

Mateusz MOTYKA¹

Opiekun naukowy: Ireneusz WRÓBEL²

SYMULACJA PROCESU SPAWANIA Z WYKORZYSTANIEM METODY ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Streszczenie: W artykule przedstawiono modelowanie procesu spawania na przykładzie typowej konstrukcji spawanej. Na potrzeby analizy zbudowano model CAD, model dyskretny analizowanej konstrukcji oraz zdefiniowano odpowiednie warunki brzegowe. Przeprowadzono analizę procesu spawania oraz opracowano i zaprezentowano wyniki symulacji w postaci rozkładu temperatury, udziału składników fazowych w złączach oraz odkształceń spawalniczych

Słowa kluczowe: symulacje spawania, MES, deformacje spawalnicze

SIMULATION OF THE WELDING PROCESS USING THE FEA

Summary: The article presents a method of modelling the welding process on the example of a typical welded structure. For the purposes of the analysis, a CAD model and a discrete model of the analysed structure were built, and appropriate boundary conditions of the task were defined. The welding process was simulated. Conclusions have been developed.

Keywords: welding simulations, FEM, welding deformations

1. Wstęp

Podczas procesu spawania zachodzą zjawiska fizyko-chemiczne takie jak: procesy cieplne (topnienie, krystalizacja), reakcje metalurgiczne, zmiany struktury co w rezultacie skutkuje występowaniem naprężeń i odkształceń spawalniczych. Zjawiska te wpływają bezpośrednio na własności połączenia spawanego, dlatego ich znajomość i możliwość przewidywania od dawna była przedmiotem zainteresowania badań naukowych.[1, 2] Wyznaczenie pola temperatur i charakterystycznych wielkości cyklu cieplnego pozwala na określenie przemian struktury materiału oraz

¹ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, specjalność: CAD/CAM, email: mateuszmotyka96@gmail.com

² dr hab. inż., prof. ATH, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, email iwrobel@ath.bielsko.pl

i naprężeń i odkształceń spawalniczych. Rozwój metod numerycznych umożliwia modelowanie skomplikowanych zjawisk fizycznych typowych dla procesów spawania takich jak: rozkład naprężeń spawalniczych w modelu, deformacje modelu po spawaniu, twardość spoiny, wartość przetopu oraz rozkład faz metalurgicznych w spoinie. Są one opisywane za pomocą równań różniczkowych opisujących model matematyczny, które po sformułowaniu zagadnień brzegowo początkowych są rozwiązywane metodami numerycznymi. [3] Do obliczania cykli cieplnych i pola temperatur najczęściej wykorzystuje się metodę elementów skończonych. Praca obejmuje omówienie zasad projektowania połączeń spawanych, zbudowaniu modelu geometrycznego i dyskretnego typowej konstrukcji spawanej a następnie przeprowadzenie symulacji spawania w systemie SYSWELD.

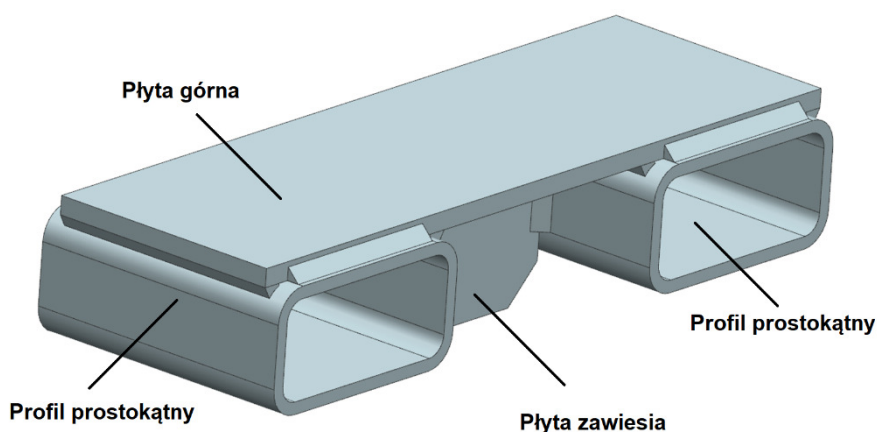
2. Zasady projektowania złączy spawanych

