

Katarzyna ŁUCZAK

Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, Wydział Budownictwa, Architektury i Sztuk Stosowanych, ul. Rolna 43, Katowice; e-mail: katarzyna.luczak@wst.com.pl

Piotr WYCIŚŁOK

Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, Wydział Budownictwa, Architektury i Sztuk Stosowanych, ul. Rolna 43, Katowice; e-mail: piotr.wycislok@wst.com.pl

EKSPERYMENTALNA OCENA JAKOŚCI WYKONANIA ELEMENTÓW METALOWO-ELASTOMEROWYCH

s. 171-180

STRESZCZENIE

Produkcja elementów metalowo-elastomerowych jest ważnym działem przemysłu maszynowego oraz motoryzacyjnego. Jednocześnie wzrastające wymagania jakościowe nakładają na producentów konieczność weryfikacji uzyskanej jakości wyrobów. Złożoność zjawisk zachodzących w takich elementach, z uwagi na własności materiałowe elastomerów powodują, że proces pełnej weryfikacji jest kosztowny oraz czasochłonny. Do tego dochodzi konieczność testowania własności elementów po ich wykonaniu, bez możliwości pobierania próbek w celu klasycznego sprawdzenia ich własności w próbie jednoosiowego rozciągania. Pojawiła się więc potrzeba opracowania prostego i taniego testu do stosowania w warunkach przemysłowych. W artykule omówiono eksperymentalną metodę szybkiej oceny jakości wykonania elementów metalowo-elastomerowych. Stwierdzono, że stosunkowo proste badanie jest wystarczające do wstępnej oceny jakości ich wykonania oraz eliminacji elementów uszkodzonych.

SŁOWA KLUCZOWE

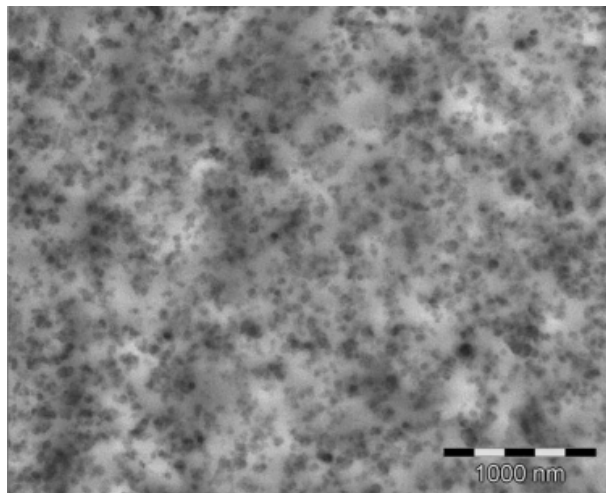
elastomery, tuleje, jakość wykonania

WPROWADZENIE

Elastomery są grupą tworzyw sztucznych, która znajduje coraz to większe zastosowanie w przemyśle. Jest to skutkiem własności elastomerów, które posiadają zdolność przenoszenia dużych odkształceń sprężystych oraz dobre własności tłumiące [1, 2]. Dodatkowo takie cechy elastomerów jak dyssypacja energii przy tłumieniu fal dźwiękowych, obniżenie krzywej rezonansu przy drganiach, dobre własności izolacji cieplnej, elektrycznej i akustycznej oraz odporność na działanie związków chemicznych powodują, że znajdują one coraz to nowsze zastosowania w konstrukcjach maszyn [2, 3]. Równoległe z tym poszukuje się bardziej efektywnych metod pomiaru własności lepko-sprężystych tych materiałów. Problemem w przemysłowych pomiarach własności mechanicznych takich elementów są skutki tarcia wewnętrznego, przejawiające się istnieniem histerezy, szybkim zanikaniem drgań swobodnych, przesunięciem fazowym między naprężeniem i odkształceniem [4, 5].

