

Wpływ procesu produkcji na jakość obręczy kolejowych

Ireneusz MIKŁASZEWICZ¹, Dariusz KOWALCZYK², Jacek BORUCIŃSKI³

Streszczenie

Poddano analizie proces technologiczny produkcji obręczy kolejowych do kół bosych zestawów kołowych wagonów towarowych, a także przeprowadzono badania materiałowe wpływu procesu studzenia w dole chłodniczym oraz w spokojnym powietrzu w hali produkcyjnej obręczy po walcowaniu. Badania przeprowadzono według wymagań Karty UIC 810-1:2003 [4], normy PN-84/H-84027/06 [6] oraz Standardowej Karty Technologicznej [10] producenta obręczy. Wykonano również obliczenia metodą elementów skończonych MES naprężeń powstających w obręczach. W podsumowaniu stwierdzono, że stosowany proces produkcji zapewnia dobrą jakość obręczy kolejowych, a proponowana korekta studzenia obręczy nie ma wpływu na jakość gotowego wyrobu.

Słowa kluczowe: studzenie obręczy, stan surowy, symulacja rozkładu naprężeń

1. Wprowadzenie

Badania dotyczyły obręczy kolejowych do kół bosych lokomotyw i wagonów produkowanych w kraju w stanie surowym, tj. bez obróbki skrawaniem, lecz po obróbce cieplnej, o wymiarach zgodnych z PN-91/K-91032 [7] lub zgodnych z zamówieniami odbiorców. Zamawiany wsad w postaci kęsisk okrągłych z ciągłego odlewania spełnia wymagania dotyczące składu chemicznego i zawartości pierwiastków w poszczególnych gatunkach stali, w szczególności zawartości gazów, tj. wodoru poniżej 2,5 ppm, oraz tlenu poniżej 20 ppm, jako pierwiastka tworzącego wtrącenia niemetaliczne, a także niskiej zawartości fosforu i siarki. Huty uzyskują czystość materiału przez zastosowanie rafinacji i obróbki płynnej stali w próżni. Materiał wsadowy nie powinien zawierać pęknięć wewnętrznych i powierzchniowych, porowatości oraz pęcherzy podpowierzchniowych, które podczas przeróbki plastycznej powodują powstanie wad przypowierzchniowych i wewnętrznych w postaci pęknięć w gotowym wyrobie.

Z uwagi na szczególną rolę obręczy w zestawie kołowym, wymagania dotyczące jakości wykonania obręczy i ich producentów są wysokie. Badania międzyoperacyjne oraz odbiorcze obręczy muszą potwierdzić wymagania zawarte w podstawowych dokumentach, tj. Karcie UIC 810-1:2003 i normie

PN-84/H-84027/06, co znaczy że obręcze powinny mieć odpowiednie właściwości wytrzymałościowe, udarność i twardość HBW zależnie od gatunku stali, spełniać wymagania spójności wewnętrznej badanej metodą ultradźwiękową, właściwą strukturę zależną od zastosowanej obróbki cieplnej, a także nie powinny mieć wad powierzchniowych mogących powodować powstawanie głębokich pęknięć po obróbce cieplnej [1, 9].

Należy jednak zauważyć, że od pojawienia się normy PN-84/H-84027/06 [6] minęło ponad 20 lat i w produkcji stali dokonał się duży postęp technologiczny. W związku z tym podjęto badania, których celem było określenie sposobu studzenia obręczy po walcowaniu z zachowaniem bezpiecznych parametrów jakości materiału: niskich naprężeń strukturalnych, zawartości gazów, głównie wodoru, spójności wewnętrznej oraz właściwości wytrzymałościowych materiału.

Na podstawie wyników analizy procesu produkcji i badań materiałowych wyprodukowanych obręczy, sformułowano wnioski dotyczące modyfikacji procesu wykonania, gwarantującej odpowiednią jakość materiału do dalszego etapu, tj. obróbki cieplnej i mechanicznej obręczy, a także uzyskania wyrobu końcowego właściwej jakości, zgodnej z wymaganiami Karty UIC 810-1:2003 oraz normy PN-84/H-84027/06.

¹ Inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: imiklaszewicz@ikolej.pl.

² Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Badań Materiałów i Elementów Konstrukcji; e-mail: dkowalczyk@ikolej.pl.

³ Mgr inż.; Huta Bankowa Sp. z o.o.; e-mail: j.borucinski@hutabankowa.pl.

2. Proces produkcji obręczy kolejowych

Proces wytwarzania elementów układu biegowego pojazdów kolejowych, tj. kół, osi i obręczy powinien rozpoczynać się wstępnymi obliczeniami za pomocą narzędzi symulacji komputerowej metody elementów skończonych [5, 9]. Na podstawie takich obliczeń proces technologiczny może być wdrażany w zakładach wytwórczych. Proces produkcyjny obręczy kolejowych do kół bosych zestawów kołowych, obejmuje następujące etapy produkcji zawarte w Standardowej Karcie Technologicznej [10]:

1. Opracowanie dokumentacji techniczno-technologicznej zawierającej wytyczne parametrów wielkości wsadu dla poszczególnych typów obręczy, temperatury nagrzewania do przeróbki plastycznej, programu pracy prasy i walcowania, obróbki cieplnej oraz badań odbiorczych gotowych obręczy.

2. Nagrzewanie materiału do przeróbki plastycznej do temperatur 1100–1150°C odbywa się w piecu obrotowym trójstrefowym, sterowanym komputerowo, załadunek i odbiór nagrzanego wsadu z pieca jest wykonywany za pomocą manipulatorów szynowych (rys. 1 i 2).



Rys. 1. Składowisko wsadu przeznaczanego do produkcji obręczy [fot. autor]



Rys. 2. Wygrzany materiał po usunięciu zgorzeliny z powierzchni [fot. autor]

3. Przeróbka plastyczna na gorąco nagrzanego materiału polega na usunięciu zgorzeliny z powierzchni za pomocą zbijacza zgorzeliny pod ciśnieniem wody około 150 atmosfer oraz na dwustopniowej przeróbce, tj. wstępnym spęczaniu i dziuowaniu na prasie, a następnie walcowaniu z kalibrowaniem wymiarów obręczy według zamówienia (rys. 3 i 4).



Rys. 3. Proces walcowania obręczy kolejowych [fot. autor]



Rys. 4. Studzenie obręczy po walcowaniu w stojakach w hali produkcyjnej

4. Studzenie obręczy po walcowaniu odbywa się w dole chłodniczym (rys. 5), zgodnie z zaleceniami normy PN-84/H-84027/06.



Rys. 5. Studzenie obręczy po walcowaniu w dole chłodniczym [fot. autor]

5. Obróbka cieplna normalizowanie lub hartowanie i odpuszczanie, w zależności od zamówienia, odbywa się w piecach szarych zgodnie z programem komputerowym z chłodzeniem w wannie hartowniczej (rys. 6).



Rys. 6. Piec szary do obróbki cieplnej obręczy [fot. autor]

6. Kontrola i odbiór końcowy obejmuje sprawdzenie technologii wykonania obręczy, składu chemicznego, kontroli spójności wewnętrznej materiału obręczy za pomocą zanurzeniowych badań ultradźwiękowych [3, 8]. Wcześniej do kalibracji defektoskopu ultradźwiękowego wykorzystuje się próbkę porównawczą ze sztucznie naciętymi wadami (rys. 7). Następnie, kontroli podlega twardość (rys. 8), kształt i wymiary obręczy. Odbioru gotowych obręczy w stanie nieobrobionym (rys. 9) dokonuje odbiorca zewnętrzny lub upoważniony rzeczoznawca zakładowy.



Rys. 7. Próbkę odniesienia obręczy do badań ultradźwiękowych [fot. autor]

Do wad obręczy kolejowych powstałych w technologicznym procesie wytwarzania zalicza się: niedotrzymanie składu chemicznego pierwiastków dla danego gatunku stali, co powoduje trudności w obróbce cieplnej i zmianę właściwości wytrzymałościowych, mikrostruktury i twardości oraz niedotrzymanie reżimów technologii nagrzewania, co może powodować

wystąpienie wad w postaci naderwań powierzchniowych podczas spęcznienia i walcowania obręczy.



