

Badania empiryczne termozgrzewalnych pasów ciągnowych o przekroju kołowym

Experimental research of round welded drive belts

KRZYSZTOF WAŁĘSA
IRENEUSZ MALUJDA
KRZYSZTOF TALAŚKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.5-6.56>

Prezentowano wymagania i założenia wstępnej procedury badawczej, dotyczącej zgrzewanych elastomerowych pasów ciągnowych o przekroju kołowym. Zwrócono uwagę na problematykę badań wytrzymałościowych cięgien i zgrzein pasów poliuretanowych, których wyniki są niezbędne do przeprowadzenia dalszej analizy procesu łączenia z wykorzystaniem gorącej płyty.

SŁOWA KLUCZOWE: pasy ciągnowe, elastomery termoplastyczne, zgrzewanie doczołowe

Presented are the requirements and preliminary research assumptions for round welded elastomer belts. The strength examination problems of polyurethane belts and welds were noticed. Their results are necessary for further analysis of hot plate welding process.

KEYWORDS: drive belts, thermoplastic elastomers, butt welding

Zgrzewanie doczołowe metodą gorącej płyty jest jednym z etapów produkcji pasów ciągnowych o przekroju kołowym. Zazwyczaj są one wykonywane z elastomerowych tworzyw termoplastycznych, najczęściej poliuretanowych [1]. Rosnący popyt na te elementy wpłynął na potrzebę zautomatyzowania ich produkcji. Stąd pomysł zaprojektowania urządzenia do ich łączenia, pozwalającego na zautomatyzowanie ręcznego zgrzewania metodą gorącej płyty. Celem tych działań jest nie tylko poprawa wydajności produkcji, lecz także uzyskanie stałej, wysokiej jakości pasów.

Badania dotyczyły doczołowego zgrzewania metodą gorącej płyty przemysłowych pasów ciągnowych o przekroju kołowym, wykonanych z poliuretanu. Jednym z etapów badawczych było przeprowadzenie prób zgrzewania w warunkach laboratoryjnych.

Aby umożliwić ocenę poprawności połączenia, należy zastosować określone procedury kontroli jakości zgrzeiny oraz zmierzyć jej istotne parametry mechaniczne, np. granicy wytrzymałości na rozciąganie. Wyniki te zostaną odniesione do wytrzymałości materiału rodzimego. Z braku dokładnych danych dotyczących tych tworzyw należy przeprowadzić badania ich właściwości termomechanicznych. Uzyskane stałe materiałowe posłużą również do opracowania modelu fizycznego procesu zgrzewania doczołowego, z wykorzystaniem gorącej płyty, na dalszych etapach badawczych.

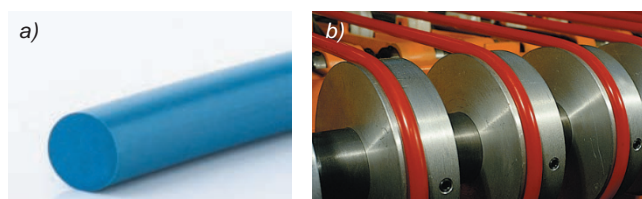
W literaturze można znaleźć szereg prac na temat zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty. Przeprowadzano próby zgrzewania m.in.: pasów wykonanych z tego samego tworzywa, z różnych tworzyw oraz wzmacnianych włóknami bądź proszkami z innego materiału. Zazwyczaj badano tworzywa stosunkowo sztywne w normalnych warunkach otoczenia, np.: poliwęglan (PC) [7, 9, 13], polimetakrylan metylenu (PMMA) [8, 9], kopolimer

akrylonitryl-butadien-styren (ABS) [8], polietylen (PE) [11] czy polipropylen (PP) [10]. W przypadku zgrzewania elastomerów termoplastycznych dane dotyczące właściwości materiału i parametrów procesu technologicznego zgrzewania są ogólnikowe i niewystarczające do analizy.

