

Wojciech Szymański*

Instytut Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich w Skawinie

Pomiar naprężeń własnych w osiach kolejowych metodą rentgenowską wg PN-EN 13261+A1 2011

Measurement of residual stresses in railway axes using the X-ray method according to PN-EN 13261 + A1 2011

ABSTRACT

The aim of the work was to discuss important aspects of stress measurements in railway axes, according to PN-EN 13261 + A1: 2011 based on experience acquired during stress measurements in railway axes in the accredited Laboratory of Metal Science and Chemical Analysis (AB 394). The requirements of the PN-EN 13261 + A1: 2011 standard 3.6 regarding residual stresses and the X-ray method for their measurement are presented. The results of measurements of stresses in railway axes of various types made by four different manufacturers and the dependence of the magnitude of stresses are summarized from turning parameters and tool wear. It has been found that while stress measurement at a depth of 2 mm can be performed for one axis in a series, stress measurement on the surface should be performed randomly for a certain number of axes in a series.

Keywords: residual stresses; stress measurement; railway axes

STRESZCZENIE

Celem pracy było omówienie istotnych aspektów pomiarów naprężeń w osiach kolejowych wykonywanych zgodnie z PN-EN 13261+A1:2011 na podstawie doświadczeń nabytych podczas prowadzenia pomiarów naprężeń w osiach kolejowych w akredytowanym Laboratorium Metaloznawstwa i Analiz Chemicznych (AB 394). Przedstawiono wymogi normy PN-EN 13261+A1:2011 pkt 3.6 dotyczące naprężeń szczątkowych (własnych) i opisano rentgenowską metodę ich pomiaru. Zestawiono wyniki pomiarów naprężeń w osiach kolejowych różnych typów wytworzonych przez czterech producentów oraz zależność wielkości naprężeń od parametrów toczenia i zużycia narzędzia. Stwierdzono, że o ile pomiar naprężeń na głębokości 2 mm może być wykonywany dla jednej osi z serii, to pomiar naprężeń na powierzchni powinien być wykonywany wrywkowo dla pewnej ilości osi w serii..

Słowa kluczowe: naprężenia własne; pomiar naprężeń; osie kolejowe

1. Wstęp

Norma PN-EN 13261+A1:2011 pt.: „Kolejnictwo - Zestawy kołowe i wózki - Osie - Wymagania dotyczące wyrobu” [1] określająca warunki odbioru osi kolejowych w punkcie 3.6 – „Naprężenia szczątkowe” odnosi się do stanu naprężeń i sposobu ich pomiaru w osiach kolejowych.

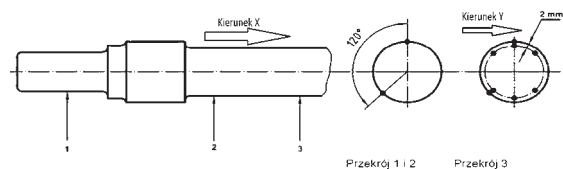
Postanowienia ogólne (3.6.1) mówią, że różne etapy produkcji nie powinny powodować powstawania naprężeń szczątkowych, które mogą powodować odkształcenia osi lub łatwość powstawania pęknięć zmęczeniowych w czasie eksploatacji. Z tych względów ustalono dopuszczalne wartości (3.6.2) naprężeń w osi w następujący sposób:

Największe naprężenia własne na powierzchni osi nie powinny przekraczać naprężenia rozciągającego o wartości $+100 \text{ N/mm}^2$.

Na głębokości 2 mm pod powierzchnią naprężenia własne nie powinny się różnić więcej niż 40 N/mm^2 .

Obecnie zamiast określenia naprężenia szczątkowe częściej stosuje się dla tego typu naprężeń pojęcie naprężenia własne, natomiast jako jednostkę naprężenia najczęściej stosuje się megapascal (1 MPa = 1 N/mm²).