Rys. 8. Sprawdzenie twardości obręczy [fot. autor]



Rys. 9. Obręcze przygotowane do wysyłki [fot. autor]

3. Badania materiałowe obręczy

Przedmiotem badań były trzy obręcze kolejowe o wymiarach $\Phi 920 \times \Phi 760 \times 139$ z tego samego wytopu, w gatunku P55A, w stanie po walcowaniu i studzeniu w dwojaki sposób, tj. obręcze studzone w dole chłodniczym oznaczone jako A oraz studzone w spokojnym powietrzu w hali produkcyjnej oznaczone jako B (rys. 4). Ponadto, badane obręcze poddano leżakowaniu przez trzy miesiące. Wykonano następujące badania:

1. Analizę składu chemicznego obręczy, którego wyniki oraz wymagania normy [6] dla gatunku P55A zamieszczono w tablicy 1. Zawartość pierwiastków dla tego gatunku stali jest zgodna z normą PN-84/H-84027/06. W obręczy studzonej w dole i po trzymiesięcznym leżakowaniu w hali stwierdzono bardzo małą zawartość wodoru (poniżej 0,4 ppm) i tlenu (13 ppm). Niska zawartość siarki i fosforu w wytopie potwierdza dobrą jakość wytopionej stali i świadczy o właściwym procesie odgazowywania stali.

Tablica 1

Skład chemiczny badanych obręczy kolejowych

Nr obręczy	Skład chemiczny [%]											
	C	Mn	Si	P, max	S, max	Cr, max	Ni, max	Cu, max	Mo, max	V, max	O ₂ , ppm	H ₂ , ppm
A i B	0,57	0,82	0,27	0,013	0,008	0,06	0,03	0,05	0,006	0,003	13	< 0,4
Gat. P55A – PN84/H-84027/06	0,57 0,65	0,60 0,90	0,15 0,40	0,035	0,035	0,30	0,30	0,30	0,08	0,05	–	< 2,5

2. Badanie właściwości wytrzymałościowych, twardości i udarności obręczy po studzeniu w dole i studzeniu w hali (tablica 2). Badanie wytrzymałości na rozciąganie przeprowadzono na próbkach z obręczy A i B wyciętych z trzech miejsc, co 120°. Zbadane właściwości wytrzymałościowe, twardość i udarność są bardzo zbliżone i dlatego nie powinny wpływać na jakość materiału w dalszym procesie wytwarzania obręczy.

3. Badanie naprężeń resztkowych obręczy za pomocą aparatu DEBBIE UMS, działającego na zasadzie metody elastoakustycznej, tj. pomiaru szybkości penetracji fal ultradźwiękowych w materiale. Pomiar wykonano w czterech punktach obręczy co 90°. W badanych obręczach stwierdzono niski stan naprężeń resztkowych. W obręczy studzonej w dole stwierdzono mniejsze naprężenie niż w obręczy studzonej

w spokojnym powietrzu w hali, jednakże naprężenia te są mniejsze od wartości dopuszczalnej dla kół monoblokowych, równej 80–150 MPa (tabl. 3).

4. Rozkład siarki próbą Baumanna w obręczach A i B po trzech miesiącach leżakowania w hali. Wyniki pokazano na rysunkach 10a i 10b. Tylko w warstwach zewnętrznych powierzchni tocznej obu obręczy występuje zmniejszenie segregacji siarki wynikające z uwarunkowań technologicznych. W pozostałej części badanych obręczy rozkład siarki jest równomierny. Przeprowadzona próba nie potwierdziła również występowania wad wewnętrznych w obręczach w postaci płatków, zatem niska zawartość wodoru oraz tlenu w wytopie winna być gwarancją dobrej jakości materiału obręczy, niezależnie od sposobu studzenia po walcowaniu.

