

Wpływ różnych rodzajów obciążeń elementów urządzeń energetycznych na przebieg zachodzących w nich procesów reologicznych i zmęczenia

The influence of different kinds of loading of the power plant components on the creep behaviour and fatigue processes

Skutki wieloletniej eksploatacji elementów urządzeń energetycznych pracujących w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury oraz ciśnienia zależą tak od wartości i przebiegu zmian w czasie tych parametrów jak i od cech geometrycznych rozpatrywanych elementów i rodzaju materiału, z którego zostały wykonane. Czynniki te wpływają na przebieg procesów odkształcania w naczyniach ciśnieniowych bloków energetycznych powodując ich trwałe odkształcenia i degradację właściwości użytkowych materiału. Do podstawowych zjawisk zachodzących w tych warunkach należą procesy pełzania, które do chwili obecnej zostały najlepiej poznane i w dalszym ciągu poświęca się im wiele uwagi rozpatrując ich wpływ na zmiany zachodzące w strukturze materiałów, odkształcenia trwałe i wytrzymałość elementów instalacji energetycznych, których trwałość prognozowana jest na podstawie charakterystyk pełzania [1-3].

Pełzanie jest efektem długotrwałego obciążenia polem siłowym, które stanowi ciśnienie oraz ciężar własny. Nie są to jednak jedyne oddziaływania odpowiedzialne za uszkodzenia i degradację właściwości użytkowych instalacji pracujących w energetyce. Dotyczy to zwłaszcza elementów grubościennych narażonych na wpływ nierównomiernego zmiennego w czasie pola temperatury oraz skutków ograniczenia przemieszczeń związanych z oddziaływaniem zamocowań. Ocena wpływu tych różnych oddziaływań na zachowanie się elementów urządzeń wymaga różnego podejścia zwłaszcza w kontekście wyznaczania własności materiałów w tym ich trwałości. Dokonując próby zdefiniowania podstawowych rodzajów oddziaływań występujących w elementach bloków energetycznych można wyróżnić ich trzy podstawowe rodzaje, których skutki mogą być różne zarówno, gdy rozpatrujemy przebieg procesów powstawania uszkodzeń w materiale jak i wówczas, gdy rozpatrujemy przemieszczenia i wytrzymałość instalacji. Do oddziaływań tych można zaliczyć:

- 1) obciążenia polem siłowym, które stanowi ciśnienie i ciężar własny,
- 2) obciążenia wywołane przemieszczeniami na skutek wpływu naciągów wstępnych lub sztywnych czy też zablokowanych zamocowań,
- 3) obciążenia wywołane nierównomiernym polem temperatury, wśród których można wyróżnić z uwagi na sposób analizy ich przebiegu w czasie:
 - oddziaływania wyznaczone dla projektowych stanów nieustalonych podczas rozruchu i odstawiania oraz stanów ustalonej pracy instalacji,
 - chwilowe wahania temperatury podczas stanów nieustalonych pracy instalacji.

W pracy rozpatrzono wpływ tych oddziaływań na zmienne w czasie przemieszczenia, odkształcenia i naprężenia w wybranych fragmentach instalacji. Przedstawione rozważania mają poglądowy charakter, bowiem w pracy skoncentrowano się na ocenie charakteru skutków obciążeń wywołanych różnymi przyczynami.

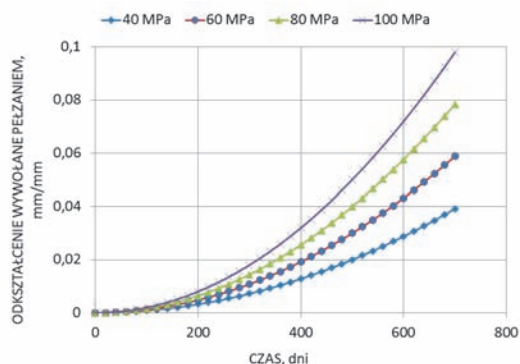
Obciążenia polem siłowym

Rozpatrzono fragment rurociągu z dwoma prostoliniowymi odcinkami i kolanem przedstawiony na rysunku 1a. W przeprowadzonych obliczeniach odebrano możliwość przemieszczeń końców rozpatrywanego rurociągu w kierunku jego osi. Przyjęto model pełzania materiału rurociągu w postaci zależności:

$$\dot{\epsilon} = C_1 S^{C_2} t^{C_3} e^{-C_4/T} \quad (1)$$

w której współczynniki C_1, C_2, C_3 i C_4 wyznaczone są na podstawie prób pełzania.

