

Stanowisko do badania trwałości zmęczeniowej sprężyn naciskowych

Piotr Swacha¹, Maciej Kotyk^{2*}, Wojciech Ziółkowski³, Radosław Stachowiak⁴

¹ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

² Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

³ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

⁴ Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

* Autor korespondencyjny; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Streszczenie: W pracy omówiono wykonanie oraz realizację projektu stanowiska do badania trwałości zmęczeniowej sprężyn naciskowych stosowanych w układach zawieszenia pojazdów szynowych. Przedstawiono także warunki pracy badanych sprężyn. Wyznaczono ich charakterystyki oraz sztywności. Na podstawie uzyskanych danych oraz znajomości warunków eksploatacyjnych opracowano plan badawczy. Określono założenia konstrukcyjne stanowiska badawczego, które powinny być spełnione, aby w jak największym stopniu odzwierciedlać warunki eksploatacyjne. Przedstawiono najważniejsze cechy konstrukcyjne zaprojektowanego stanowiska. Zaprezentowano wykonane stanowisko oraz określono jego potencjał badawczy.

Słowa kluczowe: stanowisko badawcze, badania, sprężyna, element podatny, trwałość zmęczeniowa, pojazdy szynowe

Stand for testing the fatigue life of compression springs

Piotr Swacha¹, Maciej Kotyk^{2*}, Wojciech Ziółkowski³, Radosław Stachowiak⁴

¹ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: pioswa002@utp.edu.pl

² UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

³ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: wojzio002@utp.edu.pl

⁴ UTP University of Science and Technology, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland; e-mail: radsta005@utp.edu.pl

* Correspondent author; e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Summary: The main purpose of the work was to prepare and implement the design of the stand for testing the fatigue life of compression springs used in the

suspension systems of rail vehicles. The work conditions of the tested springs are discussed. Their characteristics and stiffness were determined. Based on the data obtained and knowledge of the operating conditions, a research plan was developed. The constructional assumptions were determined that should be met by the test stand in order to reflect the operating conditions as much as possible. The most important structural features of the designed stand are presented. The performed stand was presented and its research potential determined.

Key words: test stand, tests, spring, flexible element, fatigue life, rail vehicles

1. Wstęp

Połączenia podatne to często bardzo istotne elementy wielu konstrukcji. Element podatny występujący w takim połączeniu umożliwia występowanie odkształceń sprężystych pod działaniem obciążenia zewnętrznego oraz ma zdolność do gromadzenia energii. Walory te są bardzo często pożądane w węzłach konstrukcyjnych, co skutkuje ich popularnością.

Najczęściej stosowanym rodzajem elementów podatnych są sprężyny. Znaczącą odkształcalność uzyskuje się w nich poprzez nadanie im odpowiedniego kształtu. Sprężyny wykorzystuje się w celu przejmowania sił zewnętrznych, kształtowania charakterystyki dynamicznej maszyny lub pojazdu, akumulowania energii, wykonywania określonej pracy mechanicznej, ustalenia i łączenia elementów oraz pomiarów obciążeń i ugięć.

Istnieje wiele kryteriów podziału sprężyn, do najważniejszych zaliczyć można rodzaj dominujących naprężeń w przekroju, stan obciążenia sprężyny oraz jej geometrię. Znamioną cechą sprężyn jest ich charakterystyka, czyli zależność pomiędzy obciążeniem a odkształceniem. Stosunek obciążenia do odkształcenia nazywa się sztywnością sprężyny.

Wybór odpowiedniego typu sprężyny o pożądanej charakterystyce i właściwym kształcie uzależniony jest od wymagań, jakie stawia konstruktor względem danego połączenia podatnego. W budowie maszyn najczęściej wykorzystuje się walcowe sprężyny śrubowe. Pośród tych sprężyn wyróżnia się sprężyny naciskowe [9] oraz naciągowe [10]. Sztywność walcowych sprężyn śrubowych R wyznaczyć można z zależności:

$$R = \frac{F}{x} \quad (1)$$

gdzie:

- F – siła obciążająca,
- x – ugięcie sprężyny.

W doborze sprężyny często bardzo ważnym kryterium jest określona trwałość. Trwałość zmęczeniową sprężyny określa liczba cykli zmiany obciążenia (najczęściej jednostronnie tętniącego) do wystąpienia pęknięcia zmęczeniowego lub do osiągnięcia granicznej wartości obciążenia wynikającego z relaksacji naprężeń w materiale. Zależna jest ona od wytrzymałości na rozciąganie oraz od granicy plastyczności materiału, z jakiego został wykonany pręt sprężyny.

Występowanie wtrąceń w strukturze materiału w postaci tlenków, siarczków i azotków znacząco zmniejsza trwałość sprężyn [1]. Wpływ na nią mają również sposób i parametry obróbki cieplnej oraz stan warstwy powierzchniowej, w której dąży się do uzyskania jak najmniejszej chropowatości.