Tablica 2

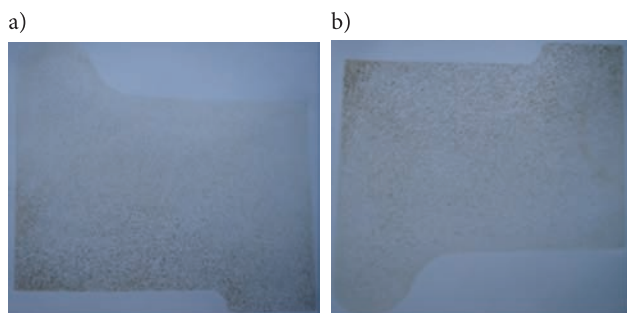
Właściwości wytrzymałościowe obręczy po studzeniu

Badana wielkość	Nr obręczy								NP95%*
	Obręcz A			Średnia	Obręcz B			Średnia	
Re [MPa]	408	–	–	408±15	412	408	408	410±15	± 3,6%
Rm [MPa]	801	774	778	784±28	817	809	819	815±29	
A ₅ [%]	13,6	15,6	14,8	14,7±0,5	14,8	14,6	14,4	14,6±0,5	
Z [%]	23,6	23,5	22,9	23,3±0,8	21,0	27,6	22,6	23,7±0,8	
HBW	196	192	193	194±5,8	201	200	205	202±6,1	± 3,0
KCU [J/cm ²]	22,7	22,1	25,8	23,6±1,3	20,0	22,2	22,5	21,8±1,2	± 5,5

Tablica 3

Wyniki pomiaru naprężeń resztkowych obręczy po studzeniu

Nr obręczy	Wielkość naprężeń resztkowych obręczy [MPa]				
	Kąt 0°	Kąt 90°	Kąt 180°	Kąt 270°	Wartość średnia
B – w stanie dostawy	-77±19	-102±17	-38±9	-74±17	-72,7±15
A – po leżakowaniu	-82±9	-17±27	-20±5	-35±5	-38,0±11
B – po leżakowaniu	-86±13	-63±13	-106±9	-39±3	-73,5±9



Rys. 10. Rozkład siarki w obręczach po przeróbce plastycznej:
a) obręcz A, b) obręcz B [fot. autor]

5. Próba przelomu na niebiesko, w celu ujawnienia ewentualnej obecności pęknięć wewnętrznych spowodowanych obecnością płatków wodorowych. Próbkę łamano w temperaturze niebieskiego nalotu w temperaturze około 430–480°C. Na rysunkach 11 i 12 pokazano przelomy próbek. Na przelomach nie stwierdzono wad w postaci płatków i wtrąceń niemetalicznych.



Rys. 11. Przelom na niebiesko obręczy A studzonej w dole [fot. autor]



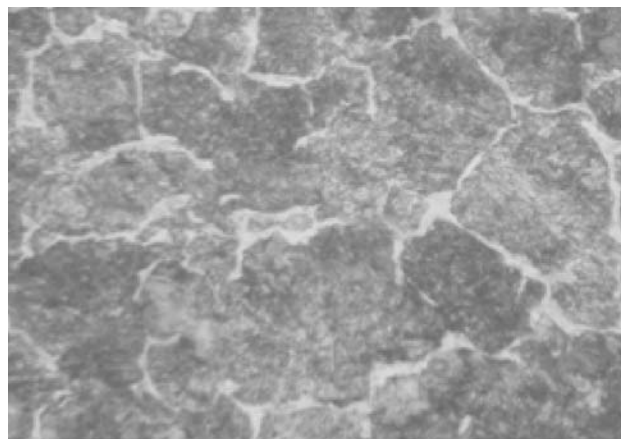
Rys. 12. Przelom na niebiesko obręczy B studzonej w hali produkcyjnej [fot. autor]

6. Badanie mikrostruktury, które przeprowadzono na obręczy A po walcowaniu i studzeniu w dole i obręczy B po walcowaniu i studzeniu w hali. W obu przypadkach otrzymano strukturę perlityczną z wydzieleniami ferrytu po granicach ziaren (rys. 13 i 14).

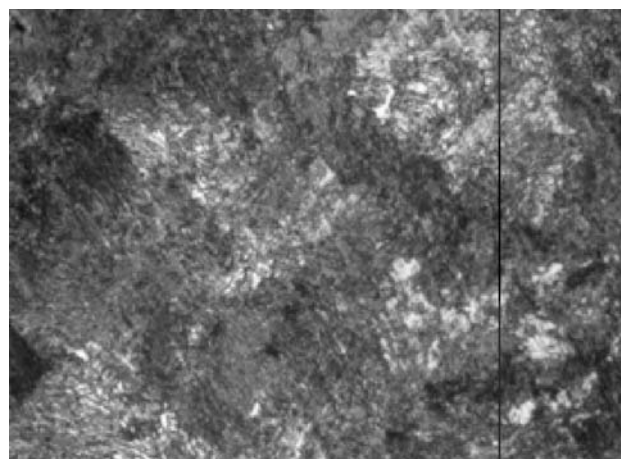
Następnie obręcze poddano obróbce cieplnej w piecach szybowych. Otrzymaną mikrostrukturę pokazano na rysunkach 15 i 16.



