

EMIL CEGIELNY*

BADANIE PRZYCZYŃ USZKODZENIA ŚRUB STOPOWYCH PRZYTWIERDZENIA SZYN DO PODKŁADÓW TYPU K

RESEARCH INTO THE CAUSES OF DAMAGE OF THE ALLOY BOLTS FASTENING RAILS TO THE K TYPE CROSSTIES

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych elementów przytwierdzenia sztywnego szyn do podkładów kolejowych typu K, to jest śrub stopowych i nakrętek. Zawarto wyniki badań składu chemicznego i mikrostruktury materiału śrub, własności mechanicznych oraz badania metaloznawcze wykonane na przełamach i przekrojach uszkodzonych śrub wraz z nakrętkami. Postawiono hipotezę dotyczącą przyczyny i mechanizmu zrywania się śrub stopowych w trakcie montażu i demontażu.

Słowa kluczowe: śruby stopowe i nakrętki, skład chemiczny, własności mechaniczne, parametry gwintu, mechanizm uszkodzenia śrub

Abstract

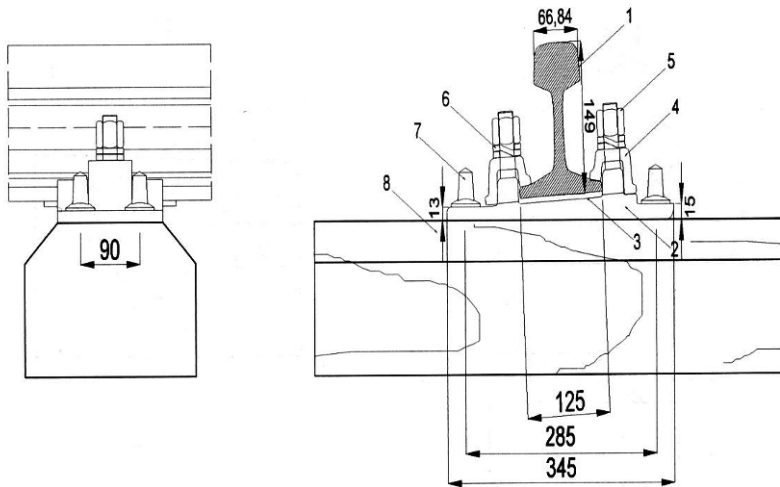
The paper presents laboratory test results and analytical calculations of components of rigid attachment of rails to sleepers type K, it is alloy bolts and nuts. The article contains the research results of chemical composition and microstructure of the bolts material, mechanical properties, analysis of stress in fasteners elements and metallurgy research made on breakthroughs and cross-sections damaged bolts and nuts. The hypothesis concerning the causes and mechanism of breaking the bolt alloy during assembly and disassembly

Keywords: alloy bolts and nuts, chemical composition, mechanical properties, thread parameters, bolts failure mechanism

* Dr inż. Emil Cegielnny, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Śruby stopowe wraz z nakrętkami są elementami składowymi przytwierdzenia sztywne szyn do podkładów typu K, powszechnie eksploatowanego przez koleje polskie. Dzięki przytwierdzeniom szyn do podkładów dwa toki szynowe tworzą wraz z podkładami rodzaj ustroju ramowego spoczywającego w warstwie podsypki. Rozwiązanie konstrukcyjne przytwierdzenia typu K wraz z pozostałymi elementami składowymi zilustrowano na rysunku 1.



Rys. 1. Przytwierdzenie typu K szyny 49E1 (S49) do podkładu drewnianego [1]: 1 – szyna, 2 – podkładka żebrowa, 3 – przekładka podszynowa, 4 – łapka, 5 – śruba stopowa z nakrętką, 6 – pierścień sprężysty podwójny, 7 – wkręt, 8 – podkład drewniany

Fig. 1. The K-type fastening of the 49E1 (S49) rail to the wooden crosstie [1]: 1 – rail, 2 – pad, 3 – sub-rail separator, 4 – clip, 5 – alloy bolt with a nut, 6 – double resilient ring, 7 – screw, 8 – wooden crosstie (sleeper)

Wartość pionowej siły docisku stopki szyny w przytwierdzeniu nie jest jednoznacznie określona ze względu na różnorodne rozwiązania konstrukcyjne przytwierdzeń stosowanych w praktyce. Zróżnicowanie typów przytwierdzeń wynika z odmiennych doświadczeń poszczególnych kolei, przyjmujących różne założenia przy opracowywaniu ich koncepcji [2]. Według jednego z nich możliwe jest jedynie wspólne pionowe przemieszczanie szyny wraz z przytwierdzonym do niej podkładem. Zgodnie z drugim założeniem dopuszczalny jest natomiast ruch pionowy szyny w stosunku do podkładu, około 1 mm, z zachowaniem dobrego prowadzenia zestawu kołowego [1, 2].