Druty sprężyn naciskowych często są umacniane zgniotem powierzchniowym, np. poprzez kulowanie. Proces ten pozwala uzyskać korzystny stan naprężeń własnych ściskających w umocnionej warstwie, a także wprowadza poprawę w mikrogeometrii powierzchni. Wszystkie wymienione parametry wpływają na

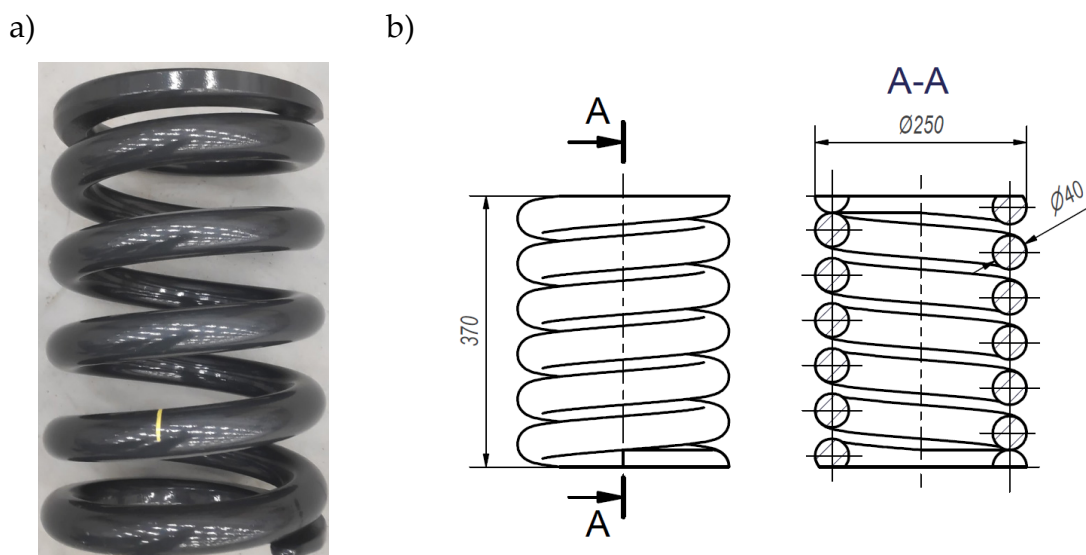
trwałość zmęczeniową, a tym samym – na warunki jej użytkowania. W konstrukcjach, których funkcjonowanie wiąże się z dużą odpowiedzialnością, a tym samym – znajomość trwałości sprężyny związana jest bezpośrednio z bezpieczeństwem osób i mienia, priorytetowe staje się przewidywanie czasu, po jakim sprężyna ulegnie uszkodzeniu, przejawiającym się najczęściej jako pęknięcie. Gdy zmienne są tak liczne, trudno jest prawidłowo analitycznie określić trwałość zmęczeniową sprężyny, dlatego najczęściej określa się ją w oparciu o badania przeprowadzone w laboratoriach. Próbki poddawane są obciążeniom odpowiadającym warunkom eksploatacyjnym. Do tego celu projektowane są specjalistyczne stanowiska. Najczęściej pozwalają one na badanie sprężyn obciążonych zarówno osiowo, jak i poprzecznie [1–3, 5, 7, 8].

W pracy omówiono projekt i wykonanie stanowiska do badania trwałości zmęczeniowej sprężyn naciskowych, wykorzystywanych w układzie zawieszenia pojazdu szynowego, oraz procedury przygotowania procesu badawczego.

2. Stanowisko badawcze

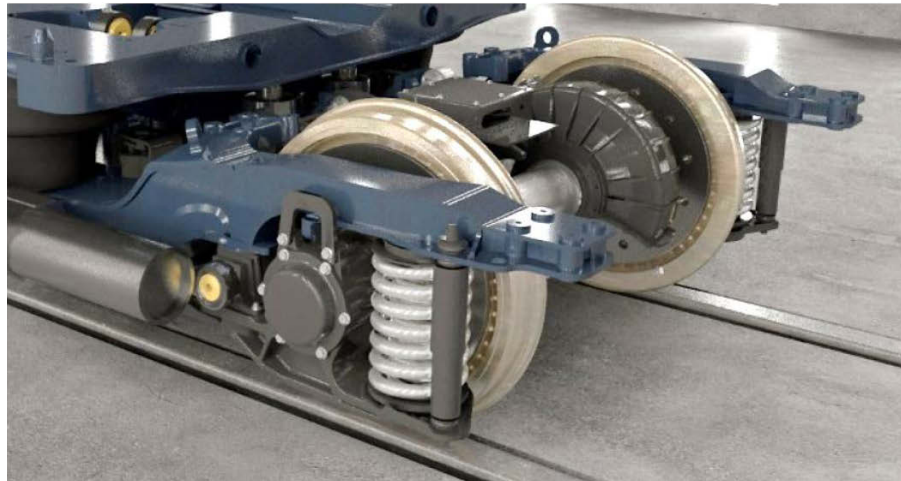
2.1. Obiekt badań

Elementem badanym, dla którego opracowano projekt stanowiska badawczego, jest walcowa naciskowa sprężyna śrubowa. Sprężyna ta przedstawiona na rysunku 1 stosowana jest w pierwszym stopniu usprężynowania zestawów kołowych o konstrukcji prowadzenia wahaczowego [11]. Przykład tego typu rozwiązania technicznego przedstawiono na rysunku 2, natomiast schemat zawierający poszczególne elementy układu – na rysunku 3.