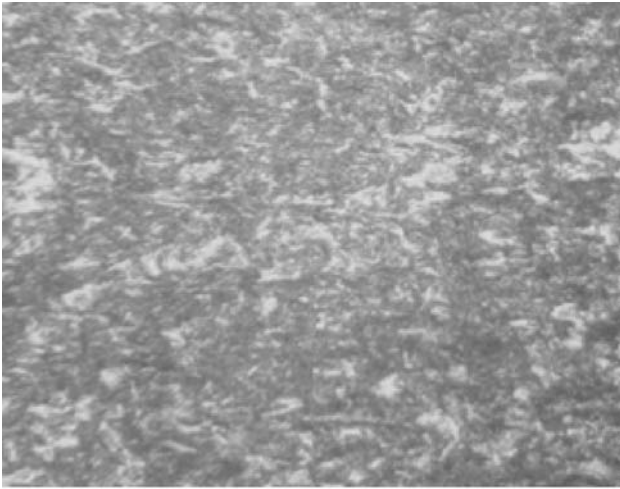
Rys. 13. Mikrostruktura obręczy A po walcowaniu, studzonej w dole [fot. autor]



Rys. 14. Mikrostruktura obręczy B po walcowaniu, studzonej w hali [fot. autor]



Rys. 15. Mikrostruktura środka obręczy A po obróbce cieplnej, powiększ. 500x [fot. autor]



Rys. 16. Mikrostruktura środka obręczy B po obróbce cieplnej, powiększ. 400× [fot. autor]

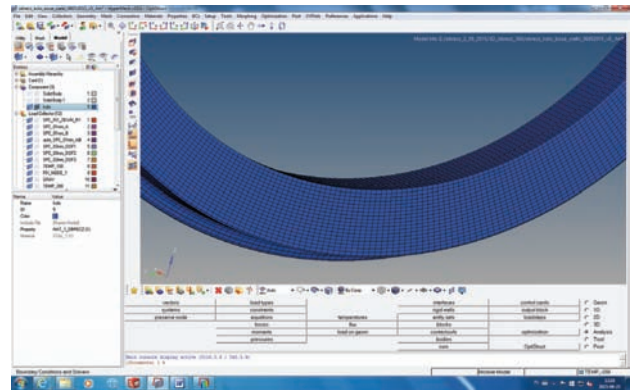
7. Badanie ultradźwiękowe obręczy A i B po walcowaniu i leżakowaniu, przeprowadzone aparatem EPOCH 600 firmy OLYMPUS z powierzchni tocznej i bocznej obręczy, zgodnie z Kartą UIC810-1:2003. Nie stwierdzono nieciągłości wewnętrznych w badanych obręczach.

8. Analiza badań odbiorczych u producenta, przed wysyłką do klienta obręczy studzonych w dole i obręczy studzonych w hali oraz po obróbce cieplnej, obejmująca próby wytrzymałościowe, udarność, kontrolę 100% twardości obręczy, sprawdzenie makrostruktury metodą głębokiego trawienia oraz próbę Baumanna i mikrostruktury, a także kontrolę wymiarów, nie wykazała różnic we właściwościach tych obręczy (tablica 4). Wyniki odbiorcze były zgodne z wymaganiami zarówno Karty UIC 810-1, jak i normy PN-84/H-84027/06.

4. Badanie rozkładu naprężeń za pomocą metody elementów skończonych MES

Badania rozkładu naprężeń wykonano jako symulacje w programie HyperWorks v13.0. Wstępny model bryłowy sporządzono w programie SolidWorks

2013 × 64 Edition. Następnie bryłę obręczy zaimportowano w programie HyperWorks v13.0. W module HyperMesh przygotowano model siatki i określano warunki brzegowe symulacji na modelach 2D (przekrój przez obręcz) i 3D (rys. 17). Stosowane typy węzłów to PSHELL i PSOLID.



