

Perforacja pasów do transportu podciśnieniowego – metody, materiały oraz problemy

Vacuum conveyor belts perforation – methods, materials and problems

DOMINIK WOJTKOWIAK
KRZYSZTOF TALAŚKA
IRENEUSZ MALUJDA
GRZEGORZ DOMEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.12.192>
English version available on: www.mechanik.media.pl

Przedstawiono analizę metod perforacji polimerowych pasów kompozytowych z uwzględnieniem współczesnych tendencji rozwoju materiałów stosowanych do produkcji pasów i taśm przenośnikowych do transportu podciśnieniowego. Dodatkowo poruszono problemy pojawiające się przy otworowaniu pasów oraz nakreślono obszar badawczy, którego realizacja przyczyni się do rozwoju procesów produkcyjnych pasów perforowanych.

SŁOWA KLUCZOWE: pasy podciśnieniowe, metody perforacji, przenośniki pasowe, taśmy przenośnikowe, pasy kompozytowe

The analysis of suitable perforation methods for polymer composites belts with regard to modern material trends in manufacturing the conveyor and timing belts for the vacuum transport was presented. Authors also discussed problems, that arise during belt perforation and specified the research area, which will help to develop the production process of perforated belts.

KEYWORDS: vacuum belts, perforation, methods, belt conveyors, conveyor, timing belts, polymer composites belts

Przenośniki pasowe podciśnieniowe są często stosowane do transportu lekkich elementów, których ze względu na niską masę nie można przenosić z wykorzystaniem tarcia (np. papieru, folii czy kartonu), oraz do transportu płacht [1]. Znajdują więc one szerokie zastosowanie m.in. w przemyśle papierniczym, spożywczym, chemicznym, jak również w maszynach drukarskich i ogólnych urządzeniach transportu bliskiego. Pasy podciśnieniowe (*vacuum belts*) mogą mieć postać zarówno pasów płaskich, jak i zębatach. Najważniejszym procesem w produkcji takich pasów jest perforacja – czyli wykonanie otworów, przez które odsysane jest powietrze w celu wytworzenia podciśnienia pomiędzy pasem a elementem transportowanym.

Autorzy przeanalizowali dostępne metody perforacji z uwzględnieniem współczesnych tendencji w rozwoju materiałów stosowanych do produkcji pasów kompozytowych oraz wskazali na problemy związane z otworowaniem pasów i taśm przenośnikowych.

Taśmy i pasy przenośnikowe

Taśma przenośnikowa służy do podtrzymywania transportowanego materiału i przenoszenia go wzdłuż przenośnika. Do jej zadań należy również przenoszenie sił wzdłużnych, które są niezbędne do pokonania oporów ruchu, w przypadku gdy przenośnik nie ma odrębnego

ciągną pędnego. Przenośnik taśmowy może transportować materiały sypkie, drobne albo duże pojedyncze elementy na powierzchni jednej taśmy. Aby działał prawidłowo, taśmy przenośnikowe powinny być wytrzymałe na rozciąganie oraz elastyczne w kierunku wzdłużnym i poprzecznym, a także trwałe, odporne na ścieranie, przebiecia, uszkodzenia mechaniczne i działanie czynników zewnętrznych oraz wysokiego współczynnika tarcia okładki nośnej [2, 3].

Pasy przenośnikowe – w odróżnieniu od taśm przenośnikowych – pełnią funkcję transportową oraz napędową. Wykorzystywane są do wielokierunkowego, liniowego bądź kątownego, przemieszczania ładunku. Przenośnikami pasowymi można transportować pojedyncze produkty o znacznych wymiarach i stosunkowo niewielkiej masie. Transport odbywa się za pomocą kilku lub kilkunastu pasów napędzanych przez wspólny wał napędowy – aby zapewnić równą prędkość elementów przenośnika. Ich niewątpliwą zaletą jest możliwość dostępu do transportowanego towaru od dołu. Budowa pasów może być płaska, klinowa lub zębata. Pasy przenośnikowe powinny być przede wszystkim wytrzymałe na rozciąganie, a zarazem na tyle sztywne, by zapewnić stabilność podczas transportu przy jednoczesnej możliwości opasania pasa wokół wału napędowego o niedużej średnicy. W przypadku konieczności dokładnego pozycjonowania (synchronizacji ruchu) stosuje się pasy zębate [4–6].

Rosnące wymagania, co do właściwości pasów i taśm wykorzystywanych jako elementy konstrukcyjne w współczesnych maszynach i urządzeniach, stanowią o potrzebie ich ciągłego doskonalenia w zakresie konstrukcyjnym, materiałowym oraz związanym z technologią wytwarzania [7].