Pionowa siła docisku stopki szyny w przytwierdzeniu powinna zapewnić wystarczający opór przeciwko podłużnemu przemieszczaniu się szyn po podkładach. Przytwierdzenie powinno utrzymywać również szerokość toru i poprzeczne pochylenie szyny, a w przypadku podkładów betonowych także stanowić izolację między szyną a podkładem. W przypadku przytwierdzeń eksploatowanych przez PKP pionowa siła docisku stopki szyny powinna wynosić 9,0–10,0 kN [2].

Celem przeprowadzonych badań było określenie mechanizmu uszkodzenia omówionych elementów złącznych do przytwierdzania szyn, polegającego na zrywaniu się śrub stopowych wraz z nakrętkami. Uszkodzenia tego typu stwierdzano zarówno podczas montażu, jak i demontażu przytwierdzenia.

2. Skład chemiczny i mikrostruktura materiału śrub

Materiał do badań składu chemicznego pobrano odrębnie z dwu śrub wybranych losowo z różnych serii. W badaniach wykorzystano metodę spektrometryczną. Otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

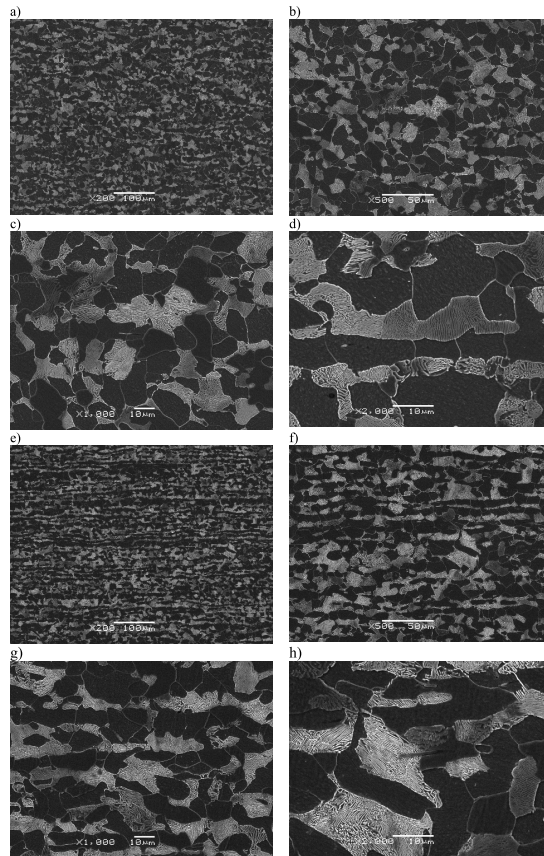
Wyniki analizy składu chemicznego próbek pobranych ze śruby 1 i 2

Specyfikacja	Zawartość pierwiastków [% masowe]								
	C	MN	SI	P	S	NI	CR	CU	Inne
Śruba 1	0,345	0,607	0,231	0,018	0,010	0,024	0,065	0,060	MO = 0,008 AL = 0,025 V = 0,0004 TI = 0,0008
Śruba 2	0,360	0,689	0,238	0,018	0,015	0,030	0,051	0,056	
Wymagania wg PN ISO 898-1:2001 kl4.6	max. 0,55	–	–	max. 0,05	max. 0,06	–	–	–	–

Na podstawie uzyskanych wyników w badaniach składu chemicznego można wnioskować, że śruby 1 i 2 wykonano z niestopowej stali konstrukcyjnej węglowej o zawartości węgla około 0,35%, zgodnie z wymaganiami zawartymi w PN-EN ISO 898-1:2001; kl. 4.6.

