

dr hab. inż. Barbara Kucharska

Department of Production Engineering and Materials Technology
Czestochowa University of Technology
Armii Krajowej 19 str., 42-200 Czestochowa, Poland
E-mail: kucharska.barbara@wip.pcz.pl

Identyfikacja naprężeń powierzchniowych w rurze do układu wydechowego wykonanej technologią hydroformowania na podstawie pomiarów dyfraktometrycznych

Słowa kluczowe: *hydroformowanie, układ wydechowy, naprężenia powierzchniowe, rentgenowski pomiar naprężeń*

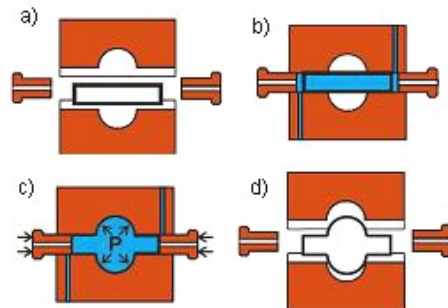
Streszczenie: W pracy dokonano identyfikacji naprężeń powierzchniowych w rurze wydechowej ze stali Cr-Ni kształtowanej technologią hydroformowania. Naprężenia wyznaczono nieniszczącą rentgenowską metodą $\sin^2\psi$. Na powierzchni rury stwierdzono złożony stan naprężeń rozciągających o wartościach z zakresu 69-240 MPa dla naprężeń obwodowych i 26-290 MPa dla naprężeń wzdłużnych. Rozłożenie naprężeń na obwodzie i długości rury analizowano na podstawie współczynników zmienności i grubości ścianki. Stwierdzono zależność pomiędzy wartością naprężeń powierzchniowych a grubością ścianki rury. Największe naprężenia występowały w obszarach rury gdzie grubość ścianki była najsilniej zredukowana. W centralnej części rury gdzie redukcja grubości ścianki była najmniejsza naprężenia również były najmniejsze, ale cechowały się największym rozproszeniem wartości.

1. Wprowadzenie

Do produkcji układów wydechowych w przemyśle samochodowym obecnie najczęściej stosowane są blachy ze stali ferrytycznej pokryte powłokami ochronnymi ze stopów aluminium. Aluminiowe powłoki zapewniają ochronę stali przed oddziaływaniem korozyjnego medium w podwyższonej temperaturze, w tym spalin, a także odporność na ścieranie w przypadku ogniowych powłok AlSi [18, 19, 13]. Obecnie, w produkcji układów wydechowych coraz bardziej preferowane jest stosowanie stali austenitycznych [3,4]. Stale te wykazują wyjątkowo korzystną kombinację właściwości chemicznych i możliwości plastycznego kształtowania [4, 6, 17]. Światowa produkcja austenitycznych stali utrzymuje się na wysokim poziomie z ciągłą tendencją wzrostową. Około 95% produkcji austenitycznych stali odpornych na korozję stanowią produkty kształtowane plastycznie, z czego prawie 10% stosowane jest w motoryzacji [6, 8]. Dobra odkształcalność plastyczna stali austenitycznych rekompensuje zarówno ich wyższą cenę, jak i stosowanie kosztownych technologii, takiej jak na przykład hydroformowanie.

Hydroformowanie jest metodą kształtowania arkuszy blach lub profili zamkniętych z użyciem płynu (najczęściej wody) pod ciśnieniem (Rys.1) [11, 1]. Zaletą metody są

zmniejszenie liczby spawanych połączeń w konstrukcjach i uzyskanie części o lepszym stanie powierzchni, cieńszych ścianach i lepszej tolerancji wymiarowej [14, 15, 5]. Obecnie, kształtowanie profili zamkniętych metodą hydroformowania jest szczególnie popularne w produkcji rowerów (ramy aluminiowe) i w przemyśle motoryzacyjnym. Metodą hydroformowania produkuje się już nadwozia samochodów, ramy nośne, tłumiki i inne części, w tym detale konstrukcyjne układów wydechowych [9].