Rys. 17. Fragment obręczy z siatką węzłów w programie HyperWorks podczas definiowania warunków symulacji [rys. autor]

Symulacje wykonano dla stali gatunku P55A o następujących właściwościach materiałowych:

- Moduł Younga 210 GPa,
- współczynnik Poissona 0,3,
- współczynnik rozszerzalności cieplnej stali $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$.

Symulacja nr 1 dotyczyła zachowania się obręczy podczas wzrostu temperatury do 220°C, co odpowiada technologicznemu procesowi nagrzewania obręczy do montażu na kole bosym. W tej symulacji wszystkie węzły obliczeniowe były w stanie swobodnym (bez odbierania stopni swobody węzłom). Następnie we wszystkich węzłach temperaturę zwiększono o 200°C. Wyniki symulacji nr 1 pokazały, że wzrost temperatury o 200°C powoduje przemieszczenie jej węzłów o maksimum 4,10 mm (rys. 18).

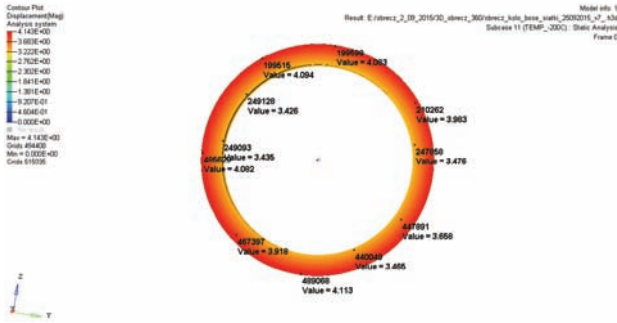
Symulacja nr 2 dotyczyła przebiegu procesu nagrzewania obręczy od temperatury otoczenia do około 125°C. W tej symulacji w jednym węźle odebrano wszystkie stopnie swobody. We wszystkich węzłach

Tablica 4

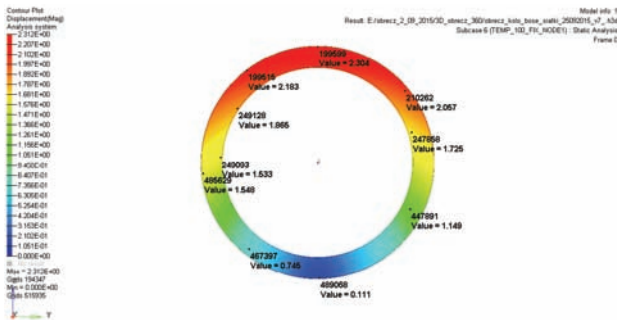
Właściwości obręczy po obróbce cieplnej hartowaniem i odpuszczaniem

Gatunek stali - P55A	Właściwości obręczy					
	Re [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Z [%]	KCU [J/cm ²]	HBW
Obręcz A	532,0	869,0	21,0	53,6	46,0	238
Obręcz B	533,0	857,0	23,2	55,1	49,0	234
PN-84/H-84027/06	min 430,0	800–920	min 14,0	min 20,0	min 30,0	min 233

temperaturę podwyższono o 100°C z umocowaniem obręczy w jednym węzle. W tym przypadku największe przemieszczenia wynosiły 2,30 mm (rys. 19).

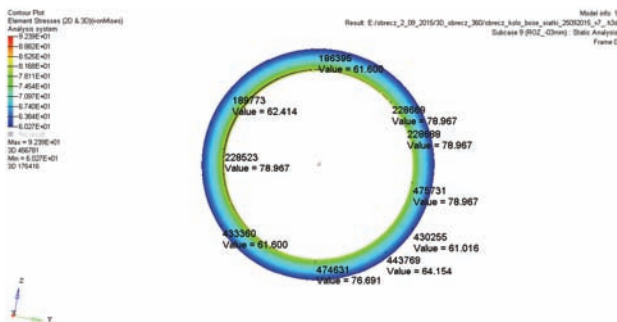


Rys. 18. Przykładowe wartości przemieszczeń węzłów obręczy podczas schładzania obręczy z 220°C do 20°C (symulacja nr 1)