Mikrostrukturę materiału badanych śrub 1 i 2 przedstawiono na rysunku 2. Jest ona ferrytyczno-perlityczna i odpowiada podanej w tabeli 1 zawartości węgla. Pasowość mikrostruktury materiału śruby nieuszkodzonej 2 jest nieznacznie większa.

Badania metalograficzne przeprowadzone na próbce wzdłużnej, wyciętej ze śruby 2, nie ujawniły mikropęknięć we wrębach gwintu. W mikrostrukturze warstwy wierzchniej śruby 2 stwierdzono jedynie niewielkie wady strukturalne pochodzące od wtrąceń niemetalicznych.



Rys. 2. Mikrostruktura w części centralnej: a–d) śruba 1, e–h) śruba 2

Fig. 2. The microstructure in the central part: a–d) bolt 1, e–h) bolt 2

3. Twardość i wytrzymałość śrub na zrywanie

Badania twardości wykonano z użyciem twardościomierza Brinella firmy Alpha kulką o średnicy 10 mm i obciążeniu 9807 N. Badania wykonano zgodnie z procedurą badawczą PB/2-9/LB3 oraz normami PN-EN ISO 6506-1 i PN-EN ISO 898-1:2001. Badaniami objęto śruby serii SZ07 i nakrętki ZC. Dla celów porównawczych badaniami objęto również śruby innego wykonawcy oznaczone symbolem Z08. Uzyskane wyniki zamieszczono w tabeli 2.

Zestawione w tabeli 2 wyniki świadczą, że wszystkie zarejestrowane wartości twardości śrub i nakrętek mieszczą się w przedziale wartości dopuszczalnych, w pobliżu wartości średnich.

Tabela 2

Twardość śrub stopowych i nakrętek

Wyszczególnienie	Śruby stopowe serii SZ 07			Śruby stopowe serii Z 08			Nakrętki serii ZC		
Wyniki pomiarów	149	148	146	150	152	148	167	169	165
HB _{sr}	147,70			150,00			167,00		
Wymagania wg PN-EN ISO 898-1:2001	1146209			114–209			–		

Badanie wytrzymałości śrub na zrywanie polegało na obciążeniu śruby w maszynie wytrzymałościowej siłą powodującą jej zerwanie, przy czym wolna długość gwintu była większa od 22 mm. Próby zrywania śrub serii SZ06, SZ07 i Z08 wykonano w IMP w Warszawie na hydraulicznej maszynie wytrzymałościowej firmy Otto Wolper Werke model U35 o zakresie siłomierza 0–350 kN. Badania przeprowadzono zgodnie z procedurą badawczą PB/2-1/LB4 i normą PN-EN ISO 898-1:2001. Otrzymane wartości wytrzymałości na zrywanie zamieszczono w tabeli 3.

Z zamieszczonych w tabeli 3 wyników pomiarów można wnioskować, że wszystkie z badanych śrub, tj. serii SZ06, SZ07, Z08, spełniają wymagania pod względem wytrzymałości na zrywanie.

Tabela 3

Wytrzymałość na zrywanie śrub stopowych serii SZ i Z

Wyszczególnienie	Śruby stopowe serii SZ 06			Śruby stopowe serii SZ 07			Śruby stopowe serii Z 08		
Siła zrywająca [kN]	199,0	197,0	198,0	208,0	207,0	202,0	201,0	203,0	199,0
				199,0	199,0	200,0			
Wartość średnia	198,0			202,5			201,00		
Wymagania wg PN-EN ISO 898-1:2001	min. 121,0			min. 121,0			min. 121,0		

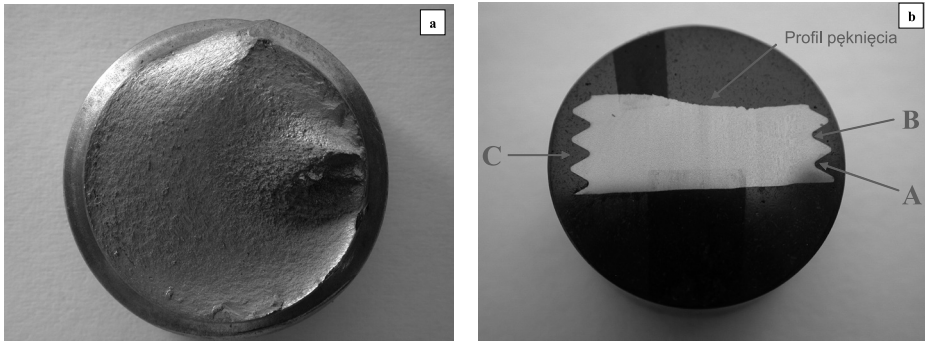
4. Badania metaloznawcze śrub uszkodzonych