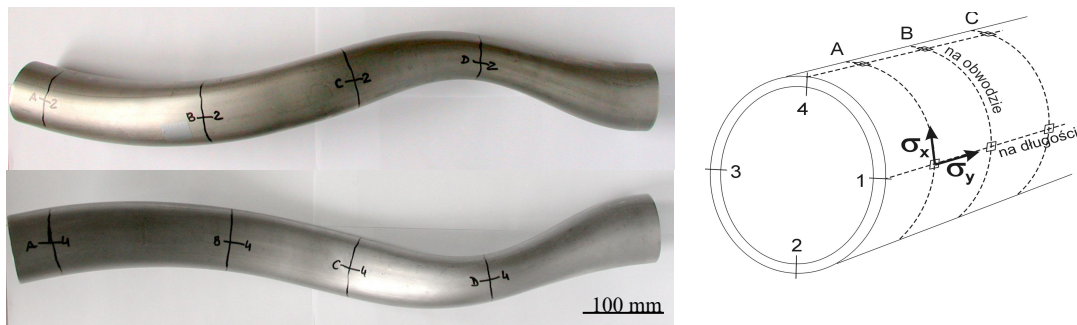
Rys. 1. Schemat operacji hydroformowania rury: a) umieszczenie rury w matrycy, b) mocowanie i uszczelnianie końców rury i wprowadzanie płynu do wnętrza rury, c) zamknięcie wlotu płynu i kształtowanie rury pod ciśnieniem płynu, d) wypuszczenie płynu i pobieranie uformowanej części z matrycy

Metodą hydroformowania możliwe jest uzyskanie złożonych kształtów detali, ze zróżnicowaną krzywizną, trudnych do uzyskania tradycyjnymi metodami przeróbki plastycznej [3, 9, 10]. Jest to niezwykle istotne z punktu widzenia konieczności upakowania wielu części mechaniki samochodowej w jak najmniejszej przestrzeni. Jednocześnie, w przypadku profili zamkniętych muszą one zapewniać swobodny przepływ mediów, np. spalin.

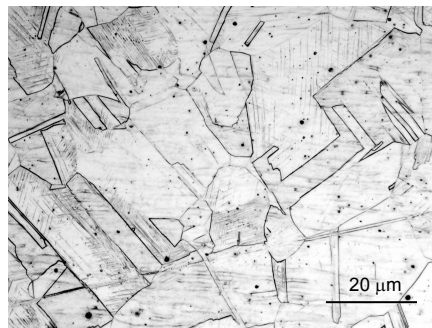
Szczególne warunki hydromechanicznego kształtowania rur, w których materiał nie ma możliwości swobodnego „płynięcia” w obszarze krawędzi, jak w przypadku blach, powodują powstawanie w materiale dużych naprężeń [7, 20]. Wysoki poziom naprężeń w detalu urządzenia sprawia, że jest on podatny na niestabilność wymiarową. Co więcej, nawet niewielkie uszkodzenia mechaniczne lub korozyjne, zainicjowane podczas eksploatacji takiego detalu, będą powodowały nieproporcjonalnie duże jego odkształcenia w wyniku relaksacji naprężeń. Z punktu widzenia trwałości eksploatacyjnej istotnym jest zatem określenie tych naprężeń metodami nieniszczącymi i ich zniwelowanie. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki pomiaru naprężeń w rurze do układu wydechowego wykonanej technologią gięcia i hydroformowania.

2. Materiał i metodyka badań

Badano rurę przeznaczoną do samochodowego układu wydechowego, której w procesie produkcji finalny kształt nadano technologią hydroformowania (Rys. 2). Rura poddana hydroformowaniu, o grubości ścianki max. 1,7 mm, była wykonana ze stali chromowo-niklowej gatunku X2CrNi18-9 (AISI 304L) o mikrostrukturze austenitycznej (Rys. 3). Stężenie niklu w stali określone spektroskopowo wynosiło 9.6%wag., co zapewnia stali lepszą ciągliwość (DDQ – deep draw quality) w porównaniu do standardowej wersji gatunku 18-8.



Rys. 2. a) Widok ogólny rury poddanej badaniom i b) schemat oznaczenia miejsc pomiarów naprężeń (\square) na powierzchni rury. Oznaczenia A, B, C i D – obwód rury, 1, 2, 3 i 4 – punkty na obwodzie rury usytuowane co 90°



Rys. 3. Mikrostruktura stali na przekroju poprzecznym rury

Celem badań było określenie naprężeń na powierzchni zewnętrznej rury w kierunku obwodowym (x) i wzdłużnym (y). Na potrzeby badań na powierzchni rury wytypowano cztery obszary (obwody), spośród których trzy (oznaczone jako B, C i D – Fig. 2a) znajdowały się w miejscach, w których kształt rury uległ największej zmianie i jeden (oznaczony jako A – Fig. 2a), blisko końca rury, gdzie przekrój poprzeczny rury był najbardziej zbliżony do kołowego. Naprężenia wyznaczono w czterech punktach na każdym z wybranych obwodów rury (oznaczone jako 1, 2, 3 i 4 – Fig. 2b), rozmieszczonych co $\sim 90^\circ$ w ten sposób, że np. punkty A1, B1, C1 i D1, układały się wzdłuż rury na jednej tworzącej.

