia 180° i prędkością maksymalnej nastawy na 50%. W przypadku promienia gięcia 40 mm badano wpływ prędkości gięcia, dla nastawy ustawionej na 100%.

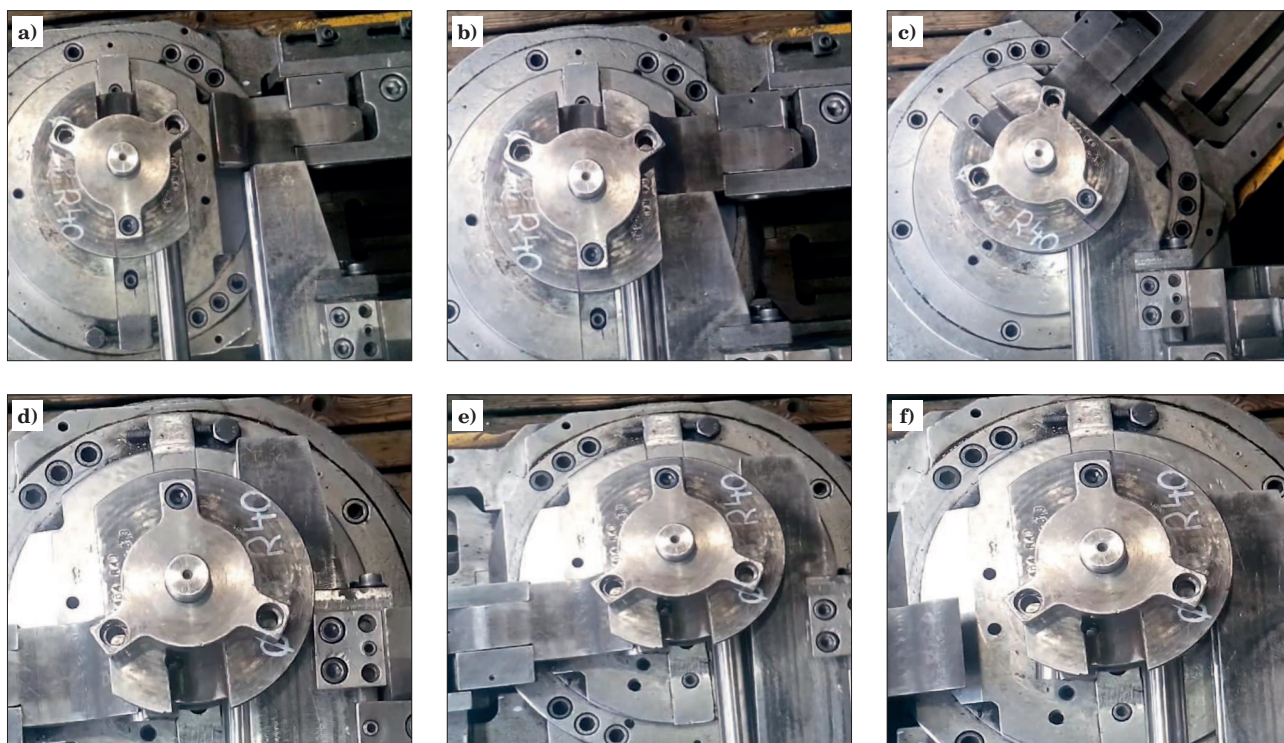
System sterujący giętarką pozwala redukować szybkość procesu za pomocą wartości względnej w stosunku do maksymalnej nastawy, bez określenia względnych wartości. Jest to związane z tym że dla różnych promieni gięcia wartości są przeliczane automatycznie. W celu zamodelowania procesu gięcia należy znać wartości bezwzględne. Dlatego w ramach badań przemysłowych zostały wyznaczone prędkości narzędzi. Z pomiarów

