*prof. dr hab. inż. Bronisław Gosowski**
*mgr inż. Michał Redecki**
*mgr inż. Łukasz Maciejewski***

Badania zmęczeniowe elastycznego połączenia stosowanego w energetyce w ciężkich maszynach wirujących

Fatigue tests of an elastic joint used in power generation in heavy rotating machines

Streszczenie. Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, których celem było określenie właściwości zmęczeniowych w warunkach niskocyklowego rozciągania i niskocyklowego zginania elastycznych połączeń wykonanych z miedzi. Badania przeprowadzono na czterech modelach, z których dwa poddano cyklicznemu rozciąganiu i zginaniu, a pozostałe dwa – wyłącznie cyklicznemu zginaniu. Badania pozwoliły potwierdzić przydatność elastycznych połączeń stosowanych w odpływie prądowym wirnika generatora.
Słowa kluczowe: wirująca maszyna elektryczna, miedziane połączenie lutowane, weryfikacja właściwości, badanie zmęczeniowe, cykliczne rozciąganie, cykliczne zginanie.

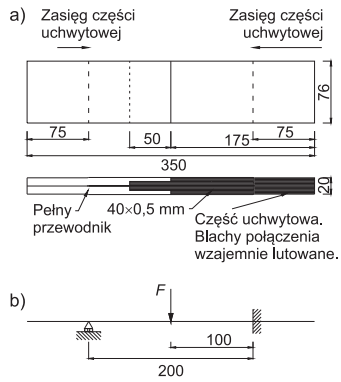
Abstract. The paper presents the experimental results of researches which the main purpose was to define fatigue characteristics of specimens made of copper in low-cycle tension and low-cycle bending. Altogether four specimens were investigated of which two were under cyclic tensile and bending testing and other two only under cyclical bend. The research allowed to confirm the applicability of the elastic joints used in power generation in heavy rotating machines.
Keywords: electrical rotating machine, soldering coppery joint, characteristics verification, fatigue test, cyclic tension, cyclical bending.

Przedmiotem badań przeprowadzonych w akredytowanym laboratorium Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej były modele połączeń, odwzorowujących projektowane elastyczne połączenie odpływu prądowego wirnika generatora, a ich celem – doświadczalne określenie zmęczeniowych właściwości połączenia oraz porównanie ich z założeniami przyjętymi na etapie projektowania.

Opis połączeń i przebieg badań

Badane próbki są odwzorowaniem projektowanego połączenia lutowanego odpływu prądowego wirnika generatora. Wykonano je z miedzianych przewodników połączonych srebrnym złączem lutowanym z zestawem miedzianych blach grubości 0,5 mm każda, ułożonych w stos wysokości 20 mm, zlutowanych w obrębie uchwytu. Część z pełnym przewodnikiem jest elementem sztywnym połączenia, natomiast część złożona z luźnych blach – elementem podatnym (rysunek 1a). Program badań został określony w instrukcji [1]. Przewiduje on zbadanie wytrzymałości zmęczeniowej na podstawie cyklicznego rozciągania oraz cyklicznego zginania (do 10 000 cykli) przy obciążeniu przykładanym z częstotliwością $f = 0{,}2$ Hz. W tym badaniu temperatura próbki, zgodnie z [1, 2], nie powinna zwiększyć się o więcej niż 20 °C (badanie przeprowadzono w temperaturze pokojowej).

* Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
** Nobo Solutions S.A.



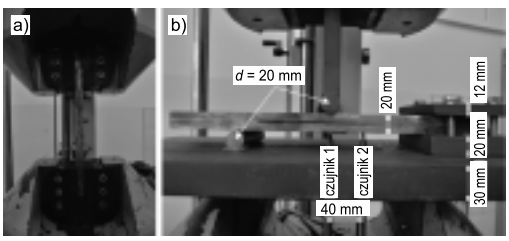
Rys. 1. Połączenie próbne (a) oraz schemat stanowiska do cyklicznego zginania (b)

W celu ujawnienia potencjalnych pęknięć w połączeniu, w trakcie doświadczeń zmęczeniowych, przeprowadzono nieniszczące badania z użyciem penetrantu. Badania penetracyjne były wykonane po skumulowanej liczbie cykli obciążenia: 500, 1000, 3000 i 10000. Przy próbie cyklicznego rozciągania maksymalna siła cyklu wynosiła 60 kN, a minimalna 0 kN (współczynnik asymetrii cyklu $R = 0$).