Spawanie jest skomplikowanym procesem cieplno-metalurgicznym mogącym zmniejszyć właściwości eksploatacyjne wyrobu. Podstawową zasadą projektowania konstrukcji spawanych powinno być dążenie do takich rozwiązań konstrukcyjnych, które ograniczyłyby udział spawania. Jeśli szczegółowe przepisy nie stanowią inaczej, mogą być wykorzystywane następujące zalecenia do projektowania połączeń spawanych:

- Elementy tworzące złącza i węzły oraz spoiny je łączące powinny być rozmieszczone tak, aby nie wywoływały dodatkowych sił i momentów wywołujących zwiększenie naprężeń i odkształceń. W przypadku elementów rozciąganych i ściskanych, środek ciężkości przekroju łączonych elementów powinien pokrywać się ze środkiem ciężkości spoin.
- Powinno unikać się nadmiernego skupienia spoin, krzyżowania się ich oraz zbyt małych odległości między nimi. Prowadzi to do powstania złożonego stanu naprężeń o dużych wartościach i powstawania pęknięć.
- Złącza spawane powinny być projektowane w miejscach łatwo dostępnych, umożliwiających poprawne wykonywanie spoin i ich kontrolę.
- Należy unikać rozwiązań, w których elementy łączone są tylko za pośrednictwem nakładek bez spoin czołowych. Elementy spawane powinny być w miarę możliwości łączone bezpośrednio.
- W przypadku doczołowego łączenia blach o różnych grubościach powinno się zapewnić łagodne przejście przekrojów. Podczas łączenia części o znacznej różnicy grubości w miejscu występowania złącza spawanego mogą wystąpić jego wady. Na skutek różnych pojemności cieplnych łączonych elementów mogą wystąpić przyklejenia w części masywnej lub przepalenia części cienkiej.
- Przy wykonywaniu spoin czołowych ważne jest poprawne przetopienie grani. Jeśli możliwy jest dostęp do spoiny z obu stron złącza, należy projektować spoiny dwustronne.
- Grubość spoin pachwinowych przy łączeniu kształtowników walcowanych nie powinna przekraczać grubości zalecanej ze względu na zaokrąglenia i pochylenia w nich występujące.

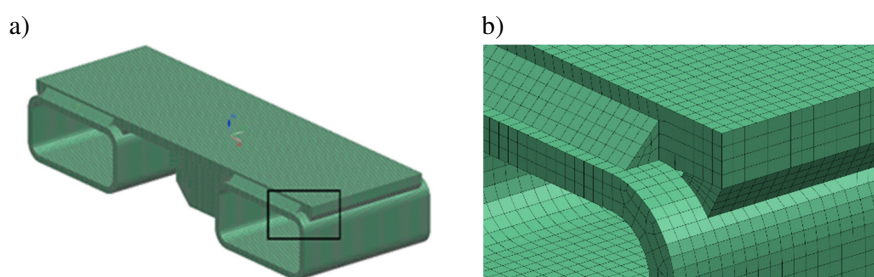
3. Budowa modelu CAD i modelu dyskretnego MES

Na potrzeby analizy procesu spawania wykonano model 3D CAD trawersy nakładanej na widły wózka widłowego. Ładunek podwieszany jest do haka w jej osi symetrii (rys. 1). Do górnej płyty o wymiarach 620mm x 300mm i grubości 15mm za pośrednictwem spoin pachwinowych połączone zostały prostokątne profile zamknięte o wymiarach 200mm x 100mm i grubości ścianki 10mm. Między nimi, na środku znajduje się płyta o grubości 15mm pełniąca funkcję zawiesia do mocowania ładunku.