Charakterystyki pełzania, które można uzyskać przyjmując założony model (1) przedstawiono na rysunku 1b.



Rys. 1. Przyjęty do obliczeń model fragmentu instalacji – a) i odpowiadające mu charakterystyki pełzania materiału – b)

Przyjęto ustaloną wartość ciśnienia na powierzchni wewnętrznej rurociągu - $p = 18 \text{ MPa}$.

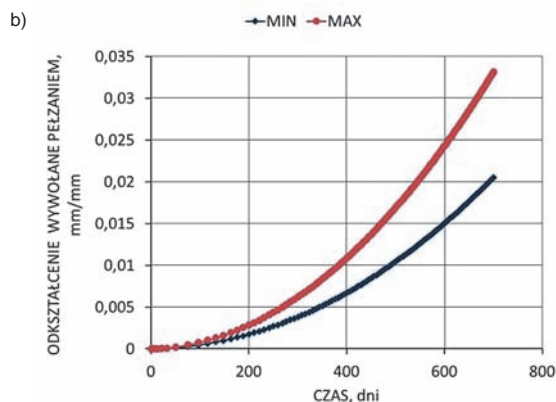
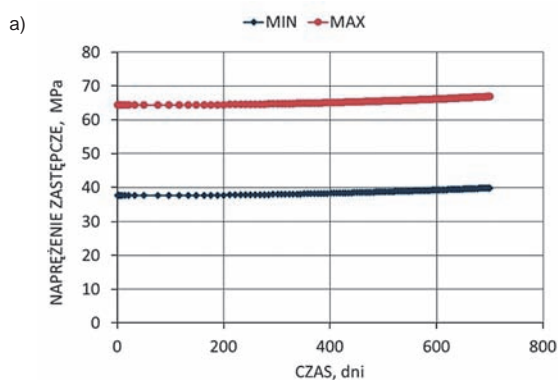
Na rysunku 2 przedstawiono wyznaczone na podstawie obliczeń zmiany w funkcji czasu naprężeń i odkształceń zastępczych wywołanych pełzaniem w wybranym fragmencie rurociągu. W rozpatrywanym przypadku dla praktycznie ustalonej wartości naprężenia maksymalnego i minimalnego można zaobserwować ciągły przyrost odkształceń wywołanych pełzaniem.

Obciążenia wywołane przemieszczeniami

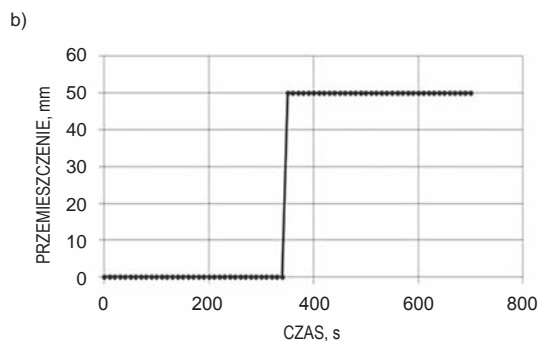
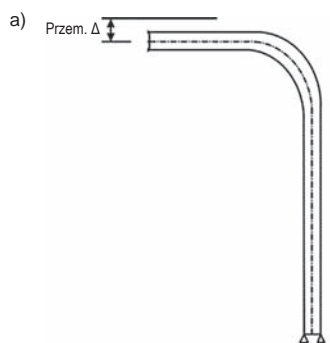
Dla rurociągu o tej samej geometrii jak w poprzednim przykładzie założono równoczesne oddziaływanie ciśnienia oraz przyjęto, że górne zamocowanie rurociągu przemieści się w kierunku pionowym o odcinek 50 mm (rys. 3).

Porównując rysunki 2b i 4b można zauważyć, że duża chwilowa zmiana naprężeń, widoczna na rysunku 4a, w niewielkim stopniu wpłynęła na wartości odkształceń spowodowanych pełzaniem.