Norma podaje (3.6.3), że próbką do badań jest oś zestawu kołowego w stanie dostawy a usytuowanie punktów pomiarowych przedstawia rys.1



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych.
Fig. 1. Locations of measurement points.

Za wartości naprężeń na powierzchni odpowiada przede wszystkim proces toczenia osi, natomiast za wartości naprężeń na głębokości 2 mm odpowiadają procesy odlewania, kucia i wyżarzania normalizującego.

Jako dopuszczalne metody pomiarowe podano (3.6.4) zarówno metodę tensometryczną, jak i rentgenowską, pozostawiając wybór metody do uzgodnienia pomiędzy klientem i producentem.

Porównując te dwie metody, to przy założeniu dysponowania odpowiednią aparaturą, zdecydowanie prostszą w zastosowaniu wydaje się metoda rentgenowska. Oprócz tego, że jest metodą szybszą, jest to metoda nieniszcząca. Oczywiście w sytuacji, gdy należy określić naprężenia na głębokości 2 mm, konieczne jest usunięcie odpowiedniej warstwy materiału, co oznacza zniszczenie badanego obiektu.

Metody rentgenowskie opierają się na pomiarze zmian odległości międzypłaszczyznowych. Pod wpływem obciążeń powodujących odkształcenie w materiale dochodzi

*Autor korespondencyjny. E-mail: wszymanski@imn.skawina.pl

do przesunięć elementów struktury krystalicznej. Zmiany położenia płaszczyzn dhkl mogą być miernikiem naprężeń, co stanowi fundament metod rentgenowskich.[2,3, 4]

Z szeregu metod rentgenowskich obecnie najczęściej stosowaną jest metoda $\sin^2 \psi$. Jest ona realizowana za pomocą dyfraktometru rentgenowskiego. Istotą tej metody jest określenie zmian odległości międzypłaszczyznowych w sieci krystalicznej materiału pod wpływem sił w nim występujących.

Dawniej za podstawową wadę tej metody uważano konieczność wycinania małych próbek, które mieściły by się w goniometrach tradycyjnych, co w oczywisty sposób wpływało na zmianę stanu naprężeń w materiale. Obecnie, dzięki stosowaniu specjalnych dyfraktometrów możliwe jest mierzenie naprężeń w praktycznie dowolnie dużych przedmiotach, co pozwala na uchwycenie stanu naprężeń nie zrelaksowanych przez wycięcie próbki oraz czyni to badanie w pełni nieniszczącym

Metoda rentgenowska pozwala na pomiar naprężenia w warstwie o grubości około 10-20 μm , czyli około pięciokrotnie płytszej niż metody tensometryczne. Jednak nie wymaga stosowania wzorców, a jedynie znajomości stałych materiałowych, takich jak moduł Younga i współczynnik Poissona. Ponadto pomiar naprężeń dokonywany jest w określonym kierunku, co pozwala na wyznaczenie tensora naprężeń.

Metody rentgenowskie pomiaru naprężeń są znane od wielu lat, jednak nie są zbyt często stosowane, zwłaszcza w przemyśle, gdyż z dużą nieufnością podchodzi się do otrzymanych nimi wyników, których interpretacja jest trudna.

Instytut Metali Nieżelaznych Oddział Metali Lekkich w Skawinie od lat prowadzi badania naprężeń metodą rentgenowską. Są to zarówno prace o charakterze badawczym [5-13], jak i prace aplikacyjne pozwalające np. na zweryfikowanie stosowanej technologii lub kontrolę wyrobu [14-17]. Ostatnio coraz większym zainteresowaniem cieszą się pomiary naprężeń wykonywane w celu dostarczenia danych do tworzenia modeli matematycznych procesów technologicznych [18].

Celem niniejszej pracy było omówienie istotnych aspektów pomiarów naprężeń w osiach kolejowych wykonywanych zgodnie z PN-EN 13261+A1:2011 na podstawie doświadczeń nabytych podczas prowadzenia pomiarów naprężeń w osiach kolejowych w akredytowanym Laboratorium Metaloznawstwa i Analiz Chemicznych (AB 394).