wynika, że maksymalna prędkość obrotowa segmentu wynosiła około $26,3^\circ/\text{s}$ bez względu na promień gięcia (100% nastawy), w przypadku nastawy na 50% wynosiła około $13,75^\circ/\text{s}$ (w przypadku promienia gięcia $R = 40$ mm). Prędkość sanek jest dobierana automatycznie w oparciu o promień gięcia. W przypadku promienia gięcia 40 mm prędkość przesuwania sanek wyniosła $\sim 9,52$ mm/s i $\sim 18,26$ mm/s odpowiednio dla 50% i 100% w stosunku do maksymalnej nastawy. Dla promienia gięcia 160 mm prędkość sanek oszacowano na poziomie 37,49 mm/s dla 50% maksymalnej nastawy.

W celu przyspieszenia obliczeń przyjęto szereg uproszczeń. Po pierwsze, w symulacji rozpatrywano proces z uwzględnieniem płaszczyzny symetrii. Pozwala to na zmniejszenie czasu obliczeń (redukcja siatki elementów) lub zwiększenie dokładności obliczeń przy tym samym czasie obliczeniowym (zmniejszenie wymiarów elementów). Po drugie, wykorzystanie sztywnych narzędzi, co pozwala zmniejszyć czas obliczenia. W symulacji założono połączone prawo tarcia Coulomba i Treski ($\mu = 0,1$ i $m = 0,2$). Ze względu na brak możliwości odzwierciedlenia rzeczywistego ruchu szczęki w trakcie zginania (obrót i dociśnięcie z siłą do rurki), założono przywieranie rurki do szczęki. Numeryczny model z zaprezentowaną kinetyką narzędzi pokazano na rysunku 5.

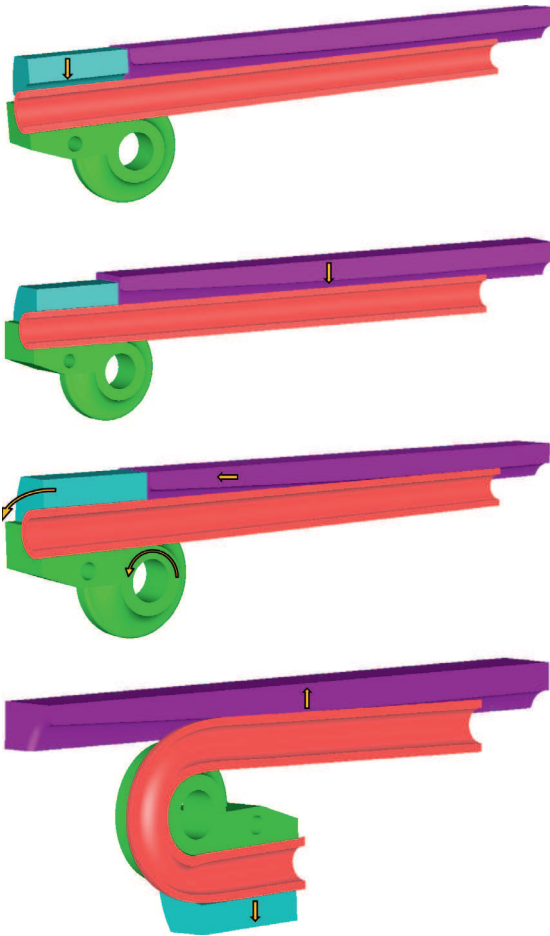
Na rysunku 6 przedstawiono obliczony rozkład naprężenia powstający w miejscu ściskania szczękami. To efekt specjalnie zaprojektowanego kształtu szczęki wytwarzającego w wyniku odkształcenia stan naprężenia uniemożliwiającego spłaszczenie rurki. Efekt ten potwierdzono w trakcie analizy rurki po odkształceniu – ślad miejscowego nacisku szczękami (Rys. 7).