Rysunek 1. Model CAD konstrukcji trawersy

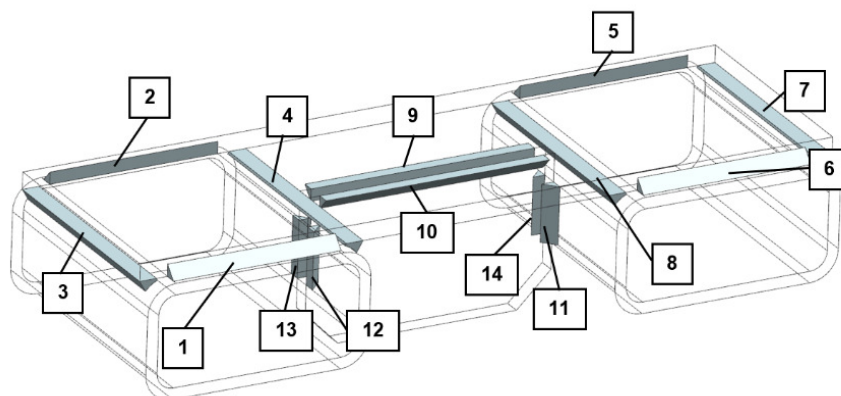
Model CAD został poddany dyskretyzacji za pomocą elementów hexagonalnych. Na rysunku 2 przedstawiono model dyskretny trawersy przygotowany na potrzeby analizy. Model dyskretny został podzielony na ośmiowęzłowe elementy hexagonalne. Ważna jest koincydentność węzłów leżących na styku poszczególnych elementów modelu: blach, profili i spoin. [5, 6, 7]



Rysunek 2. Model dyskretny trawersy: a) widok elementu, b) powiększenie zaznaczonego fragmentu

Przed przystąpieniem do analizy procesu spawania opracowano strategię spawania, czyli zdefiniowano kolejność wykonywania spoin. Najpierw wykonywano spoiny łączące profile prostokątne do płyty, następnie spoiny łączące płytę zawiesia do

głównej płyty a na końcu spoiny łączące płytę zawiesia z profilami zamkniętymi. Zdefiniowano również kierunek układania spoiny. Na rysunku 3, przedstawiono kolejność wykonywania spoin.



Rysunek 3. Kolejność nakładania spoin

Na potrzeby analizy zdefiniowano także:

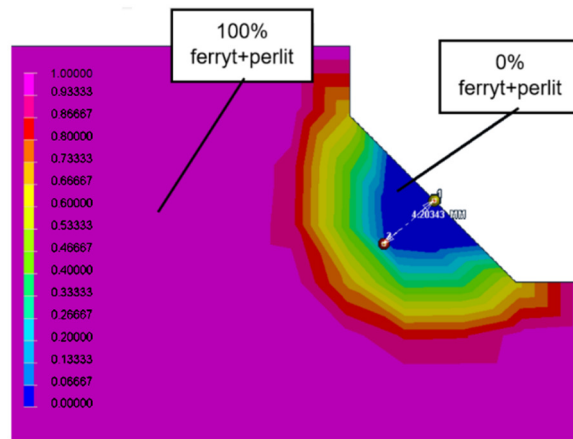
- materiał z jakiego wykonana jest konstrukcja i materiał spoiny – S355J2,
 - warunki wymiany ciepła powierzchni zewnętrznych modelu trawersy z otoczeniem,
 - metodę i parametry spawania: metoda MIG, prąd: 250A, prędkość spawania 5mm/s,
 - sposób podparcia modelu, który odwzorowywał spawanie konstrukcji w przyrządzie spawalniczym. Każdy komponent modelu był podparty w odpowiednich miejscach, tak aby odwzorować podparcie go w rzeczywistym przyrządzie spawalniczym.
- Taki zbudowany model został poddany analizie w systemie Sysweld.

Tabela 1 Skład chemiczny stali S355J2 w [%] wg PN-EN 10025-2:2007 [8]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V	Al	Cu
0,2	1,5	0,2-0,5	max 0,04	max 0,4	max 0,3	max 0,3	-	-	-	max 0,02	max 0,03