2. Aparatura

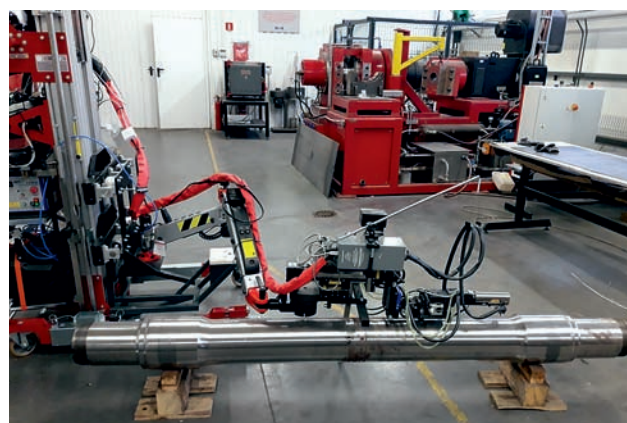
Pomiary naprężeń metodą rentgenowską osi kolejowych wg EN 13261:2009+A1:2010 przeprowadzono dyfraktometrem rentgenowskim produkcji firmy PROTO Manufacturing Ltd. – Jest to przenośny dyfraktometry rentgenowski, w pełni skomputeryzowany, służący jedynie do pomiaru naprężeń własnych i zawartości austenitu szczątkowego. Został on zintegrowany z manipulatorem przejezdny (rys.2). Pomiar i wykorzystana metoda obliczeniowa, wykonywane wg własnej procedury badawczej laboratorium (PB-N wyd. III z dnia 08.12.2016), były zgodne ze standardami: SAE J84a

i ASTM E915. Wszystkie parametry aparaturowe i materiałowe związane z pomiarem przedstawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Parametry materiałowe i aparaturowe zastosowane w pomiarach naprężeń.

Tab. 1. Material and apparatus parameters used in stress measurements.

Parametr	Wielkość
Napięcie	20 kV
Prąd lampy	4 mA
Zastosowana lampa rtg.	Cr
Długość promieniowania λ_{Cr}	2.103 [Å]
Płaszczyzny odbicia	Fe 211
Mierzony zakres kątowy 2θ	145° - 165°
Wielkość padającej wiązki rtg na próbce	5 x 1 mm
Badany materiał	Stal ferrytyczna
Kąt Bragga materiału bez naprężeń $2\theta_0$	156,41°
Rentgenowskie stałe materiałowe	(1/2)S2 = 5.92 E-6 [1/MPa]
	S1 = 1.28 E-6 [1/MPa]
Głębokość wnikania promieniowania rtg.	≈10 μm



Rys. 2. Dyfraktometr rentgenowski PROTO iXRD w trakcie pomiaru naprężeń w osi kolejowej.

Fig. 2. The X-ray diffractometer PROTO iXRD during stress measurement on the railway axis.

3. Badania

Pomiary naprężeń wykonywano w osiach kolejowych różnych typów (201E, EA1N, 4ANc, 102E/EP08, EN 57, 3B), dostarczonych do badań przez czterech różnych producentów. W tablicy 2 przedstawiono wyniki zgodności badanych osi z wymaganiami normy.

Drugą oś badaną na zlecenie producenta A przedstawiono jako nr 5 aby podkreślić, że pomiędzy badaniami osi upłynęło kilka lat.

Jako przykłady pomiarów podano szczegółowe wyniki dla osi 1 producenta A i osi 1 producenta B, które przedstawiono w tablicach 3 i 4.

Dodatkowo jeden z producentów osi, w celu doboru optymalnych, spełniających wymogi normy co do stanu naprężeń na powierzchni osi, parametrów toczenia, przeprowadził eksperyment polegający na wskazaniu siedmiu przekrojów

Tab. 2. Zgodność badanych osi z wymaganiami normy PN-EN 13261+A1:2011.