W chwili obecnej do najczęściej wykorzystywanych elastomerów, oprócz gumy naturalnej, należy guma syntetyczna SBR (ang. Styrene Butadiene Rubber). Pojawiają się również inne materiały jak chociażby elastomery poliuretanowe czy butylowe. Własności tych materiałów w warunkach jednoosiowych obciążeń statycznych są znane i dobrze opisane [1-7]. Również dynamiczne własności materiałów są badane od ponad

50 lat, dzięki tzw. prętowi Hopkinson'a (ang. Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB) [7, 8]. Obecnie pojawiają się nowoczesne maszyny wytrzymałościowe wykorzystujące np. techniki wizyjne do określania własności elastomerów. Jednakże wszystkie te metody wymagają specjalnie przygotowanych próbek oraz są kosztowne i pracochłonne. Elastomery zbudowane są z długich łańcuchów o strukturze liniowej. Obroty wzdłuż szkieletu łańcucha makrocząsteczek są stosunkowo swobodne, co umożliwia materiałowi przenoszenie dużych odkształceń [9, 10]. Czysta wulkanizowana guma jest w stanie poddać się quasi-odwracalnym dużym odkształceniom, jednakże jej sztywność jest mała. W celu zmiany własności mechanicznych wprowadza się do materiału cząstki wypełniacza. Chociaż interakcje guma – wypełniacz nie są jeszcze dobrze poznane, powszechnie wiadomo, że poprawiają one pożądane własności np. sztywność [9, 10]. Jako wypełniaczy używa się głównie sadzy i krzemionki. Własności gumy zależą w wysokim stopniu nie tylko od zastosowanego wypełniacza i jego ilości, ale również technologii wprowadzenia go do gumy [3]. Mikrostrukturę gumy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Struktura SBR wypełnionego popiołem [3].
 Fig. 1. The SBR structure filled with Ash [3].

Opis teoretyczny zachowania mieszanek elastomerowych jest skomplikowany i ciągle niepełny. Z uwagi na silną zależność własności elastomerów od rodzaju materiału i zastosowanych dodatków, proponowane opisy są uzyskiwane tylko dla szczególnych warunków, tym nie mniej z powodzeniem są wykorzystywane np. w modelach obliczeniowych [5]. W cytowanej pracy do opisu np. płaskiego stanu naprężenia stosuje się wzory:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{(1-\nu^2)} [\lambda_1 - 1 + \nu(\lambda_2 - 1)] + \tilde{\sigma}_1 \\ \sigma_2 &= \frac{E}{(1-\nu^2)} [\lambda_2 - 1 + \nu(\lambda_1 - 1)] + \tilde{\sigma}_2 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie:

λ_1, λ_2 - względne skrócenie odpowiednio w kierunku osi 1 i 2,

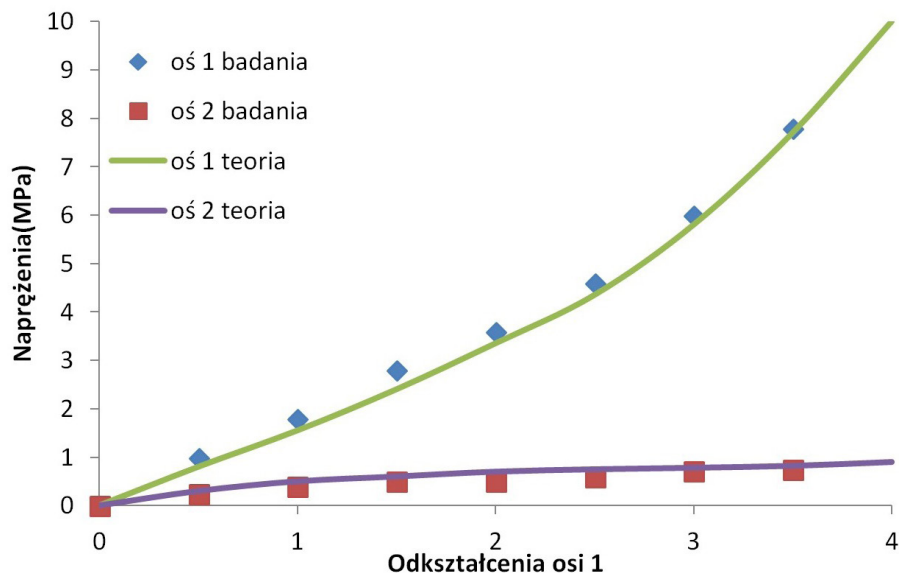
E - moduł Younga,

zaś ν to współczynnik Poissona dany wzorem:

$$\nu = \frac{1-\lambda_3}{(\lambda_1+\lambda_2-\lambda_3-1)} \quad (2)$$

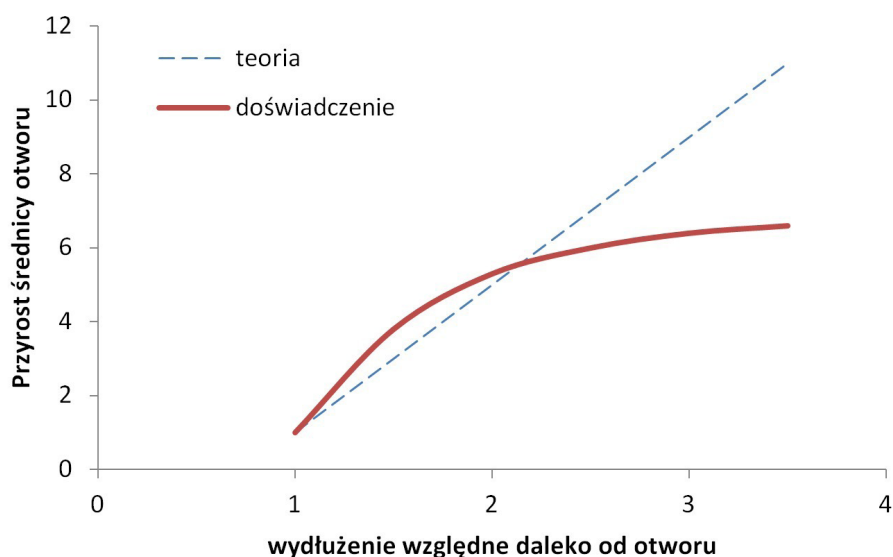
a σ_1, σ_2 - to zmienne uwzględniające nieliniowy wpływ wypełniacza na zachowanie materiału.

Powyższe wzory zostały weryfikowane dla próbki zwulkanizowanego lateksu o grubości 150 μm rozciąganej dwukierunkowo (rys. 2).



Rys. 2. Porównanie wyników teoretycznych i doświadczalnych rozciągania dwukierunkowego filmu lateksowego [5].
 Fig. 2. Comparison of theoretical and experimental results of biaxial latex film tensile testing [5].

Interesujące dla niniejszej pracy jest to że, w ramach testów Buckley i Turner dokonali oceny wpływu otworu w próbce na uzyskane wyniki. Okazało się, że otwór deformuje uzyskane wyniki w stopniu umożliwiającym identyfikację próbki, ze względu na pojawiające się odchylenie wyników od liniowości, objawiające się mniejszym przyrostem średnicy otworu przy rozciąganiu (rys. 3).



Rys. 3. Zmiana średnicy kołowego otworu w dwuosiowo rozciągany filmie lateksowym [5].
 Fig. 3. Change of the diameter of the circular opening in latex film under biaxial tensile testing [5].

Podsumowując należy stwierdzić, że pomimo braku jednoznacznie akceptowanej teorii opisującej zachowanie elastomerów, wyniki uzyskane w ramach cząstkowych rozwiązań są dostateczne dla opisu wielu praktycznych testów. Ponadto zarówno powtarzalność wyników jak i wyraźny wpływ zmian w próbkach na zachowanie w trakcie testów pozwala przypuszczać, że wykonanie powtarzalnych eksperymentów pozwoli na skonstruowanie testu wskazującego na nieprawidłowości w procesie produkcji.

Badania własne

Dla tulei metalowo-elastomerowych zaproponowano wykonywanie badań poprzez wyznaczenie charakterystyki siła - przemieszczenie, przy wymuszeniu przemieszczenia wewnętrznej tulei w kierunku równoległym do jej osi. Ponadto, w miejsce odniesienia do wzorca teoretycznego zaproponowano by wzorcową była charakterystyka elementu wykonanego pod specjalnym nadzorem jakościowym. Jak wykazały bowiem doświadczenia przytoczone wcześniej, trudno byłoby oprzeć się na wzorcu teoretycznym z uwagi na różnorodne źródła możliwych odchyłek i to zarówno na etapie konstruowania wzorca jak i prowadzonych badań.

Badaniom poddano cztery próbki tulei metalowo-elastomerowych pozyskane z firmy TEDGUM (znanego producenta elementów metalowo-gumowych dla przemysłu motoryzacyjnego). Ze względu na tajemnicę firmy nie przekazano szczegółowych informacji o zastosowanych materiałach. Jedna próbka była wykonana z mieszaniny gumowo polipropylenowej (T-5129) a trzy pozostałe z gumy. Badane próbki wraz z oznaczeniami przedstawiono na rysunku 4.