Wyniki symulacji numerycznej procesu gięcia rury w łuk przedstawiono na rysunkach 8–12, uzyskane

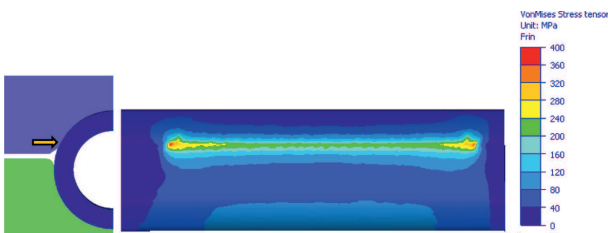


Rys. 4. Etapy w procesie gięcia rury w łuk: a) dojazd szczęki; b) dojazd sanek; c) rozpoczęcie gięcia; d) zakończenie gięcia; e) cofnięcie sanek; f) cofnięcie szczęki

Fig. 4. Stages of arc pipe bending process: a) access clamp die; b) access pressure die; c) start of bending; d) end of bending; e) back pressure die; f) back clamp die



Rys. 5. Kinetyka narzędzi dla różnych etapów symulacji
Fig. 5. Kinetics of tools for different stages of the simulation

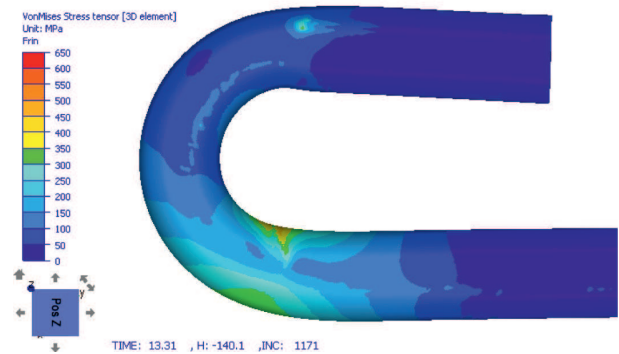
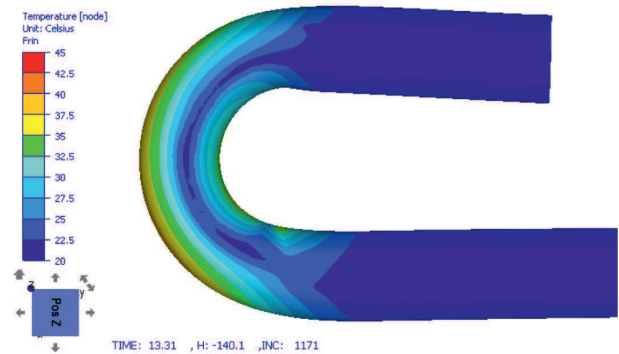
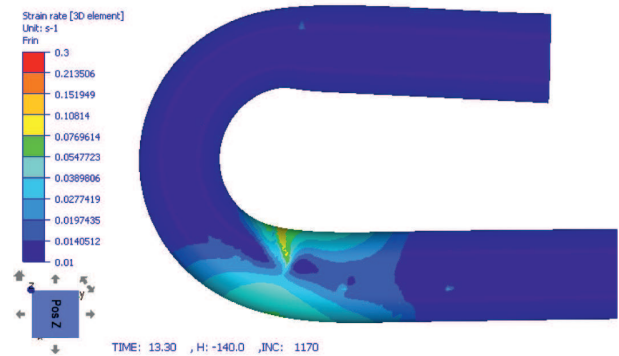
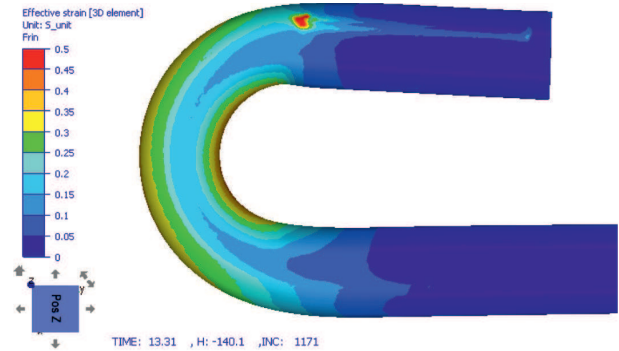