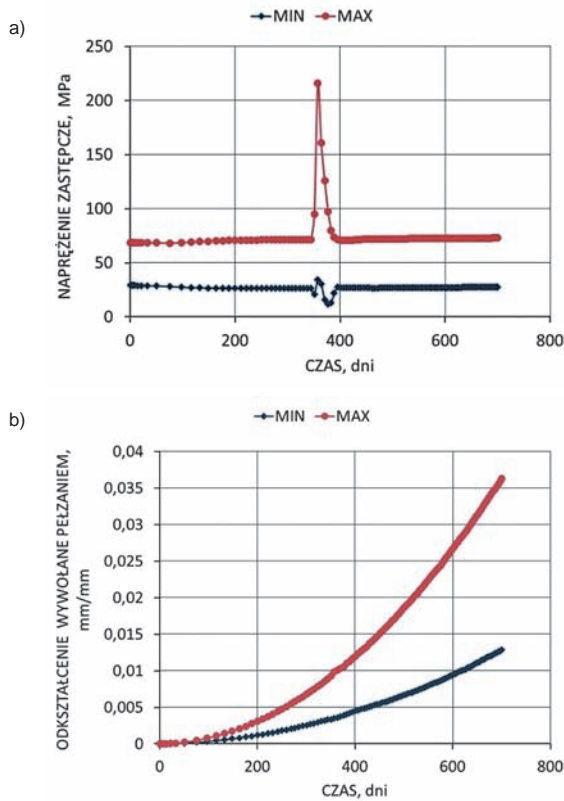
Na rysunku 4a widoczne są natomiast efekty związane z relaksacją naprężeń. Można więc stwierdzić, że naprężenia wywołane przemieszczeniami oddziałują w ograniczonych przedziałach czasu i zanikają w wyniku relaksacji naprężeń. Założone przemieszczenie wybranego punktu rurociągu prowadzi natomiast do istotnych trwałych zmian położenia osi rurociągu (rys. 5b), co może mieć istotne znaczenie dla poprawności jego funkcjonowania.



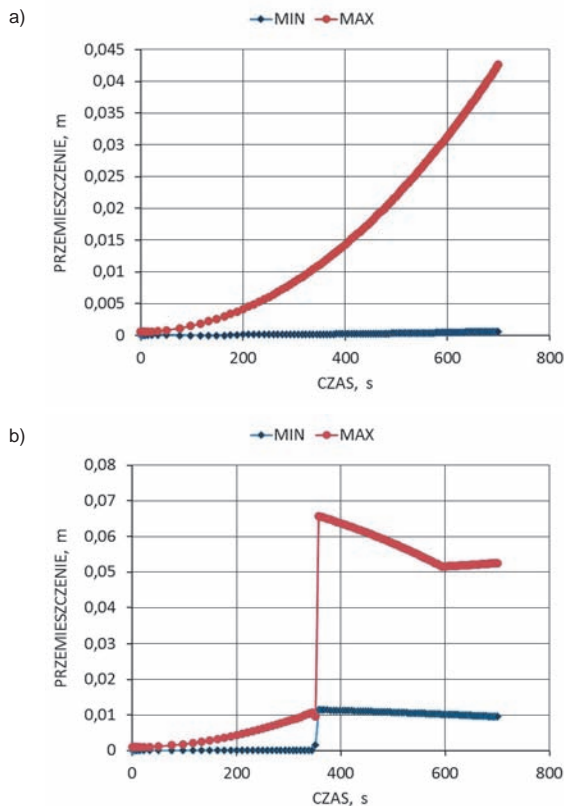
Rys. 2. Zmiany w funkcji czasu naprężeń i odkształceń zastępczych wywołanych pełzaniem w wybranym fragmencie rurociągu



Rys. 3. Schemat rozpatrywanego rurociągu wraz z zaznaczonym przemieszczeniem górnego zamocowania – a) oraz przebieg zmian w funkcji czasu przemieszczenia pionowego – b)



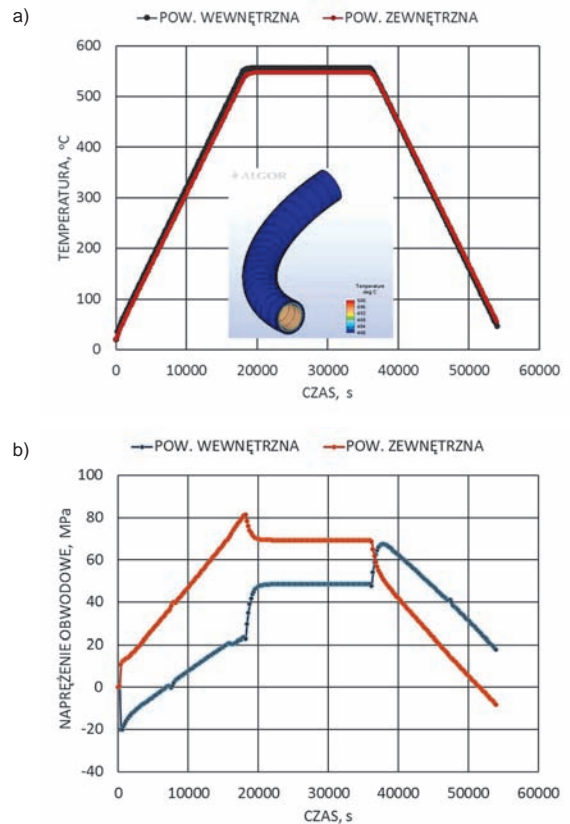
Rys. 4. Zmiany w funkcji czasu naprężeń i odkształceń zastępczych wywołanych pełzaniem i relaksacją w wybranym fragmencie rurociągu



