

Zabiegi technologiczne zwiększające prognozowaną żywotność osi zestawów kołowych

W artykule przedstawiono środki technologiczne zwiększające żywotność osi zestawów kołowych w układach biegowych tocznych oraz napędnych układów biegowych pojazdów trakcyjnych. Istotny wkład w zakresie rozwoju kryteriów technologicznych i badań odbiorczych osi zestawów kołowych wnosi nowa norma PN-EN 13261:2009. Przedstawiono porównanie tych kryteriów z dotychczas obowiązującymi przepisami UIC oraz krajowymi. Artykuł został opracowany w ramach projektu badawczo-rozwojowego Nr R 10 004806/2009 pt. „Mikroprocesorowy system diagnostyczny głównych systemów trakcyjnego pojazdu szynowego uwzględniający ocenę bieżącą i prognozowanie stanów”, finansowanego z budżetu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

1. Wstęp

Problematyka związana z rozwojem technologii wytwarzania osi zestawów kołowych jest wciąż aktualna. Rozwój tej technologii jest wynikiem wzrastających parametrów eksploatacyjnych, jakie muszą spełniać obecne pojazdy. Do podstawowych parametrów technicznych pojazdów, podlegającym zwiększeniu należą między innymi prędkość oraz nacisk zestawu kołowego na tor. Zwiększenie tych parametrów jest wywołane wzrastającymi wymaganiami, stawianymi przez przewoźników kolejowych, w wyniku konkurencji na rynku transportowym. Oś zestawu kołowego nabiera więc jako element konstrukcyjny coraz większego znaczenia, decydującego o bezpieczeństwie eksploatacyjnym pojazdu trakcyjnego. Tym należy tłumaczyć coraz większy nacisk na rozwój:

- metod obliczeniowych, przedstawionych w PN-EN 13103:2009 [15] oraz PN-EN 13104:2009 [16] oraz w [4,19],
- metod diagnostycznych [1,3,8,9,11,12,14,20] oraz
- prognozowania pęknięć w osiach zestawów kołowych [5,8,10].

Niewątpliwie do zwiększenia żywotności osi przyczynia się również technologia wykonania osi, która ma ostateczny wpływ na osiągnięcie zakładanej granicy zmęczenia materiału. Norma PN-EN 13261:2009 [17] przedstawia wymagania technologiczne w następujących zakresach:

- składu chemicznego
- dopuszczalnych wad mikrograficznych
- wymagań wytrzymałościowych
- zabezpieczeń antykorozyjnych
- dopuszczalnych naprężeń własnych.

2. Skład chemiczny oraz wymagania wytrzymałościowe

2.1. Skład chemiczny

Jednym z istotnych czynników mających wpływ na własności wytrzymałościowe jest zawartość pierwiastków uznanych jako szkodliwe. Zgodnie z PN-EN 13261:2009 [17] skład chemiczny stali użytych na wykonanie osi zestawów kołowych tzn. EA1N, EA1T oraz EA4T (stal 25Cr Mo4) jest przedstawiony w tabeli 1.

Do pierwiastków uznanych za szkodliwe można zaliczyć siarkę i fosfor. Segregacje fosforu są jedną z głównych przyczyn struktury pasmowej w wyrobach walcowanych, a poza tym powodują większą kruchość stali, niż można by przewidywać z przeciętnej zawartości fosforu. Nawet w granicach dopuszczalnych zawartości fosfor zwiększa skłonność do kruchości odpuszczania, zwłaszcza w stalach manganowych i chromowo-manganowych. Główną przyczyną dla której uważa się siarkę za pierwiastek szkodliwy jest kruchość na gorąco, którą wywołuje. Siarka ma znacznie mniejszą rozpuszczalność niż fosfor, co powoduje że wpływ siarki polega przede wszystkim na oddziaływaniu wtrąceń siarczokowych w fazę metaliczną. Ich zawartość została ograniczona odpowiednio do 0,025% oraz 0,015%. Dla porównania skład chemiczny stali A1(C35e), A2(22MnCrV5), A3(C45e), A4(25Cr Mo4) i A5(42CrMo4) wg karty UIC 811-1 [13] jest przedstawiony w tabeli 2.

Tabela 1

Gat. stali	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
	Zawartość procentowa pierwiastków									
EA1N	0,40	0,50	1,20	0,020	0,020	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06
EA1T	0,40	0,50	1,20	0,020	0,015	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06
EA4T	0,22÷0,29	0,40	0,80	0,020	0,015	0,90÷1,20	0,30	0,15÷0,30	0,30	0,06

Skład chemiczny stali używanych na osie zestawów kołowych wg karty UIC 811-1 [13]

Tabela 2

Gat. stali	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
	Zawartość procentowa pierwiastków									
A1	0,37	≤0,46	≤1,12	≤0,040	≤0,040	≤0,30	≤0,30	≤0,05	≤0,30	≤0,05
A2	0,17÷ 0,27	≤0,40	1,00 ÷1,40	≤0,025	≤0,030	0,20 ÷0,70	≤0,25	≤0,15	≤0,30	0,05 ÷0,15
A3	0,42÷ 0,50	0,15 ÷0,40	0,50 ÷0,80	≤0,035	≤0,035	≤0,030	≤0,30	≤0,08	≤0,30	≤0,05
A4	0,22÷ 0,29	0,15 ÷0,40	0,50 ÷0,90	≤0,035	≤0,035	0,90 ÷1,20	≤0,30	0,15÷0,30	≤0,30	≤0,05
A5	≤45	≤0,40	≤0,90	≤0,035	≤0,035	≤1,20	≤0,30	≤0,30	≤0,30	≤0,10

Jak widać z przedstawionego porównania zawartość siarki oraz fosforu w poszczególnych gatunkach stali wg PN-EN13261:2009 [17] jest znacznie mniejsza niż tych, wymienionych w karcie UIC 811-1 [13].

Kolejnym istotnym ograniczeniem jest obowiązek kontrolowania zawartości wodoru w stali. Dopuszczalna zawartość wodoru w stali musi być mniejsza:

- kategorii 1 (dla pojazdów przystosowanych do prędkości powyżej 200 km/h) od 2 ppm oraz
- kategorii 2 (dla pojazdów przystosowanych do prędkości ≤200 km/h) od 2,5 ppm.

Norma PN-EN 13261:2009 (załącznik G) [17] zwiększyła znacznie wymagania dotyczące sprawdzenia zawartości wodoru w wytopie stali przeznaczonej na osie zestawu kołowego.

W celu usunięcia wodoru ze stali zaakceptowano dwie metody analizy:

- odgazowanie próżniowe w temperaturze 650÷1050°
- poprzez wdmuchiwanie lotnego gazu w ciekłą stal o temperaturze 650±20°C; gaz zatrzymywany jest w drodze powrotnej, który zawiera wodór i jest odzyskiwany do obiegu.

Sprawdzenie zawartości wodoru w stali, przeznaczonej na osie zestawów kołowych odbywa się za pomocą pobierania próbek z wytopu jedną z czterech metod:

- metodą kokili miedziowych
- rury krzemowej
- rury wydmuchującej krzem (nie dopuszcza się stosowania kwarcu przepuszczającego światło)
- metodą próbki zanurzeniowej (metoda nośnego gazu z detektorem z przewodnością cieplną).