Do wyznaczenia naprężeń zastosowano metodę dyfrakcji rentgenowskiej, znaną jako metodę $\sin^2\psi$ [16, 2]. Badania wykonano w oparciu o preferowany do pomiarów naprężeń w stalach austenitycznych refleks dyfrakcyjny od płaszczyzny (311) [12]. Pomiary wykonano z użyciem dyfraktometru PROTO dedykowanego do pomiarów naprężeń w Katedrze Nauki o Materiałach na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa w Politechnice Rzeszowskiej (Fig. 4).

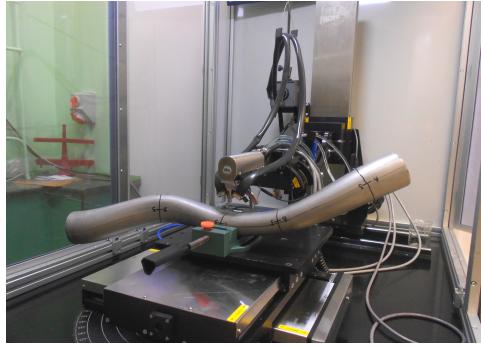


Fig. 4. Pomiar naprężeń w hydroformowanej rurze z użyciem dyfraktometru PROTO

Zastosowano promieniowanie $K_{\alpha}Mn$ (kolimator $\varnothing 2mm$) o długości $0,2103$ nm, które umożliwiło pomiar naprężeń w warstwie przypowierzchniowej stali o maksymalnej grubości ok. $17 \mu m$.

Wyznaczenie naprężeń metodą rentgenowską polega na określeniu odkształcenia sieci krystalicznej ε spowodowanego m.in. przeróbką plastyczną materiału polikrystalicznego. Odkształcenie to zdefiniowane jest jako względna różnica odległości międzypłaszczyznowych Δd w materiale z naprężeniami i bez naprężeń. Naprężenia σ_{ϕ} wylicza się z zależności (1), w której ϕ oznacza kierunek naprężeń (określony poprzez usytuowanie detalu w trakcie pomiaru), natomiast ψ - kąt ustawienia głowicy dyfraktometru lub nachylenia powierzchni detalu przy pomiarze d_{hkl} sieci odkształconej.

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \Delta d / d_o = \left(\frac{1 + \nu}{E} \right) \sigma_{\phi} \sin^2 \psi + \left(\frac{\nu}{E} \right) (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (1)$$

gdzie: d_o - odległość między płaszczyznami sieciowymi w materiale nie odkształconym ($d_o^{311}_{(aust)} = 0.1083$ nm), σ_{11} i σ_{22} - naprężenia główne w płaszczyźnie powierzchni materiału (ze względu na głębokość pomiaru nie przekraczającej kilkunastu μm przyjmuje się $\sigma_{33} = 0$), ν - współczynnik Poissona, E - moduł Younga [16].

Naprężenia obliczono przyjmując rentgenowskie stałe sprężystości dla płaszczyzn (311) $\frac{1}{2} s_2 = 6.33 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ i $-s_1 = 1.42 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ (program XRDWin), których wartości odpowiadają stałym mechanicznym modułu Younga $E = 200 \text{ GPa}$ i współczynnika Poissona $\nu = 0.29$, według zależności (2).

$$E = 1 / (s_1 + \frac{1}{2} s_2) \quad \text{i} \quad \nu = -s_1 / (s_1 + \frac{1}{2} s_2) . \quad (2)$$

3. Wyniki

Wyznaczone w pomiarach wartości naprężeń na powierzchni zewnętrznej rury, według schematu na rysunku 3b, przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Wszystkie wyznaczone naprężenia były rozciągające, zarówno w kierunku obwodowym, jak i wzdłużnym. Wartości naprężeń cechowały się dużym rozrzutem, większym z przypadku naprężeń wzdłużnych - zakres $21-253 \text{ MPa}$, w porównaniu do naprężeń w kierunku obwodowym - zakres $65-227 \text{ MPa}$.