Rys. 5. Przebieg zmian w czasie położenia górnego punktu zamocowania rurociągu w wyniku:
a) pełzania wywołanego ciśnieniem wewnętrznym
b) przemieszczenia, pełzania i relaksacji

Obciążenia wywołane nierównomiernym polem temperatury

Analizując wpływ obciążeń o charakterze cieplnym na stan naprężeń i odkształceń w instalacji posłużono się dwoma przykładami. Pierwszy z nich to wybrane kolano rurociągu. Drugim przykładem jest komora przegrzewacza pary. W przypadku kolana rozpatrzono idealny cykl pracy bloku energetycznego, podczas którego w okresie uruchamiania temperatura pary zmienia się zgodnie z liniową zależnością. Podobnie rośnie ciśnienie. Następnie wartość temperatury pary ustala się na poziomie odpowiadającym warunkom ustalonej pracy kotła. Po okresie pracy ustalonej następuje odstawienie kotła, dla którego przyjęto również liniową zależność pomiędzy czasem i temperaturą pary oraz pomiędzy czasem i spadkiem ciśnienia. W tych warunkach istnieje różnica pomiędzy temperaturą powierzchni wewnętrżnej i zewnętrznej zarówno w okresie uruchamiania jak i odstawiania kotła, a na przekroju ścianki rurociągu występuje nierównomierny rozkład temperatury. Efektem nierównomiernego pola temperatury są naprężenia cieplne, których zmiany na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Przebieg zmian temperatury powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej rurociągu spowodowany zmianami temperatury pary – a) oraz odpowiadające tym zmianom przebiegi zależności pomiędzy naprężeniami obwodowymi na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej rurociągu i czasem – b)

Na wykresach obrazujących wyidealizowany cykl pracy bloku energetycznego widoczny jest okres ustalonej pracy kotła oraz okresy, w których naprężenia osiągają swoje ekstremalne wartości. Można zauważyć, że naprężenia na powierzchni

zewewnętrznej osiągają maksymalne wartości pod koniec okresu rozruchu. Na powierzchni wewnętrznej największe naprężenia występują na początku okresu odstawiania.

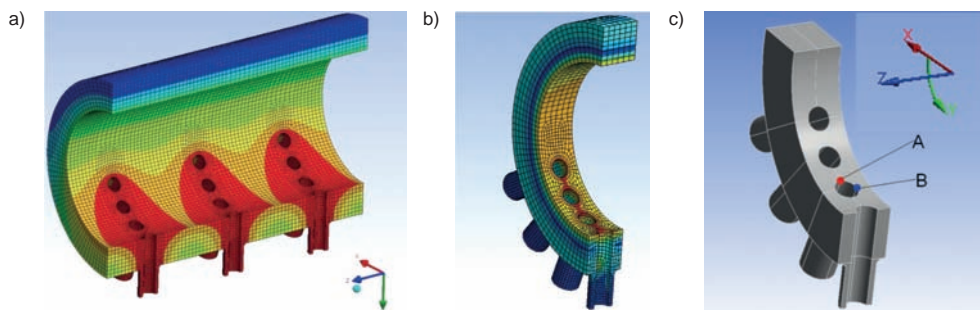
W większości przypadków przebiegi zmian temperatury w funkcji czasu znacznie odbiegają od rozpatrywanego przypadku, który obrazuje sposób liczenia wartości naprężeń zgodnie z obowiązującymi obecnie normami. Zarówno w okresie uruchamiania jak i odstawiania bloku energetycznego mogą występować krótkie okresy bardzo gwałtownych zmian temperatury. Badaniom procesów odkształcania w takich warunkach poświęcono niewiele opracowań. Należą do nich między innymi publikacje [4-7]. W pracach [5-7] przedstawione zostały wyniki analizy pola temperatury, naprężeń i odkształceń w jednym z krytycznych elementów bloku energetycznego, jakim jest komora przegrzewacza pary (rys. 7). Wykonano obliczenia dla rzeczywistych zmierzonych w warunkach eksploatacji parametrów pracy bloku energetycznego. Wyznaczono lokalne charakterystyki procesu odkształcania w postaci zależności pomiędzy składowymi stanu odkształcania i składowymi stanu naprężenia w wybranych punktach na powierzchni komory (rys. 8).