Tab. 2. Compatibility of the tested axes with the requirements of the PN-EN 13261 + A1: 2011 standard.

Oś	Producent															
	A				B				C				D			
	Przekrój															
	1	2	3	3T	1	2	3	3T	1	2	3	3T	1	2	3	3T
1	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	+
2					+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
3					+	+	+	-	+	+	+	+				
4									+	+	+	+				
5	+	+	-	-					+	+	-	+				
6									+	+	+	+				
7									+	+	+	-				
8									+	+	+	-				

(+) - Przekrój zgodny; (-) - Przekrój niezgodny; 3T - Przekrój 3 na głębokości 2 mm

Tab. 3. Wyniki pomiarów naprężeń w MPa dla osi, która spełnia warunki normy PN-EN 13261+A1:2011 (producent A oś 1).

Tab. 3. Results of the measurements of stress in MPa of the axis, which complies with PN EN 13261 + A1: 2011 (producer A axis 1).

Przekroje badane na powierzchni				Przekrój 3 na gł. 2 mm		
Punkt/ kier.	Przekrój			Punkt	Kierunek	
	1	2	3		x	y
1/x	-274	-280	-212	1	-24	3
1/y	-239	-250	-178	2	9	4
2/x	-317	-125	-34	3	-3	16
2/y	-230	-108	-45	4	-8	16
				5	-8	2
				6	-17	9

Tab. 4. Wyniki pomiarów naprężeń w MPa dla osi, która nie spełnia warunków normy PN-EN 13261+A1:2011 (producent B oś 1).

Tab. 4. Results of the measurements of stress in MPa of the axis that does not meet the requirements of the PN-EN 13261 + A1: 2011 standard (producer B axis 1).

Przekroje badane na powierzchni				Przekrój 3 na gł. 2 mm		
Punkt/ kier.	Przekrój			Punkt	Kierunek	
	1	2	3		x	y
1/x	62	-41	360	1	-15	29
1/y	210	238	336	2	-49	-9
2/x	85	7	491	3	-1	48
2/y	229	181	494	4	7	55
				5	-8	2
				6	-17	9

osi do pomiarów naprężeń. W każdym ze wskazanych obszarów powierzchnia osi toczona była z różnymi parametrami takimi jak: prędkość skrawania, posuw przy toczeniu i głębokość skrawania. Wyniki przedstawiono w tabelicy 5. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że optymalnymi parametrami toczenia osi są kombinacje parametrów toczenia oznaczone jako 6 i 7, dopuszczalną może być kombinacja 5, natomiast pozostałe nie dają wymaganych rezultatów jak chodzi o stan naprężeń na powierzchni osi.

Aby ocenić wpływ zużycia narzędzia (noża tokarki), na wartości uzyskanych naprężeń na powierzchni osi, jeden z producentów przeprowadził eksperyment polegający na toczeniu powierzchni osi nie do momentu, kiedy zmianę

narzędzia nakazywała instrukcja, ale do momentu, kiedy uzna to za właściwe operator tokarki. Zmianę uzyskiwanych w ten sposób naprężeń na powierzchni osi przedstawia tabela 6. Uzyskane wyniki wskazują, że nawet zmiana narzędzia skrawającego według instrukcji toczenia następowała zbyt późno. Bezpieczne byłoby zmienianie narzędzia mniej więcej po 3/5 czasu podanego w instrukcji.

Tab. 5. Zależność wielkości naprężeń w MPa od parametrów toczenia.

Tab. 5. Dependence of the magnitude of stresses in MPa on the rolling parameters.