Badania metaloznawcze śrub uszkodzonych wykonano w dwu etapach. W etapie pierwszym wykonano badania metalograficzne przełomu śruby nr 1 wybranej losowo ze zbioru śrub uszkodzonych dostarczonych do badań. W drugim etapie do badań wybrano losowo jedną z trzech śrub uszkodzonych w trakcie badań eksploatacyjnych. Zerwaną śrubę wraz z zablokowaną na niej nakrętką oznaczono numerem 3.

Ogólny widok przełomu śruby 1 przedstawiono na rys. 3. Na mikrofotografiach przedstawionych na rysunkach 4 i 5 pokazano szczegóły topograficzne przełomu śruby wykonanej z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) JS-50LV firmy Jeol.

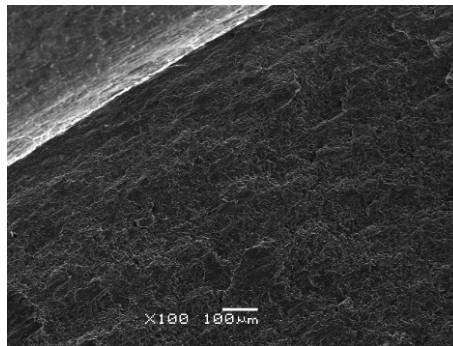
Szczegółowe obserwacje mikroskopowe wykazały, że pęknięcie śruby 1 powstało na skutek przekroczenia krytycznej wartości naprężeń stycznych (ścianania). Efekt ich działania objawia się w postaci gładkiej powierzchni przelomu z charakterystycznym stożkiem na jej powierzchni. Taki kształt powierzchni przelomu obserwowano na wszystkich uszkodzonych śrubach, które poddano badaniom wizualnym.

Na powierzchni przelomu śruby 1, we wrębie gwintu, zauważyć można zarodki szczelin zmęczeniowych, co przedstawiono na mikrofotografiach 6–7. Badania metalograficzne wykonano na próbce wzdłużnej, wyciętej ze śruby 1, po polerowaniu i trawieniu 4-procentowym azotalem. Badania te ujawniły również zarodki pęknięć występujące we wrębach gwintu śruby 1. Mikropęknięcia te niewątpliwie mogły ułatwić proces ścianania śruby 1.



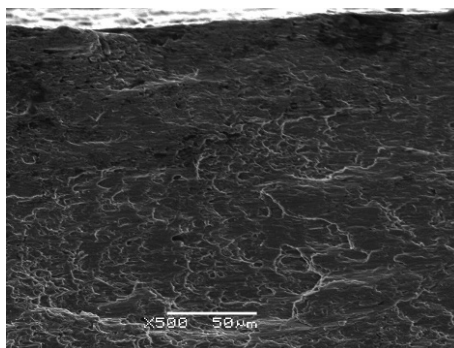
Rys. 3. Próbkę metalograficzną pękniętej śruby 1: a) zdjęcie makroprzelomu, b) widok przekroju poprzecznego z profilem pęknięcia, A, B, C – analizowane wręby gwintu

Fig. 3. The metallographic sample of the fractured bolt 1: a) the picture of a macro-crack, b) the cross-section with a crack profile, A, B, C – the analyzed grooves of the thread



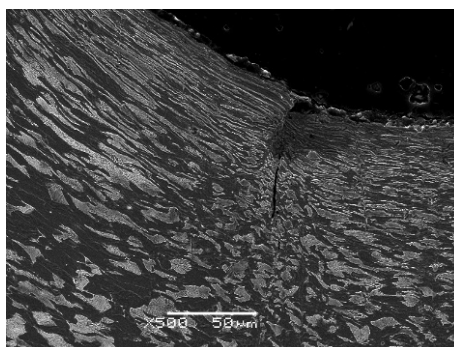
Rys. 4. Topografia przelomu śruby 1 w pobliżu wrębu gwintu