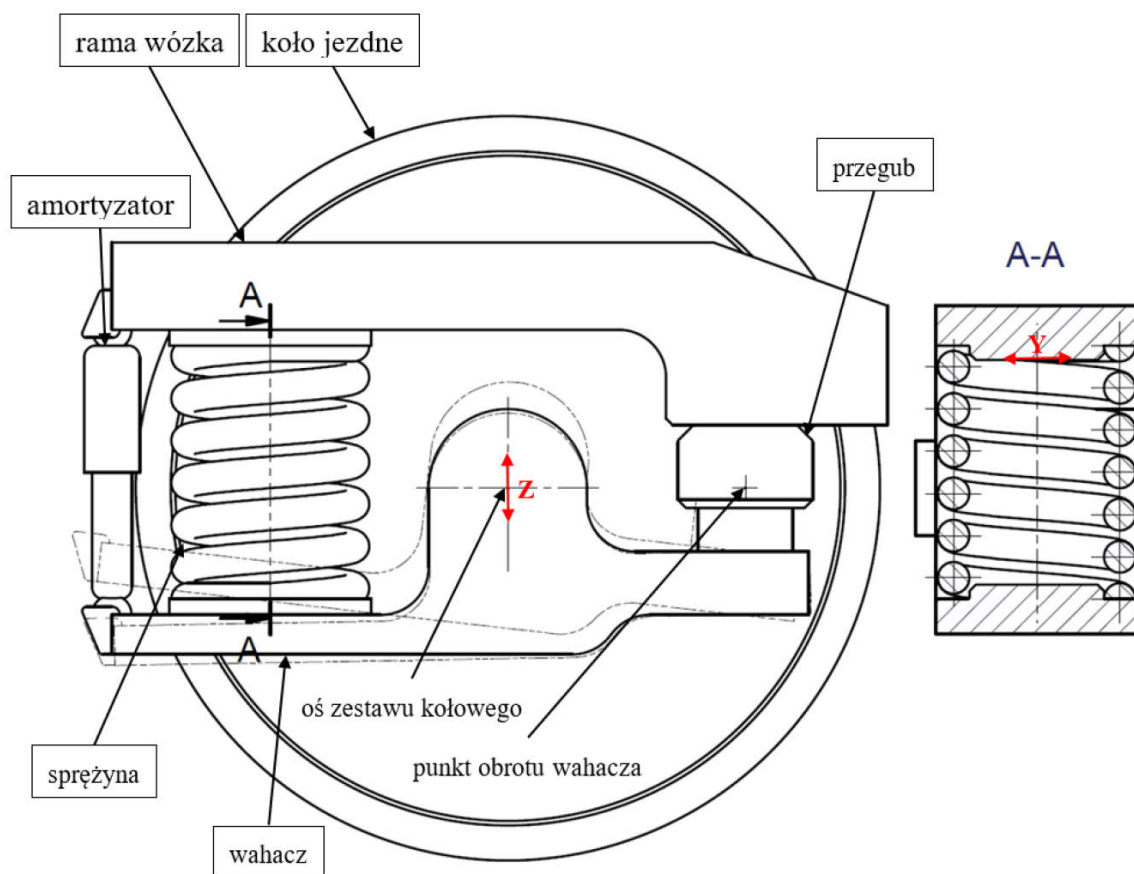
Rys. 1. Walcowa sprężyna śrubowa: a) widok rzeczywistego obiektu, b) wymiary [opracowanie własne]

Fig. 1. Cylindrical coil spring: a) view of the real object, b) dimensions [own study]



Rys. 2. Przykład zawieszenia zestawu kołowego zastosowanego w wózkach Bombardier FLEXX Compact [4]

Fig. 2. An example of a wheel set suspension used in Bombardier FLEXX Compact rail bogies [4]



Rys. 3. Schematyczne przedstawienie omawianego układu zawieszenia [opracowanie własne]

Fig. 3. Schematic representation of the discussed suspension system [own study]

Prowadzenie typu wahaczowego jest bardzo często stosowane w konstrukcjach podwozi pojazdów szynowych. Umożliwia ono projektowanie krótszych, niższych i lżejszych ram wózków. Konstrukcja tego typu pozwala przenosić duże siły trakcyjne. Podatny przegub, do którego mocuje się wahacz, pozwala uzyskać skrętność

zestawu kołowego w płaszczyźnie poziomej. Poprawia to współpracę kół z szynami toru, szczególnie w momencie jazdy po łuku, gdy koło nabiega na szynę [6, 11].

Skrętność podatnego przegubu w płaszczyźnie poziomej oraz odległość punktu obrotu wahacza od punktu mocowania sprężyny powodują, iż poddawana jest ona obciążeniu złożonemu. Sprężyna nie tylko jest ściskana (oś Z na rys. 3), lecz także jest nieznacznie przemieszczana poprzecznie (oś Y na rys. 3). Przemieszczenie to jest zgodne z kierunkiem osi zestawu kołowego.