Wodór jest pierwiastkiem, którego zawartość w stali jest zdecydowanie szkodliwa. Wodór jest przyczyną powstawania kruchości w stali tzw. „kruchości wodorowej”. Według jednej z hipotez wodór tworzy atmosfery dookoła dyslokacji. Przy względnie powolnym odkształceniu atmosfery te przemieszczają się wraz z dyslokacjami, skutkiem czego w takich miejscach powstają zarodki pęknięć, wodór wypełnia je, wytwarzając w nich skutkiem rekombinacji atomów w cząsteczki znaczne ciśnienie i w ten sposób ma ułatwiać pękanie. Niezależnie od wszystkich opisanych zjawisk, wodór może być przyczyną powstawania poważnych wad wyrobów stalowych, zwanych płatkami. Płatki występują przede wszystkim w strefach środkowych wyrobów o dużych przekrojach. Z wyrobów cienkich znaczna część wodoru pochodzącego z procesu stalowniczego ulatnia się już podczas obróbki plastycznej, dzięki czemu nie powoduje uszkodzeń. Płatki są pęknięciami o wymiarach od kilku do kilkunastu milimetrów, zorientowanymi prostopadle do kierunku naprężeń własnych, powstającymi poniżej 200÷250°C podczas stygnięcia po przeróbce plastycznej, chociaż obserwowano również ich tworzenie się w ciągu kilkunastu dni po ostygnięciu. Płatki widoczne na przelomie stali stanowią jasne plamy, różniące się wielkością ziarna i połyskiem od reszty powierzchni przelomu. Szczególnie wyraźnie występują na przelomach stali hartowanych i odpuszczanych. Na szlifach stanowią zasadniczo krótsze lub dłuższe pęknięcia, czasami tak cienkie, że dopiero po trawieniu można je wyraźnie obserwować. W kontroli produkcji do wykrywania płatków stosuje się powszechnie badania ultradźwiękowe, tym bardziej że ich rozmieszczenie wewnątrz odkuwek czyni je tak

cienkie, że dopiero po trawieniu można je wyraźnie obserwować. Przyczyną powstawania płatków jest wodór i naprężenia własne, zarówno cieplne jak i strukturalne. Występowanie płatków powoduje wodór zawarty w stali w wyniku procesu stalowniczego. Zawartość wodoru zależy w dużym stopniu od metody wytopów i warunków, w jakich jest prowadzony. Zgodnie z danymi literaturowymi można przytoczyć następujące dane:

- stal z kwaśnego pieca martenowskiego 3÷7 cm³/100 g
- stal z zasadowego pieca martenowskiego 4÷10 cm³/100g
- stal z zasadowego pieca elektrycznego 4÷8 cm³/100g [6].

Głównym czynnikiem określającym zawartość wodoru w stali jest ilość pary wodnej w atmosferze pieca. Z roztopionej stali w piecu wodór wydziela się szybciej, im bardziej energiczne jest świeżenie (tzw. gotowanie kąpieli), lecz z chwilą przerwania świeżenia zawartość

wodoru zaczyna wzrastać. Wodór może pochodzić ze zlasowanego wapna, nie wysuszonych żelazostopów i dodatków nawęglających do kadzi. Niedostatecznie wysuszona kadź i zbyt gruba warstwa lakieru na ściankach wlewnicy stanowią dalsze źródła wodoru przechodzącego do stali. W przypadkach niekorzystnych zawartość wodoru w stali może znacznie przekroczyć podane wyżej wartości. Wg jednej z hipotez zawartość wodoru wynosząca 2cm³/100 g nie powodują powstawania płatków, nawet w największych przekrojach. Zawartość ta oczywiście zależy od gatunku stali, wielkości przekroju i warunków stygnięcia po przeróbce plastycznej na gorąco, dla małych przekrojów może być większa. Oprócz działania na własności mechaniczne wodór działa również chemicznie, reagując z niektórymi pierwiastkami w stali. Znane i wykorzystywane praktycznie jest silnie odwęglające działanie wilgotnego wodoru na stal podczas wyżarzania. Atmosfera wodoru umożliwia również usuwanie siarki, fosforu i tlenu z cienkich taśm stalowych podczas

Zestawienie dopuszczalnych wtrąceń dla stali kategorii 1 wg PN-EN 13261:2009 [17]

Tabela 3

Typ wtrąceń	Kategoria 1		Kategoria 2	
	Seria wzrastająca (maksimum)	Seria malejąca (maksimum)	Seria wzrastająca (maksimum)	Seria malejąca (maksimum)
A (siarka)	1,5	1,5	1,5	2
B(gliniany)	1	1,5	1,5	2
C(krzemiany)	1	1,5	1,5	2
D(tlenki ziarniste)	1	1,5	1,5	3
B+C+D	2	3	3	4

Zestawienie własności wytrzymałościowych dla stali EA1N, EA1T oraz EA4T wg PN-EN13261:2009 [17]

Tabela 4

Gatunek stali	R _{eH}	R _m	A ₅	KU w kierunku wzdłużnym	KU w kierunku poprzecznym
	[MPa]	[MPa]	[%]	[J]	[J]
EA1N	≥320	550÷650	≥22	≥30	≥20
EA1T	≥350	550÷700	≥24	≥40	≥25
EA4T	≥420	650÷800	≥18	≥40	≥25

Zestawienie własności wytrzymałościowych dla stali A1N, A1T, A2N, A3N, A3T, A4T oraz A5T wg karty UIC811-1 [13]

Tabela 5

Gatunek stali	R _{eH}	R _m	A ₅	KU w kierunku wzdłużnym	KU w kierunku poprzecznym
	[MPa]	[MPa]	[%]	[J]	[J]
A1N ¹⁾	≥320	550÷650	≥22	25	10
A1T ²⁾	≥350	550÷700	≥24	40	15
A2N	≥350	510÷620	≥22	40	20
A3N	≥360	600÷750	≥17	20	10
A3T	≥390	620÷770	≥19	25	13
A4T	≥420	650÷800	≥18	40	20
A5T	≥510	730÷880	≥14	25	13

¹⁾N- w stanie normalizowanym

²⁾T- stan ulepszonym cieplnie

wyżarzania. W aparaturze syntezy związków wodorowych wodór pod dużym ciśnieniem działa na stal przy temperaturach dochodzących do 500°C. W tych warunkach dyfundujący wodór reaguje z cemenytem i rozkłada go, tworząc z węglem metan (CH₄), co powoduje poważne uszkodzenia struktury połączone z utratą wytrzymałości i ciągliwości. Zapobiega się temu, stosując stale stopowe, w których zamiast cemenytmu występują bardziej stabilne węgliki chromu, molibdenu, wolframu albo wanadu.

Kolejnym kryterium, które sformułowała norma PN-EN 13261:2009 [17] było wprowadzenie dopuszczalnych wtrąceń, które są uznawane jako wady mikrograficzne i których rzeczywista wielkość jest sprawdzana za pomocą badań ultradźwiękowych. Poziomy dopuszczalnych wtrąceń dla stali przeznaczonych na osie kategorii 1 i 2 są przedstawione w tabeli 3.