Charakterystyki pokazane na rysunku 8 wykazują typowy dla procesów zmęczeniowych w zakresie małej liczby cykli przebieg w postaci pętli histerezy. O ile jednak w przypadku klasycznych procesów zmęczenia niskocyklowego zjawisko to przebiega w stałej temperaturze, to w rozpatrywanym przypadku procesowi zmian naprężeń i odkształceń towarzyszą zmiany

temperatury. Jest to proces zmęczenia cieplno-mechanicznego, którego badania prowadzone są obecnie w niewielu wybranych ośrodkach w kraju i za granicą.

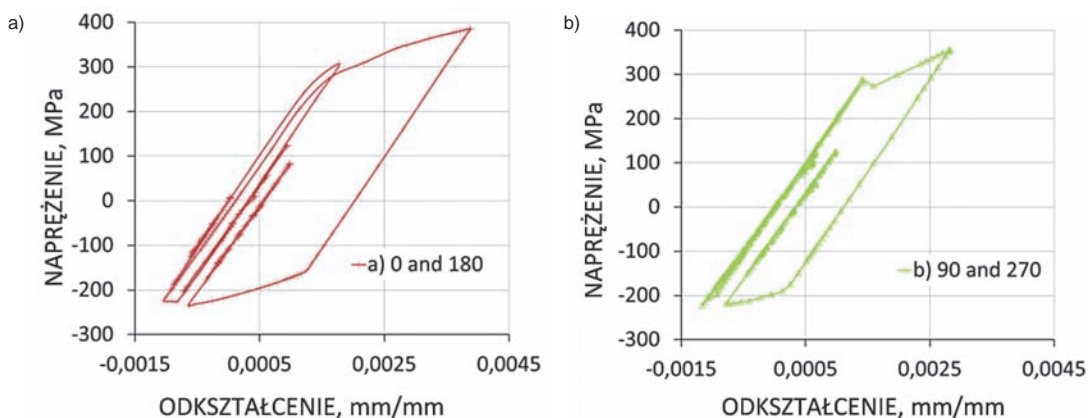
Podsumowanie

Celem pracy było syntetyczne przedstawienie charakterystycznych cech różnego rodzaju oddziaływań występujących w elementach urządzeń energetycznych oraz wpływu tych oddziaływań na procesy odkształcania o charakterze globalnym i lokalnym. Posłużono się w tym przypadku przykładami wybranych uproszczonych modeli elementów instalacji oraz wynikami badań i modelowania rzeczywistych obiektów. Na podstawie przedstawionych przykładów można stwierdzić, że przebieg procesów reologicznych w elementach rurociągów energetycznych w bardzo istotnym stopniu zależy od rodzaju obciążeń. Przemieszczenia punktów zamocowania rurociągów mogą w wyniku relaksacji prowadzić do trwałej deformacji ich osi natomiast skutkiem pełzania wywołanego ciśnieniem wewnętrznym w rurociągu mogą być w głównej mierze zmiany wymiarów jego przekroju poprzecznego. Należy również zauważyć, że chwilowe wartości naprężeń cieplnych występujące w nieustalonych stanach pracy instalacji energetycznych zazwyczaj znacznie przekraczają wartości wyznaczone zgodnie z projektowymi charakterystykami uruchamiania i odstawiania instalacji.