Charakterystyka termozgrzewalnych pasów ciągnowych

Pasy ciągnowe są powszechnie używane w mechanizmach napędowych maszyn przemysłowych. Obok klasycznych przekładni pasowych, z gumowymi i kompozytowymi pasami (płaskimi, klinowymi oraz zębatymi), popularne są elastyczne cięgna o przekroju kołowym [3]. Pasy te są produkowane z tzw. elastomerów termoplastycznych, najczęściej z poliuretanu [1]. Takie materiały charakteryzują się elastycznością oraz zdolnością do uzyskania dużej wartości odkształcenia nietrwałego. Dlatego można je wykorzystać w układach napędowych, w których jest wymagane stosowanie kół pasowych o stosunkowo niewielkich średnicach (by zapewnić mały promień gięcia pasa). Pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury materiały te zachowują się jak typowe tworzywa termoplastyczne [2]. Dzięki temu możliwe jest ich łączenie poprzez zgrzewanie doczołowe za pomocą gorącej płyty.

Pasy ciągnowe tego typu mają przekrój kołowy, o średnicy od kilku do kilkunastu milimetrów (rys. 1a). Znajdują zastosowanie jako pasy napędowe oraz przenośnikowe w przemyśle lekkim i spożywczym (rys. 1b) [15].



Rys. 1. Elastomerowe pasy ciągnowe o przekroju kołowym [1]: a) przykładowy pas o średnicy 8 mm, b) zastosowanie pasów w przenośniku produktów spożywczych

Wymagania dotyczące termozgrzewalnych pasów ciągnowych

Termozgrzewalne pasy ciągnowe powinny spełniać szereg wymagań, które można podzielić na dwie grupy: warunki normatywne dotyczące wykonanych zgrzein oraz wytyczne konstruktorów maszyn przemysłowych na temat gotowego pasa.

Warunki normatywne dotyczące zgrzein

Ta grupa wymagań wynika z norm określonych dla połączeń spawanych i zgrzewanych tworzyw sztucznych. Zgodnie z normą PN-EN 13100 spoiny termoplastycznych tworzyw sztucznych można poddawać badaniom nieniszczącym, w tym:

* Mgr inż. Krzysztof Wałęsa (krzysztof.walesa@put.poznan.pl), dr hab. inż. Ireneusz Malujda, prof. PP (ireneusz.malujda@put.poznan.pl), dr inż. Krzysztof Talaśka (krzysztof.talaska@put.poznan.pl) – Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Poznańskiej

- ocenie wizualnej,
- badaniom radiograficznym za pomocą promieniowania X,
- badaniom ultradźwiękowym,
- badaniom wysokim napięciem.

Na potrzeby wstępnej oceny wykonanych spoin podczas prac badawczych nad zgrzewaniem wystarczająca będzie ocena wizualna. Jej wyniki zostaną odniesione do wymagań przedstawionych w normie PN-EN 14728 lub jej bardziej precyzyjnym odpowiedniku DIN DVS 2202-1, które opisują typowe niezgodności złączy spawanych i zgrzewanych tworzyw termoplastycznych.

Według tych wytycznych oceniana będzie wystudzona zgrzeina, w której pozostawiono nadmiarowy materiał w postaci wypłytki. W takim przypadku złącze zgrzewane nie powinno mieć:

- pęknięć i korbów w obszarze zgrzeiny oraz poza nią,
- wypłytki o ostrych, postrzępionych krawędziach, której pole przekroju poprzecznego jest znacznie większe niż pasa,
- uszkodzeń cieplnych w postaci nadtopień, zmniejszających pole przekroju poprzecznego łączonych elementów lub samej zgrzeiny,
- uszkodzeń cieplnych, widocznych w postaci zwęglenia materiału, wynikających z przekroczenia dopuszczalnej wartości temperatury ponad granicę destrukcji termicznej,
- niewypełnionych materiałem przestrzeni.

W normach określone są również warunkowo dopuszczalne wady złączy zgrzewanych, do których można zaliczyć:

- małe wtrącenia obcego materiału,
- pęcherze powietrza w zgrzeinie,
- odchylenie kątowe łączonych elementów, wynikające np. z niewłaściwego ustawienia podczas spajania, o ile wymiar kątowy odchylenia nie przekroczy dopuszczalnej wartości,
- mimośrodowość bądź przesunięcie zgrzewanych elementów,
- nierówność wysokości i szerokości wypłytki po obu stronach złącza.

Tego rodzaju wady są dopuszczalne, jeśli nie przekraczają określonych w normie wymiarów geometrycznych lub ilości [5, 14].