Rys. 6. Wytwarzanie stanu naprężenia blokującego płaszczanie się rury podczas gięcia
Fig. 6. Formation of stress state preventing the pipe from flattening during bending



Rys. 7. Ślad dociskania szczęki na powierzchni rurki
Fig. 7. Traces of clamp die on the pipe surface

dla czasu odpowiadającego zakończeniu odkształcenia. Maksymalne wartości odkształcenia zastępczego (w strefie ściskania) generowane są na wewnętrznej stronie łuku i wynoszą około 0,42, nieco mniejsze wartości intensywności odkształcenia (w strefie rozciągania) powstają na zewnętrznej stronie łuku i wynoszą



Rys. 8. Rozkład pola wartości i prędkości odkształcenia, temperatury oraz naprężenia uzyskanego dla obliczeń gięcia rury w łuk z parametrami: promień gięcia $R = 40$ mm i ustawienia prędkości na 50%

Fig. 8. Distribution of strain and strain rate, temperature and stress obtained for the calculation of arc pipe bending with parameters: bending radius $R = 40$ mm and the speed settings of 50%

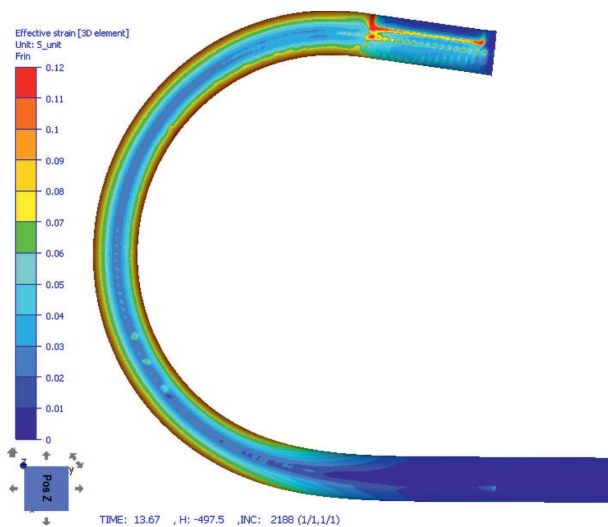
0,37. W przypadku dużego łuku gięcia generowane są dużo mniejsze wartości odkształcenia. Zwiększenie prędkości odkształcenia powoduje nieznaczne zwiększenie wartości odkształcenia.

Analizując rozkład pola temperatur można stwierdzić, że duży łuk gięcia nie pozwala na nagrzewanie się materiału w wyniku odkształcenia (wzrost temperatury do 23°C). W przypadku małego promienia łuku gięcia ilość generowanego ciepła jest dużo większa (wzrost do 38°C), zwłaszcza po zastosowaniu maksymalnej prędkości gięcia 100% (do około 45°C).

Obliczone wartości prędkości odkształcenia w trakcie gięcia rury w łuk wynoszą około 0,3 i 0,15 s⁻¹, odpowiednio, dla prędkości gięcia 100 i 50 % maksymalnej nastawy.