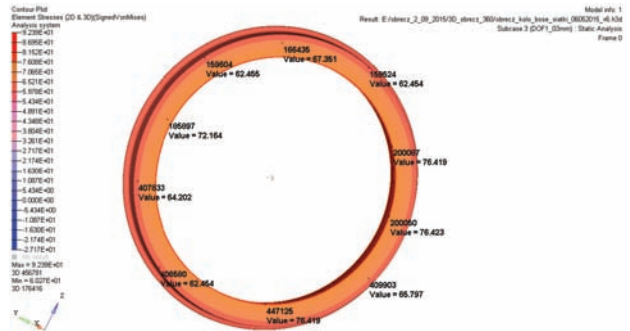


Rys. 19. Przemieszczenia węzłów obręczy w symulacji nr 2

Symulacja nr 3 dotyczyła przemieszczeń węzłów wewnętrznych obręczy o wielkość 0,30 mm, odpowiadającą zakresowi tolerancji wykonania średnicy wewnętrznej obręczy, zapewniającej właściwy zacisk na kole bosym [2]. W tej symulacji przemieszczenia węzłów wewnętrznej powierzchni obręczy ukazały stan naprężeń w materiale obręczy po założeniu na koło bose. W symulacji wszystkie węzły obręczy były w stanie swobodnym (bez odbierania stopni swobody węzłom). W obszarach wewnętrznej średnicy obręczy naprężenia wynosiły około 80 MPa, w zewnętrznych obszarach wynosiły około 60 MPa (rys. 20 i 21).

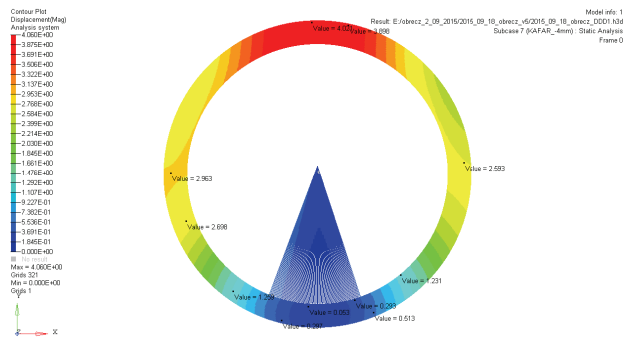


Rys. 20. Wartości naprężeń w układzie z-y w węzłach obręczy na kole bosym przy zacisku 0,30 mm (symulacja nr 3)

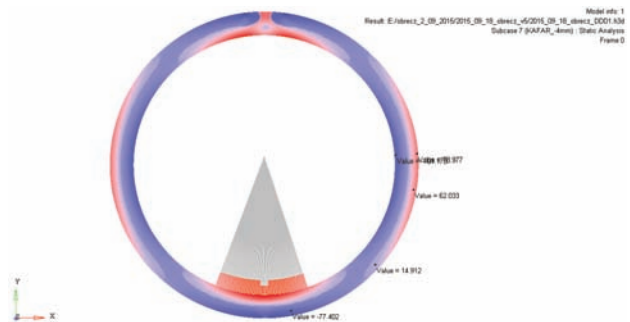


Rys. 21. Wartości naprężeń w układzie y-z w węzłach obręczy na kole bosym przy zacisku 0,30 mm (symulacja nr 3)

Symulacja nr 4 dotyczyła tzw. próby kafarowej obręczy. Celem tej próby było uzyskanie trwałych odkształceń plastycznych przy braku wystąpienia pęknięć powierzchniowych. Symulacja przedstawiła odkształcenia i rozkład pól naprężeń w obręczy dla próby kafarowej, w której uzyskano podobny zakres naprężeń, jak podczas badań aparatem DEBIE (rys. 22 i 23).