Próbę cyklicznego zginania przeprowadzono na specjalnym stanowisku, którego schemat przedstawia rysunek 1b. Część pełna przewodnika była przegubowo podparta, natomiast część elastyczna sztywno zamocowana. Obciążenie F przykładano w środku rozpiętości próbki tak, aby maksymalne przemieszczenie cyklu wynosiło 1 mm. Podobnie jak w próbie cyklicznego rozciągania, współczynnik asymetrii wynosił $R = 0$. Podczas przeprowadzania próby dokonano następujących modyfikacji programu badań:

- na stanowisku do cyklicznego zginania zainstalowano czujniki rejestrujące ugięcia, co pozwoliło m.in. na poznanie mechanizmu powstawania trwałych deformacji;
- postanowiono kontynuować próby cyklicznego zginania na próbkach, które przeszły pomyślnie badania na cykliczne rozciąganie.

Na fotografii 1a pokazano jedną z próbek umieszczoną w szczękach maszyny wytrzymałościowej, realizującej cykliczne rozciąganie, a na fotografii 1b – stanowisko z umieszczoną próbką przygotowaną do cyklicznego zginania.

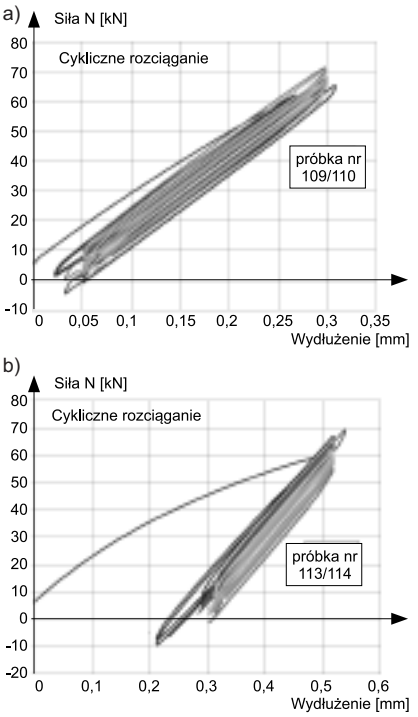


Fot. 1. Maszyna wytrzymałościowa z zainstalowaną próbką do badań: a) na rozciąganie, b) na zginanie

Badania na cykliczne rozciąganie

Badania zmęczeniowe na cykliczne rozciąganie przeprowadzono na próbkach oznaczonych nr 109/110 i 113/114. Obciążenie podłużne 0 ÷ 60 kN powtarzano z częstotliwością 0,2 Hz. Po 500, 1000, 3000 i 10000 cykli wykonywano badania penetracyjne. W większości przypadków nie wykazały

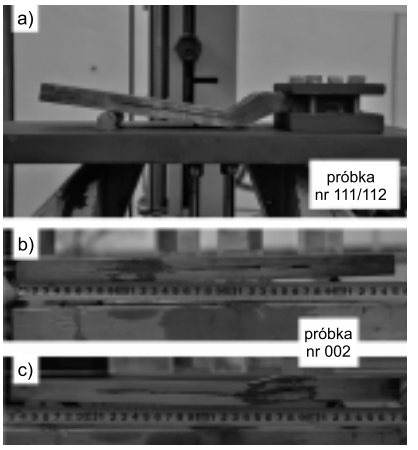
one żadnych uszkodzeń. Wyjątkiem była próbka nr 109/110, w której po 10000 cykli po obu stronach pojawiły się krótkie ryski. Na rysunku 2 przedstawiono wybrane wyniki z badań na cykliczne rozciąganie. W przypadku próbek nr 109/110 i 113/114 różnią się one zasadniczo przy pierwszych trzech cyklach (rysunek 2). W odróżnieniu od próbki nr 109/110, w próbce nr 113/114, w pierwszym cyklu wystąpiło znaczne wydłużenie trwałe, wynoszące ok. 0,2 mm. Z tego powodu zmiana wydłużeń tej próbki w dalszych badaniach odbywała się w zakresie 0,2 ÷ 0,5 mm, a nie tak jak w próbce nr 109/110 – 0,03 ÷ 0,30 mm. W trakcie dalszych badań cyklicznych obu próbek, wydłużenie trwałe zwiększało się w nich tylko nieznacznie, a mianowicie w próbce nr 109/110 o ok. 0,03 mm, natomiast – nr 113/114 o ok. 0,07 mm. Prawdopodobnie przyczyną wystąpienia tak znacznego wydłużenia trwałego próbki nr 113/114 w pierwszym cyklu rozciągania były deformacje wstępne (wykonawcze), których przed badaniami nie usuwano.