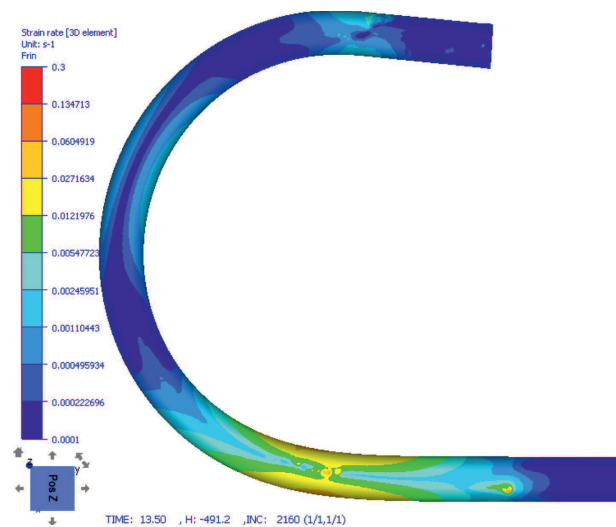
W wynikach obliczeń występują pewne artefakty, część z nich (odkształcenie w miejscu kontaktu szczęki z rurką) związana jest z założonymi uproszczeniami symulacji, inne błędy związane są z zastosowaną dyskretyzacją na elementy i błędami w interpolacji wyników.

Ostatnim etapem modelowania była symulacja procesu sprężynowania powrotnego. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 13 i 14. Nie uzyskano różnic w kształcie po zajściu sprężynowania powrotnego w przypadku promienia gięcia 40 mm dla różnych szybkości odkształcenia. Wynik ten jest związany z uzyskaniem zbliżonych rozkładów odkształcenia i naprężenia uplastyczniającego (wyższa prędkość odkształcenia generuje więcej ciepła).



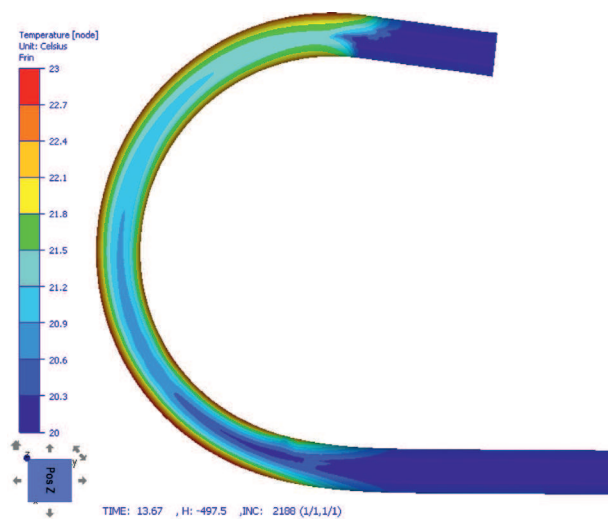
Rys. 9. Rozkład odkształcenia uzyskanego dla obliczeń gięcia rury w łuk z parametrami: promień gięcia $R = 160$ mm i ustawienia prędkości na 50%

Fig. 9. Distribution of strain obtained for arc pipe bending with parameters: bending radius $R = 160$ mm and the speed settings of 50%



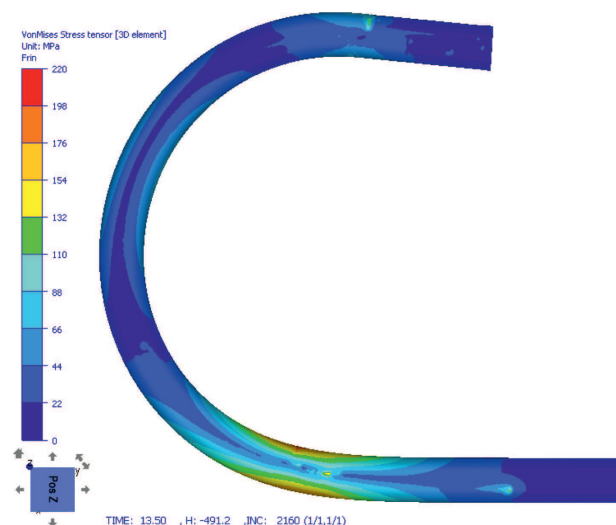
Rys. 10. Rozkład prędkości odkształcenia uzyskanego dla obliczeń gięcia rury w łuk z parametrami: promień gięcia $R = 160$ mm i ustawienia prędkości na 50%