2.2. Własności wytrzymałościowe

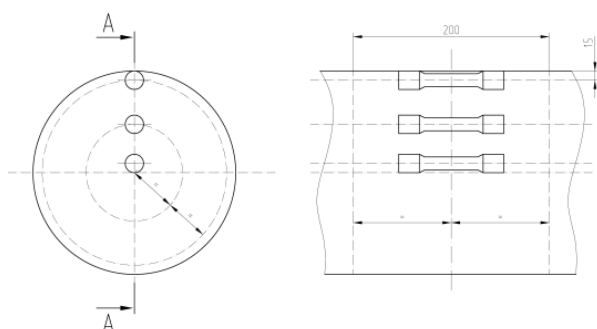
Własności wytrzymałościowe stali EA1N,EA1T oraz EA4T wg PN-EN 13261:2009 [17] są przedstawione w tabeli 4.

Jak widać z przedstawionego porównania własności wytrzymałościowe stali EA1N,EA1T oraz EA4T są zbliżone do stali A1N,A1T oraz A4T za wyjątkiem udarności. Zgodnie z PN-EN 13261:2009 [17] udarność dla stali EA1N, EA1T oraz EA4T jest nieco wyższa niż jej dawne odpowiedniki wg karty UIC 811-1 [13].

Zwraca się uwagę na fakt, że norma PN-EN13261:2009 [17] zwiększyła wymagania w stosunku do karty UIC 811-1 w zakresie pomiarów wytrzymałościowych próbek. Próbki do badań wytrzymałościowych powinny być pobrane w trzech miejscach największego przekroju osi:

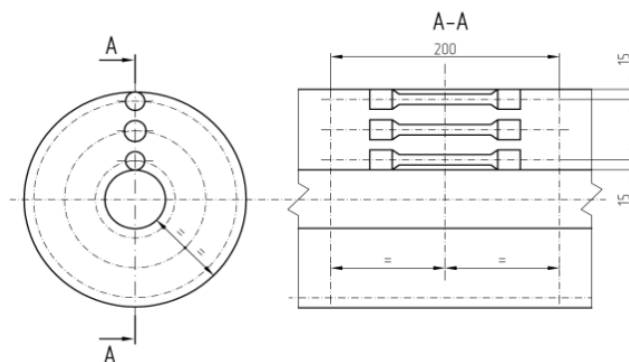
- możliwie blisko powierzchni zewnętrznych wszystkich osi
- w środku promienia i w osi symetrii pełnych osi
- w środku pomiędzy powierzchnią zewnętrzną i wewnętrzną w pobliżu wewnętrznej powierzchni osi drążonych.

Przykładowe rozmieszczenie próbek do badań wytrzymałościowych dla osi pełnych jest przedstawione na rys.1.



Rys.1. Rozmieszczenie próbek do przeprowadzenia prób rozciągania dla osi pełnych wg PN-EN 13261:2009 [17]

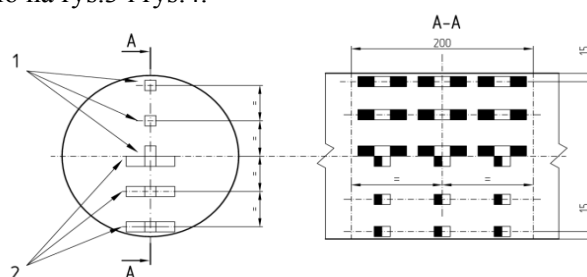
Rozmieszczenie próbek do badań wytrzymałościowych dla osi drążonych jest przedstawione na rys.2.



Rys.2. Rozmieszczenie próbek do przeprowadzenia prób rozciągania dla osi drążonych wg PN-EN 13261:2009 [17]

Wartości mierzone dla próbek pobieranych w pobliżu zewnętrznej powierzchni powinny być większe lub równe 0,95 wartości, mierzonej na połowie promienia osi lub w środku pomiędzy powierzchnią zewnętrzną lub wewnętrzną dla osi drążonych.

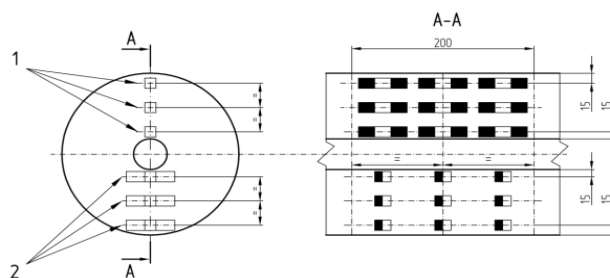
Dopuszczalne wartości w środku osi lub w pobliżu powierzchni otworu osi drążonych, muszą być większe lub równe 0,8 wartości mierzonej w połowie promienia pełnych osi lub w środku pomiędzy powierzchnią zewnętrzną i wewnętrzną osi drążonych. Rozmieszczenie próbek do badań udarności dla osi pełnych oraz drążonych jest przedstawione odpowiednio na rys.3 i rys.4.



Legenda:

- 1 - próbki do badań w kierunku wzdłużnym
- 2 - próbki do badań w kierunku poprzecznym

Rys.3. Rozmieszczenie próbek do przeprowadzenia prób udarności dla osi pełnych wg PN-EN 13261:2009 [17]



Legenda:

- próbki do badań w kierunku wzdłużnym
- próbki do badań w kierunku poprzecznym

Rys.4. Rozmieszczenie próbek do przeprowadzenia prób udarności dla osi drążonych wg PN-EN 13261:2009 [17]

Wartości udarności dla próbek osi, mierzonych w kierunku poprzecznym i wzdłużnym wg PN-EN 13261: 2009 [17]
Tabela 6

Gatunek stali	KU w kierunku wzdłużnym [J]	KU w kierunku poprzecznym [J]
EA1N	≥30	≥20
EA1T	≥40	≥25
EA4T	≥40	≥25

W pobliżu powierzchni zewnętrznej wartości udarności powinny być większe lub równe 0,95 wartości mierzonej w połowie promienia przy pełnych osiach lub wartości w środku pomiędzy powierzchnią zewnętrzną i wewnętrzną osi drażonych. Wartość mierzona w osi środkowej pełnych osi zestawów kołowych lub w pobliżu powierzchni otworu osi drażonych powinny wynosić więcej niż 0,8 wartości mierzonej w połowie promienia. Jak widać własności mechaniczne dla stali, użytej na osie zestawów kołowych są bardzo dokładnie badane. Tak dobrane stale pod względem

składu chemicznego oraz własności wytrzymałościowych powinny zagwarantować własności zmęczeniowe, które są badane:

- na małych próbkach z gładkimi powierzchniami (granica wytrzymałości zmęczeniowej R_{FL})
- na małych próbkach z korbami (granica wytrzymałości zmęczeniowej R_{FE})
- na próbkach w skali 1:1 (granica wytrzymałości zmęczeniowej F_1 i F_2 , gdzie F_1 jest granicą zmęczenia dla stref próbki bez karbu, natomiast F_2 jest granicą zmęczenia dla próbek z karbem).

Poszczególne granice zmęczenia dla gatunków stali EA1N, EA1T oraz EA4T są przedstawione w tabeli 7. Zagwarantowane granice zmęczenia wg PN-EN 13261:2009 pozwalają na przyjęcie dopuszczalnych naprężeń dla osi tocznych, które są przedstawione w tabeli 8 i 9.