Fig. 4. The topography of the bolt 1 fracture near the thread groove



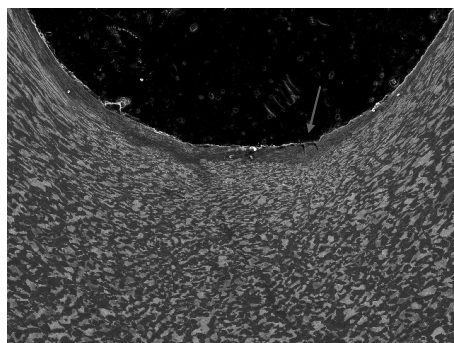
Rys. 5. Topografia przelomu śruby 1 – mechanizm pęknięcia ciągliwego pod wpływem działania naprężeń stycznych

Fig. 5. The topography of the bolt 1 fracture – the mechanism of ductile cracking under shear stress



Rys. 6. Widok mikropęknięcia we wrębie gwintu w punkcie A

Fig. 6. A micro-crack in the thread groove in point A



Rys. 7. Widok wrębu gwintu B w próbce 1 z widocznymi mikropęknięciami oznaczonymi strzałką

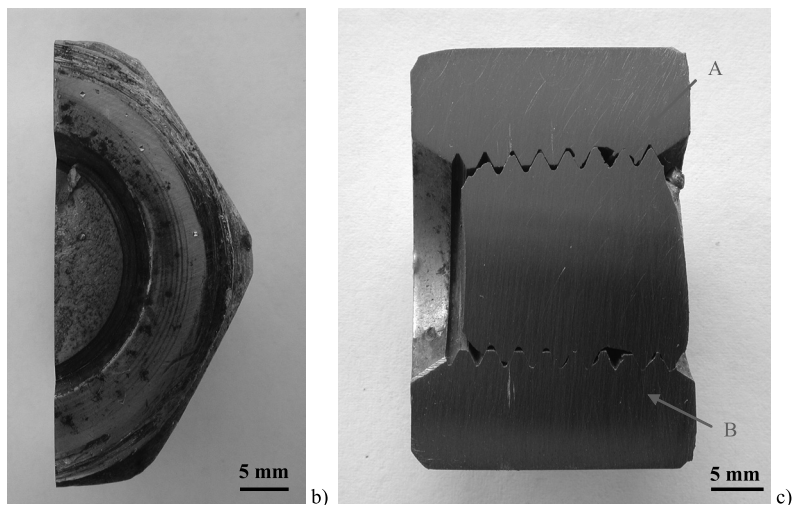
Fig. 7. Thread B groove in sample 1 with visible micro-cracks marked with an arrow

Źródłem mikropęknięć we wrębach gwintu śruby mogą być również błędy kształtu gwintu nakrętki lub nadmierny luz w połączeniu. Nakrętki z niewłaściwie ukształtowaną powierzchnią gwintu w obszarze bruzd lub z „mimośrodowym” zarysem gwintu powodują, że zwoje gwintu nakrętki wywołują odkształcenia plastyczne gwintu śruby wskutek „rozpie-
 rania” wrębów, w wyniku którego dochodzi do koncentracji naprężeń i naruszenia ciągłości struktury we wrębach (bruzdach) śruby.

5. Badania metaloznawcze zerwanej śruby i nakrętki

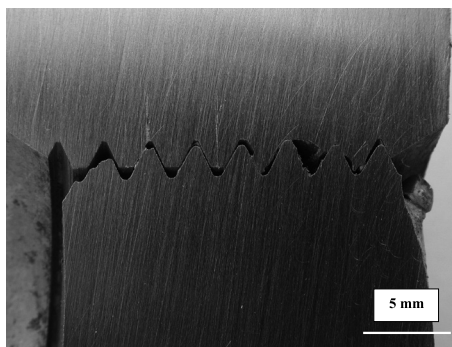
Zerwane złącze śrubowe w dalszych badaniach oznaczono cyfrą 3. Analiza faktograficzna przeprowadzona z zastosowaniem mikroskopu stereoskopowego wykazała, że śruba 3 pękła również na skutek ścinania. Dla potrzeb badań mikroskopowych połączenia gwintowego wewnątrz nakrętki, z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), nakrętkę wraz z fragmentem zerwanej śruby przecięto wzdłuż osi. Po szlifowaniu uzyskano przekrój, którego fotografie przedstawiono na rysunkach 8–10. Z analizy przekroju wynika, że połączenie gwintowe wewnątrz nakrętki jest zniszczone na dwóch dolnych zwojach roboczych. Makroskopową fotografię uszkodzonego gwintu śruby przedstawiono na rysunku 11.