Ocena niektórych nieprawidłowości złączy może wymagać ich obróbki mechanicznej (przecięcia itp.). Ta operacja musi być wykonana w taki sposób, aby nie zniszczyć struktury złącza, np. poprzez znaczne zniekształcenie obszaru zgrzeiny.

Wymagania dotyczące użytkowania pasów ciągnowych

Druga grupa wymagań pochodzi z wytycznych proponowanych przez odbiorców pasów ciągnowych. Zamontowany w mechanizmie napędowym pas powinien spełniać pewne warunki, wynikające z zasad konstrukcji maszyn, takie jak:

- zachowanie odpowiednich wymiarów pasa w obszarze połączenia, co należy rozumieć jako brak odchylenia średnicy od średniej wartości dla litego materiału. Wynika to z wymagań układów napędowych. Pasy pracują zazwyczaj z precyzyjnie wykonanymi rolkami. Każde zaburzenie ich geometrii może wprowadzać wahania prędkości i momentu obrotowego. To z kolei grozi powstaniem niepożądanych drgań i w konsekwencji – dodatkowych, nadmiernych naprężeń w przekroju poprzecznym pasa [4], przyspieszających zużycie. Ponadto wprowadzane są dodatkowe obciążenia pozostałych elementów układu napędowego,

np. łożysk lub wałów, które niekorzystnie wpływają na ich trwałość. Spełnienie tego warunku wymaga usunięcia nadmiaru materiału, który wypływa poza obszar zgrzeiny;

- zachowanie współosiowości zgrzewanych końców, gdyż jej brak przyczynia się do powstania niedokładności geometrii pasa, co powoduje wymienione już skutki;
- dokładne wykonanie zgrzeiny w całym przekroju – niepełne połączenie, tylko w części pola poprzecznego spoiny, powoduje obniżenie wytrzymałości pasa na wielokrotne zginanie, które zachodzi podczas pracy na kołach pasowych;
- zachowanie odpowiedniej wytrzymałości na rozciąganie pasa po zgrzewaniu – w najlepszym przypadku wytrzymałość zgrzeiny na rozciąganie jest taka sama jak materiału rodzimego. Ważne jest również zachowanie zbliżonego przebiegu krzywej rozciągania dla zgrzeiny i litego pasa. Warunek jest spełniony, jeśli moduł sprężystości wzdłużnej zgrzeiny i materiału pasa jest taki sam.

Praktyka pokazuje, że opisane nieprawidłowości oraz brak zachowania pożądanej wytrzymałości pasa mogą powstawać z powodu błędów technologicznych w procesie łączenia, np.:

- niewłaściwego zorientowania zakończeń pasa względem siebie oraz względem gorącej płyty podczas etapów nagrzewania i spajania,
- doboru niewłaściwych wartości parametrów technologicznych procesu zgrzewania, m.in.: temperatury gorącej płyty, czasu trwania poszczególnych etapów technologicznych oraz siły docisku podczas nagrzewania i spajania.

Cięgno z takimi wadami powinno być odrzucone ze względu na wysokie prawdopodobieństwo niedotrzymania założonych parametrów mechanicznych, np. zdolności do przenoszenia obciążeń. Wiąże się to z możliwością jego przyspieszonego uszkodzenia oraz zaburzenia pracy mechanizmu, w którym zastosowano pas.

Wstępna procedura badawcza pasów

Badania zgrzewania doczołowego pasów ciągnowych wymagają sekwencyjnej kontroli uzyskiwanych wyników.

Na pierwszym etapie prac badawczych połączenia zgrzewane wykonane na stanowisku badawczym podlegają ocenie wizualnej, zgodnie z powołanymi normami.

Na drugim etapie, po pozytywnej weryfikacji, spoiny będą poddawane próbie rozciągania na maszynie wytrzymałościowej. W ten sam sposób będą również badane właściwości litego materiału bez zgrzeiny, dla pasa z tej samej serii produkcyjnej. Uzyskane wyniki będą ze sobą porównywane, co pozwoli wyznaczyć empiryczny współczynnik wytrzymałości względnej spoiny [12]:

$$f_z = \frac{\sigma_{Schw}}{\sigma_{GM}}$$

gdzie: σ_{Schw} – granica wytrzymałości na rozciąganie próbki ze spoiną, σ_{GM} – granica wytrzymałości na rozciąganie litego materiału.

