Seria: TRANSPORT z. 14

Nr kol. 1048

Jan BROS Adam TUŁECKI

Instytut Pojazdów Szynowych Politechnika Krakowska

BADANIA MODELOWE WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ ELEMENTÓW POŁĄCZEŃ WCISKOWYCH W ZESTAWACH KOŁOWYCH

> Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wytrzymałości zmęczeniowej modelowych połączeń wciskowych w aspekcie ich zastosowania do montażu kolejowych zestawów kołowych. Przeprowadzone badania uwzględniały wpływ metody montażu, obróbki powierzchniowowzmacniającej oraz powłok ochronnych na wytrzymałość zmęcezniową.

1. WPROWADZENIE

Zapewnienie wysokiej jakości połączeń wciskowych elementów zestawów kołowych wymaga zastosowania określonych zabiegów technologicznych oraz nowych metod montażu. Analiza literaturowa przedmiotu oraz charakterystyka konstrukcyjno-funkcjonalna i tribologiczna, pozwala na ustalenie kierunków prac zmierzających do podwyższania jakości połączeń wciskowych. Kierunki te obejmują wytrzymałość statyczną połączenia, wytrzymałość zmęczeniową elementów połączenia, zabezpieczenie przed zużyciem typu fretting, powtarzalność montażu oraz obniżenie naprężeń montażowych i odkształceń elementów połączenia.

Przeprowadzone badania wstępne [1] wykazały, że wytrzymałość statyczna połączeń skurczowych bez powłok ochronnych na powierzchniach nośnych, jest o 30% wyższa od tradycyjnych połączeń wtłaczanych.

Zastosowanie w połączeniach skurczowych powłok ochronnych, prowadzi do dalazego wzrostu wytrzymałości statycznej połączenia nawet o 80%. Z przebadanych materiałów powłokowych do dalszych badań postanowiono zakwalifikować powłoki z cynku oraz siłaku M-101. Materiał tych powłok jest stosunkowo miękki tak, że względny ruch pomiędzy kojarzonymi powierzchniami jest przejmowany przez powłokę. Efektem tego jest niedopuszczenie do zatarcia powierzchni, jak również do powstania mostków międzymetalicznych. Tym samym jest spełniony warunek zabezpieczenia przed zużyciem typu frettning oraz uszkodzeniami o charakterze adhezyjnym podczas rozłączania połączenia wciskowego. Dla ustalenia wpływu materiałów powłok na wytrzymałość zmęczeniową elementów połączenia, zostały podjęte dalsze badania modelowe. Przedstawione w niniejszej pracy wyniki uwzględniają również wpływ metody montażu (połączenia wtłaczane i skurczowe) oraz rodzaju obróbki powierzchniowo-wzmacniającej czopa spoczynkowego.

2. CEL, ZAKRES I KONCEPCJA BADAŃ

Celem przeprowadzenia badań była ocena istotności wpływu wybranych czynników technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową elementów z połączeniami wciskowymi. Zmienne czynniki technologiczne dotyczyły metody montażu połączeń wciskowych, obróbki powierzchniowo-wzmacniającej i rodzaju powłok ochronnych na powierzchni nośnej połączenia. Przyjęty cel zakładał identyfikację kwalitatywną funkcji obiektu badań o postaci ogólnej:

 $Z = F(X_{L})$ przy C = const

gdzie:

Z - czynnik wynikowy,

X_L - czynniki badane,

C - czynniki stałe.

Czynnik Z stanowiła wytrzymałość zmęczeniowa G₁ elementów połączenia modelowego. Zbiór czynników badanych, na podstawie analizy literaturowej i przeprowadzonych badań wetępnych [1], został ograniczony i przyjęty jako:

X₁ = M - metoda montażu,

X₂ = OP - rodzaj obróbki powierzchniowo-wzmacniającej,

X_z = P = materiał powłoki.

Funkcja obiektu badań przyjmie więc postać:

 $G_{-1} = F \leq M, OP, P >$

Jako czynnik stały przyjęto w modelowym połączeniu wartość wcisku.