Rys. 7. Model komory przegrzewacza pary wykonanej ze stali X20CrMo12

- a) wycinek komory z rozkładem temperatury dla wybranej chwili czasu, b) rozkład naprężeń osiowych dla wybranej chwili czasu, c) wycinek komory z zaznaczonymi punktami dla których wyznaczano charakterystyki odkształcania



Rys.8. Zależności pomiędzy składowymi stanu odkształcania w wybranych punktach komory przegrzewacza pary [6,7]:

- a) naprężenie osiowe w funkcji odkształcenia osiowego w punkcie A, b) naprężenie obwodowe w funkcji odkształcenia obwodowego w punkcie B

Naprężenia cieplne spowodowane wahaniami temperatury w stanach nieustalonej pracy bloków energetycznych mogą być przyczyną procesów zmęczeniowych zachodzących w materiałach ich elementów. Zatem trwałość elementów bloku energetycznego w tym trwałość resztkowa nie powinna być rozpatrywana w oderwaniu od rodzaju ich obciążeń oraz historii tych obciążeń. Z uwagi na coraz większe znaczenie naprężeń cieplnych w procesach niszczenia elementów grubościennych urządzeń energetycznych istotnego znaczenia nabierają zarówno metody eksperymentalnego wyznaczania własności materiałów poddanych zmęczeniu cieplno-mechanicznemu [8] jak i metody analizy wytrzymałościowej elementów narażonych na powstawanie w nich odkształceń o charakterze termo-sprężysto-plastycznym [9]. Zagadnieniom tym w ostatnim okresie poświęca się coraz większą uwagę w związku ze wzrostem parametrów eksploatacji bloków energetycznych, co wynika ze względów ekologicznych i dążenia do zwiększenia sprawności urządzeń pracujących w energetyce.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Okrajni J., Zmęczenie cieplno-mechaniczne i trwałość instalacji energetycznych, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2011.
- [2] Hernas A., Żarowytrzymałość stali i stopów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1999.
- [3] Hernas A., Dobrzański J., Trwałość i niszczenie elementów kotłów i turbin parowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003.

- [4] Farragher TP, Scully S, O'Dowd NP, Leen SB. Development of life assessment procedures for power plant headers operated under flexible loading scenarios. *International Journal of Fatigue* 2013;49: 50-61.
- [5] Okrajni J., Twardawa M., Influence of a variable in time heat transfer coefficient on stresses in models of power plant components. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology* 2014;136(4).
- [6] Twardawa M., Zmęczeniowe uwarunkowania trwałości stopów stosowanych na elementy grubościenne bloków energetycznych o parametrach nadkrytycznych, praca doktorska, (The fatigue conditioning of the durability of alloys of thick-walled components of supercritical power plants, doctoral thesis). Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
- [7] Okrajni J., Twardawa M., Local Strains That Lead to the Thermo-mechanical Fatigue of Thick-walled Pressure Vessels, *Materials Performance Characterization* ASTM International, vol. 2, no. 2/ 2014, pp. 244-261.
- [8] Marek A., Okrajni J., Junak G., Twardawa M., Research on dependence between the fatigue life of X20CrMoV12.1 and P91 steels under conditions of interactions of thermo-mechanical and isothermal low-cycle fatigue. *Solid State phenomena* 2015; 224: 93-98.
- [9] Banaś K., Badur J., On an approach to the thermo-elastic-plastic failure based on the Burzyński-Pęcherski criterion, Proc. 11th Int. Cong. On Thermal Stresses, University of Salerno, Italy, 5-9 June 2016, pp. 19-22.



Tadeusz Pała, Ihor Dzioba, Robert Pała
Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn

Mikrostruktura i właściwości mechaniczne spawanych laserowo doczołowych złączy rur ze stali ferrytycznych¹⁾

The microstructure and mechanical properties of the butt tubes laser welded joints of a ferritic steels

Łączenie elementów w konstrukcjach różnego rodzaju za pomocą spawania jest obecnie jedną z rozpowszechnionych technologii. Podczas eksploatacji konstrukcje, w tym i ich frag-

menty zawierające złącza spawane, poddawane są obciążeniom stałym, monotonicznym i zmęczeniowym, pochodzącym od działania czynników siłowych, temperaturowych oraz innych [1-4]. Automatyzacja procesu spawania oraz zastosowanie nowoczesnych technologii (MIG/MAG, TIG, hybrydowe) pozwala uzyskiwać złącza o wysokiej jakości, jednak wciąż pozostają one obiektami szczególnej uwagi i uważane są za najłabsze ogniwa konstrukcji. Powodem tego są pewne osobliwości powstające w złączu – niejednorodność materiałowa i mikrostrukturalna,

¹⁾ Praca powstała w ramach projektu badawczego PBS1/B5/13/2012 „Technologie laserowego spawania dla energetyki i ochrony środowiska” sfinansowanego przez NCBiR oraz projektu 01.0.08.00/2.01.01.02.0048 sfinansowanego przez MNiSW. Autorzy pragną złożyć podziękowania dr inż. Justynie Kasińskiej za pomoc w wykonaniu zdjęć metalograficznych.