Rys. 22. Stan odkształceń w materiale obręczy po próbie kafarowej (model 2D, elementy typu powierzchniowego PSHELL) – symulacja nr 4



Rys. 23. Rozkład pól naprężeń rozciągających i ściskających wg von Misesa (model 2D, elementy typu powierzchniowego PSHELL) – symulacja nr 4

5. Podsumowanie

Badania jakościowe obręczy na gotowo, tj. po obróbce plastycznej i obróbce cieplnej potwierdziły, że proces technologiczny u producenta był prowadzony właściwie i zapewnił dobrą jakość materiału obręczy. Badania nie wykazały różnic we właściwościach wytrzymałościowych i strukturalnych materiału obręczy, które po walcowaniu poddano studzeniu w dole oraz w spokojnym powietrzu w hali.

Badania naprężeń w obręczach za pomocą metody elementów skończonych MES stwierdziły występowanie naprężeń w granicach 60–80 MPa, nie przekraczający zakresu 80–150 MPa, przyjętego w normie PN EN 13262:2011 jako zakres dopuszczalny dla wieńców kół monoblokowych. Wielkość tych naprężeń jest bardzo zbliżona do naprężeń w obręczach badanych aparatem DEBBIE UMS. Ponadto nie stwierdzono wad wewnętrznych obręczy w postaci pęknięć, co potwierdziła śladowa zawartość wodoru w analizie kontrolnej materiału obręczy studzonej w dole oraz w hali na wolnym powietrzu.

Wobec pozytywnych wyników badań obu sposobów studzenia obręczy oraz wysokiej jakości stali produkowanej przez dostawców wsadu można stwierdzić, że oba zastosowane sposoby studzenia obręczy po walcowaniu są właściwe i nie wpływają na ich jakość po obróbce cieplnej.

Literatura

1. Bałuch H.: *Trwałość i niezawodność eksploatacyjna nawierzchni kolejowej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
2. Gąsowski W.: *Wagony kolejowe, konstrukcja i badania*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1988.
3. Instrukcja OW-304, Warunki Techniczne kwalifikacji do naprawy i odbioru po naprawie zestawów kołowych z maźnicami, Warszawa 1997.
4. Karta UIC 810-1:2003: Technical specification for the supply of rough rolled nonalloy steel tyres for tractive and drailing stock, January 2003.
5. Kim N., Machida S., Kabayash S.: *Ring rolling processes simulation by the three dimensional finite element method*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1990 (30–4), pp. 569–577.
6. PN-84/H-84027/06: Stal dla kolejnictwa – Obręcze do kół pojazdów szynowych – Gatunki.
7. PN-91/K-91032: Tabor kolejowy – Obręcze nieobrobione do zestawów kołowych.
8. Rockstroh B., Walter F. and others: *New ultrasound testing system for the production testing of rail wheels; Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, The British Institute of Non-Destructive Testing, 1 June 2007, Volume 49, Number 6, pp. 333–336.
9. Ward M.J., Miller B.C., Davey K.: *Simulation of multi-stage railway wheel and tyre forming processes*; Journal of Materials Processing Technology, 1998 (80), pp. 206–212.
10. Warunki Techniczne Realizacji Zamówienia – Standardowa Karta Produkcyjna.

Effect of Production Process on the Quality of the Rim Rail

Summary

We analyzed the technological process of the production of railway tyres wheel sets of freight cars, as well as materials research conducted impact of the cooling process after rolling the tyres in the bottom of the refrigerant, and in the still air in the production hall. The study was conducted based on the requirements contained in the UIC 810-1: 2003 [4], PN-84 / H-84027/06 [6]. Also made possible the calculation of stresses in the tyres of existing finite element FEM. It concluded that the production process used for the good quality of railway tyres cooling and the proposed adjustment does not affect the quality of the finished product.

Keywords: tyres, tyres production, cool manner

Влияние процесса производства на качество ободов колес

Резюме

В статье проанализировано технологический процесс производства ободов для колесных пар грузовых вагонов, а также проведено испытание материалов влияния процесса охлаждения ободов после вальцевания в охлаждающем отверстии а также под влиянием спокойного воздуха в производственном цеху. Проведено также вычисления возможных напряжений в ободах методом конечных элементов MES. В итоговой сводке было установлено, что применяемый способ производства не влияет на качество готового продукта. Исследования были проведены в соответствии с памяткой МСЖД 810-1:2003 [4], PN-84/H-84027/06 [6] и стандартной технологической картой [10] производителя ободов.

Ключевые слова: охлаждение ободов, сырое состояние, моделирование графика напряжений