Na podstawie szczegółowych badań mikroskopowych wykonanych na przekroju połączenia śruby i nakrętki, którego nie udało się rozdzielić, stwierdzono, że na przekroju występują obszary wyraźnego „nieprzylegania” powierzchni roboczych gwintu śruby i nakrętki oraz obszary obrazujące „szczepienie” materiału śruby i nakrętki na powierzchniach współpracy gwintów. Mikrofotografie takich stref przedstawiono na rysunkach 12 i 13.



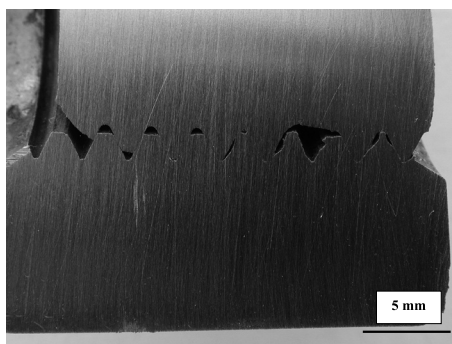
Rys. 8. Fragment śruby 3 z nakrętką po przecięciu z zaznaczonymi miejscami szczegółowej analizy A i B

Fig. 8. A fragment of bolt 3 with a nut after cutting with the marked spots of the detailed analyses A and B



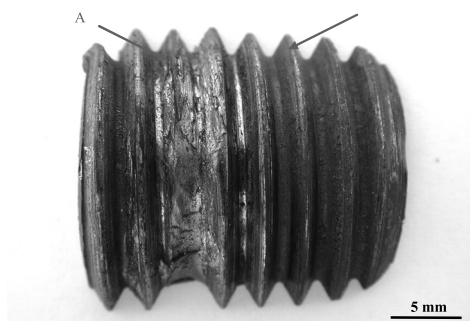
Rys. 9. Powiększony obszar A z rys. 8

Fig. 9 The enlarged area A from Fig. 8



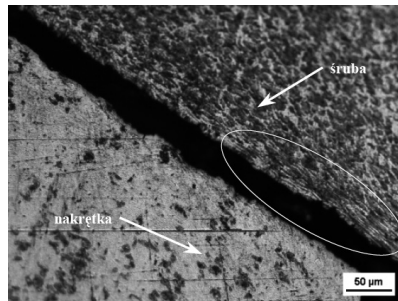
Rys. 10. Powiększony obszar B z rys. 8

Fig. 10. The enlarged area B from Fig. 8



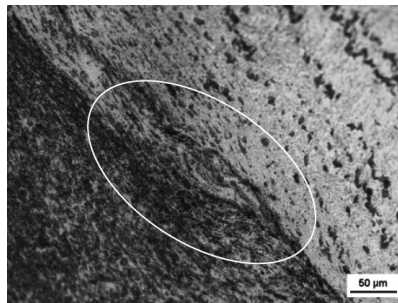
Rys. 11. Śruba 3 z katastrofalnym uszkodzeniem gwintu

Fig. 11. Bolt 3 with severe thread damage



Rys. 12. Widok przecięcia połączenia śruby z nakrętką w strefie złomu. Widoczny zgniot struktury powstały w procesie walcowania gwintu

Fig. 12. The view of the cut of the bolt and a nut in the break zone. A visible deformation of the structure formed in the process of roll-threading



Rys. 13. Widok strefy połączenia nakrętki ze śrubą. Widoczny zrost tarciový śruby z nakrętką

Fig. 13. The view of the nut – bolt fastening zone. A visible bolt – nut friction connection