Dla każdej próbki wykonano serię trzech badań, w ramach których zebrano charakterystykę w układzie siła-przemieszczenie w trakcie pomiaru wymuszonego przemieszczenia wzajemnego tulei wchosisio 10% wartości wymiaru charakterystycznego (długości tulei). Każdy z pomiarów wykonano przy innej prędkości wymuszenia: 10 mm/min, 20 mm/min oraz 50 mm/min. Taki scenariusz badań został podyktowany chęcią potwierdzenia teoretycznego braku istotnych zależności charakterystyki materiału od prędkości ugięcia w zakresie niewielkich prędkości, na co wskazywały prace innych autorów [7]. Prędkości badania oparto na założeniu, że docelowe urządzenie pomiarowe będzie obsługiwane ręcznie, w związku z czym prędkości badania nie będą zbyt duże. Ponadto dla jednego z elementów, wykonano dwa cykle badań.

W drugim przypadku celowo uszkodzono próbkę, poprzez deformację zewnętrznej tulei (rys. 5), tym samym chcąc potwierdzić, że uszkodzenie wpłynie na wyniki w sposób umożliwiający identyfikację uszkodzonej próbki. Do badań wykorzystano uniwersalną maszynę wytrzymałościową wraz z oprogramowaniem MaxTest. Na potrzeby badania wykonano specjalne elementy mocujące tuleje.



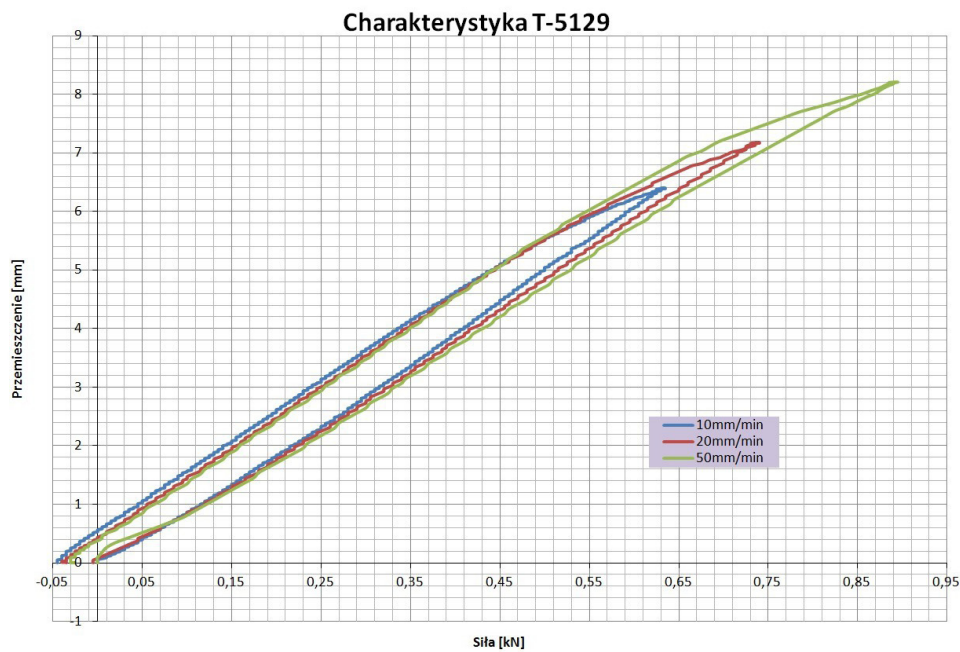
Rys. 4. Tuleje metalowo - elastomerowe poddane badaniom.
Fig. 4. Metal-elastomer bushings submitted to testing.



Rys. 5. Uszkodzona próbka. Strzałka wskazuje miejsce deformacji zewnętrznej tulei.
Fig. 5. Damaged sample. The arrow indicates the location of the deformation of the outer sleeve.