2.2. Wyznaczenie charakterystyki sprężyny

Opracowanie projektu poprzedzono wyznaczeniem charakterystyk 4 wybranych sprężyn. Pozwoliły one na określenie sztywności każdej z nich. Z uzyskanych sztywności sprężyn wyznaczono wartości: maksymalną, minimalną oraz średnią, która została przyjęta za punkt odniesienia podczas projektowania i ostatecznie budowy stanowiska. Wspomniane sztywności badanych elementów podatnych wyznaczono podczas próby ściskania. Do tego celu wykorzystano hydrauliczną maszynę wytrzymałościową Instron 8502 ze specjalnie zaprojektowanymi prowadzzeniami, które umożliwiły ustalenie sprężyny w osi szczęk. Widok stanowiska podczas badania przedstawiono na rysunku 4.

a)



b)

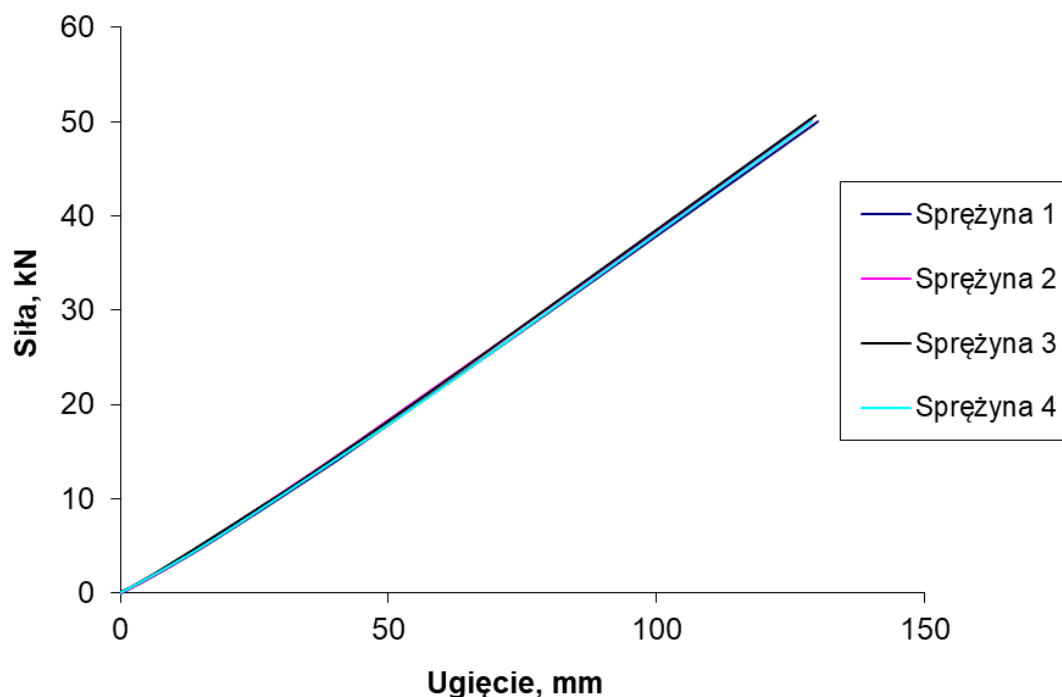


Rys. 4. Próba ściskania: a) widok maszyny, b) widok uchwytów [opracowanie własne]

Fig. 4. Compression test: a) view of the machine, b) view of the handles [own study]

Próbie ściskania prowadzono do osiągnięcia siły 50 kN. Wartość ta jest największym spodziewanym obciążeniem występującym podczas eksploatacji. Podczas próby rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej sprężynę oraz jej

ugięcia. Wynik badania przedstawiono na rysunku 5. W tabeli 1 zestawiono wyznaczone na podstawie wzoru 1 wartości sztywności dla poszczególnych sprężyn R_i oraz wartość maksymalną R_{max} , minimalną R_{min} oraz średnią $R_{\bar{s}r}$.



Rys. 5. Przebiegi siła – ugięcie wyznaczone dla sprężyn układu trakcyjnego [opracowanie własne]

Fig. 5. Force-deflection curves for the traction system springs [own study]

Tabela 1. Wyniki sztywności poszczególnych sprężyn [opracowanie własne]

Table 1. Stiffness results of selected springs [own study]

R_1	R_2	R_3	R_4	R_{max}	R_{min}	$R_{\bar{s}r}$
kN/mm						
0,380	0,385	0,386	0,382	0,386	0,380	0,383

Na podstawie wykresu można stwierdzić, że zgodnie z oczekiwaniami badane sprężyny w zakresie 10–50 kN mają charakterystykę liniową. Wyznaczone sztywności dla poszczególnych sprężyn są zgodne z założeniami konstrukcyjnymi i mieszczą się w zakresie wymaganej sztywności. Różnica między wartością maksymalną a minimalną jest niewielka w odniesieniu do wartości średniej, dlatego przy opracowywaniu planu badań posłużono się uśrednioną wartością wszystkich sztywności.