Fig. 10. Distribution of strain rate obtained for arc pipe bending with parameters: bending radius $R = 160$ mm and the speed settings of 50%



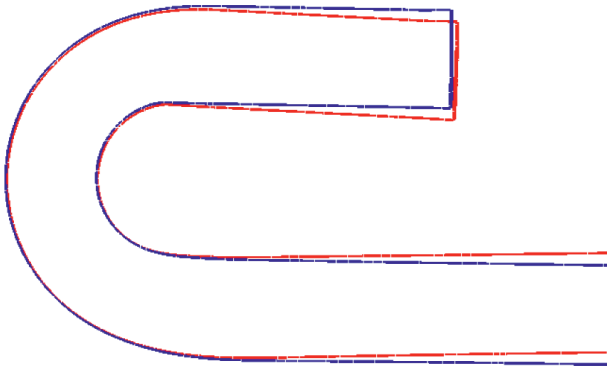
Rys. 11. Rozkład temperatury uzyskanego dla obliczeń gięcia rury w łuk z parametrami: promień gięcia $R = 160$ mm i ustawienia prędkości na 50%

Fig. 11. Distribution of temperature obtained for arc pipe bending with parameters: bending radius $R = 160$ mm and the speed settings of 50%



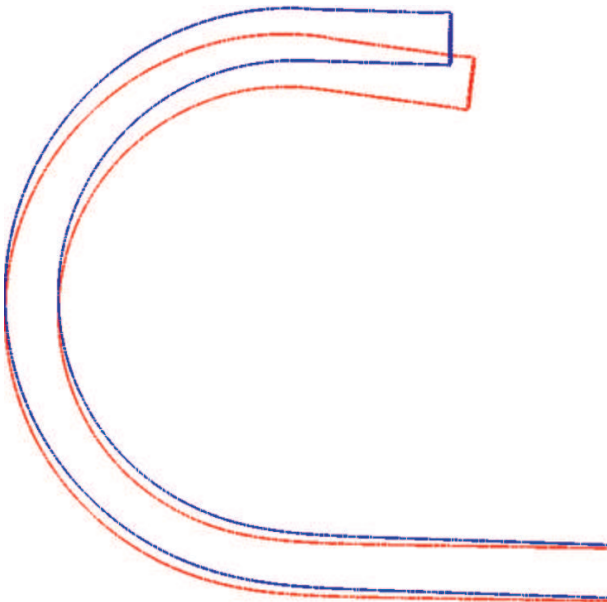
Rys. 12. Rozkład naprężenia uplastyczniającego uzyskanego dla obliczeń gięcia rury w łuk z parametrami: promień gięcia $R = 160$ mm i ustawienia prędkości na 50%

Fig. 12. Distribution of flow stress obtained for arc pipe bending with parameters: bending radius $R = 160$ mm and the speed settings of 50%



Rys. 13. Sprężynowanie powrotne uzyskane dla obliczeń z parametrami: promień gięcia $R = 40$ mm i prędkość gięcia 50%. Linia czerwona - po odkształceniu, niebieska - po zdjęciu obciążenia

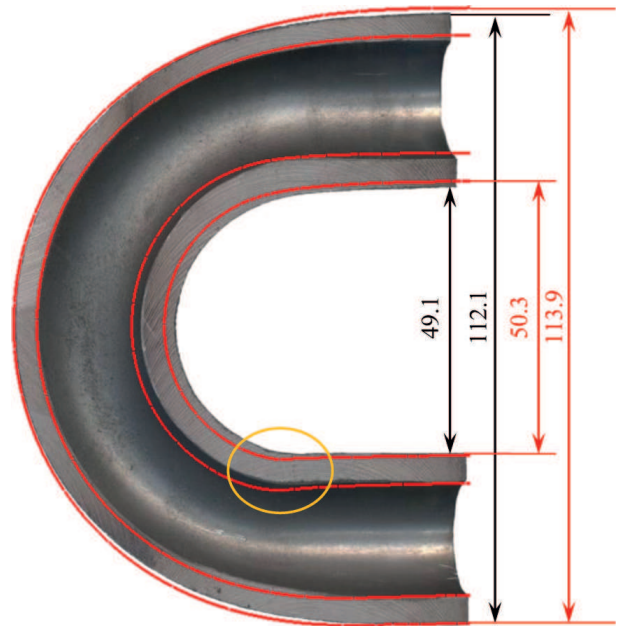
Fig. 13. Springback obtained for calculations with parameters: bending radius $R = 40$ mm and bending speed at 50%. Red line - after deformation, blue - after unloading