Jego wartość w idealnym przypadku powinna być równa 1. Oznacza to, że spoina jest tak wytrzymała jak materiał rodzimy. Zwyczajowo w przemyśle uznaje się tę tezę za prawdziwą, celowe jest więc jej sprawdzenie.

Rozpatrywane będą ciągnia wykonane z poliuretanu o twardości 88°Sh w skali A Shore'a. Wybrano dwa typy dostępnych w ofercie handlowej pasów ciągnowych, z których pobrane będą próbki:

- pas PU 85A o przekroju kołowym i oznaczeniu handlowym FBRK020GGAAA oraz średnicy $\varnothing 2$ mm będzie przeznaczony do wykonywania próbek walcowych,

• pas płaski PU 85A o przekroju prostokątnym i oznaczeniu handlowym FBK150X4GG oraz grubości 4 mm będzie przeznaczony do badań próbek płaskich z przewężeniem.

Producent tych pasów deklaruje identyczność rodzaju tworzywa, z którego wykonane są oba pasy, oraz taką samą strukturę ich powierzchni.

Badanie poliuretanu, z którego wykonane są pasy, ma na celu poznanie jego podstawowych właściwości termomechanicznych. Założono, że na pierwszym etapie wystarczające będzie przeprowadzenie próby rozciągania, dzięki czemu zostaną określone:

- wytrzymałość materiału na rozciąganie,
- moduł sprężystości wzdłużnej,
- wydłużenie względne pasa podczas zerwania.

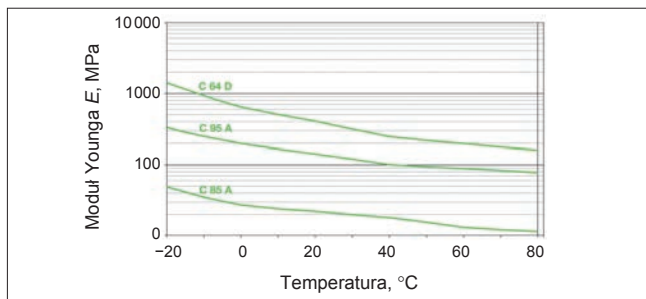
Badania te będą powtarzane w temperaturze pokojowej ok. 20°C oraz w warunkach podwyższonej temperatury. Jej wartość będzie zwiększana stopniowo, aż do 100°C (wynika to z maksymalnej dopuszczalnej temperatury pracy pasa). Pozwoli to wyznaczyć wpływ wzrostu temperatury na ewentualną zmianę wartości podstawowych parametrów wytrzymałościowych. Wyniki tych badań będą stanowić dane wejściowe, potrzebne do opracowania modelu fizycznego procesu zgrzewania doczołowego metodą gorącej płyty, oraz wartości porównawcze do dalszych badań empirycznych.

Dostępne w literaturze (np. w katalogach producentów) informacje na temat poliuretanowych pasów ciągnowych nie zawierają dokładnych danych o właściwościach wytrzymałościowych materiału. Zamiast tego można odczytać np. dopuszczalne obciążenie na jeden pas przenośnika poziomego. Niestety nie jest możliwe porównanie tych wartości wprost z wartością wytrzymałości pasa na rozciąganie.

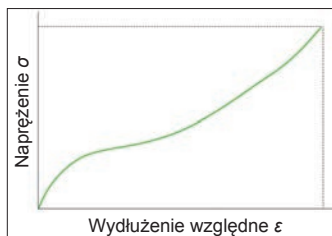
W literaturze można również znaleźć karty materiałowe poliuretanów stosowanych do produkcji ciągów, udostępnione przez producentów tworzyw sztucznych. Można z nich pozyskać np. krzywą rozciągania (rys. 2) lub zależność modułu sprężystości wzdłużnej od temperatury (rys. 3).

Jednak bez wykonania badań empirycznych niemożliwe jest potwierdzenie zgodności tych danych z właściwościami tworzywa, z którego będą pobierane próbki do zgrzewania.