Rysunki 9 i 12 potwierdzają i obrazują wielkość występującego luzu pomiędzy powierzchnią gwintu śruby i nakrętki powyżej strefy złomu. Natomiast na rysunkach 10 i 13 widoczna jest strefa wyraźnego „zrostu tarciového” materiału śruby i nakrętki, będąca trwałym połączeniem stykających się obszarów trących powierzchni metalowych gwintu na skutek dyfuzji poprzez pierwotną granicę ich rozdziału [4]. Zrastanie tarciové powstaje przy dużych odkształceniach plastycznych oraz wysokiej temperaturze w mikroobszarach tarcia. Połączenie dyfuzyjne materiału śruby z materiałem nakrętki lub produkty zerwania takiego połączenia są powodem zablokowania obrotu nakrętki względem śruby. Zablokowanie obrotu nakrętki powoduje przeniesienie momentu montażowego na śrubę, konsekwencją którego jest „ścięcie” śruby w płaszczyźnie najmniejszego przekroju, wskutek przekroczenia dolnej granicy plastyczności materiału śruby (ReL).

6. Badania uzupełniające

W ramach badań uzupełniających dokonano oceny jakości wykonania gwintu śrub i nakrętek pod względem wymiarowym i kształtowym oraz określono wartość naprężenia roz-

ciągającego w śrubie stalowej M22×72, przy obciążeniu nominalnym momentem montażowym $M = 180$ [Nm].

Z będących w dyspozycji par elementów złącznych do pomiaru parametrów wymiarowych gwintu śrub i nakrętek wybrano losowo 4 pary. Śruby i nakrętki były wykonane w klasie zgrubnej (C). Gwint śrub wykonano w klasie zgrubnej 8 g, a gwint nakrętek w klasie 7 H.

Pomiary gwintu przeprowadzono na maszynie dwuwspółrzędnościowej ZKM firmy C. Zeiss o rozdzielczości układów cyfrowych pomiaru przemieszczeń 0,001 mm. Śruby i nakrętki przed pomiarami dokładnie oczyszczono z zabrudzeń i ponumerowano. Śruby były montowane w uchwycie pryzmowym i orientowane w płaszczyznach pionowej i poziomej. Pomiar był realizowany w dwóch płaszczyznach dla każdej ze śrub. Pierwszą płaszczyzną była płaszczyzna równoległa do stopy kształtowej, drugą – płaszczyzną prostopadłą do niej. Szczegółowe wyniki pomiarów śrub i nakrętek oraz ich uśrednione wartości zmierzonych parametrów gwintu w obszarze współpracy śruby i nakrętki zawarto w opracowaniu [7].

Otrzymane z pomiarów wartości podstawowych parametrów gwintu śrub wskazują na stosunkowo dobrą jakość jego wykonania. Wszystkie otrzymane wyniki znalazły się w polu tolerancji wymiarowej. Gwinty w nakrętkach wykazują gorsze zachowanie wymiarów średnicowych niż w przypadku śrub. Dotyczy to przede wszystkim średnicy podziałowej. Znaczne odchyłki w tym przypadku mogą powodować powstawanie nadmiernego luzu między nakrętką a śrubą. Może być on powodem zwiększenia nacisków powierzchniowych na zwojach roboczych śruby, a w konsekwencji powodować ich uszkodzenie.

Zauważono również pewne nieprawidłowości w przebiegu zarysu gwintu, zwłaszcza w obszarze bruzd. W przypadku niektórych śrub sam zarys był wykonany prawidłowo, jednak ze zróżnicowaniem w obszarze bruzd. W przypadku nakrętek stwierdzono, że powierzchnie gwintu były chropowate z wyraźnymi błędami kształtu, które mogą uniemożliwiać prawidłową współpracę z gwintem śruby.

Wartości naprężeń występujących w śrubie stopowej obciążonej momentem montażowym $M = 180$ Nm określono na podstawie obliczeń analitycznych i MES [7]. Obliczenia naprężenia rozciągającego σ_r i naprężenia zastępczego przeprowadzono metodą analityczną. Dla potrzeb obliczeń metodą elementów skończonych (MES) wykonano dokładny model CAD 3D badanej śruby oraz współpracującej z nią nakrętki w programie CATIA V5. Model CAD został przeniesiony do programu do analizy MES ANSYS. Do analizy MES wykorzystano element skończony solid187 (dziesięciowęzłowy element 3D wyższego rzędu). W analizie uwzględniono kontakt między nakrętką a śrubą. Jako obciążenie przyjęto wartość siły rozciągającej $Q = 35\,290$ N pochodzącej od momentu montażowego. W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że wartość naprężenia rozciągającego w śrubie stopowej M22×72, obciążonej nominalnym momentem montażowym $M = 180$ Nm, nie przekracza wartości dopuszczalnej wynikającej z normy PN-EN ISO 898-1 ($ReL = 240$ MPa). W przypadku zablokowania nakrętki ze śrubą podczas demontażu (rozkręcania) połączenia momentem $M = 180$ Nm w rdzeniu śruby powstają naprężenia o wartości 274,18 MPa, przekraczające dopuszczalną wartość ReL , powodujące zerwanie śruby.