Rys. 14. Sprężynowanie powrotne uzyskane dla obliczeń z parametrami: promień gięcia $R = 160$ mm i prędkość gięcia 50%. Linia czerwona - po odkształceniu, niebieska - po zdjęciu obciążenia

Fig. 14. Springback obtained for calculations with parameters: bending radius $R = 160$ mm and bending speed at 50%. Red line - after deformation, blue - after unloading

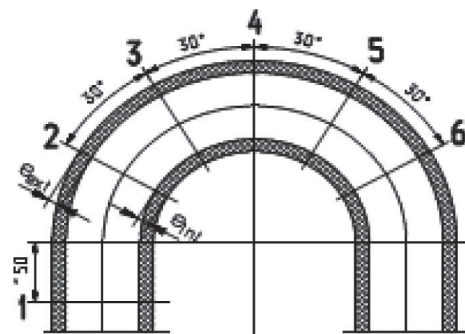
W obliczeniach, na wewnętrznym łuku, zaobserwowano wklęsły kształt (na rysunku 15 zaznaczono kółkiem). Podobny efekt zaobserwowano w rzeczywistym procesie. Na rysunku 15 porównano kształt rury uzyskany w wyniku symulacji z połówką rury po gięciu.



Rys. 15. Porównanie wyników obliczeń z wynikami badań doświadczalnych: promień gięcia $R = 40$, kąt gięcia $\alpha = 180^\circ$ oraz ustawienia prędkości na 50%

Fig. 15. Comparison of results of calculations with the experiment: bending radius $R = 40$, bending angle $\alpha = 180^\circ$ and bending speed at 50%

Analizując wyniki obliczeń można stwierdzić, że dobrze odzwierciedlają one proces powrotnego sprężynowania. Uzyskano nieznaczne różnice w kształcie łuku wewnętrznego i zewnętrznego. W obliczeniach uzyskano większe odległości (na rysunku 15 wymiary podano na czerwono), niż w rzeczywistym procesie (na czarno). Różnice są małe i mogą wynikać ze zużycia narzędzi i zastosowanych uproszczeń w symulacji jak i wartość modułu Younga. Pokrycie się kształtów świadczy o tym, że w symulacji numerycznej wykorzystano prawidłową wartość modułu Younga.



Rys. 16. Miejsce pomiaru grubości ścianek

Fig. 16. Location of wall thickness measurement

Tabela 2. Porównanie obliczenia z danymi doświadczalnymi dla gięcia rury w łuk o parametrach: promień gięcia $R = 40$ mm
Table 2. Comparison of calculations with experimental data for arc pipe bending with the following parameters: bending radius $R = 40$ mm

Oznaczenia na rys. 16		1	2	3	4	5	6
Zewnętrzna	obliczenia	5,15	4,56	4,51	4,50	4,51	4,58
	pomiar	5,1	4,6	4,5	4,5	4,8	4,5
Wewnętrzna	obliczenia	5,28	6,10	6,19	6,23	6,24	6,18
	pomiar	5,2	6,1	6,4	6,5	6,5	6,5

W tabeli 2 przedstawiono porównanie zmiany grubości ścianki uzyskanej w wyniku obliczeń z danymi zmierzonymi w RAFAKO S.A. Wyniki obliczeń grubości ścianki zewnętrznej są zbliżone do wartości zmierzonych, natomiast w przypadku grubości ścianki wewnętrznej uzyskano rozbieżność wynoszącą 0,2÷0,3 mm.