Sposób toczenia	1	2	3	4	5	6	7
Pkt. 1 kier. x	337	488	231	313	-149	-268	-647
Pkt. 1 kier. Y	594	478	92	486	72	-94	-675
Pkt. 2 kier. X	359	388	245	383	-158	-269	-257
Pkt. 2 kier. y	604	402	112	458	56	-103	-275

Tab. 6. Zależność wielkości naprężeń w MPa na powierzchni osi od czasu pracy narzędzia.

Tab. 6. Dependence of the magnitude of stress in MPa on the surface of the axis from the time the tool wear.

Etapy toczenia	1	2	3	4	5	Zmiana narzędzia wg instrukcji	Zmiana narzędzia wg operatora
Kier. x	-542	-499	-300	-110	-10	98	245
Kier. y	-421	-321	-123	56	115	154	364

4. Podsumowanie

Analizując wyniki badanych osi można zaobserwować, że procesy mające wpływ na odkształcanie osi w trakcie eksploatacji, takie jak odlewanie, kucie i wyżarzanie normalizujące, są stosunkowo stabilne i producenci, nie mający w danym okresie (cyklu produkcyjnym) kłopotów ze spełnieniem warunków normy, nie mają ich dla wszystkich osi podobnych typów. Osie 7 i 8 producenta C były osiami typu EN57 charakteryzującymi się dodatkowym podpięciem na środku osi. Natomiast, gdy osie danego producenta pochodzące z jednego cyklu produkcyjnego nie spełniają

warunków normy, to dotyczy to wszystkich osi z tego cyklu. Prawdopodobnie powtarzalność takiego rezultatu związana jest ze znikomym wpływem tzw. czynnika ludzkiego na procesy odlewania, kucia i wyżarzania normalizującego. Ich właściwe wykonanie ocenia się mierząc naprężenia na głębokości 2 mm, a ich różnice nie mogą przekraczać wg PN-EN 13261+A1:2011 40 MPa.

Inaczej wygląda sytuacja z procesem toczenia osi, który odpowiada za powstawanie naprężeń na ich powierzchni. Naprężenia te są jednym z czynników odpowiadających za powstawanie pęknięć zmęczeniowych w czasie eksploatacji. Norma nakazuje, żeby ich wartości nie przekraczały 100 MPa. Proces toczenia zdecydowanie jest mniej odporny na wpływy czynnika ludzkiego (pośpiech operatora). Dlatego znacznie częściej pojawia się w tym zakresie przekroczenie warunków normy i jednocześnie jest ono znacznie łatwiejsze do wyeliminowania. Jak widać na przykładzie wyników prób toczenia osi (tab. 5), przeprowadzonych przez jednego z producentów, stosunkowo łatwo można tak dobrać parametry procesu, aby uzyskać na powierzchni osi naprężenia zgodne z wymaganiami normy.

5. Wnioski

- 1) Pomiar naprężeń na głębokości 2 mm może być wykonywany dla jednej osi z serii. Procesy odlewania, kucia i wyżarzania normalizującego osi wydają się wystarczająco stabilnymi w cyklu produkcji osi
- 2) Pomiar naprężeń na powierzchni jako pomiar w pełni nieniszczący powinien być wykonywany wrywkowo dla pewnej ilości osi w serii. Istnieje ryzyko niewłaściwej obróbki powierzchniowej osi, przy której znaczny udział ma „czynniki ludzki”

6. Literatura/References

- [1] Norma PN-EN 13261+A1:2011, " Kolejnictwo - Zestawy kołowe i wózki - Osie - Wymagania dotyczące wyrobu"
- [2] E.Kula, V.Weiss, "Residual Stress and Stress Relaxation", 1982 Plenum Press New York.
- [3] I.C. Noyan, J.B. Cohen, " Residual Stress Measurement by Diffraction and Interpretation", Springer-Verlag New York 1987
- [4] A. Pszonka, J. Ziaja, „ Rentgenograficzne metody pomiaru naprężeń”, Prace Naukowe Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1971.