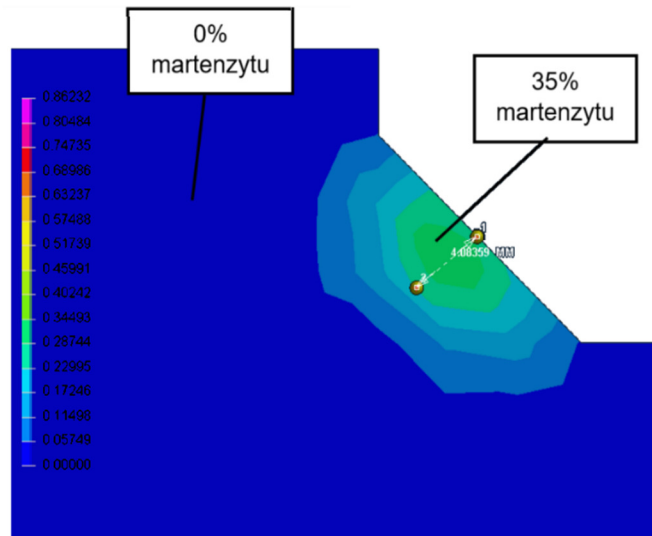
4. Wyniki analiz

Dla konstrukcji wykonana została analiza rozkładu temperatury, udziału składników fazowych w złączach oraz odkształceń spawalniczych z zastosowaniem programu Sysweld. Ze względu na zbliżony charakter procesów cieplnych w każdej spoinie występującej w konstrukcji rozkład faz i ich mieszanin w każdej z nich przebiegał bardzo podobnie. Pierwszą zarejestrowaną strukturą była mieszanina ferrytu i perlitu. [7, 9] Jej zawartość w spoinie w odległości około 4 mm od lica spoiny nie przekraczała 5% i stopniowo rosła do wartości 100% w materiale rodzimym (rys. 4).



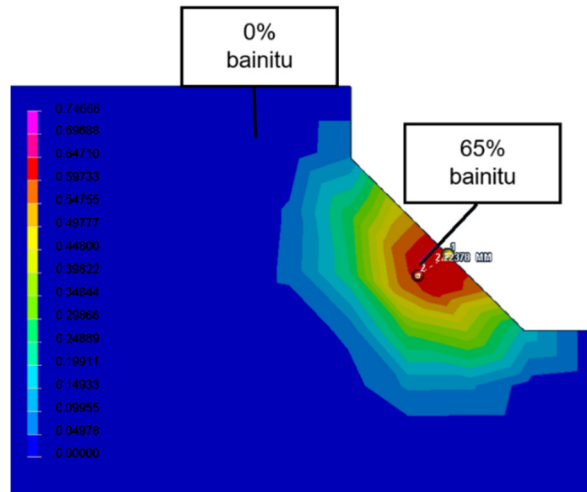
Rysunek 4. Przedstawienie graficzne udziału ferrytu i perlitu w złączu

Widoczny na rysunku 5 martenzyt występował w złączu spawanym w ilości nie większej niż 35%. Największy jego udział zaobserwowano w spoinie.



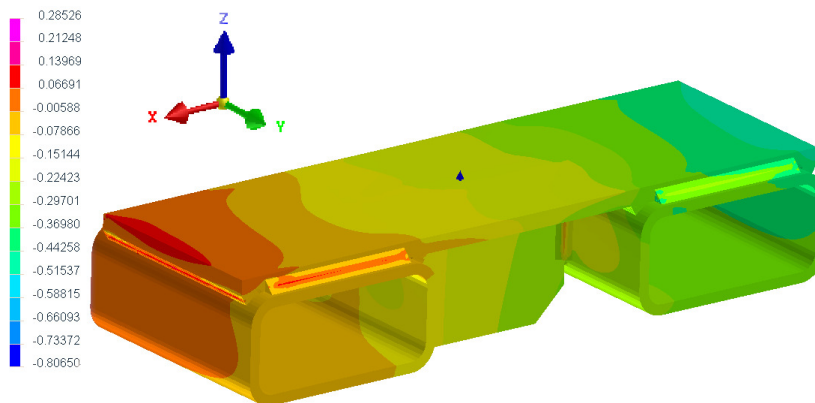
Rysunek 5. Przedstawienie graficzne udziału martenzytu w złączu

Kolejną zarejestrowaną mieszaniną był bainit. Obszar jej największej wartości (do 65%) znajdował się w pobliżu lica spoiny (około 3 mm od jego powierzchni). (rys. 6).