Zestawienie granic zmęczenia dla stali EA1N, EA1T oraz EA4T wg PN-EN 13261:2009 [17]

Tabela 7

Gatunek stali	F_1	F_2	R_{FL}	R_{FE}	$q=R_{FL}/R_{FE}$
EA1N	≥200 N/mm ²	≥80 N/mm ²	≥250 N/mm ²	≥170 N/mm ²	≤1,47
EA1T	≥200 N/mm ²	≥80 N/mm ²	≥250 N/mm ²	≥170 N/mm ²	≤1,47
EA4T	≥240 N/mm ²	≥96 N/mm ²	≥350 N/mm ²	≥215 N/mm	≤1,63

Zestawienie dopuszczalnych naprężeń dla osi tocznych zgodnie z PN-EN 13103:2009 [15]

Tabela 8

Gatunek stali	Rodzaj osi	Współczynnik bezpieczeństwa	Strefa 1	Strefa 2
EA1N	oś pełna	1,2	166	100
EA4T	oś pełna	1,33	180	110

Zestawienie dopuszczalnych naprężeń dla tocznych osi drażonych zgodnie z PN-EN 13103:2009 [15]

Tabela 9

Gatunek stali	Rodzaj osi	Współczynnik bezpieczeństwa	Strefa 1 ¹⁾	Strefa 2 ²⁾	Strefa 3 ³⁾	Strefa 4 ⁴⁾
EA1N	Oś drażona	1,2	166	92	78	67
EA4T	Oś drażona	1,33	180	99	85	72

¹⁾ strefa 1: osadzenie łożysk ślizgowych, strefy przejścia

²⁾ strefa 2: wszystkie osadzenia z wyjątkiem czopów i płaszczyzn osadzania łożysk ślizgowych

³⁾ strefa 3: czopy (pod łożyska toczne)

⁴⁾ strefa 4: otwór drażony

Zestawienie naprężeń dopuszczalnych dla osi trakcyjnych jest przedstawione w tabeli 10 i 11.

Zestawienie dopuszczalnych naprężeń dla osi trakcyjnych zgodnie z PN-EN 13104:2009 [16]

Tabela 10

Gatunek stali	Rodzaj osi	Współczynnik bezpieczeństwa	Strefa 1	Strefa 2
EA1N	Oś napędna z wtłoczonym kołem lub zębikiem przekładniowym	1,5	133	80
EA4T	Inne przypadki	1,3	154	92

- ¹⁾ **strefa 1:** osadzenie łożysk ślizgowych, dna rowków między sąsiadującymi osadzeniami, powierzchnie gumowe, pierścienie uszczelniające, strefy przejścia
- ²⁾ **strefa 2:** osadzenia kół, osadzenia tarcz hamulcowych, osadzenia łożysk tocznych, osadzenia zębniaka, osadzenia pierścieni uszczelniających

Zestawienie dopuszczalnych naprężeń dla osi trakcyjnych drążonych zgodnie z PN-EN 13104:2009 [16]
Tabela 11

Gatunek stali	Rodzaj osi	Współczynnik bezpieczeństwa	Strefa 1 ¹⁾	Strefa 2 ²⁾	Strefa 3 ³⁾	Strefa 4 ⁴⁾
EA1N	Oś napędna z wtłoczonym kołem lub zębniakiem przekładniowym	1,5	133	73	63	53
	Inne przypadki	1,3	154	85	72	62
EA4T	Oś napędna z wtłoczonym kołem lub zębniakiem przekładniowym	1,66	145	80	68	58
	Inne przypadki	1,44	167	92	78	67

¹⁾ **strefa 1:** osadzenie łożysk ślizgowych, strefy przejścia

²⁾ **strefa 2:** wszystkie osadzenia z wyjątkiem czopów i płaszczyzn osadzania łożysk ślizgowych

³⁾ **strefa 3:** czopy (pod łożyska toczne)

⁴⁾ **strefa 4:** otwór drążony

3. Powłoki malarskie

Jak wynika z obecnych trendów rozwojowych tematyka ochrony antykorozyjnej zestawów kołowych zyskała szczególnie na znaczeniu. Powodem do tego są:

- zmieniający się pogląd, że powłoki malarskie mają takie samo znaczenie konstrukcyjne jak inne części zestawu kołowego, na które jest udzielana gwarancja w zakresie 5÷8 lat
- zmieniająca się polityka utrzymania i konserwacji, co prowadzi do przekonania, że naprawa uszkodzeń powłoki malarskiej może być przeprowadzona tylko podczas napraw głównych, a nie podczas przeglądów okresowych.

Jak wynikało z zebranych dotychczas doświadczeń eksploatacyjnych już po dwóch latach zbierano negatywne doświadczenia dotyczące jakości powłoki malarskiej, której jakość nie odpowiadała oczekiwaniom użytkownika taboru kolejowego.

Zgodnie z zapisem w PN-EN 13103:2009 [15] oraz PN-EN 13104:2009 [16] wartości wytrzymałości zmęczeniowej wartości naprężeń dopuszczalnych przy założeniu współczynników bezpieczeństwa można stosować tylko wtedy, gdy warunki eksploatacyjne zapewniają prawidłowe zabezpieczenie przed korozją przez cały okres użytkowania osi. W przeciwnym przypadku, kiedy pojawiają się wątpliwości, że zabezpieczenie przed korozją nie będzie skuteczne, to graniczne naprężenia powinny być podzielone przez

współczynnik uzgodniony przez projektanta i zamawiającego, uwzględniający utrzymania stosowane przez użytkownika. W związku z powyższym nowe przepisy potraktowały zabezpieczenie antykorozyjne jako istotny element zapewnienia antykorozyjnego.

Osie trakcyjne i toczne powinny być zabezpieczone przed korozją w tych miejscach, w których nie występują żadne części łączone.

Powłoki antykorozyjne można podzielić na cztery klasy:

- **klasy 1:** osie, które są odporne na korozję atmosferyczną oraz uderzenia mechaniczne
- **klasy 2:** osie, które są narażone na korozję spowodowaną specjalnymi produktami
- **klasy 3:** osie, które są narażone na korozję atmosferyczną
- **klasy 4:** osie, które są narażone na korozję atmosferyczną i których obliczone naprężenia są mniejsze od 60% naprężeń dopuszczalnych, wymienionych w tabelach 7, 8, 9 i 10 zgodnie PN-EN 13103:2009 [15] oraz PN-EN 13104:2009 [16].

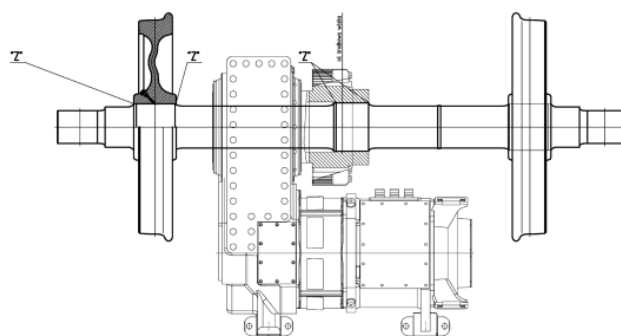
Własności poszczególnych klas zabezpieczeń antykorozyjnych przedstawiono w tabeli 12.