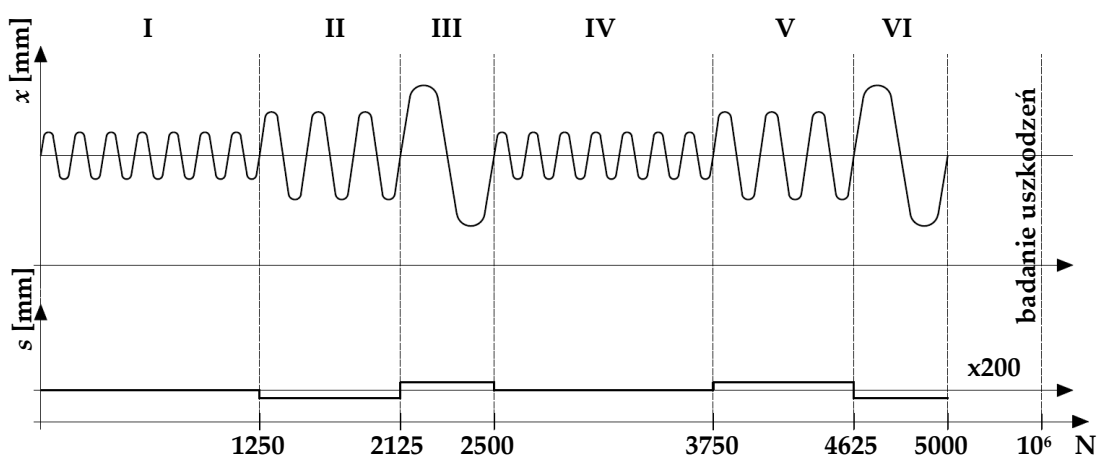
Ze względu na specyfikę stanowiska badawczego oraz ograniczenia dostępnej aparatury pomiarowej konieczne okazało się sterowanie siłownikami obciążającymi badane sprężyny za pomocą kanału przemieszczenia, pomimo że podczas eksperymentu chciano obciążyć próbki (sprężyny) ściśle określoną wartością siły. Było to możliwe, ponieważ w pierwszym etapie badania wyznaczono przebiegi siła – przemieszczenie oraz sztywność badanych sprężyn. W drugim etapie badań polegającym na określeniu trwałości zmęczeniowej sprężyn, po odpowiednim przeli-

czeniu wartości przemieszczenia (ugięcia sprężyny) układ pomiarowy rejestrował oczekiwaną wartość siły obciążającej sprężynę w funkcji liczby cykli.

Takie rozwiązanie pozwoliło na istotne skrócenie czasu badań ze względu na zwiększenie częstotliwości obciążania badanych sprężyn przez siłowniki hydrauliczne stanowiska badawczego.

2.3. Plan badań

Sprężyna podczas eksploatacji pojazdu jest obciążona zarówno od masy pojazdu, jak i od zjawisk dynamicznych zachodzących podczas jazdy. Ze względu na to, że masa pojazdu jest znana podobnie jak trasa, po której się on porusza, możliwe jest określenie przybliżonego widma obciążeń, jakie będzie oddziaływało na pojazd. Tak było w przypadku eksperymentalnej weryfikacji trwałości sprężyn, których wybrane wyniki prezentowane są w tej pracy. Podmiot użytkujący badane sprężyny określił wartości obciążeń, przemieszczeń poprzecznych s oraz cykliczność ich występowania w trakcie eksploatacji. Znając wartość sztywności średniej dla poszczególnych obciążeń, wyznaczono odpowiadające im wartości przemieszczenia x . Na podstawie otrzymanych parametrów przygotowano plan badań składający się z 6 etapów. Przedstawiono go schematycznie na rysunku 6. Wybrane parametry badania zestawiono w tabeli 2. Każdy z prezentowanych etapów zawiera w sobie określoną liczbę cykli. Wspomniane etapy badania różnią się od siebie amplitudą przemieszczeń oraz wartością przemieszczenia poprzecznego. Po każdym milionie cykli konieczne jest przeprowadzenie badań nieniszczących w celu wykrycia ewentualnych pęknięć oraz ponowne wyznaczenie charakterystyk sprężyny w celu porównania ich z tymi, które określono, zanim przystąpiono do eksperymentalnego wyznaczania trwałości sprężyn.



Rys. 6. Schematyczne przedstawienie sposobu obciążania sprężyny w każdym z VI etapów, x – przemieszczenie wzdłużne; s – przemieszczenie poprzeczne [opracowanie własne]

Fig. 6. Schematic representation of the method of loading the spring in each of the VI stages, x – longitudinal displacement; s – lateral displacement [own study]

Tabela 2. Plan badań sprężyn I stopnia usprężynowania [opracowanie własne]
Table 2. Test plan of primary suspension [own study]

Etap	Liczba cykli	Wartość średnia ugięcia, mm	Amplituda przemieszczenia, mm	Przemieszczenie poprzeczne s , mm
I	1250	90,88	12,77	0
II	875		21,34	-4
III	375		34,23	4
IV	1250		12,77	0
V	875		21,34	4
VI	375		34,23	-4

2.4. Założenia konstrukcyjne

Na prezentowanym stanowisku do odwzorowania obciążenia eksploatacyjnego niezbędne jest, aby zadać obciążenie równoległe do pionowej osi sprężyny. Skutkiem tego obciążenia jest znaczne przemieszczenie (ugięcie sprężyny), które zostało zrealizowane z wykorzystaniem siłownika hydraulicznego, wyposażonego w przegub kulisty zamontowany na końcu części roboczej tłoczyska. Ruch posuwisto-zwrotny siłownika zamieniony został na ruch kątowy wahacza, który odwzorowuje pracę rzeczywistego obiektu. Zakres przemieszczeń wahacza musi być co najmniej taki jak wartości maksymalnego ugięcia sprężyny podczas warunków rzeczywistych. Dodatkowo opisywany wahacz musi być skonstruowany w taki sposób, aby możliwe było osiągnięcie luzu montażowego oraz wychylenie pozwalające umieścić sprężynę na stanowisku.