Ustalone warianty technologiczne próbek zestawiono w tablicy 1, natomiast parametry procesów technologicznych obróbek powierzchniowo-wzmacniających w tablicy 2.

Podane parametry odpowiadaję wariantowi obróbki, który w badaniach na próbkach gładkich uzyskał najwyższę wytrzymałość zmęczeniowę [2]. Grubość powłoki (cynk, silak) była wliczona do wartości wcisku, który został przyjęty w zakresie 20-25 µm.

Tablica 1

Lp.	Czynnik badany	Wariant technologiczny		
1	Metoda montażu	połączenie wtłaczane – M ₁ połączenie skurczowe – M ₂		
2	Obróbka powierz- chniowo-wzmacnia- jąca	ulepszanie cieplne – OP ₁ śrutowanie – OP ₂ azotowanie – OP ₃ hartowanie powietrzchniowe – OP ₄		
3	Materiał powłoki	cynk - P ₁ silak M-101 - P ₂		

Warianty technologiczne próbek do badań wytrzymałości zmęczeniowej

Tablica 2

Parametry procesów technologicznych obróbek powierzchniowo-wzmacniających

Azotowanie		Śrutowanie		Hartowanie powierzchniowe (indukc.)	
Temparatura [k	853	czas [min]	0,5	I _s [A]	1,4
Czas [h]	4	ciśn.zasil. [atm]	6	I _a [A]	2,0
Atmosfera	100% NH ₃	rodz.śrutů	cięty z drutu stalowego	v _a [kv]	4,3
Stopień dysoc.	35%	skład mieszanki	6% Ø 0,8 24% Ø 1,0 70% Ø 1,2	szybkość przesuwu wzbudnika V [mm/s]	3,3
Chłodzenie	szybkie	średnica dyszy [mm]	8	wstępne wygrz, na po- stoju t [s]	1
Starzenie	7 h przy 373 K	odl. dyszy od próbki [mm]	250	chłodzenie	woda
Wydzielenia	warstwa	typ płytki kontrolnej Almena	С	średnice wewn. wzbudnika	12,5
Przesycanie	przesyc.	strzałka ugięcia płytki Almena [mm]	0,20	średnice otworów natrysko- wych [mm]	1

63

3. METODYKA BADAN

Model połączenia wciskowego został dostosowany do maszyny zmęczeniowej typu NU (prod. ZSRR), a jego wymiary dobrano z zachowaniem podobieństwa geometrycznego z obiektem rzeczywistym 1 . Oprawa połączenia 1 (rys. 1) została wykonana ze stali St5P, natomiast czop 2 ze stali P4O (wg PN-83/ H-84027).



Rys. 1. Próbka do badań zmęczeniowych połączeń wciskowych 1 – oprawa, 2 – czop Fig. 1. Sample to the fatique research of forced in joints 1 – mounting, 2 – journal

Przed montażem połączeń modelowych dokonano oceny jakości powierzchni nośnych elementów łączonych, poprzez pomiar chropowatości, prostoliniowości i kołowości. Średnia wartość parametru chropowatości powierzchni R_a wynosiła 0,21,µm dla opraw i 0,16,µm dla czopów. Odchyłki prostoliniowości i kołowości odpowiadają dużej dokładności kształtu (klasa IV, V) zgodnie z PN-68/M-02138. W przypadku próbek śrutowanych oceny jakości powierzchni nie dokonywano.

Połączenia wtłaczane uzyskano w wyniku wprasowania czopa w otwór oprawy na prasie przy zastosowaniu specjalnego przyrządu, umożliwiającego współosiowe prowadzenie czopa względem oprawy. Natomiast dla uzyskania połączenia skurczowego oprawę nagrzewano w piecu komorowym do temp. 570 K i następnie swobodnie osadzano na czopie próbki.

Warunki przeprowadzenia prób zmęczeniowych były zgodne z wymogami przedmiotowych norm PN-75/H-04325, PN-76/H-04326. Do badań zastosowano maszynę zmęczeniową typu NU, której schemat obciążenia stałym momentem zginającym M_g przedstawiono na rys. 2. Po dokonanym montażu próbek przeprowadzono pomiary niewspółosiowości, która zgodnie z instrukcją obsługi maszyny zmęczeniowej nie powinna przekraczeć 0,03 mm.