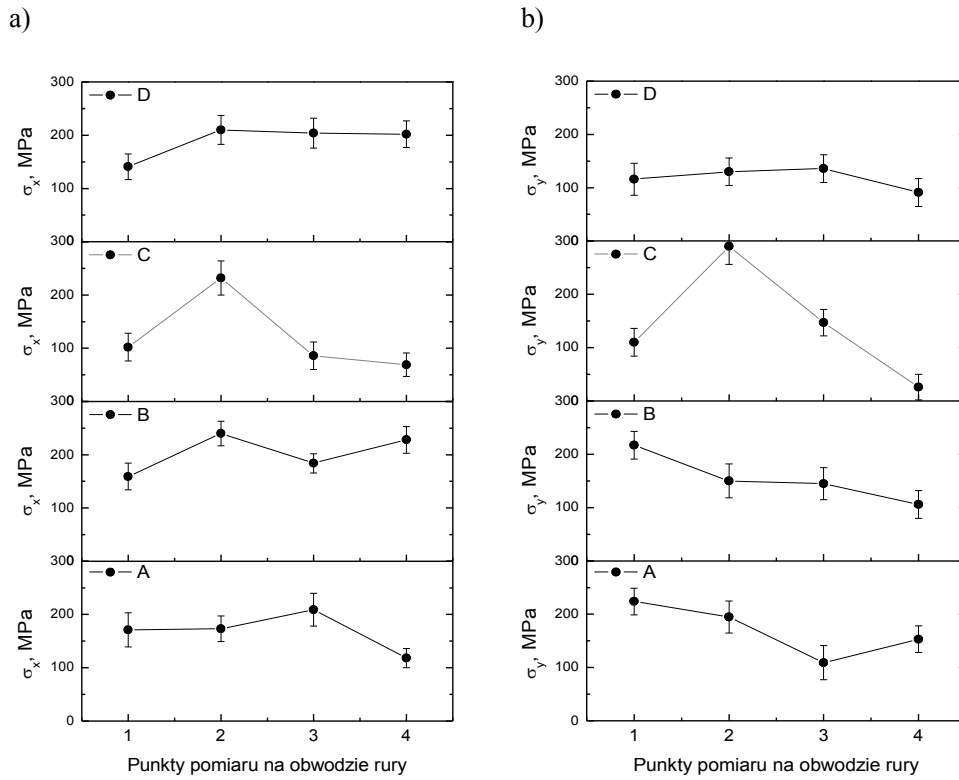


Fig. 5. Rozłożenie naprężeń a) obwodowych i b) wzdłużnych na obwodzie rury

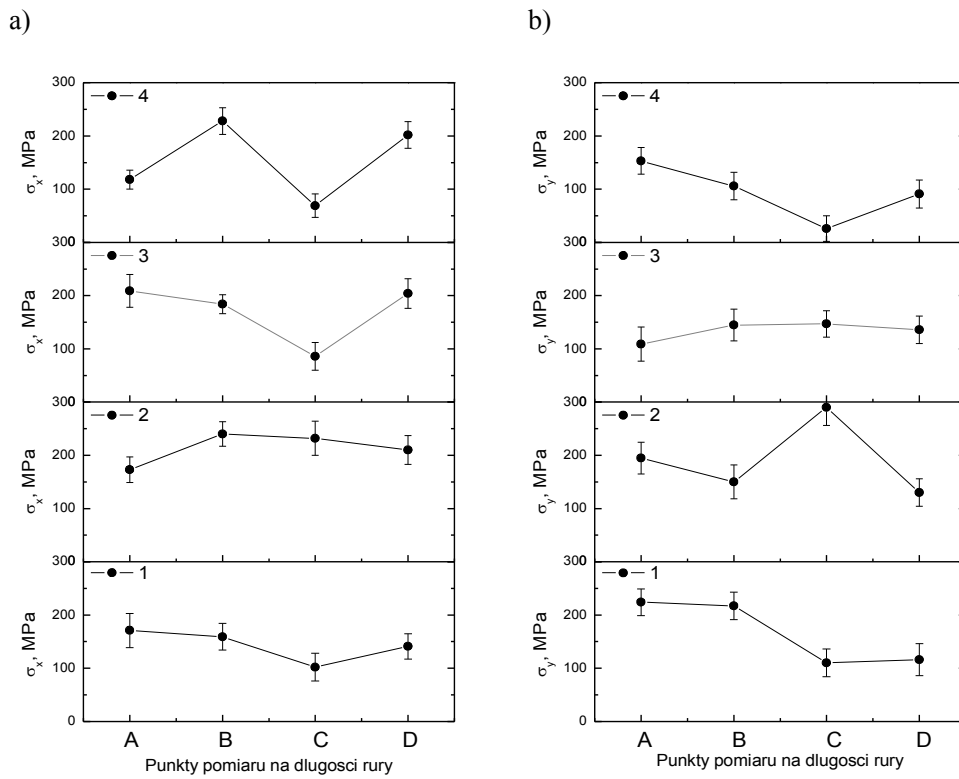


Fig. 6. Rozłożenie naprężeń a) obwodowych i b) wzdłużnych na długości rury

Analiza rozłożenia naprężeń na obwodzie rury (Rys. 5) wykazała, że największe, co do wartości, zróżnicowanie naprężeń w obu badanych kierunkach występowało na obwodzie C, w centralnej części długości rury. Najbardziej jednorodne rozłożenie naprężeń stwierdzono na obwodzie D, z tym, że naprężenia obwodowe były średnio większe od naprężeń wzdłużnych o ok. 80 MPa.

Analiza rozłożenia naprężeń na długości rury (Rys. 6) wykazała, że największe co do wartości zróżnicowanie naprężeń obwodowych występowało na tworzących 4 i 3, a naprężeń wzdłużnych na tworzącej 2. Najbardziej jednorodne rozłożenie naprężeń obwodowych stwierdzono na tworzących 1 i 2, a naprężeń wzdłużnych na tworzącej 3.

Bardziej uogólnione informacje o rozłożeniu naprężeń szczytkowych na powierzchni rury mogą dostarczyć uśrednione wartości naprężeń dla poszczególnych obszarów rury (Rys. 7) oraz współczynniki zmienności (Tabela 1) definiowane jako (3)