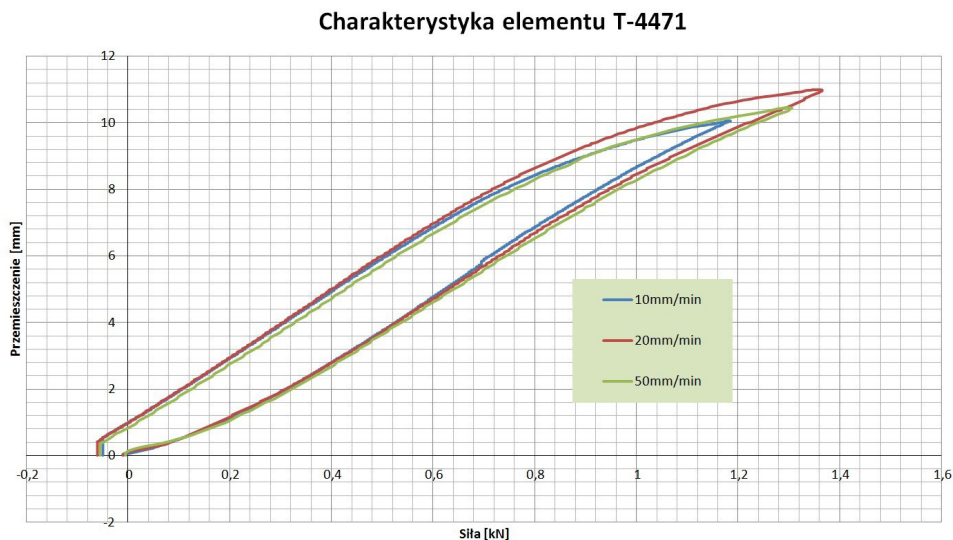
Rezultaty eksperymentu zebrano w postaci zestawu charakterystyk przemieszczenia w funkcji działającej siły. Wykres dla próbki oznaczonej numerem T-5129 przedstawiono na rysunku 6. Wymiar charakterystyczny próbki to 75 mm. Badanie przeprowadzono na przemieszczeniu wzajemnym zewnętrznej i wewnętrznej tulei o 7,5 mm. Stwierdzono, że dla różnych prędkości odkształcenia kształt charakterystyki się nie zmienił.

Dla wyznaczonych charakterystyk obliczono również współczynniki korelacji pomiędzy krzywymi, Wyznaczone współczynniki, kształtujące się na poziomie 0,98-0,99 potwierdzają brak wpływu prędkości przemieszczenia na charakterystykę materiału.



Rys. 6. Zależność siła - przemieszczenie dla próbki T-5129 dla trzech prędkościach wymuszonych przemieszczeń.
Fig. 6. The dependence of the force-displacement movement for the sample type T-5129 at three speeds of forced displacement.

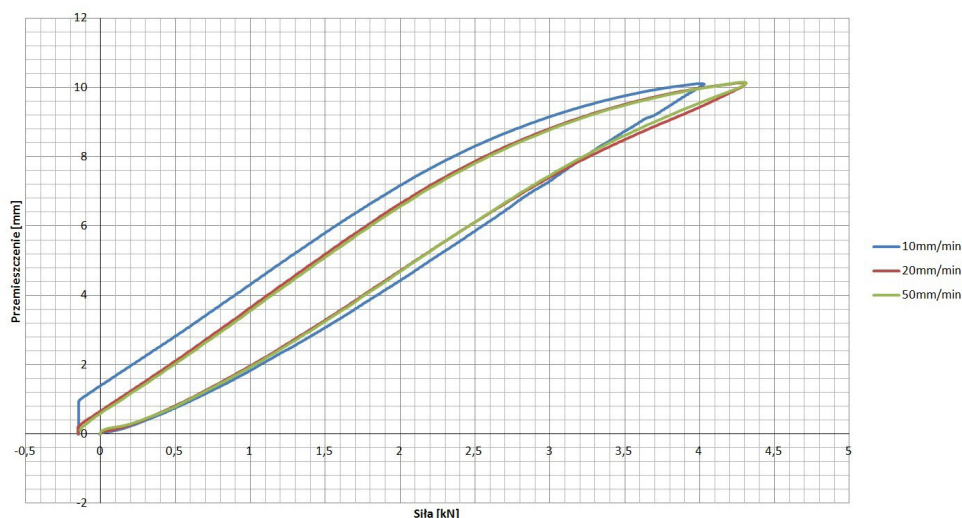
Próbka T-4471 została przebadana przy przemieszczeniu wzajemnym tulei o 10 mm (rys. 7).



Rys. 7. Zależność siła - przemieszczenie dla próbki T-4471 dla trzech prędkościach wymuszonych przemieszczeń.
Fig. 7. The dependence of the force-displacement movement for the sample type T-4471 at three speeds of forced displacement.

Dla tej próbki również nie stwierdzono widocznego wpływu prędkości przemieszczenia na charakterystykę badanego materiału. Współczynniki korelacji pomiędzy charakterystykami uzyskanymi przy różnych prędkościach przemieszczenia wynoszą 0,99. Kolejna próbka (T-3160) została poddana wymuszonemu przemieszczeniu wzajemnym tulei o 10 mm, (rys. 8).