Sprężyna poprzez podatność skrętną przegubu prowadzenia wahaczowego wychylana jest również w osi poprzecznej, która jest zgodna z osią zestawu kołowego. W celu realizacji przemieszczenia poprzecznego s również zastosowano siłownik hydrauliczny, którego ruch posuwisto-zwrotny zmienia położenie poziomej platformy przesuwnej, na której umieszczono badany obiekt.

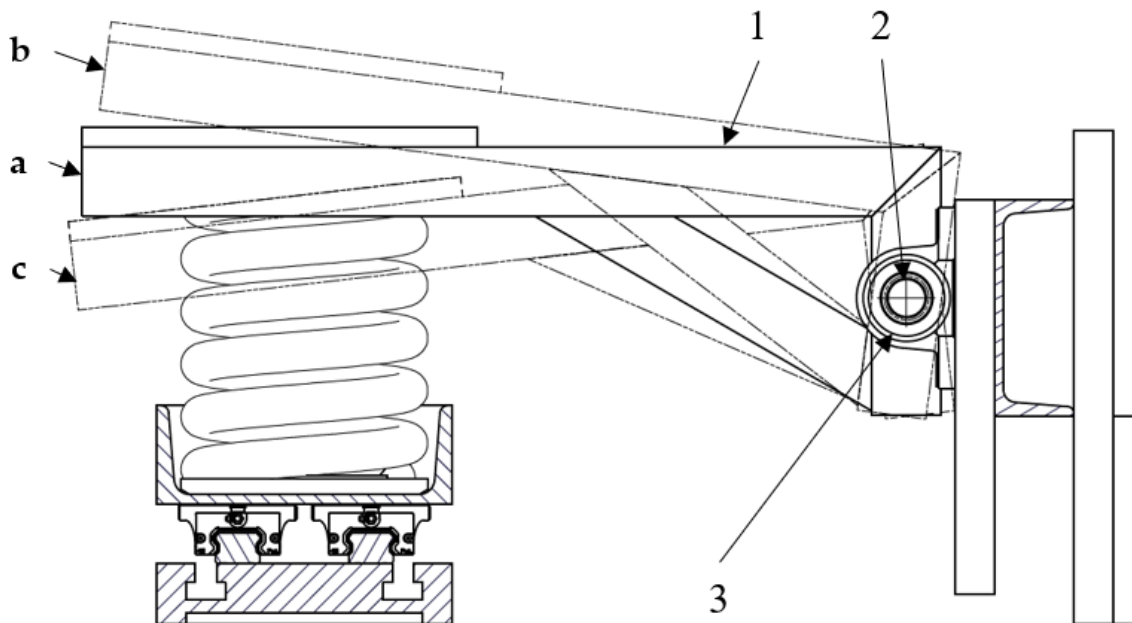
Miejsca mocowań elementów ruchomych powinny mieć możliwie jak największą sztywność w celu zwiększenia wydajności badania.

Sterowanie odbywało się z wykorzystaniem systemu badawczego do struktur wielkogabarytowych wyposażonego w kontroler IST Labtronic 8800.

2.5. Cechy konstrukcyjne stanowiska badawczego

Pierwszym postanowieniem podczas realizacji projektu stanowiska było obrócenie układu o 180° w taki sposób, aby siła nacisku na sprężynę była wywierana od góry. Zabieg ten pozwolił na łatwiejsze zamontowanie siłowników wymuszających obciążenie. W związku z tym, że przewidywano, iż możliwa do uzyskania częstotliwość obciążania pojedynczej sprężyny dla etapu o największej częstotliwości będzie mniejsza niż 5 Hz, postanowiono zaprojektować stanowisko umożliwiające badanie jednocześnie dwóch sprężyn.