Trwałą wytrzymałość zmęcezniową \mathcal{G}_{-1} wyznaczono przy podstawie N_G = 10^7 cykli i częstotliwości zmiany naprężeń 45 Hz. Przyjęty program badań odpowiadał programowi statycznemu zdeterminowanemu kompletnemu [3].



Rys. 2. Schemat obciążenia maszyny zmęczeniowej typu NU (prod. ZSRR) Fig. 2. Thescheme of the loading of the fatique-testing machine

Schemat realizacji programu, przyjmując warianty próbek podane w tablicy 1, przedstawiał się następująco:

1) $M_1 = OP_1$ 2) $M_2 = OP_1$ 3) $M_2 = OP_2$ 4) $M_2 = OP_3$ 5) $M_2 = OP_4$ 6) $M_2 = P_1 = OP_1$ 7) $M_2 = P_1 = OP_2$ 8) $M_2 = P_1 = OP_3$ 9) $M_2 = P_1 = OP_4$ 10) $M_2 = P_2 = OP_1$ 11) $M_2 = P_2 = OP_3$ 13) $M_2 = P_2 = OP_4$

W zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej przyjęto przebieg krzywej zmęczenia w układzie bilogarytmicznym jako:

lg N = C - m lgG

gdzie:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\lg G_{i} - \lg \overline{G}) \cdot (\lg N_{i} - \lg \overline{N})}{\sum_{i=1}^{n} (\lg G_{i} - \lg \overline{G})^{2}}$$

 $C = l\bar{g}N - m l\bar{g}G$

G_i, N_i – poziom amplitudy naprężeń i odpowiadająca im liczba cykli do zniezczenia próbki.

4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Rezultaty przeprowadzonych badań wytrzymałości zmęczeniowej, dla przyjętego schematu realizacji programu, przedstawiono graficznie (rys. 3-5). Dla każdego wariantu określono trwałą wytrzymałość zmęczeniową G_{-1} oraz podano parametry m i C krzywej zmęczeniowej Wöhlera w zakresie ograniczonej wytrzymałości. Podano również równanie tej krzywej w układzie bilogarytmicznym. W tablicy 3 zestawiono wyniki badań dla wszystkich wariantów, w zakresie trwałej i ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej.

Przyjmując jako podstawę odniesienia wytrzymałość zmęczeniową dla połączeń wtłaczanych, bez powłoki, z ulepszeniem cieplnym czopa, określono współczynnik zmiany wytrzymałości zmęczeniowej dla pozostałych wariantów.

Porównując wytrzymałość zmęczeniową połączeń bez powłoki (rys. 3) można stwierdzić, że dla połączeń skurczowych trwała wytrzymałość zmęczeniowa jest o 28% wyższa od analogicznych połączeń wtłaczanych. Zaobserwowano to mimo faktu, że połączenia skurczowe charakteryzują się wyższymi naciskami powierzchniowymi, a tym samym ich wytrzymałość powinna być niższa. Jednak w procesie montażu połączeń wtłaczanych mogą zachodzić przypadki uszkodzenia powierzchni nośnych, które stają się później ogniskami pęknięć zmęczeniowych. Fakt ten potwierdzono w badaniach mikroskopowych przełomu zmęczeniowego, którego lokalizacja nastąpiła na czopie w części połączenia z oprawą. Dla połączeń skurczowych przełom zmęczeniowy występował poza powierzchnią nośną połączenia.

Połączenia wciskowe prowadzą do ok. 2-krotnego obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej w porównaniu do próbek gładkich (tablica 4). Stopień obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej uzależniony jest od metody obróbki i rodzaju powłoki naniesionej na powierzchnię nośną połączonia.

Dla połączeń skurczowych z czopem ulepszonym cieplnie, stopień obniżenia wytrzymałości w zależności od materiału powłoki wynosił 1,76-2,3, natomiast dla czopów azotowanych zawierał się w przedziale 1,52-1,86.