Podczas badań wytrzymałości materiału istotne jest przyjęcie odpowiednich parametrów geometrycznych próbek. Zdecydowano, że na tym etapie zastosowane będą:

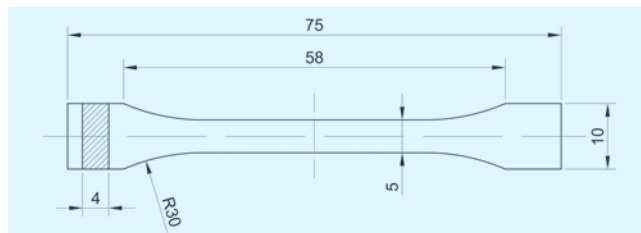


Rys. 2. Zależność modułu Younga od temperatury poliuretanów, o różnej twardości, z grupy Elastollan [6]



Rys. 3. Krzywa rozciągania przykładowego poliuretanu z grupy Elastollan [6]

- płaskie próbki dwuwiosłowe typu 1BA z przewężeniem (rys. 4), wykonane zgodnie z zaleceniami normy PN-EN ISO 527-1 i 2, dotyczącej badań właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu tworzyw sztucznych,
- próbki walcowe pasów o średnicy $\varnothing 2$ mm i długości 75 mm, pobrane z wyprodukowanych pasów ciągnowych.



Rys. 4. Wymiary próbki płaskiej typu 1BA do badania rozciągania pasa poliuretanowego zgodnie z PN-EN ISO 527-2

Badania takich próbek walcowych nie są znormalizowane. Dlatego ich wyniki nie będą stanowić wartości wzorcowej do dalszych analiz procesu zgrzewania tego materiału.

Przeprowadzenie takich prób jest jednak celowe, ponieważ w praktyce przemysłowej stosowane są pasy w takiej właśnie postaci. Należy więc sprawdzić, czy takie czynniki, jak:

- obróbka mechaniczna konieczna do wytworzenia próbki dwuwiosłowej (cięcie na wykrojniku),
- różnice w technologii wytwarzania pasa płaskiego (z którego będą pobrane próbki dwuwiosłowe) oraz walcowego (stosowanego powszechnie typu pasów okrągłych),
- odmienna struktura powierzchni obu próbek wynikająca z obróbki mechanicznej powierzchni

– mają wpływ na właściwości wytrzymałościowe tego materiału. Uwzględniając te czynniki, należy zwrócić również uwagę na wpływ techniki wytwarzania wyrobów, z których pobrane będą próbki, np. na ewentualne ukierunkowanie makrocząsteczek w tworzywie, a przez to – na kierunkowe zorientowanie właściwości mechanicznych.

Podczas opracowywania metodologii badań wytrzymałościowych materiału pasa przeprowadzono testowe próby rozciągania próbki walcowej pasa o średnicy $\varnothing 4$ mm oraz próbki płaskiej dwuwiosłowej o długości 150 mm (próbka 1B według normy PN-EN ISO 527-2). Zaobserwowano pewne trudności, które mają duży wpływ na opracowaną metodologię i rodzaj oprzyrządowania niezbędnego do badań, m.in.:

- zbyt mały zakres przemieszczenia uchwytu maszyny wytrzymałościowej w przypadku rozciągania próbki płaskiej dwuwiosłowej, co uniemożliwiło zerwanie pasa. Podczas prób uzyskano odkształcenia względne pasa przekraczające 1000%, co przy tego typu próbce (1B o długości 150 mm i odcinku pomiarowym dłuższym niż 100 mm), powodowało wyczerpanie zakresu pomiarowego maszyny MTS Insight 50, który wynosi maksymalnie 1050 mm,
- zrywanie próbek w uchwytach lub ich wyslizgiwanie się ze szczęk, co uniemożliwiało poprawne uchwycenie pasa o przekroju kołowym. Gdy siła zacisku pasa w uchwycie była stosunkowo niewielka, pasy się wyslizgiwały. Gdy zaciśnięto szczęki z większą siłą, to próbki zrywały się w uchwycie, a nie w pożądanym zakresie pomiarowym (czyli między uchwytami). Wynika to z wprowadzania dodatkowych naprężeń do struktury materiału podczas ściskania końcówek pasa w uchwycie. Przekrój poprzeczny pasa kołowego bez przewężeń charakteryzuje się w przybliżeniu jednakową wytrzymałością na całej długości, dlatego pasy zrywały się w uchwytach.