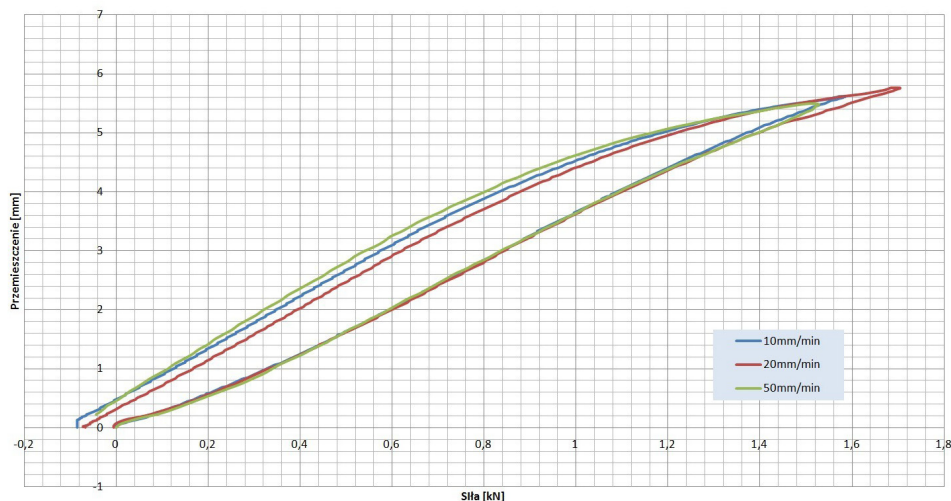
Charakterystyka T-3160



Rys. 8. Zależność siła-przemieszczenie dla próbki T-3160 dla trzech prędkości wymuszonych przemieszczeń.
 Fig. 8. The dependence of the force-displacement movement for the sample type T-3160 at three speeds of forced displacement.

Dla tego materiału wyznaczone współczynniki korelacji również kształtują się na podobnym poziomie od 0,96 porównując charakterystyki materiału przy prędkościach 10 mm/min i 20 mm/min do 0,99 porównując charakterystyki przy prędkościach 20 mm/min i 50 mm/min. Próbką T-3781 w stanie nieuszkodzonym, została poddana wymuszonemu prze-mieszczaniu tulei o 5 mm. Jej charakterystykę przedstawiono na rysunku 9.

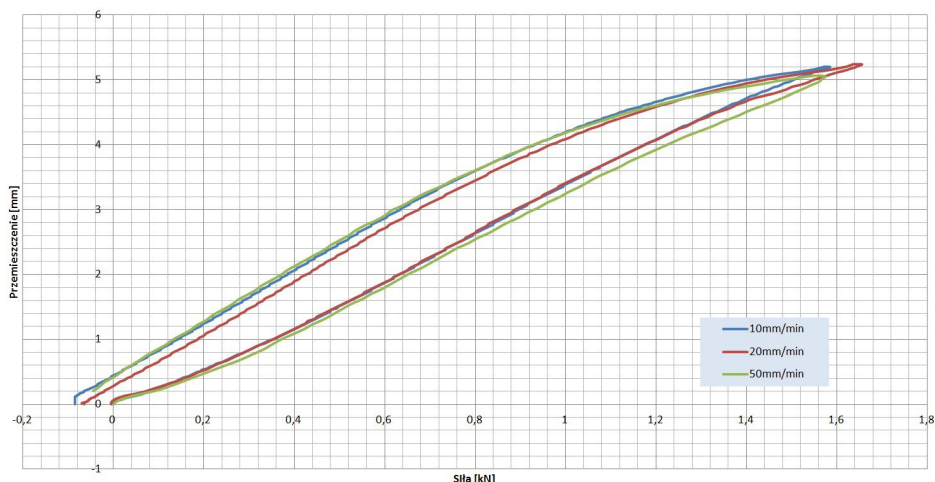
Charakterystyka T-3781 nieuszkodzony



Rys. 9. Zależność siła-przemieszczenie dla próbki nieuszkodzonej T-3781 dla trzech prędkości wymuszonych przemieszczeń.
 Fig. 9. The dependence of the force-displacement movement for the sample type T-3781 at three speeds of forced displacement.

Następnie próbkę T-3781 poddano cyklom badań w stanie uszkodzonym. Jej charakterystykę przedstawiono na rysunku 10.