Zestawienie właściwości poszczególnych powłok antykorozyjnych dla osi trakcyjnych i tocznych wg 13261:2009 [17]
Tabela 12

Właściwość	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3	Klasa 4
Grubość powłoki	×	×	×	–
Przyczepność powłoki	×	×	×	–
Wytrzymałość powłoki	×	-	–	–
Odporność na odrywanie	×	×	×	–
Odporność na działanie wody morskiej	×	×	×	–
Odporność na działanie mediów korozyjnych	-	×	–	–
Odporność na działanie cyklicznych obciążeń mechanicznych	×	×	×	–

Ochrona przed korozją obowiązuje zarówno dla zestawów kołowych nowo-produkowanych, jak również podlegających naprawie i konserwacji. Jak okazuje się z doświadczeń eksploatacyjnych powierzchnia zestawów kołowych jest narażona na uderzenia mechaniczne np. tłucznia, znajdującego się na nawierzchni kolejowej, kawałków lodu w warunkach zimowych, działaniu czynników atmosferycznych, zanieczyszczeń do jakich można zaliczyć olej, smary, żeliwny pył ze wstawek hamulcowych. Klasa 1 ochrony antykorozyjnej jest przewidziana przede wszystkim dla osi pojazdów kolejowych, przeznaczonych do prędkości powyżej 200 km/h, z uwagi na bardzo duże prawdopodobieństwo powstania uszkodzeń mechanicznych. Klasa 2 ochrony antykorozyjnej jest przewidziana dla specjalistycznych pojazdów trakcyjnych, przeznaczonych do czyszczenia i konserwacji nawierzchni kolejowej. Jako powłoki antykorozyjne dla wagonów osobowych w ostatnich latach proponowano farby na bazie żywic epoksydowych, które charakteryzują się z jednej strony odpornością na działanie czynników chemicznych, natomiast z drugiej strony pewną odpornością na uderzenia mechaniczne. Grubość powłoki malarskiej tego typu wynosi z reguły 200 µm. W przypadku wagonów towarowych (w szczególności wyposażonych w hamulec klockowy) stosuje się jednowarstwową powłokę malarską na bazie żywic alkidowych. Grubość powłoki malarskiej wynosi zwykle 60÷100 µm, w zależności od sposobu jej nanoszenia. Powłoki na bazie żywic epoksydowych oraz żywic alkidowych charakteryzują się dobrym powiązaniem sieciowym i posiadają dużą przyczepność do materiału rodzimego. Jednak jak wykazują doświadczenia, jednowarstwowe powłoki antykorozyjne nie spełniają warunku odporności powłoki na uderzenia mechaniczne. Z przeprowadzonych testów wynika, że żadna z dotychczas badanych powłok malarskich nie może spełnić warunku odporności na uderzenia i przy jednoczesnym spełnieniu własności antykorozyjnych. Dalej okazało się, że jednowarstwowe powłoki malarskie, stosowane w wagonach towarowych nie spełniają wymagania dotyczącego odporności przed odrywa-

niem. Pewne nadzieje związane są z nowymi farbami, które zostały określone jako polimer A i polimer B [2]. W przypadku polimeru A chodzi o farbę jednoskładnikową, która utwardza się w wyniku procesu polimeryzacji addycyjnej (poliaddycji). Tzw. czas reakcji wynosi kilka sekund tzn. oś po pokryciu tym środkiem jest gotowa do eksploatacji. Przez polimer B rozumie się system jednoskładnikowy, który jest stosowany w formie spieku. Czas reakcji wynosi podobnie jak w przypadku polimeru A kilka sekund. Jak wynika z doświadczeń przeprowadzonych w Bochumer Verein BVV obydwie powłoki antykorozyjne spełniają wymagania dotyczące wytrzymałości na uderzenia zgodnie z normą PN-EN 13261:2009 [17]. Problem powłok antykorozyjnych sprowadza się również do spełnienia wymagań dotyczących ochrony środowiska. Z tego powodu ograniczono stopniowo stosowanie farb bitumicznych, które przed długi czas były stosowane jako klasyczny środek antykorozyjny. Zaletą ich była duża odporność na działanie wysokich temperatur, co znalazło szczególne zastosowanie na części zestawów kołowych narażonych na działanie wysokich temperatur (np. koła z tarczami hamulcowymi). W przypadku wystawiania piasty koła, koła zębatego lub jarzma na osi występują „ukryte zagłębienia”, które zgodnie z p.3.2.7 normy PN-EN 13261:2009 [17] należy zabezpieczyć przed korozją. Miejsca te są pokazane przykładowo na rys.5.



Legenda do rys.5:

Z- „miejsca ukryte”, które należy zabezpieczyć przed korozją

Rys.5. Przykładowe miejsca ukrytech

L.p.	Własność	Wartość	Zakres
1.	Typ chemiczny	Oksymowy kauczuk silikonowy	
2.	Wygląd (barwa)	szary	
3.	Masa właściwa w 20°C	1,45	
4.	Lepkość w 25°C, mPas (cP)	Pasta tiksotropowa ¹⁾	
5.	Prędkość wyciskania (gm/min) (dysza 3 mm, 6 bar, 25°C)	250	200÷550
6.	Temperatura zapłonu (TCC) [°C]	>93	
7.	Twardość, Shore'a	55÷60	
8.	Proces utwardzania	14 dni przy temperaturze 23±2°C i względnej wilgotności powyżej 60±5% oraz szczelinie 0,5 mm	

¹⁾**Tiksotropia** (pamięć cieczy) - własność niektórych rodzajów płynów, w których występuje zależność lepkości od czasu działania sił ścinających, które na ten płyn działały. Na przykład niektóre płyny tiksotropowe mogą stać się przez pewien czas mniej lepkie, gdy podda się je intensywnemu mieszaniu. Płyny takie po pewnym czasie (spoczynku) od momentu mieszania ponownie "zastygają", tzn. zwiększają swoją lepkość do normalnej wartości. Możliwe jest jednak także odwrotne zjawisko, tzn. płynem tiksotropowym jest także taka substancja, która czasowo zwiększa swoją lepkość na skutek mieszania. Tiksotropia jest więc procesem odwracalnym; do zniszczenia struktury tiksotropowej płynu wymagane jest dostarczenie energii.

Jako środek zabezpieczający przed korozją stosuje się jednoskładnikowy klej **LOCTITE 5699**, znany też jako uszczelniaacz silikonowy, który wulkanizuje w temperaturze pokojowej (RTV), nie osiada, nie powoduje korozji, ma słaby zapach i zawiera mało części lotnych.

Podstawowe właściwości kleju/uszczelnacza typu Loctite 5699 są przedstawione w tabeli 13.

4. Środki technologiczne zwiększające wytrzymałość zmęczeniową osi

Normy PN-EN 13103:2009 [15] oraz PN-EN 13104:2009 [16] nie uwzględniają zabiegów technologicznych zwiększających wytrzymałość zmęczeniową osi. Metody te można podzielić na trzy rodzaje:

- **metody mechaniczne**, do których można zaliczyć wałeczowanie (rolowanie) powierzchni osi
- **metody obróbki cieplnej**, jak np. hartowanie indukcyjne, hartowanie płomieniowe
- **metody cieplno-chemiczne**, do których można zaliczyć: utwardzanie dyfuzyjne, azotowanie lub węgielazotowanie [7].