Stwierdzono, że wpływ obróbki powierzchniowo-wzmacniającej na wytrzymałość **zmęczeniow**ą dla próbek gładkich jest zbliżony do wytrzymałości próbek z połączeniami.

Najwyższą wytrzymałość zmęczeniową uzyskano dla próbek z połączeniem skurczowym o czopie azotowanym i pokrytym powłoką (z silaku M-101 ($G_{-1} = 440 \text{ MN/m}^2$). Również w przypadku próbek gładkich azotowanych, wytrzy-małość zmęczeniowa była najwyższa i wynosiła 670 MN/m².

Powłoki z silaku i cynku naniesione na powierzchnie nośne połączenia wpływają korzystnie na trwałą wytrzymałość zmęczeniową. Jest ona o ok.60%





Fig. 3. The fatigue strenght of the forced-in joints without coating 1 - forced-in, 2 - shrinkage shot peened journal, 3 - shrinkage surface hardened journal, 4 - shrinkage nitvided journal



Rys. 4. Wytrzymałość zmęczeniowa połączeń skurczowych z powłoką cynkową 1 - czop ulepszony cieplnie, 2 - czop śrutowany, 3 - czop hartowany powierzchniowo, 4 - czop azotowany Fig. 4. The fatigue strength of thermocompression bonding with zinc coating 1 - tempered journal, 2 - shot peened journal, 3 - surface hardened journal, 4 - nitrided journal J. Broś, A. Tułecki

89





69

Tablica 3

Lp.	Rodzaj obró b ki	⁶ -1 [MN/m ²]	m	С	Wartość zmiany wytrzym. zmęcz.
1	Połącz. wtłacz. bez powłoki, ulepsz. ciepl.	125	22,147	52,751	1,00
2	Połącz. skurcz. bez powłoki, ulepsz. ciepl.	160	30,569	74,059	1,28
3	Połącz. skurcz. bez powioki, ulepsz. ciepl. + śrutowanie	240	19,776	53,236	1,92
4	Połącz. skurcz. bez powł. ulepsz. ciepl. + azotowanie	360	20 ,6 47	59,065	2,88
5	Połęcz. skurcz. bez powł. ulepsz. ciepl. + hartowanie pow.	340	22,280	62,477	2,72
6	Połęcz. skurcz. powł. cynkowa, ulepsz. ciepl.	210	18,875	50,136	1,68
7	Połącz. skurcz. powł. cynk. ulepsz. ciepl. + śrutowanie	280	24,757	67,112	2,24
3	Połącz, skurcz, powł. cynk. ulepsz. ciepl. + azotowanie	41C	18,848	55,471	3,28
9	Połącz. skurcz. powł. cynk, ulepsz. ciepl. + hartowanie	380	21,814	62,689	3,04
10	Połącz, skurcz, powł. silak M-101, ulepsz. cieplne	200	24,261	62,285	1,60
11	Połącz. skurcz. powł. silak №101, ulepsz. ciepl. + śrutowanie	300	23,830	65,549	2,4
12	Połęcz. skurcz. powł. silak M-101, ulepsz. ciepln. + azotowanie	440	23,744	69,057	3,52
13	Połącz. skurcz. powł. silak M-101, ulepsz. ciepln. + hartowanie	390	21,391	61,857	3,12

Zestawienie wyników badań zmęczeniowych w zakresiu trwałej i ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej

Tablica 4

Lp.	Rodzaj p r óbki	ପ-1 [MN/m ²]	m	с
1	Próbka gładka ulepsz. ciepln.	370	11,916	36,46
2	Próbka gładka ulepsz. ciepln. + śrutowanie	450	17,725	53,16
3	Próbka gładka ulepsz. ciepln. + azotowanie	670	31,604	95,511
4	Próbka gładka ulepsz. ciepln. + hartowanie powierzchn.	630	19,407	60,238

Wytrzymałość zmęczeniowa próbek gładkich przy różnych wariantach obróbek powierzchniowo-wzmacniających

wyższa niż dla próbek wtłaczanych bez powłoki i o 30% wyższa od wytrzymałości zmęczeniowej dla próbek z połączeniami skurczowymi (poz. 1, 2, 6, 10 tablica 3 rys. 3). Nie stwierdzono natomiast istotnych różnic pomiędzy wytrzymałością zmęczeniową dla obu materiałów powłokowych. Charakteryzują się one zbliżoną wartością siły adhezji do materiału rdzenia 1, wobec czego efektywność wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej jest zbliżona.