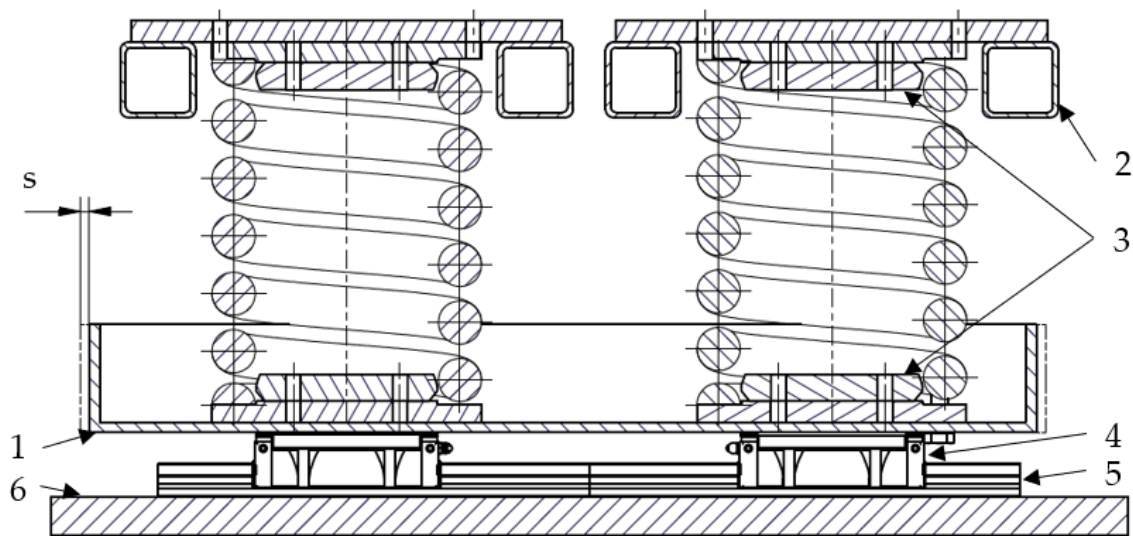
Jednym z ważniejszych założeń podczas realizacji projektu było odzwierciedlenie sposobu obciążania sprężyny. Na rysunku 7 przedstawiono zaprojektowany wahacz (1) w 3 pozycjach wychylecia. Położenie *a* odzwierciedla pozycję, w której element podatny obciążony jest wyłącznie masą pojazdu. Wychylenie oznaczone literą *b* to pozycja, która umożliwi montaż próbki na stanowisku. Maksymalne obciążenie, jakiemu poddawana jest sprężyna, odpowiada pozycji *c*. Wahacz wykonano ze znormalizowanych stalowych elementów konstrukcyjnych. Obrót zrealizowano za pomocą osi (2) osadzonej w łożyskach samonastawnych (3), łożyska te umiejscowiono w oprawach, które na sztywno zamocowano do reszty stanowiska.



Rys. 7. Wahacz stanowiska badawczego [opracowanie własne]

Fig. 7. Control arm of test stand [own study]

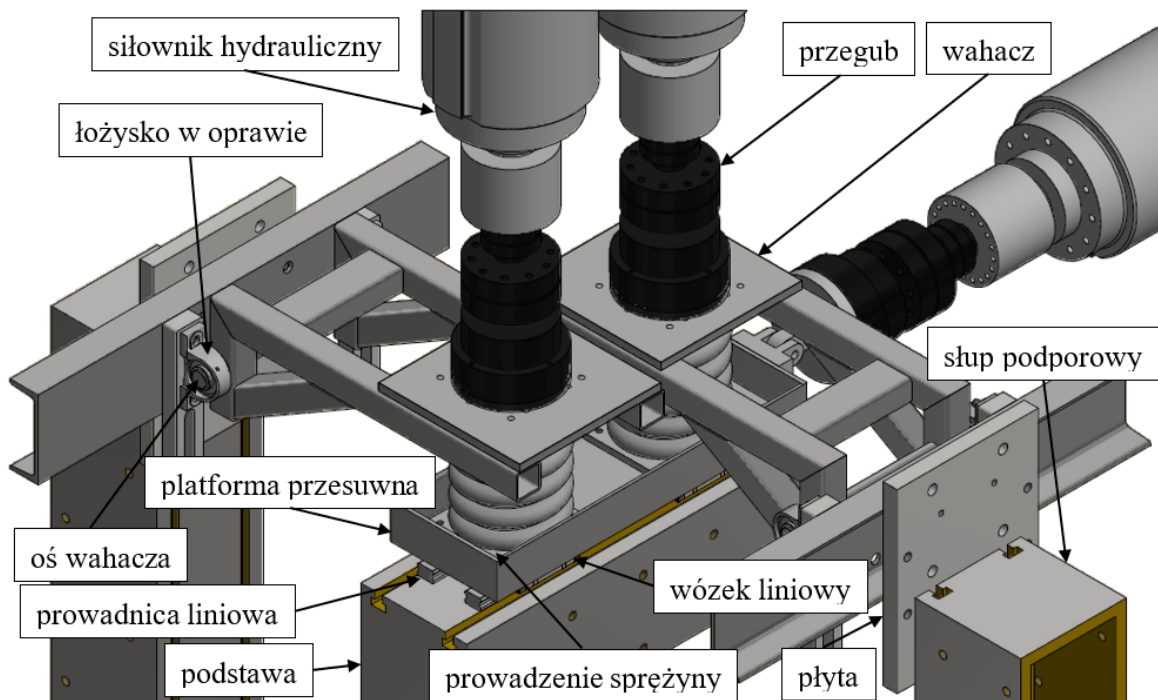
Aby odzwierciedlić przemieszczenie poprzeczne, zaprojektowano platformę przesuwą (1) przedstawioną na rysunku 8. Przesuw platformy możliwy jest o skok s . Zgodnie z planem badania przedstawionym w tabeli 1 wynosi on ± 4 mm, w przypadku zaprojektowanego układu możliwy jest skok o wartości ± 80 mm. Widoczne dwie sprężyny zostały ustalone względem pozycji wahacza (2) oraz platformy za pomocą prowadzeń (3), których geometria odzwierciedla rzeczywisty kształt prowadzeń znajdujących się na pojeździe. Ruch prostoliniowy umożliwiają wózki liniowe (4) poruszające się po prowadnicach liniowych (5). Prowadnice zamocowane zostały do sztywnej podstawy (6).