Jak wynika dotychczasowych doświadczeń eksploatacyjnych wytrzymałość zmęczeniowa może być zwiększona o 10 do 150 procent w stosunku do zakładanej w obliczeniach. Metody mechaniczne, do jakich należą wałeczowanie (rolowanie) powierzchni polegają na wytworzeniu w warstwie wierzchniej naprężeń ściskających, działających w przeciwnym kierunku niż naprężenia rozciągające od zginania i przyczyniają się do obniżenia naprężeń eksploatacyjnych. W celu zabezpieczenia niezawodnego podwyższenie wytrzymałości zmęczeniowej osi konieczne jest, aby na skutek rolowania uzyskać zwiększoną twardość warstwy powierzchniowej od 25 do 40%, przy czym głębokość

warstwy utwardzonego metalu powinna wynosić $0,02\div 0,04D$, gdzie D-średnica wzmacnianego przekroju osi. Przy wyborze parametrów rolowania, szczególnie dla osi drażonych, konieczne jest zachowanie ostrożności, ponieważ przyjęcie zwiększonych naprężeń ściskających na powierzchni może doprowadzić do powstania pęknięcia zmęczeniowego na powierzchni wewnętrznej wydrążenia. Z tego powodu zaleca się, aby dla osi drażonych stosować dolne granice głębokości warstwy utwardzonej tzn. 0,02 średnicy wzmocnionego przekroju osi. Skuteczność zabiegu rolowania powierzchni określa stopień podwyższenia twardości powierzchniowej, który można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta HV = \frac{HV_{MAX} - HV_{MIN}}{HV_{MIN}} \quad (1)$$

gdzie:

ΔHV - przyrost twardości rolowanej powierzchni osi zestawu kołowego

HV_{max} - maksymalna twardość na rolowanej powierzchni osi zestawu kołowego

HV_{MIN} - minimalna twardość powierzchni przed rolowaniem osi zestawu kołowego.

Niezbadanym zagadnieniem budzącym wątpliwości jest relaksacja naprężeń w miarę oddziaływania naprężeń eksploatacyjnych, nie mniej jednak gdyby takie zjawisko występowało można wnioskować i tak o częściowym skompensowaniu skutków działania sił eksploatacyjnych.

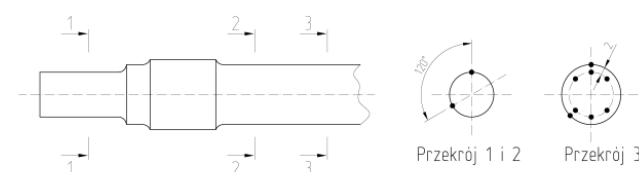
Metody obróbki cieplnej zwiększają wytrzymałość zmęczeniową przez zmiany strukturalne w warstwie wierzchniej, przy czym głównymi parametrami decydującymi o jego skuteczności jest głębokość podgrzanej sceny i prędkość chłodzenia. Metody obróbki cieplno-chemicznej do jakich należą utwardzanie dyfuzyjne, azotowanie lub węgielazotowanie prowadzą

do zmiany składu chemicznego warstwy wierzchniej. Zmiana składu chemicznego warstwy wierzchniej odbywa się przez dyfuzję węgla lub azotu. Największy udział w umocnieniu powierzchni w przypadku utwardzania dyfuzyjnego ma nasycenie warstwy wierzchniej węglem (lub dodatkowo azotem) i ostateczna przemiana w martenzyt. Wskutek tego powstają naprężenia sieciowe, wynikające z tetragonalnego rozrywania sieci krystalicznej żelaza. Do tego dochodzi przy odpowiednim składzie chemicznym stali efekt częściowego umocnienia powierzchniowego wskutek wytrącania się węglików. Azotowanie i węglazotowanie prowadzą do zwiększenia wytrzymałości przez wnikanie atomów w luki tetragonalne siatki krystalicznej żelaza i tworzenie się azotków żelaza, węgla itd. Właściwości warstwy wierzchniej określa się zasadniczo przez naprężenia własne. Wadą metod obróbki cieplnej jest między innymi widoczny brak poprawy odporności warstwy wierzchniej na korozję. Istotną poprawę odporności warstwy wierzchniej na procesy korozyjne oraz odporności na uderzenia np. tłuczni z nawierzchni kolejowej przynoszą metody obróbki cieplno-chemicznej.

Wraz z wprowadzeniem nowej normy PN-EN 13261:2009 [17] na osie zestawów kołowych pojawił się problem badania naprężeń własnych (p.3.6 niniejszej normy).

W punkcie 3.6 i podpunktach „Naprężenia własne” znajdują się następujące zapisy:

- p.3.6.1 „Postanowienia ogólne: W różnych etapach produkcyjnych nie powinny występować żadne naprężenia własne, które mogą prowadzić w eksploatacji do odkształceń osi lub powstania pęknięć zmęczeniowych”
- p.3.6.2. „Dopuszczalne wartości: Największe naprężenia własne na powierzchni osi nie powinny się różnić więcej niż 40N/mm² [40 MPa] pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi” (usytuowanie punktów pomiarowych naprężeń własnych w osiach zestawów kołowych jest podane na rys.6)
- p.3.6.3. Metoda pomiarowa; pomiar można przeprowadzić zarówno za pomocą tensometrów jak również promieniowania rentgenowskiego. Metoda ta powinna być uzgodniona pomiędzy producentem a klientem.



Legenda:

Przekrój 1-1: czop osi zestawu kołowego

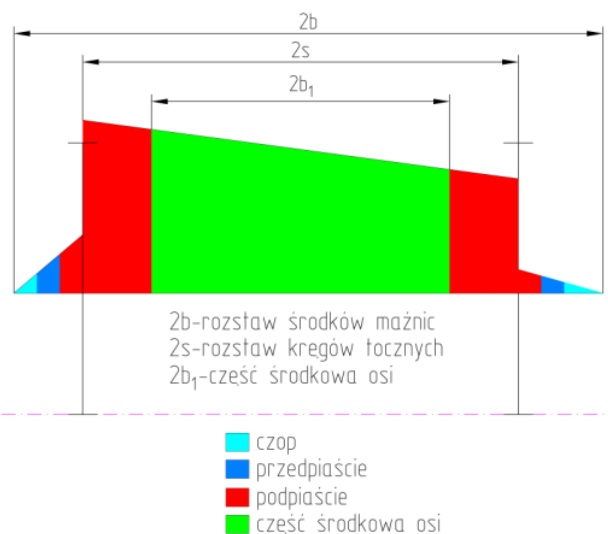
Przekrój 2-2: część środkowa osi zestawu kołowego za tzw. „zapiąciem”

Przekrój 3-3: część środkowa osi zestawu kołowego

Punktu pomiarowe są oznaczone przez „•”

Rys.6. Usytuowanie punktów pomiarowych

Celem pomiarów naprężeń własnych w osiach zestawów kołowych jest upewnienie się, czy naprężenia własne (szczątkowe) mierzone na głębokości 2 mm nie przekraczają wartości dopuszczalnej wynoszącej +100 MPa oraz różnica pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi nie przekracza 40 MPa. Celem tego badania jest stwierdzenie czy na etapie wytwarzania osi (przyjęty proces technologiczny) nie pojawiają się dodatkowe naprężenia rozciągające, które mogą wpływać dodatkowo na wyężenie materiału osi, a ich obecność nie jest uwzględniana w metodyce obliczeniowej przedstawionej w normie PN-EN 13104:2009 [16]. Problem pomiaru naprężeń własnych w osiach zestawów kołowych powstał w wyniku prac Europejskiego Komitetu Normalizacyjnego (fr. Comité Européen de Normalisation) nad edycją normy europejskiej PN-EN 13261:2009 [17]. We wcześniejszych przepisach krajowych tzn. PN-93/K-91045 [18] oraz UIC (unieważniona karta UIC 811-1 [13]) problem pomiaru naprężeń własnych nie był w ogóle poruszany. Oś zestawu kołowego jest obciążona siłami pionowymi, poprzecznymi, hamulcowymi i rozruchowymi, które wywołują zginanie i skręcanie. W wyniku tego oś zestawu kołowego jest obciążona momentem zredukowanym, którego przykładowy wykres jest przedstawiony na rys.7.