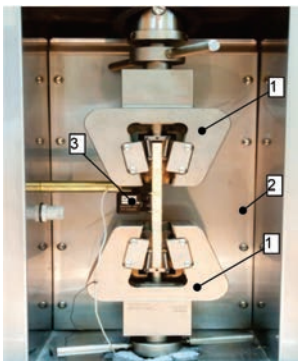
Ze względu na te problemy w badaniach będą zastosowane próbki płaskie pomniejszone (1BA na rys. 4), warunkowo dopuszczone przez normę PN-EN ISO 527-2.

Do prób zrywania próbek walcowych zaprojektowano specjalny uchwyt (rys. 6).

Badania wytrzymałościowe zgrzein pasów ciągnowych będą przeprowadzone według takiej samej metodyki. Umożliwi to zachowanie tych samych warunków, a dzięki temu – porównanie wyników i wyznaczenie współczynnika względnej wytrzymałości spoiny f_z .

Oprzętowanie do badań wytrzymałości pasa i spoin na rozciąganie

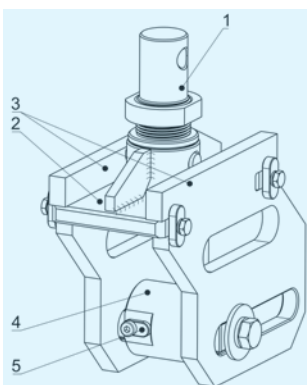
W próbach rozciągania pasów oraz spoin zgrzewanych metodą gorącej płyty zostanie wykorzystana maszyna wytrzymałościowa MTS Insight 50 z komorą klimatyczną i ekstensometrem przystosowanym do pracy w podwyższonej temperaturze (rys. 5).



Rys. 5. Maszyna wytrzymałościowa MTS z zabudowaną komorą klimatyczną w trakcie próby rozciągania: 1 – uchwyty dwuszczkowe, 2 – komora klimatyczna, 3 – ekstensometr

Komora klimatyczna pozwoli na uzyskanie pożądanej podwyższonej temperatury podczas próby rozciągania. Ekstensometr zapewni dokładne wyznaczenie odkształcenia próbki, dzięki czemu będzie możliwe wyznaczenie modułu sprężystości wzdłużnej materiału. Do badania próbek płaskich zostaną wykorzystane standardowe klinowe uchwyty dwuszczkowe, stanowiące wyposażenie maszyny MTS.

W badaniu próbek walcowych zostanie wykorzystany zaprojektowany uchwyt (rys. 6), w którym pas jest nawijany na rolkę. To zapewni zmniejszenie naprężeń w chwytanym przekroju i pozwoli na zerwanie pasa w odcinku pomiarowym. Dwa takie uchwyty będą zamontowane do maszyny wytrzymałościowej z użyciem trzpienia (1). Jest on połączony rozłącznie z płytą nośną (2), do której za pomocą połączenia kształtowego zamontowane są dwie płyty pionowe (3). Do fasolkowych otworów, za pomocą połączenia kształtowego, zamontowana jest rolka (4), na którą będzie nawijany pas. Jej średnica jest większa od minimalnego dopuszczalnego promienia gięcia pasa, określonego w katalogu producenta. Koniec pasa będzie przyciśnięty do płaskiej powierzchni przez płytkę zabezpieczającą (5).



Rys. 6. Uchwyt do badania wytrzymałości na rozciąganie pasów i połączeń zgrzewanych: 1 – trzpień montażowy, 2 – płyta nośna, 3 – płyty pionowe, 4 – rolka, 5 – płytka zabezpieczająca

Przewiduje się, że nawinięcie pasa na rolkę i unieruchomienie jego końca umożliwi zerwanie pasa w zakresie pomiarowym pomiędzy uchwytami. Rolka jest wymienna, co pozwala na rozciąganie pasów o większej średnicy, które mają większy minimalny dopuszczalny promień gięcia. Przykładowo: dla pasa o średnicy $\varnothing 2$ mm, wykonanego z materiału o twardości 88° według skali Shore'a A, minimalna wymagana średnica rolki wynosi 15 mm, natomiast dla pasa średnicy $\varnothing 12$ mm – 120 mm [1]. Dodatkowo rolka ma możliwość przesuwu poprzecznego w fasolkowym otworze płyt pionowych i dlatego możliwe jest uzyskanie osiowego oddziaływania siły rozciągającej względem mechanizmu przesuwu i układu pomiarowego maszyny MTS.