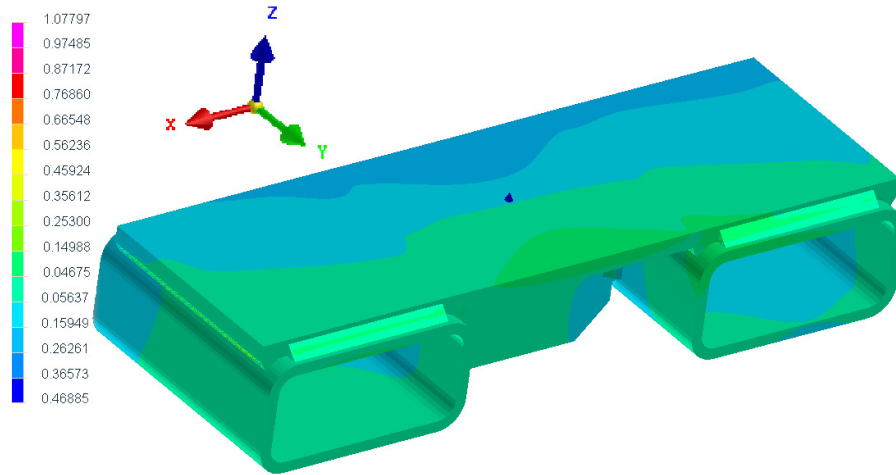
Rysunek 6. Przedstawienie graficzne udziału bainitu

Widoczne na rysunku 7 odkształcenie konstrukcji w kierunku osi X (odnoszącej się do długości trawersy) przebiegało jednakowo na całej długości modelu. Jego całkowita wartość wyniosła około 0,6 mm. Należy zaznaczyć, że wartości odkształcenia zostały analizowane po osiągnięciu przez model temperatury otoczenia równej 20 °C.



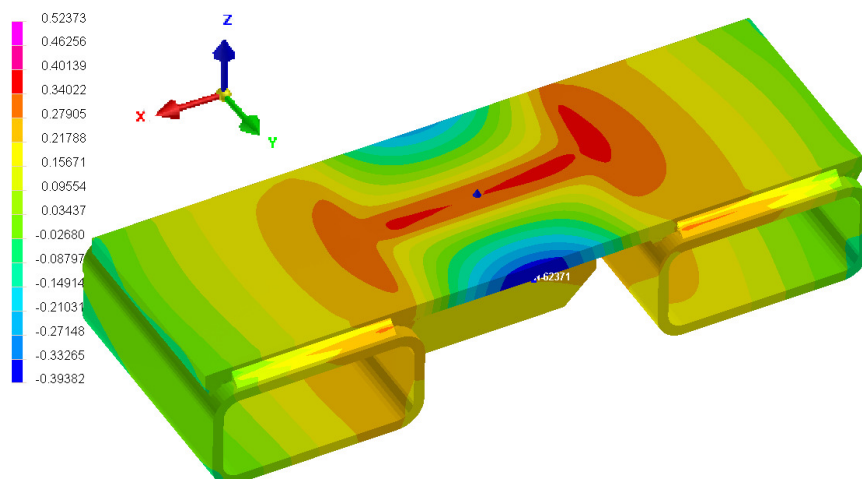
Rysunek 7. Odkształcenia modelu w kierunku osi X

Deformacje w kierunku osi Y (wzdłuż szerokości konstrukcji) nie przekroczyły 0,3mm. Na górnej płycie, na środku krawędzi w miejscu oddalonym od spoin łączących ją z prostokątnymi profilami zamkniętymi i płytą zawiesia można zaobserwować wzrost odkształceń (rysunek 8).