Rys.7. Przykładowy przebieg momentu zredukowanego obciążającego oś zestawu kołowego

W każdym przekroju naprężenia maksymalne obliczane są jako wynik momentu **MR**, który wynosi:

$$MR = \sqrt{MX^2 + MY^2 + MZ^2} \quad (2)$$

MR - moment zredukowany (wypadkowy)

MX - moment gnący w płaszczyźnie pionowej

MY - moment gnący w płaszczyźnie poprzecznej

MZ - moment skręcający.

Moment zredukowany **MR** wywołuje naprężenia rozciągające σ , które wyznacza się ze wzoru:

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 = \sqrt{MX^2 + MY^2 + MZ^2} \quad (3)$$

Naprężenia normalne σ_n mają następującą wartość (zginana belka o przekroju kołowym):

$$\sigma_n = \frac{32\sqrt{MX^2 + MY^2}}{\pi d^3} \quad (4)$$

Wartość naprężeń skręcających lub stycznych σ_t jest następująca (belka skręcana pomiędzy dwoma przekrojami kołowymi):

$$\sigma_t = \frac{16MY}{\pi d^3} \quad (5)$$

W wyniku działania momentów sił MX , MY i MZ powstają naprężenia główne σ_1 i σ_2 , które wyznacza się odpowiednio ze wzorów:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_n + \sqrt{\sigma_n^2 + 4\sigma_t^2}}{2} \quad (6)$$

oraz

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_n - \sqrt{\sigma_n^2 + 4\sigma_t^2}}{2} \quad (7)$$

Ponieważ wartość bezwzględna naprężeń głównych jest większa σ_1 i σ_2 (od 10 do 20 razy) niż naprężenia skręcające σ_t naprężenia zastępcze σ dla kontroli przyjętej wartości średnicy „ d ” wyznacza się ze wg hipotezy koła Mohra zgodnie ze wzorem:

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2 = \frac{32}{\pi d^3} \sqrt{MX^2 + MY^2 + MZ^2} \quad (8)$$

Obliczone naprężenia porównuje się z naprężeniami dopuszczalnymi dla stali E1AN, które wynoszą przykładowo dla pełnych osi trakcyjnych zgodnie z PN-EN 13104:2009 [16]:

- 133 MPa dla strefy 1 tzn. „oś, osadzenia łożysk ślizgowych, na rowków między sąsiadującymi osadzeniami, powierzchnie gumowe, pierścienie uszczelniające, strefy przejścia
- 80 MPa dla strefy 2 tzn. „osadzenia tarcz hamulcowych, osadzenia łożysk tocznych, osadzenia zębniaka, osadzenia pierścieni uszczelniających przy zachowaniu współczynnika bezpieczeństwa $S=1,5$ **oraz**
- 154 MPa dla strefy 1
- 92 MPa dla strefy 2 w pozostałych przypadkach przy zachowaniu współczynnika bezpieczeństwa $S=1,3$.

Ww. naprężenia dopuszczalne są przyjmowane w oparciu o założenie, że przestrzegana jest technologia wykonania osi w zakresie, który jest opisany w PN-EN 13261:2009 [17].

Technologia ta musi być zapewniać, aby na etapie:

- wytopu stali
- procesu kucia
- poszczególnych procesów obróbki mechanicznej nie pojawiły się naprężenia własne o wartościach przekraczających kryteria podane w punkcie 3.6 PN-EN 13261:2009 [17].

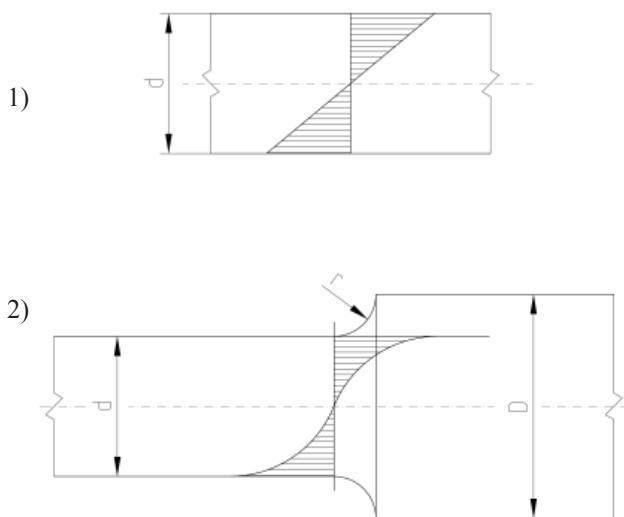
Naprężenia wewnętrzne, powstające w wyniku procesów technologicznych, głównie obróbki plastycznej i cieplnej można podzielić na trzy kategorie:

- **naprężenia pierwszego rodzaju (makronaprężenia)**; są to naprężenia międzystrefowe tj. powstające między poszczególnymi strefami przekroju i między częściami wyrobu. Im większy jest gradient temperatur na przekroju, jak też gradient pomiędzy poszczególnymi częściami wyrobu (zależy od prędkości i równomierności chłodzenia), naprężenia pierwszego rodzaju przybierają jeszcze większe wartości
- **naprężenia własne drugiego rodzaju**; powstają wewnątrz ziaren lub między ziarnami sąsiadującymi między sobą; przyczyną powstania tych naprężeń są różne współczynniki rozszerzalności liniowej faz występujących w obrabianych wyrobach lub też powstawanie nowych faz o różnej od wyjściowej objętości właściwej
- **naprężenia własne trzeciego rodzaju**; naprężenia te powstają wewnątrz obszarów nie przekraczających kilku komórek sieci krystalicznej metalu.

Niezależnie od rodzaju występujących naprężeń własnych skutek ich oddziaływania jest jednakowy. Jeżeli ich wielkość przekracza granicę plastyczności materiału, to odkształca się on trwale, natomiast jeżeli wielkość ta przekracza granicę wytrzymałości to materiał pęka. Naprężenia własne, które przekraczają ww. kryteria mogą prowadzić do procesów deformacji osi (oś jako element zestawu kołowego posiada bardzo dokładne tolerancje wymiarowe oraz odchyłki kształtu i położenia) w trakcie eksploatacji lub „inicjować pęknięcia zmęczeniowe”.