Podsumowanie

Zgrzewane pasy ciągnowe o przekroju kołowym, wykonane z poliuretanu termoplastycznego, powinny spełnić szereg wymagań normatywnych, a także wytycznych wywodzących się z praktyki przemysłowej. Wstępne prace badawcze nad zgrzewaniem tych pasów wymagają: przeprowadzenia badań właściwości wytrzymałościowych materiału pasa, wykonania zgrzein, ich oceny wizualnej i badań wytrzymałościowych. Osobliwe właściwości poliuretanu, np. duża elastyczność, są źródłem licznych problemów badawczych, takich jak trudności w uchwyceniu próbek walcowych lub niewystarczający zakres pomiarowy maszyny wytrzymałościowej. Podczas opracowywania metodologii badawczej w odpowiedzi na te problemy zaprojektowano oprzętowanie. Uchwyt rolkowy pozwala na przeprowadzenie próby rozciągania pasa w taki sposób, aby materiał o stałym przekroju poprzecznym na całej długości zerwał się w pożądanym miejscu.

Wyznaczone wartości stałych materiałowych będą wykorzystane do:

- oceny jakości wykonywanych zgrzein poprzez porównanie wytrzymałości litego materiału ze spoiną,
- opracowania modelu fizycznego procesu zgrzewania.

Badania będą stanowić podstawę do formułowania założeń konstrukcyjnych prototypu urządzenia do zautomatyzowanego zgrzewania pasów ciągnowych.

LITERATURA

1. BEHAbelt. "Product Catalogue 2015/2016". Glottteral: BEHAbelt, 2015.
2. Ciszewski A., Radomski T. „Materiały konstrukcyjne w budowie maszyn”. Warszawa: PWN, 1989.
3. Domek G., Malujda I. „Modelling of timing belt construction”. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*. 7, (2007): s. 45–46.
4. Domek G., Dudziak M. „Energy dissipation in timing belts made from composite materials”. *Advanced Material Research*. 189–193 (2011): s. 4414–4418.
5. Grewell D., Benatar A. „Welding of plastics: fundamentals and new developments”. *International Polymer Processing*. 22, 1 (2007): s. 43–60.
6. *Katalog Elastollan® – material properties*, BASF.
7. Krishnan C., Benatar A. „Analysis of residual stress in hot plate welded polycarbonate”. *ANTEC 2004 Plastics: Annual Technical Conference*. Vol. 1: *Processing*. (2004): s. 1149–1153.
8. Mokhtarzadeh A., Wu Ch., Benatar A. „Comparison of hot plate and vibration welding of PMMA to ABS”. *ANTEC 2008 Plastics: Annual Technical Conference. Proceedings*. (2008): s. 856–861.
9. Mokhtarzadeh A., Wu Ch., Benatar A. „Comparison of hot plate and vibration welding of PMMA to Polycarbonate”. *ANTEC 2008 Plastics: Annual Technical Conference. Proceedings*. (2008): s. 851–855.
10. Nieh J., Lee J. „Hot plate welding of polypropylene. Part I: Crystallization kinetics”. *Polymer Engineering and Science*. 38, 7 (1998): s. 1121–1132.
11. Poopat B., Benatar A. „Comparative study of contact and non-contact hot plate welding of HDPE”. *ANTEC 2000 Plastics: Annual Technical Conference*. Vol. 1: *Processing*. (2000): s. 1117–1122.
12. Potente H., Brüßel A. „Welding behaviour of filled and reinforced thermoplastics with hot plate welding”. *ANTEC 1998. Proceedings*. (1998): s. 1062–1066.
13. Stokes V.K. „A phenomenological study of the hot-tool welding of thermo-plastics. Part 1: Polycarbonate”. *Polymer*. 40, 23 (1999): s. 6235–6263.
14. Troughton M. „*Handbook of plastics joining: a practical guide*”. New York: Plastics Design Library, 1997.
15. Wojtkowiak D., Talaśka K., Malujda I., Domek G. „Perforacja pasów do transportu podciśnieniowego – metody, materiały oraz problemy”. *Mechanik*. 12 (2017): s. 1138–1142.