7. Wnioski

Zrealizowane wielokierunkowe badania materiałowe, obliczenia analityczne i MES oraz pomiary parametrów geometrycznych gwintu, śrub i nakrętek upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- materiał, z którego wykonane są śruby, pod względem składu chemicznego, własności mechanicznych oraz mikrostruktury, spełnia wymagania obowiązujących aktów normatywnych,
- obciążenie śruby stopowej momentem montażowym $M = 180 \text{ Nm}$, z zastosowaniem poprawnie wykonanych elementów złącznych, pod względem wymiarowo-kształtowym i materiałowym, nie powoduje przekroczenia dopuszczalnej wartości naprężenia rozciągającego,
- uszkadzające się śruby serii SZ są wykonane poprawnie pod względem wymiarowym i kształtowym, niewielkie odchyłki w wykonaniu promienia bruzd nie powinny być przyczyną ich uszkodzenia się,
- zbadane nakrętki serii SZ charakteryzują przekroczenia maksymalnej wartości granicznej średnicy podziałowej i błędy kształtu gwintu, co prowadzi do powstania zbyt luźnego lub nadmiernie ciasnego połączenia ze śrubą, co stwierdzono w przypadku analizowanej pary nr 3,
- bezpośrednią przyczyną uszkodzenia (ścianienia) śrub badanych serii są adhezyjne zrosty tarcie powierchni trących gwintu śruby i nakrętki powstające wskutek dużych nacisków na współpracujących powierzchniach gwintu spowodowanych błędami kształtowo-wymiarowymi wykonania gwintu nakrętek.

Jednym z podstawowych wariantów występowania zużycia adhezyjnego jest tarcie suche na powierzchniach nośnych połączenia [6]. W analizowanym i badanym przypadku błędy wymiarowo-kształtowe wykonania nakrętki prowadzą do niekorzystnego rozkładu nacisków na powierzchni gwintu, co przy braku smarowania śrub lub miękkich powłok metalowych (miedź, kadm) prowadzi do powstania między wierzchołkami nierówności przeciwległych powierzchni połączeń adhezyjnych. Powierzchnie w wyniku wzajemnych oddziaływań ulegają zgrzaniu lub zespawaniu, tworząc w rezultacie tzw. mikrozgrzeiny lub mikrospoiny.

Zaobserwowano, że zrywanie śrub podczas odkręcania następuje po kilku obrotach nakrętki. Analiza uszkodzonych połączeń prowadzi do postawienia hipotezy, że w chwili rozpoczęcia odkręcania następuje zerwanie zgrzein i spoin, powstają głębokie wrywania materiału, a produkty zużycia wypełniają objętość powstałą przez luzy w połączeniu. Z chwilą gdy objętość produktów zużycia przekroczy objętość wywołaną luzami, następuje zablokowanie nakrętki i śruby, co powoduje jej zerwanie w miejscu osłabienia rdzenia.

L i t e r a t u r a

- [1] *Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych o szerokości toru 1520 i 1524 mm*, Zamość 2007.
- [2] *Towpik K., Infrastruktura transportu kolejowego*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.
- [3] *Malinowski J., Jakubiec W., Płowucha W., Pomiar gwintów w budowie maszyn*, WNT, Warszawa 2008.
- [4] *Hebda M., Wachal A., Trybologia*, WNT, Warszawa 1980.
- [5] *Lawrowski Z., Tribologia, tarcie, zużywanie i smarowanie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [6] *Łuczak A., Mazur T., Fizyczne starzenie elementów maszyn*, WNT, Warszawa 1981.
- [7] *Ustalenie przyczyny występowania wad elementów złącznych – śrub stopowych M22/72 i nakrętek M22 firmy Connector S.C.*, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.