Pomimo tego, że naprężenia własne nie są uwzględnione w metodyce obliczenia wg normy PN-EN 13104:2009 [16], to można wyjść z założenia że sprawa naprężeń własnych jest ujęta we współczynniku bezpieczeństwa „ S ”, co powinno zapewnić wystarczający zapas wytrzymałości zmęczeniowej osi zestawu kołowego pojazdu. W związku z tym, że naprężenia szczytkowe mogą posiadać znak dodatni, czyli mieć charakter rozciągający ich wielkość jest ograniczona lokalnie do

+100 MPa. Jak wynika z rys.7 decydujący wpływ na wyteżenie osi posiada moment gnący, w związku z czym rozkład naprężeń w dowolnym przekroju osi jest taki jak przedstawiono na rys.8.



Legenda:

- 1 - przebieg naprężeń zginających w przekroju osi bez karbu
- 2 - przebieg naprężeń zginających w przekroju osi z karbem

Oznaczenia użyte na rysunku:

d, D - średnice przekrojów osi zestawu kołowego

r - promień przejściowy pomiędzy przekrojem o średnicy d i przekrojem o średnicy D

Rys.8. Rozkład naprężeń w dowolnym przekroju osi zestawu kołowego

6. Wnioski

1. Wprowadzenie normy europejskiej PN-EN 13261:2009 [17] ma istotne znaczenie dla technologii wytwarzania osi pojazdów szynowych. Podwyższenie wymogów technologicznych przyczynia się do zwiększenia wytrzymałości zmęczeniowej. Metodyka obliczania osi zestawów kołowych, przedstawiona w PN-EN 13103:2009 [15] i PN-EN 13104:2009 [16] ma charakter obligatoryjny pod warunkiem zastosowania stali wymienionych w PN-EN 13261:2009 [17] wraz z przynależną technologią wykonania, wymaganiami i badaniami. Stosowanie karty UIC 811-1 [13] nie ma już dalej uzasadnienia, zwłaszcza dla nowoprojektowanego i modernizowanego taboru. Stosowanie kryteriów dotyczących reżimu technologicznego zapewnia osiągnięcie minimalnej granicy zmęczenia dla materiałów, wymienionej w normach PN-EN 13103:2009 [15], PN-EN 13104:2009 [16] oraz PN-EN 13261:2009 [17].

2. Jednym z ważnych osiągnięć nowej normy PN-EN 13261:2009 [17] jest zwrócenie uwagi na jakość powłok malarskich, jako środka konstrukcyjnego zabezpieczającego oś przed skutkami korozji, a tym samym zapewniającym wytrzymałość zmęczeniową osi w czasie wyznaczonego okresu eksploatacyjnego. Jak wynika z dotychczasowych osiągnięć eksploatacyjnych bardzo duży udział w pęknięciach zmęczeniowych osi zestawów kołowych miał fatalny stan powłoki malarskiej.

3. Opisane wymogi technologiczne przyczyniają się niewątpliwie do wzrostu bezpieczeństwa eksploatawanego taboru pod warunkiem przestrzegania okresów między-kontrolnych w trakcie eksploatacji dla osi zestawów kołowych oraz odpowiednich kwalifikacji personelu wykonującego badania nieniszczące.

4. Do istotnych osiągnięć normy PN-EN 13261:2009 [17] jest podział osi na dwie kategorie tzn. kategorię 1 i kategorię 2. Jako kryterium podziału uznano prędkość pojazdu. Kategoria 1 osi jest przeznaczona dla pojazdów wysokich prędkości powyżej 200 km/h. W związku z tym wymagania w zakresie zawartości wodoru, czystości struktury mikrograficznej, dopuszczalnych wad materiałowych badanych za pomocą metody ultradźwiękowej i magnetoskopowej są większe aniżeli dla kategorii 2. W dotychczasowych przepisach podział taki nie był wprowadzony. Wdrożenie takiego podziału świadczy o coraz większym udziale transportu kolejowego z wysokimi prędkościami w odniesieniu do całości transportu kolejowego.

Literatura

- [1] Gökcek E., Behrends V.: *Automatisches Radsatzmonitoring für Güterwagen*. ETR-Eisenbahntechn. Rundsch. Nr.11/2010
- [2] Gumbiowski M., Poschmann I., Bowi M., Bardehle T.: *Oberflächenschutz von Radsätzen*. Eisenbahningenieur Nr.9/2002.
- [3] Engelmann J., Wirtgen J., Nicolin J.: *Europäisches Aktionsprogramm für die Güterwagensicherheit*. Eisenbahntechn. Rundsch. Nr.11/2010
- [4] Hasslinger H.: *Lastannahmen für Radsatzwellen-Bestandsanalyse*. Eisenbahntechnische Rundschau. Nr 12, 12.2009.
- [5] Liedgens K.: *Inspektionskonzept für Radsatzwellen bei der Hamburger Hochbahn*. Eisenbahningenieur. Nr 3/2010.
- [6] Malkiewicz T.: *Metaloznawstwo stopów żelaza*. PWN Warszawa-Kraków. Wydanie III.1976.
- [7] Murawa F., Winkler M.: *Randschichtbehandelte Radsatzwellen*. Eisenbahningenieur Nr.7/2007.
- [8] Richard A., Sander M., Wirxel M., Lebehahn J.: *Ermittlung von Inspektionsintervallen mittels Risswachstumsuntersuchungen*. Eisenbahningenieur. Luty 2010.
- [9] Sobaś M.: *Diagnostyka osi zestawów kołowych układów biegowych pojazdów trakcyjnych i tocznych*. Pojazdy Szynowe nr 4/2010
- [10] Sobaś M.: *Kryteria obiektywnej oceny prognozowanych stanów osi zestawów osi zestawów kołowych pojazdów trakcyjnych*. Pojazdy Szynowe nr 1/2011.
- [11] EN 473: *Kwalifikacja i certyfikacja personelu do badań nieniszczących*. Ogólne zasady. Marzec 1993.
- [12] EN 45013: *Ogólne wymagania dotyczące opinii i akredytacji placówek certyfikujących (ISO/IEC Tom 61:1996)*.1998.
- [13] Karta UIC 811-1: *Warunki techniczne na dostawę osi zestawów kołowych dla pojazdów trakcyjnych i wagonów*.

- [14] Karta UIC 960: Kwalifikacja i certyfikacja personelu odpowiedzialnego za prowadzenie badań nieniszczących elementów zespołów pojazdów szynowych w procesie ich utrzymania. 2-gie wydanie z grudnia 2001.
- [15] PN-EN 13103:2009: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych tocznych. Zasady konstrukcji.
- [16] PN-EN 13104:2009: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie zestawów kołowych napędnych. Zasady konstrukcji.
- [17] PN-EN 13261:2009: Kolejnictwo. Zestawy kołowe i wózki. Osie. Wymagania dotyczące wyrobu.
- [18] PN-93/K-91045: Pojazdy trakcyjne. Osie zestawów kołowych. Wymagania i badania.
- [19] Raport ORE/ERRI B136/Rp.11/D: Zestawy kołowe z nasazanymi łożyskami tocznymi. Konstrukcja, utrzymanie i standaryzacja. Obliczenie osi zestawów kołowych dla wagonów towarowych i osobowych. Utrecht, kwiecień 1979.
- [20] OR-9666: „Diagnostyka układów biegowych pojazdów tocznych i trakcyjnych.” IPS Tabor Wrzesień 2010.