Rys. 8. Schemat ustawienia sprężyn na platformie przesuwnej [opracowanie własne]

Fig. 8. Diagram of spring setting on the sliding platform [own study]

Na rysunku 9 przedstawiono widok całego projektu stanowiska badawczego. Zaprezentowano na nim układ siłowników hydraulicznych, wymuszających obciążenie. Dwa siłowniki zostały przymocowane do każdego z wahaczy, natomiast jeden – bezpośrednio do platformy przesuwnej. Można zauważyć także orientację dwóch identycznych wahaczy względem platformy przesuwnej. Usytuowanie ich naprzeciw siebie pozwala zmniejszyć rozmiary platformy, gdyż badane próbki są w możliwie najmniejszej odległości.



Rys. 9. Schemat stanowiska badawczego [opracowanie własne]

Fig. 9. Diagram of the test stand [own study]

3. Wykonanie i doświadczalna weryfikacja poprawności funkcjonowania stanowiska badawczego

Na rysunku 10 przedstawiono fotografię wykonanego stanowiska podczas badania. Można dostrzec dodatkowe elementy, które zamontowano podczas budowy w celu zwiększenia sztywności stanowiska. Wykonanie tych elementów wymagało użycia specjalistycznego sprzętu, maszyn do obróbki oraz szeregu prac wykonawczych i montażowych. Działania tych nie omówiono jednak szerzej.

Dodatkową cechą stanowiska jest możliwość regulacji wysokości położenia wahacza poprzez zamocowanie go do płyty, której położenie można płynnie zmieniać względem słupa. Położenie słupów względem podstawy również może zostać zmienione, gdyż zamocowano je na stalowej podłodze, do której można je dowolnie przytwierdzić. Te cechy stanowiska wraz z dużym zakresem posuwu platformy przesuwnej dają możliwość prowadzenia badań innych układów zawieszenia pojazdów szynowych.



Rys. 10. Stanowisko badawcze podczas badania [opracowanie własne]

Fig. 10. Test stand during the test [own study]

4. Podsumowanie

Opisane stanowisko zbudowane zostało w Laboratorium Badań Materiałów i Konstrukcji w Bydgoszczy. Pozwoliło ono na rozszerzenie zakresu możliwości badawczych o zagadnienia związane z wyznaczaniem trwałości zmęczeniowej sprężyn układów zawieszenia pojazdów trakcyjnych.

Wyznaczone charakterystyki badanych sprężyn umożliwiły zaplanowanie procesu badawczego, a także pozwoliły dokładniej określić potrzebny zakres roboczy projektowanego stanowiska.

Wykonane stanowisko charakteryzuje się prostą konstrukcją. Daje także możliwość dostosowania położenia niektórych elementów względem obiektu badawczego. Pozwala to odwzorować warunki eksploatacji pracy układów zawieszenia o różnej charakterystyce. Duża sztywność konstrukcji oraz możliwość jednoczesnego badania dwóch obiektów jednocześnie pozwalają na przyspieszenie badań trwałości sprężyn, a zastosowany układ przemieszczenia poprzecznego – na obciążanie jednocześnie w dwóch osiach, co lepiej odwzorowuje warunki rzeczywiste.

Możliwość szybkiego demontażu próbek pozwala monitorować stan uszkodzenia (pęknięcia) zmęczeniowego za pomocą metod nieniszczących. Badania prowadzone na tym stanowisku umożliwiają określenie trwałości badanych sprężyn w warunkach zbliżonych do eksploatacyjnych.

Bibliografia

- [1] Baranowski, B., „Sprężyny metalowe”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [2] Berger, C., Kaiser, B., “Results of very high cycle fatigue tests on helical compression springs”, *Int. J. Fatigue* 28, (2006), 1658–1663.
- [3] Dietrich, M., „Podstawy konstrukcji maszyn. Tom 2”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2015.
- [4] “Equipment for mainline vehicles”,
<https://rail.bombardier.com/en/solutions-and-technologies/equipment/mainline-equipment.html>
- [5] Furuya, Y., Matsuoka, S., Abe, T., “Inclusion-Controlled Fatigue Properties of 1800 MPA-Class Spring Steels”, *Metall. Mater. Trans.* 35(12), (2004), 3737–3744.
- [6] Iwnicki, S., “Handbook of railway vehicle dynamics”, CRC Press, Boca Raton 2006.
- [7] Ji, S., Huang, H., Huang, G., Qin, X., Shui, G., “Experimental study on fatigue damage of train K6 spring”, *Przegląd Elektrotechniczny* 89(3), (2013), 131–133.
- [8] Mroziński, S., „Podstawy konstrukcji maszyn: laboratorium”, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz 2010.
- [9] „PN-EN 13906-1, Sprężyny śrubowe walcowe z drutu lub pręta okrągłego – Obliczanie i konstrukcja – Część 1: Sprężyny naciskowe”.
- [10] „PN-EN 13906-2, Sprężyny śrubowe walcowe z drutu lub pręta okrągłego – Obliczanie i konstrukcja – Część 2: Sprężyny naciągowe”.
- [11] „TRANSPORT SZYNOWY – niezależna strona informacyjna”,
<http://www.transportszynowy.pl/zestawykolowe1.php>



© 2020 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).