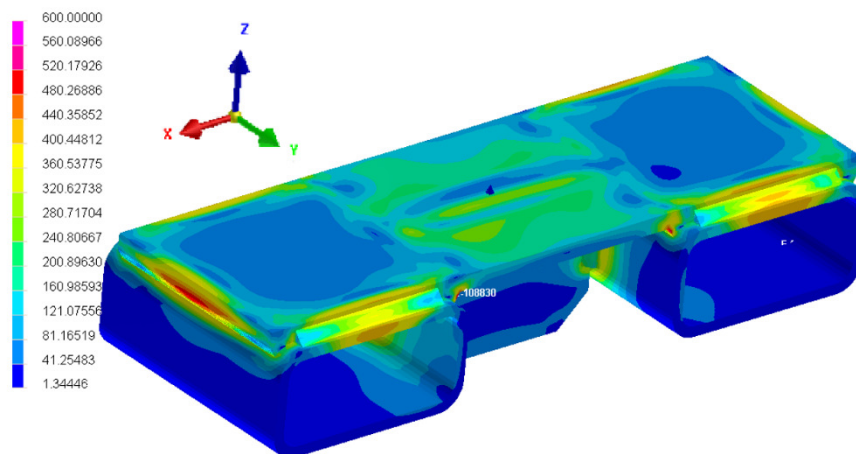
Rysunek 8. Deformacje w kierunku osi Y

Rysunek 9 przedstawia odkształcenie w kierunku osi Z (wzdłuż wysokości trawersy) rozłożyły się w modelu równomiernie. Oba końce spawanej konstrukcji obniżyły się o około 0,15mm w stosunku do stanu pierwotnego. Górna płyta w miejscu łączenia z płytą zawiesia i profilami prostokątnymi podniosła się o 0,4mm. Środkowe części dłuższych krawędzi górnej płyty obniżyły się 0,4 mm.



Rysunek 9. Odkształcenie w kierunku osi Z

Zredukowane naprężenia spawalnicze wystąpiły w miejscach spoin i dotyczyły głównie górnej płyty łączącej wszystkie pozostałe części. Wartość i rozkład naprężeń w obrębie łączącej konstrukcję były bardzo podobne. Największe z nich miały miejsce w zewnętrznych spoinach łączących rury z płytą a ich wartość nie przekroczyła 480MPa (rysunek 10).



Rysunek 10. Pola naprężeń spawalniczych

5. Wnioski

Wynikami przeprowadzonych symulacji są pola temperatury, udział składników strukturalnych oraz wielkości odkształceń i naprężeń spawalniczych.

Miejscowa zawartość martenzytu w spoinach trawersy dochodziła do 35%, a bainitu do 65%. Powstawanie struktur hartowniczych typu bainit, martenzyt może być związane z szybkim odprowadzaniem ciepła ze złączy ze względu na grubość elementów i wielkość powierzchni wymiany ciepła. Odkształcenia trawersy zaobserwowane w szczególności na jej górnej płycie pochodzą ze skurczu spoin łączących do niej pozostałe elementy. Ich niewielka (w porównaniu do gabarytów konstrukcji) wartość nie pogarsza jej własności użytkowych. Największe naprężenia występowały na zewnętrznych spoinach łączących rury z górną płytą. Ich wartość dochodziła miejscami do 480MPa. Wytrzymałość doraźna stali S355J2 przyjmuje wartość od 490 – 630MPa. Ze względu na użytkowy charakter konstrukcji należy zwrócić uwagę na możliwość sumowania się naprężeń własnych z eksploatacyjnymi oraz możliwość pęknięcia na zimno ze względu na zwiększoną zawartość martenzytu w spoinach. Z tego powodu w przypadku konstrukcji trawersy powinno rozważyć się zastosowanie wstępnego podgrzewania łączonych części oraz odprężania konstrukcji po spawaniu np. za pomocą wyżarzania odprężającego. Prawidłowe wykonanie symulacji spawania pozwala na uzyskanie informacji m.in. o odkształceniach

i naprężeniach konstrukcji. Pozwala to na odpowiedni dobór parametrów spawania, zredukowanie liczby wykonanych prototypów, opracowanie planu wykonywania spoin, przewidzenie wartości odkształceń spawalniczych zgodnie z założonymi tolerancjami..

LITERATURA

1. FERENC K.: Spawalnictwo Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
2. MAZUR M.: Podstawy Spawalnictwa, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1993.
3. KOCZUBIEJ S.: Metoda elementów skończonych, wprowadzenie, *www.tu.kielce.pl*, 09.2020.
4. PILARCZYK J.: Poradnik inżyniera Tom 1 - Spawalnictwo Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
5. ESI Group, Panel-Bar Tutorial Visual Weld 9.5, 2014.
6. Serwis internetowy:
https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nx/11/nx_api/custom/ja_JP/opencae/NX%20Nastran%20-20Thermal/ELEMS/Hex8.html
(2020)
7. Welding simulation user guide, Sysweld manual ESI Group, 2016.
8. PN-EN 10025-2: 2007 Wyroby walcowane na gorąco ze stali konstrukcyjnych.
9. WYGLĘDACZ B., KIK T.: Symulacja numeryczna wpływu zmian warunków technologicznych na rozkład naprężeń i odkształceń wymiennika ciepła, Przegląd Spawalnictwa 88(2016)5.