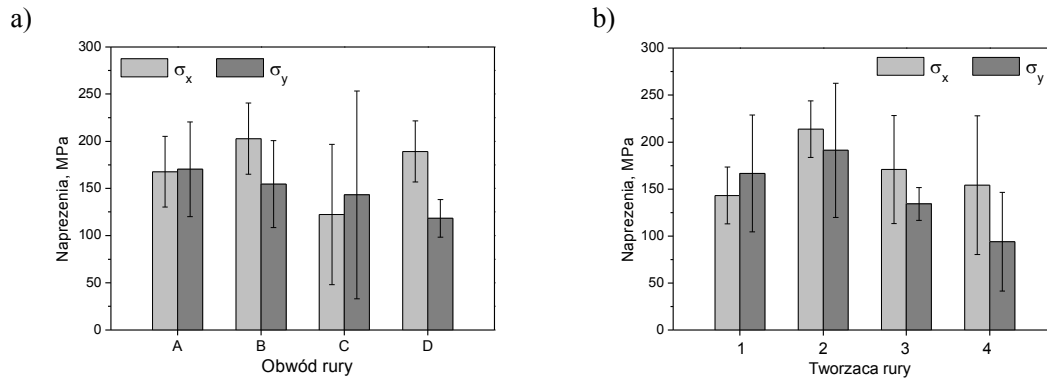
$$V = S/\bar{\sigma} \quad (3)$$

gdzie: S – odchylenie standardowe, $\bar{\sigma}$ - średnia arytmetyczna.

W analizie średnich wartości naprężeń $\bar{\sigma}_x$ i $\bar{\sigma}_y$ na poszczególnych obwodach rury (A, B, C i D) nie wykazano między nimi żadnej zależności (Rys. 7a). Odnotować można tylko, że w centralnej części rury (na obwodzie C) naprężenia obwodowe $\bar{\sigma}_x$ były najmniejsze. Średnie naprężenia w kierunku wzdłużnym $\bar{\sigma}_y$ (Rys. 7a) były największe w pobliżu końca rury reprezentowanego obwodem A, i malały sukcesywnie w kierunku obwodu D. Dodatkowo stwierdzono, że zarówno naprężenia obwodowe, jak i naprężenia wzdłużne, wyznaczone w obszarze C cechowały największe współczynniki zmienności V (61% i 77%), co oznacza duże rozproszenie wartości naprężeń na tym obwodzie rury. Z kolei w obszarze D, naprężenia w obu kierunkach cechowały najmniejsze współczynniki zmienności (17%), czyli występowało małe rozproszenie wartości naprężeń.