Pewnych wniosków dostarczyć może analiza współczynnika pochylenia krzywej zmęczenia w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczeniowej. Jego wartość świadczy m.in. o stopniu kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych oraz o wrażliwości elementu na przeciążenie [4].

Im jego wartość jest wyższa, tym pochylenie krzywej zmęczeniowej jest mniejsze. Przyjmuje się również, że współczynnik m świadczy o głębokości warstwy utwardzonej [5]. Jednak badań w tym kierjnku nie prowadzono na obecnym etapie podjętego zadania badawczego.

W ramach badań makroskopowych przełomów zmęczeniowych dokonano obserwacji przy powiększeniu 10-krotnym.

Stwierdzono, że próbki ulepszone cieplnie wykazują przełom gruboziarnisty, szczególnie w strefie złomu doraźnego, a na powierzchni próbki istnieje jedno lub kilka ognisk zmęczeniowych (rys. 6). Pozostałe próbki (rys. 7-9 wykazują przełom drobnoziarnisty, z wyjątkiem środkowych stref (wyraźnie się odróżniających), mających charakter przełomu dorażnego o gruboziarnistej strukturze. Ogniska zmęczeniowe dla próbek azotowanych i hartowanych indukcyjnie znajdują się pod warstwą utwardzoną (rys. 8-9), natomiast dla próbek śrutowanych inicjacja pęknięcia zmęczeniowego wystąpiła na powierzchni próbki.

Przełom zmęczeniowy, szczególnie w obrębie ogniska zmęczeniowego, obserwowano również przy zastosowaniu mikroskopu elektronowego skaningowego. Na rys. 10 i 11 przedstawiono mikrowycinki złomu zmęczeniowego z wi-



Rys. 6. Przełom zmęczeniowy próbki z połączeniem skurczowym – czop ulepszony cieplnie. Pow. 10x

Fig. 6. Fatigue fracture of the sample with the termocompression bonding - tempered journal. Magnification 10x



Rys. 7. Przełom zmęczeniowy próbki z połączeniem skurczowym – czop śrutowany. Pow. 10x

Fig. 7. Fatigue fracture of the sample with the thermocompression bonding - shot peened journal. Magnification 10x



Rys. 8. Przełom zmęczeniowy próbki z połączeniem skurczowym – czop azotowany. Pow. 10x

Fig. 8. Fatigue fracture of the sample with the thermocompression bonding - nitrided journal. Magnification 10x



Rys. 9. Przełom zmęczeniowy próbki z połączeniem skurczowym – czop hartowany powierzchniowo. Pow. 10x

Fig. 9. Fatigue fracture of the sample with ≻he thermocompression bonding - surface hardened journal, Magnification 10x



Rys. 10. Mikrobudowa złomu zmęczeniowego z widocznymi pasmami poślizgu. Stal P40 w stanie ulepszonym cieplnie

Fig. 10. The microstructure of the fatigue scrap with a visible slip band. Tempered steel P40



Rys. 11. Mikrowycinek powierzchni złomu zmęczeniowego z widocznym ogniskiem pęknięcia. Stal P40 ulepszona i hartowana indukcyjnie

Fig. 11. The microsector of the fatigue scrap surface with a visible fracture focus. Tempered and induction hardened steel P40 docznymi pasmami poślizgu i ogniskiem pęknięcia dla stali P40. Szczegółowe obserwacje przełomów zmęczeniowych niezbędne dla interpretacji fizycznej stwierdzonych zjawisk będą przedmiotem dalszych prac.