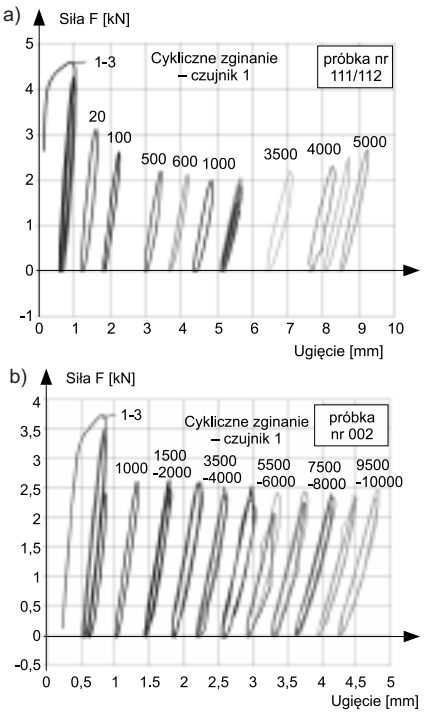
Rys. 2. Zależność obciążenie-wydłużenie cyklicznie rozciąganych próbek nr 109/110 (a) i 113/114 (b), po wybranej liczbie cykli

Badania na cykliczne zginanie

Badania zmęczeniowe na cykliczne zginanie połączeń próbnych przeprowadzono na stanowisku pokazanym na fotografii 1b, wyposażonym w jeden czujnik do pomiaru ugięć, zlokalizowany w połowie rozpiętości (czujnik 1). Po zbadaniu próbki nr 111/112, zainstalowano dodatkowy czujnik (czujnik 2), w celu rejestracji ugięcia maksymalnego. Obciążenie siłą pionową F wywołującą ugięcie próbki w połowie jej rozpiętości, równe maksymalnie 1 mm, przykładano cyklicznie z częstotliwością 0,2 Hz. Jako pierwsza zbadana została próbka nr 111/112. Ze względu na narastające ugięcia trwałe jej badanie zakończono po 5000 cykli (fotografia 2a), gdyż oparła się o stanowisko badawcze. Wyniki badania dla wybranej liczby cykli pokazano na rysunku 3a. Drugim połączeniem poddanym cyklicznemu zginaniu była próbka nr 002. Wyniki badań zmęczeniowych próbki dla wybranej liczby cykli pokazano na rysunku 3b. Skumulowane ugięcia trwałe próbki nr 002 po 10000 cykli zginania wynoszą ok. 4,5 mm (rysunek 3b). Są więc zdecydowanie mniejsze od analogicznych ugięć trwałych próbki nr 111/112 po 5000 cykli (fotografia 2), wynoszących ok. 8,5 mm.



Fot. 2. Widok próbki nr 111/112 (a) na stanowisku do cyklicznego zginania i próbki 002: b) przed obciążeniem, c) po 10000 cykli zginania



Rys. 3. Zależność obciążenie-ugięcie cyklicznie zginanej próbki nr 111/112 (a) i 002 (b), po wybranej liczbie cykli

Podsumowanie i wnioski

Badania dwóch połączeń na cykliczne rozciąganie, w warunkach obciążenia pulsującego 0 ÷ 60 kN z częstotliwością 0,2 Hz, wykazały, że mają one zakładane na etapie projektowym właściwości zmęczeniowe. Tylko w jednym ze zbadanych połączeń po 10000 cykli, na jego zewnętrznych powierzchniach stwierdzono krótkie ryski. Pozostałe badania penetracyjne nie wykazały żadnych uszkodzeń.

Badania dwóch połączeń na cykliczne zginanie, w warunkach obciążenia pulsującego od zera do wywołującego ugięcie próbki 1 mm, przykładanego z częstotliwością 0,2 Hz, wykazały dużą wrażliwość próbek na deformacje wstępne (wykonawcze), z których najistotniejszy okazał się brak płaskości. Badania pierwszej próbki prowadzono bez wcześniejszego usunięcia wymienionej deformacji, co ze względu na zbyt duże ugięcia trwałe doprowadziło do konieczności ich przerwania po 5000 cykli. Zapewnienie płaskości drugiej próbki pozwoliło na przeprowadzenie badań w zaplanowanym zakresie, tzn. do 10000 cykli. Należy dodać, że badania penetracyjne w przypadku obu próbek nie wykazały żadnych uszkodzeń.

Wykorzystując doświadczenia nabyte podczas badań na cykliczne zginanie połączeń, kontynuowano tego typu badania zmęczeniowe na dwóch połączeniach, które były wcześniej cyklicznie rozciągane. Oba połączenia przeszły pomyślnie próby cyklicznego zginania. Badania penetracyjne próbek nie wykazały żadnych uszkodzeń.

Z badań zmęczeniowych przeprowadzonych na czterech połączeniach próbnych wynika, że elastyczne połączenia, projektowane w odpływie prądowym wirnika generatora, mogą być zastosowane w ciężkich maszynach wirujących wykorzystywanych w energetyce. Osiągnięcie parametrów tych połączeń uzyskanych w badaniach doświadczalnych uwarunkowane będzie jednak dotrzymaniem wysokich wymagań w procesie produkcji.

Literatura

[1] Nobo Solutions, Instrukcja wykonania badań wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej połączenia elastycznego I12-002, Rew. A.

[2] PN-H-04334:1985. Badania niskocyklowe zmęczenia metali.