Charakterystyka T-3781uszkodzony

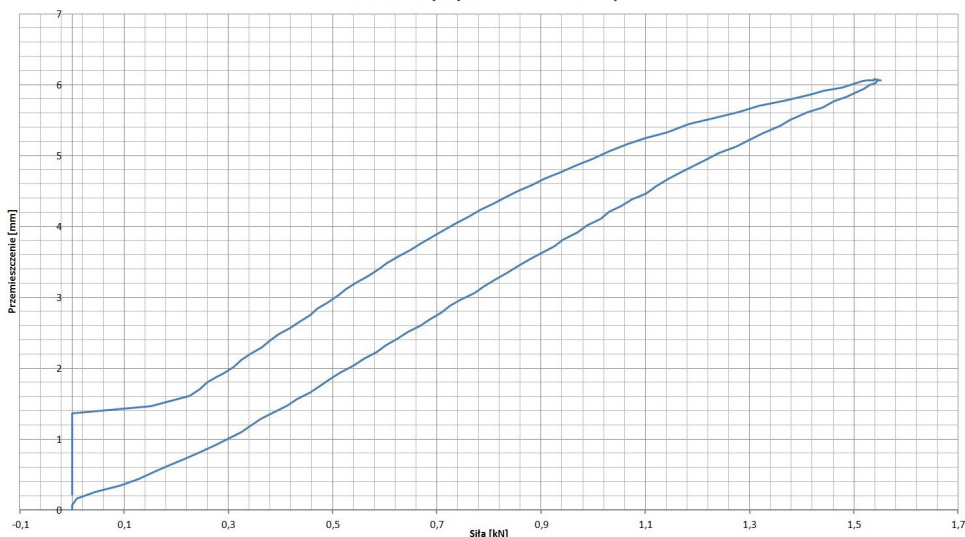


Rys. 10. Zależność siła-przemieszczenie dla próbki uszkodzonej T-3781 dla trzech prędkościach wymuszonych przemieszczeń.
 Fig. 10. The dependence of the force-displacement movement for the damaged sample at three speeds of forced displacement.

Porównując wykresy uzyskane dla próbki T-3781 przed uszkodzeniem (rys. 9) oraz po uszkodzeniu tulei (rys.10), można stwierdzić, że dla próbki w stanie uszkodzonym charakterystyka uległa spłaszczeniu o ok. 10%. Jest to poziom zauważalnie różny pozwalający na odróżnienie tej charakterystyki od charakterystyki wzorcowej.

W celu potwierdzenia prawidłowości rozumowania wykonano jeszcze jedną próbę. Zwrócono się do firmy o udostępnienie produktu, który uznano za niespełniający wymogów jakościowych z Serii T-381. Powodem odrzucenia udostępnionego wyrobu było pojawienie się pęcherzy powietrza na powierzchni styku tulei metalowych i masy gumowej. Dla dostarczonej próbki przeprowadzono ponowne badanie. Na rysunku 11 przedstawiono charakterystykę uzyskaną dla jednej prędkości wymuszonych przemieszczeń (50 mm/min).

Charakterystyka T-3781 wadliwy



Rys. 11. Zależność siła-przemieszczenie dla próbki typu T-3781 z wadami produkcyjnymi przy prędkości 50 mm/min wymuszonych przemieszczeń.
 Fig. 11. Dependence of the force-displacement movement for the T-3781 type sample with manufacturing defects at a speed of 50 mm/min of forced displacement.

Analizując otrzymaną charakterystykę (rys. 11), można stwierdzić, że błędy produkcyjne zaowocowały zmianą powrotnej gałęzi wykresu. W dolnej jego części zaobserwować można pojawienie się trwałego odkształcenia elementu o 1,4 mm. Można również zauważyć, iż poziom sił, które przeniósł element przy wymuszeniu (6 mm) jest niższy o ok. 10% od poziomu sił przenoszonych przez element prawidłowo wykonany. Za anomalię powrotnej gałęzi wykresu prawdopodobnie odpowiadają procesy lokalnego zrywania połączenia guma-metal w miejscach powstania pęcherzy powietrza na tym połączeniu i powstawania zwiększonych obszarów braku trwałego kontaktu gumy z metalem.