W analizie średnich wartości naprężeń $\bar{\sigma}_x$ i $\bar{\sigma}_y$ na poszczególnych tworzących rury (1, 2, 3 i 4) (Rys. 7b) wykazano podobną tendencję w ich rozłożeniu. Największe średnie naprężenia charakteryzowały tworzącą 2, a najmniejsze tworzącą 4. Te tworzące znajdowały się na przeciwległych ściankach rury. Duże rozproszenie wartości naprężeń w obu kierunkach występowało wzdłuż tworzącej 4 ($V= 48\%$ i 56%). Małe rozproszenie wykazały naprężenia obwodowe na tworzącej 2, a naprężenia wzdłużne na tworzącej 3.

Mimo podobieństwa w rozłożeniu naprężeń obwodowych i wzdłużnych na tworzących rury należy podkreślić, że analiza rozkładu naprężeń wzdłużnych nie jest często postrzegana jako szczególnie użyteczna w przypadku rur. Wynika to z faktu, że pod wpływem ciśnienia medium wewnątrz eksploatowanej rury zwiększeniu ulegają przede wszystkim naprężenia obwodowe. Ich wartości na powierzchni zewnętrznej są dwukrotnie większe od naprężeń wzdłużnych (osiowych). Z tego powodu ryzyko uszkodzeń rur związane jest przede wszystkim z wartościami naprężeń obwodowych - i wyznaczenie tych naprężeń zlecają producenci i odbiorcy. W niniejszej pracy badano rurę w stanie technologicznym. Pod wpływem ciśnienia cieczy podczas hydroformowania, nie dochodzi do swobodnego poszerzania się rury ze względu na ograniczenie jej kształtu matrycą, stąd można przypuszczać, że naprężenia wzdłużne mogą być relatywnie większe w stosunku do obwodowych. Wyniki eksperymentalnie wyznaczonych naprężeń potwierdzają słuszność tego przypuszczenia w odniesieniu do powierzchni zewnętrznej rury.

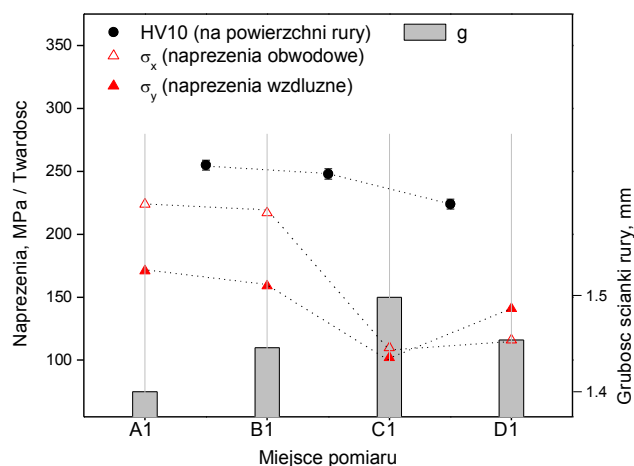


Rys. 7. Uśrednione wartości naprężeń w poszczególnych obszarach hydroformowanej rury a) na obwodach i b) na tworzących (znaczniki błędów przedstawiają odchylenie standardowe)

Tabela 1. Współczynniki zmienności naprężeń V w różnych obszarach rury hydroformowanej

Obwód	$V(\sigma_x)$	$V(\sigma_y)$	Tworząca	$V(\sigma_x)$	$V(\sigma_y)$
A	22	29	1	21	37
B	19	30	2	14	37
C	61	77	3	34	13
D	17	17	4	48	56