- [5] M. Lech-Grega, A. Kłyszewski, „Aparat Strainflex PSF-2M do pomiaru naprężeń własnych i austenitu szczałkowego”, Hutnik lipiec 1991
- [6] „Zastosowanie rentgenowskiej metody pomiaru naprężeń własnych w badaniach nieniszczących”, XVI Sesja naukowa okrętowców cz. II str.137, Szczecin-Dziwnówek 1994.
- [7] M. Lech-Grega., W. Szymański, "X-Ray Residual Stress Measurement in 7020 Alloy Welded Joints", 2003 TMS 132nd Annual Meeting & Exhibition, San Diego, California, USA
- [8] M. Lech-Grega, K. Mazurkiewicz, W. Szymański, „Zmęczenie materiału a stan naprężeń własnych w obszarze okolo-spoinowym złącz spawanych ze stopu AlZnMg”. Krajowa Konferencja Dobór i eksploatacja materiałów inżynierskich Jurata 22-25.09.1997
- [9] M. Lech-Grega, J. Kusnerz, W. Szymański, „Naprężenia własne w złączach spawanych ze stopu AlZnMg”, VII Ogólnopolska Konferencja pt. Metale Nieżelazne w Przemysle Okrętowym; Szczecin Międzyzdroje , 12-14 września 1996, Mat. Konf. s.115-122
- [10] L. Fajkiel., M. Lech-Grega, W. Szymański, „Naprężenia własne w warstwie wierzchniej formy ciśnieniowej pod wpływem oddziaływań ciepłego stopu aluminiowego”, Konf. Naukowa Nowe Materiały – Nowe Technologie Materiałowe w Przemysle Okrętowym i Maszynowym Szczecin-Swinoujście wrzesień 1998
- [11] A. Jurcius, A.V. Valiulis, O. Cernasejus, K.J. Kurzydłowski, A. Jaskiewicz, M. Lech-Grega, "Influence of vibratory stress relief on residual stresses in weldment and mechanical properties of structural steel joint"; Vibromechanika, Journal of Vibroengineering, March 2010, vol. 12, pp.133-141
- [12] W. Szymański, M. Lech-Grega. „Validation Of The X-Ray Stress Measurement Method” Advances In Materials Science (ISSN: 1730-2439), Vol.42, No.4, 2014)
- [13] W. Szymański, M. Lech-Grega, M. Gawlik, „Ocena stanu naprężeń szczałkowych w warstwie nawęglanej kół zębatych”, Sprawozdanie IMN nr 7066/II/2013
- [14] W. Szymański, „Opracowanie metody oceny skuteczności obróbki wielkogabarytowych odlewów z żeliwa EN-GJS-500-7”, Sprawozdanie IMN nr 7255/14
- [15] W. Szymański, M. Lech-Grega, M. Gawlik, „Ocena zmian stanu naprężeń w taśmie ze stali nierdzewnej w trakcie procesu prostowania”, Sprawozdanie IMN nr 7254/14
- [16] W. Szymański, „Ocena wpływu obróbki skrawaniem i obróbki cieplnej na stan naprężeń w walcach ze staliwa L 200HNM”, Sprawozdanie IMN nr. 7441/15
- [17] A.Milenin, R.Kuziak, M.Lech-Grega, A.Chochorowski, S.Witek, M.Pietrzyk; Numerical modeling and experimental identification of residual stresses in hot-rolled strips; Archives of Civil and Mechanical Engineering 16 (2016) 125 – 134

Badania Nieniszczące i Diagnostyka

Nondestructive Testing and Diagnostics

SPIS REKLAM

REKLAMY NA OKŁADCE

TÜV Rheinland	1
OLYMPUS	2
TELEMOND HOLDING	3
EVEREST POLSKA	4

REKLAMY W NUMERZE

Instytut Spawalnictwa.....	2
CASP.....	8
EVEREST POLSKA.....	19
ITA.....	30
TESTING.....	43
KOLI.....	54
CASP.....	85