Podsumowanie

Konieczność weryfikacji jakości wyrobów produkowanych z elastomerów przy jednoczesnym braku jednoznacznej teorii opisującej zachowanie tych materiałów powoduje, że ciągle poszukuje się nowych rozwiązań potwierdzających jakość wyrobu w warunkach przemysłowych. W niniejszej pracy zaproponowano eksperymentalną metodę szybkiej oceny jakości wykonania elementów metalowo-elastomerowych. Przedstawiona metoda, polegała na badaniu charakterystyk siła-przemieszczenie w elementach tulei, w których wymuszane jest wzajemne przemieszczenie wewnętrznej i zewnętrznej tulei w ich osi. Dla każdej próbki wykonano serię trzech badań, prowadzonych przy różnych prędkościach przemieszczenia w ramach których zebrano charakterystykę w układzie siła-przemieszczenie w trakcie pomiaru wymuszonego przemieszczenia wzajemnego tulei w ich osi, o 10% wartości wymiaru charakterystycznego. Potwierdzono brak istotnych zależności charakterystyki materiału od prędkości odkształcenia, gdyż dla prędkości wykorzystywanych w próbach, pętle histerezy praktycznie pokrywały się. Natomiast dla próbki celowo uszkodzonej stwierdzono spłaszczenie otrzymanych charakterystyk w stosunku do charakterystyk otrzymanych dla próbki nieuszkodzonej tego samego rodzaju. Pozwala to na identyfikację elementów uszkodzonych lub w inny sposób odbiegających swoimi właściwościami od złożonego wzorca. Dodatkowe badanie, próbki o stwierdzonych wadach wykonania, potwierdziło, że próba wskazuje w sposób jednoznaczny na wadliwość badanego elementu. W trakcie badania charakterystyczny przebieg krzywej zależności siła-przemieszczenie pozwolił bez wątpliwości wskazać nieprawidłowy wyrób. Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że przedstawiona w niniejszej publikacji może z powodzeniem służyć do wykrywania rodzaju wady/uszkodzenia. Jednakże potwierdzenie tego wymaga dalszych badań.

Podsumowując można stwierdzić, że metoda nie pozwala na bezwzględna ocenę jakości badanych elementów. Jest jednak dostatecznie wiarygodna dla badań przesiewowych wyprodukowanych elementów w celu eliminacji ewidentnie uszkodzonych oraz wskazywania elementów do głębszej analizy jakości wykonania.

Bibliografia

- [1] Pielichowski J., Puszyński A.: *Technologia tworzyw sztucznych*. Warszawa: WNT, 2010.
- [2] Rabek J.: *Współczesna wiedza o polimerach*. Warszawa: PWN, 2008.
- [3] Rabek J.: *Polimery - otrzymywanie, metody badań, zastosowanie*. Warszawa: PWN, 2016.
- [4] Merckel Y.: *Experimental characterization and modeling of the mechanical behavior of filled rubbers under cyclic loading conditions*. Other. Ecole Centrale de Lille, 2012. English. HAL 2012.
- [5] Buckley C.P., Turner D.M.; *Application of flexible biaxial teting In the development of constitutivr models for elastomers*. *Constitutive Models for Rubber*. Dormann&Muhr (eds) 1999 Balkema Rotterdam; str 59-63.
- [6] Ochelski S., Bogusz P., KiczkoA.: *Influence of hardness on mechanical properties of elastomers*. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 17, 317-325, 2010.
- [7] Ogden R.W.: *Elastic deformations of rubberlike solids*, *Mechanics of Solids*, The Rodney Hill 60th Anniversary Volume, Oxford, 1982.
- [8] Johnson T.P., Sarva S., Socrate S.: *Comparison of Low Impedance Split-Hopkinson Pressure Bar Techniques in the Characterization of Polyurea*. *Experimental Mechanics* September 2010, Volume 50, Issue 7, pp 931-940.
- [9] Yamabe J., Fujikawa M., Kodama Y., Koishi M.: *Experimental characterization of cyclic stress-strain response and its modeling for filled SBR vulcanizates*. *Constitutive Models for Rubber VIII*, CRC Press 2013, str. 163-169.
- [10] Bergstr"J.S., BoyceM.C.: *Large strain time-dependent behavior of filled elastomers*. *Mechanical Mater.*, 32(11) 2000, str. 627-644.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF METAL-ELASTOMER ELEMENTS MANUFACTURING QUALITY

SUMMARY

The production of metal-elastomer elements is an important sector of machinery and automotive industries. At the same time increasing quality requirements force manufacturers to verify the quality of the resulting products. The complexity of the phenomena occurring in these elements, due to the material properties of rubber, make the full verification process costly and time-consuming. What is more there is the need to test the properties of elements after they are manufactured, without the possibility of sampling for the classic uniaxial test of their properties. There is thus a need for a simple and inexpensive test for use in industrial environments. The article discusses the selection of experimental methods for the rapid evaluation of metal-elastomer elements manufacturing quality. It was found that a relatively simple test is sufficient to evaluate the quality of their manufacturing.

KEYWORDS

elastomers, bushings, manufacturing quality