Ze względu na kształt rury oraz niewielką grubość ścianki nie było możliwe wykonanie dokładnych pomiarów twardości bezpośrednio na powierzchni rury, ani metodą Vickersa, ani metodą ultradźwiękową. Niemniej, na rysunku 8 przedstawiono wyniki próby takich pomiarów wykonane w przybliżeniu wzdłuż tworzącej 1. Pomiary wykonano na powierzchni rury pomiędzy obwodami A, B, C i D, celem nie uszkodzenia miejsc wytypowanych do pomiaru naprężeń. Mimo tylko poglądowego charakteru wyznaczonych twardości można zauważyć, że odzwierciedliły one poniekąd rozłożenie naprężeń σ_x i σ_y wzdłuż tej tworzącej, tzn. były mniejsze tam gdzie naprężenia również były mniejsze. Po pomiarach naprężeń z rury pobrano wycinki celem wyznaczenia grubości ścianki, które przedstawiono również na rysunku 8. Potwierdzono przypuszczenie, że naprężenia są największe w obszarach rury z najmniejszą grubością ścianki, zredukowanej podczas kształtowania.



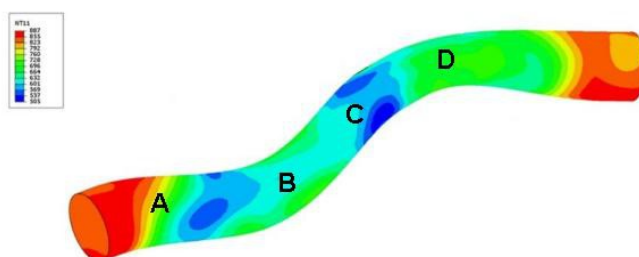
Rys. 8. Porównanie naprężeń, twardości i grubości ścianki na długości rury (tworząca 1)

4. Dyskusja i podsumowanie

Na powierzchni zewnętrznej rury do układu wydechowego, wykonanej ze stali chromowo-niklowej kształtowanej technologią hydroformowania, stwierdzono złożony stan naprężeń rozciągających. Wartości największych naprężeń powierzchniowych przekraczają poziom granicy plastyczności stali 304L w wersji DDQ (ok. 170MPa). Oznacza to, że stal podczas hydroformowania uległa umocnieniu, i jak można przypuszczać mając na względzie złożony kształt rury, również wskutek wstępnego gięcia poprzedzającego hydroformowanie.

Naprężenia cechowały się szerokim zakresem zmienności zarówno w kierunku obwodowym (σ_x), jak i w kierunku wzdłużnym (σ_y), wynoszącym odpowiednio 69-240 MPa i 26-290 MPa. W analizie średnich wartości naprężeń oraz współczynników zmienności wykazano, że najmniejsze naprężenia i o jednocześnie największym rozproszeniu wartości występowały w centralnej części rury, gdzie redukcja grubości ścianki była najmniejsza. Z uwagi na powierzchniowy charakter wyznaczonych naprężeń źródła tego rozproszenia należy poszukiwać w odmiennych warunkach tarcia różnych fragmentów powierzchni rury o matrycę podczas hydroformowania.

Rozłożenie naprężeń powierzchniowych wyznaczonych metodą dyfraktometryczną ogólnie współgra z modelem rozłożenia odkształceń w poszczególnych obszarach rury wygenerowanym komputerowo, przedstawionym na rysunku 9. Należy jednak podkreślić, że przy grubościach ścianki jakie posiadała badana rura (<1.5 mm) model prezentuje raczej odkształcenia średnie w całej grubości ścianki. Nie odzwierciedli on ewentualnych, incydentalnych zjawisk (np. związanych z transportem i magazynowaniem), które mogą wystąpić w warunkach produkcji.



Rys. 9. Rozłożenie odkształceń w hydroformowanej rurze wygenerowane w modelowaniu komputerowym

Wartości wyznaczonych naprężeń i analiza ich rozłożenia oparte na pomiarach metodą rentgenowską dotyczą niewielkich powierzchniowych obszarów, określonych przekrojem skolimowanego promieniowania ($\varnothing 2\text{mm}$) oraz jego wnikaniami w stal (ok. $17\ \mu\text{m}$) przy powierzchni zewnętrznej rury. Zobrazowanie rozłożenia naprężeń, czy odkształceń, w tak cienkiej warstwie nie jest osiągalne w komputerowym modelowaniu procesów kształtowania plastycznego. Stąd, metoda rentgenowska może służyć jako cenne uzupełnienie modelowania, szczególnie że nowoczesne dyfraktometry umożliwiają dokonanie nieniszczących pomiarów na cienkościennych wyrobach o złożonym kształcie powierzchni.