5. PODSUMOWANIE

W pracy, w oparciu o badania przemysłowe i laboratoryjne, opracowano i zweryfikowano numeryczny model gięcia rur ze stali w gatunku DMV 617mod. W ramach badań przemysłowych otrzymano geometrie narzędzi oraz wyznaczono parametry kinetyczne pracy narzędzi dla giętarki stosowanej do gięcia rury w łuk w RAFAKO S.A. Część rury nieodkształconej pobrano do przeprowadzenia badań laboratoryjnych. W badaniach laboratoryjnych wykonano próby wytrzymałościowe oraz plastometryczne. W oparciu o badania plastometryczne wyznaczono reologię materiału z wykorzystaniem analizy odwrotnej w celu wyeliminowania wpływu niejednorodnego rozkładu prędkości odkształcenia

i temperatury. Opracowano model reologiczny dla badanego materiału.

Dane uzyskane w badaniach przemysłowych i laboratoryjnych pozwoliły na wykonanie symulacji procesu gięcia rury w łuk za pomocą programu FORGE. Analizując uzyskane wyniki modelowania można stwierdzić, że dają one zbliżone rozkłady grubości ścianek, które uzyskano w rzeczywistym procesie. W symulacji otrzymano zbliżony efekt sprężynowania powrotnego do obserwowanego w warunkach przemysłowych. Różnice między wynikami symulacji numerycznej a badaniami doświadczalnymi mogą być spowodowane dokonanymi uproszczeniami w symulacji numerycznej oraz brakiem możliwości wyznaczenia wszystkich warunków brzegowych. Zgodność kształtu uzyskanego w wyniku symulacji numerycznej z kształtem otrzymanym w badaniach przemysłowych świadczy o tym, że w próbie rozciągania uzyskano prawidłową wartość modułu Younga, pomimo że różni się ona od danych literaturowych.

Praca wykonana została w ramach projektu współfinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Strategicznego Programu Badawczego, umowa SP/IE1/67484/10.

LITERATURA

1. DATASHEET, DMV 617 mod, Salzgitter Mannesmann Stainless Tubes, 2010
2. Mäenpää L., Klauke F., Tigges K.D., Matsuda J., Kukoski A., Gaffoor A.: Material Aspects of a 700°C – Power Plant”, http://www.psa.mhps.com/supportingdocs/forbus/hpsa/technical_papers/Material_aspects_of_a_700_C_Power_Plant_4.pdf
3. FORGE 2008 Documentation, 3D Forging Datafile, Transvalor, 2008
4. Pidvysots'kyy V., Kuziak R., Łapczyński, Z.: Rozwój komputerowej analizy danych uzyskanych w badaniach plastometrycznych mających na celu opracowywanie modelu rozwoju mikrostruktury i modelu reologicznego materiału, Prace Instytutu Metalurgii Żelaza, 2013, 65, nr 1, 45-47
5. Gavrus A., Massoni E., Chenot J.L., An Inverse Analysis Using a Finite Element Model for Identification of Rheological Parameters, Journal of Materials Processing Technology, 1996, 60, s. 447-454
6. Szeliga D., Pietrzyk M.: Identification of Rheological and Tribological Parameters, chapter in the book Metal Forming Science and Practice, eds. John G. Lenard, Elsevier Science Ltd., Amsterdam, 2002 s. 227-258
7. PN-EN ISO 6892-1:2010, Metale – Próba rozciągania – Część 1: Metoda badania w temperaturze pokojowej, Warszawa, 2010
8. Nelder J.A., Mead R.: A simplex method for function minimization, Computer Journal, 1965, 7 1965, 308–313