5. ZAKOŃCZENIE I WNIOSKI

Jednym z podstawowych kierunków prac nad podwyższeniem jakości połączeń wciskowych w zestawach kołowych jest wytrzymałość zmęczeniowa elementów połączenia. Dla określenia wpływu wybranych metod technologicznych na wytrzymałość zmęczeniową przeprowadzono odpowiednie badania modelowe. Czynnikami badanymi były: metoda montażu (połączenie wtłaczane, skurczowe), obróbka powierzchniowo-wzmacniająca (śrutowanie, azotowanie, hartowanie powierzchniowe) oraz materiał powłoki (cynk, silak M-101).

Wyniki uzyskane z badań pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- wytrzymałość zmęczeniowa połączeń skurczowych bez powłoki jest o 28% wyższa od wytrzymałości połączeń wtłaczanych,
- stopień obniżenia wytrzymałości zmęczeniowej próbek z połączeniami wciskowymi w porównaniu do próbek gładkich uzależniony jest od metody obróbki powierzchniowo-wzmacniającej i materiału powłoki. Wynosi on 1,76-2,3 dla czopów ulepszonych cieplnie i 1,52-1,86 dla czopów azotowanych,
- najwyższę wytrzymałość zmęczeniową posiadaję próbki z połęczeniem skurczowym o azotowanym czopie z powłoką cynkową lub z silaku M-101,
- przebadane materiały powłok korzystnie wpływają na wytrzymałość zmęczeniową, a ich wpływ uzależniony jest od przyczepności do podłoża,
- w zakresie ograniczonej wytrzymałości zmęczuniowej największą wrażliwość na przeciążenia wykazują próbki z połączeniem skurczowym z czopem ulepszonym cieplnie bez powłoki (m = 30,57), natomiast najmniejszą z czopem azotowanym i powłoką cynkową (m = 18,85),
- ogniska zmęczeniowe dla próbek azotowanych i hartowanych powierzchniowo, znajdują się pod warstwą utwardzoną, natomiast dla próbek śrutowanych – na powierzchni zewnętrznej.

Biorąc pod uwagę zaprezentowane wnioski oraz całość uzyskanego materiału badawczego, dalsze prace będą dotyczyć:

- wyjaśnienia mechanizmów zaobserwowanych zjawisk zmęczeniowych (badania mikro- i makroskopowe),
- prognozowanie trwałości elementów z połączeniami wciskowymi.

LITERATURA

- [1] Praca zbiorowa Technologiczne metody zwiększania trwałości i niezawodności pojazdów szynowych. Temat 04.09 w ramach CPBP nr 02.19. Kraków 1986.
- [2] Praca zbiorowa Badania zmęczeniowe stali po wybranych rodzajach obróbki powierzchniowc-wzmacniającej. Temat T3/Z/266/81. Kraków, luty 1936.
- [3] Polański Z.: Metodyka badań doświadczalnych. PWN, Kraków 1978.
- [4] Olejnik W.N.: Ob opriedieleni dołgowiecznosti dietalej maszin po rasczietnym krivym ustałosti. "Detali Mashin" Wyp. 26, Kijów 1978.
- [5] Erlich L.B., Diniewicz W.G.: Gipoteza ob obrazowanii ustałostnych trieszczin na powierchnosti dietalej maszin. "Detali Mashin". Wyp. 21, 25, Kijów 1975.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Gąsowski

Wpłynęło do Redakcji 15.06.1989 r.

модельные исследования усталостноя прочности элементов прессовых соединении в нодвижном состазе

Резюме

Доклад содержает резултаты модельных исследований усталостной прочности прессовых соединений, а тоже возмоюность их применения во время сборки подвижного состава железнодорожного транспорта. В испытаниях принято во внимание влияние методов сборки, поверхностной пластической деформации, а тоже защитных покрытий на усталостную прочность.

A MODEL RESEARCH INTO THE FATIGUE STRENGTH OF THE FORCED-IN JOINT ELEMENTS IN THE WHEEL SETS

Summary

The paper presents the results of the fatigue strenght research of the model forced-in joints in their application to the wheel set assembling. The resarch has been taken into consideration the influence of the metod of assembly, surface strengthening treatment and protective coatings on the fatigue strenght.