Z prezentowanych w literaturze analiz numerycznych przepływu ciekłego medium w przewodach rurowych wynika, że wywiera ono różne ciśnienie na ścianki przewodu w różnych jego miejscach. Ciśnienie to zależy głównie od kątów zagięcia przewodu oraz parametrów medium, takich jak temperatura, gęstość lub szybkość przepływu [20]. Przemawia to za tym, aby w miejscach, gdzie krzywizna przewodu rurowego jest najsilniejsza dokonywać mapowania rozłożenia naprężeń poprzez kompleksowe pomiary - na obwodach i wzdłuż tworzących rury.

Literatura

- [1] Alaswad A, Benyounis K Y, Olabi A G. Tube hydroforming process: a reference guide. *Materials and Design* 2012; 33: 328-339.
- [2] Baczmanski A, Wierzbanowski K, Lipinski P. Determination of Residual Stresses in Plastically Deformed Polycrystalline Material. *Materials Science Forum* 1994; 157-162: 2051-2058.
- [3] Bahman K, Trends for stainless steel tube in automotive applications. *The Tube & Pipe Journal*, September 13, 2005 (thefabricator.com).
- [4] Brytan Z, Stainless steel in the automotive industry (in Polish). *STAL Metale & Nowe Technologie* 2013; 11-12: 14-19.
- [5] Chałupczak J. Hydromechanical spreading in application to the formation of tees and X-pieces (in Polish). *Works of the Kielce University of Technology. Mechanics*; 39. Habilitation dissertation. Kielce, 1986.
- [6] Gronostajski Z, Kuziak R. Metallurgical, technological and functional foundations of advanced high-strength steels for the automotive industry (in Polish). *Works of the Institute of Ferrous Metallurgy* 2010; 22-26.
- [7] Hashemi R, Assemoir A, Masourni E, Abad K. Implementation of the forming limit stress diagram to obtain suitable load path in tube hydroforming considering M–K model. *Materials & Design* 2009; 30(9): 3545-3553.
- [8] ISSF International Stainless Steels Forum. *Stainless Steel Consumption Forecast*, October 2017, (<http://www.worldstainless.org/statistics>) 05.12.2018
- [9] Kocańda A, Sadłowska H. Automotive component development by means of hydroforming. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2008; 8(3): 55-69.
- [10] Koç M. An overall review of tube hydroforming (THF) technology. *Journal of Materials Processing Technology* 2001; 108: 384-393.
- [11] Koç M (Ed.). *Hydroforming for Advanced Manufacturing*. Woodhead Publishing Limited England, and CRC Press USA, 2008.
- [12] Kucharska B, Krzywiecki M. Stresses in a Cr-Ni superficial steel layer based on x-ray measurements and electropolishing *Solid State Phenomena* 2015; 223: 348-354.
- [13] Kucharska B., Wróbel A., Kulej E., Nitkiewicz Z. The X-ray measurement of the thermal expansibility of Al-Si alloy in the form of cast and a protective coating on steel. *Solid State Phenomena* 2010; 163: 286-290.
- [14] Miłek T. Variations of wall thickness in the sections of hydromechanically bulged copper cross joints. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2003; 2(18): 45-48.
- [15] Morphy G. Pressure-sequence and high pressure hydroforming: Knowing the processes can mean boosting profits. *The Tube & Pipe Journal*, September/October 1998 (thefabricator.com, February 2001).
- [16] Skrzypek S J, Witkowska M, Kowalska M, Chruściel K. The non-destructive X-Ray methods in measuring of some material properties (in Polish). *Hutnik-Wiadomości Hutnicze* 2012; 79(4): 238-246.
- [17] Susceptibility of stainless steels to plastic working. *Euro Inox*, Series: Materials and applications. Book No. 8, 2008.
- [18] Wróbel-Knysak A, Kucharska B, The abrasion of Al-Si coatings with different silicon crystal morphology used in car exhaust systems. *Tribologia* 2016; 5: 209-218.
- [19] Xianfeng Chen, Zhongqi Yu, Bo Hou, Shuhui Li, Zhongqin Lin. A theoretical and experimental study on forming limit diagram for a seamed tube hydroforming. *Journal of Materials Processing Technology* 2011; 211(12): 2012-2021.
- [20] Kumbár V, Votava J, Numerical modelling of pressure and velocity rates of flowing engine oils in real pipe. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2015; 7(3): 422-426.