Do transportu podciśnieniowego można wykorzystać zarówno taśmy, jak i pasy przenośnikowe płaskie oraz zębate. Pasy płaskie mają najczęściej budowę wielowarstwowego kompozytu polimerowego (rys. 1) i składają się z rdzenia 1, przekładek ochronnych 2 i okładek: bieżnej 3 i nośnej 4 [2, 3].

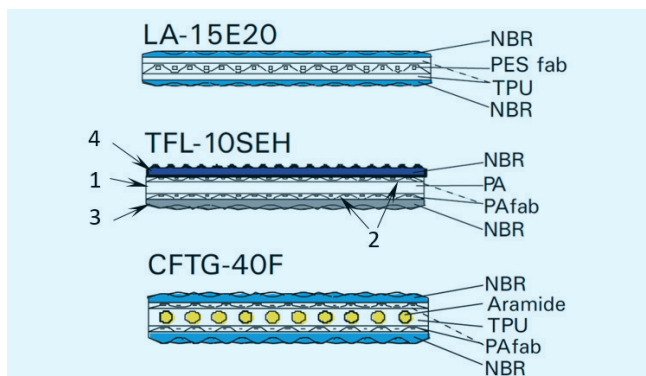
Wśród dostępnych na rynku pasów płaskich można wyróżnić:

- elastyczne lekkie pasy, których rdzeń wykonuje się z poliuretanu, czasem wzmocnionego tkaniną poliestrową, polichloru winylu (PVC), tkaniny lub gumy – LA-15E20,
- sztywne pasy o podwyższonej wytrzymałości, których rdzeń stanowi warstwa poliamidu – TFL10SEH,
- wytrzymałe, elastyczne pasy, których poliuretanowy rdzeń jest wzmocniony kordem z włókien aramidowych (kevlaru) – CFTG-40F.

W większości pasów – ze względu na korzystne właściwości cierne – okładkę bieżną i nośną wykonuje się z kauczuku butadieno-akrylo-nitrylowego (NBR), który może mieć różną strukturę powierzchni. W celu uzyskania niepalnej i gładkiej struktury na okładkach stosuje się

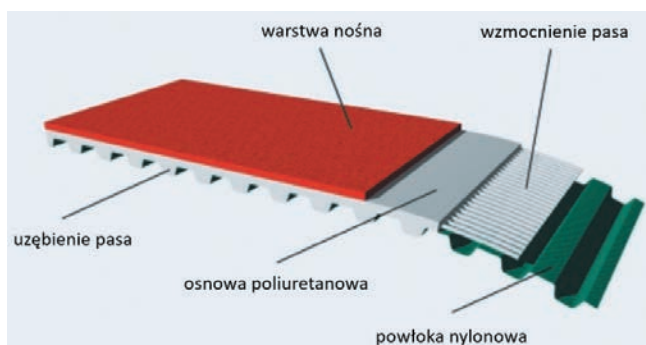
* Mgr inż. Dominik Wojtkowiak (dominik.wojtkowiak@put.poznan.pl), dr inż. Krzysztof Talaśka (krzysztof.talaska@put.poznan.pl), dr hab. inż. Ireneusz Malujda prof. PP (ireneusz.malujda@put.poznan.pl) – Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Poznańskiej; dr hab. inż. Grzegorz Domek prof. nadzw. (gdomek@ukw.edu.pl) – Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy

również często PVC. Przekładki ochronne występują głównie w pasach mocnych i mają chronić rdzeń oraz dodatkowo wzmocnić pas. Najczęściej rolę przekładki pełni warstwa odpowiednio utkanej tkaniny poliamidowej, często wtopionej w strukturę rdzenia. Na rys. 1 przedstawiono pasy firmy Nitta z trzech opisanych grup, które charakteryzują się najczęściej spotykaną strukturą.



Rys. 1. Struktura i materiały kompozytowych pasów przenośnikowych: LA-15E20 – elastyczny pas warstwowy z poliuretanu wzmocnianego tkaniną poliestrową, TFL-10SEH – mocny, sztywny pas warstwowy z rdzeniem poliamidowym, CFTG-40F – mocny elastyczny pas z poliuretanu wzmocnianego kordem z włókien aramidowych; NBR – kauczuk butadienowo-akrylo-nitrylowy, TPU – poliuretan, PA – poliamid, PES – poliester, fab – tkanina, Aramide – kevlar (opis w tekście) [20]

Pasy zębate (rys. 2) wykonuje się najczęściej z gumy lub poliuretanu, które stanowią osnowę, oraz kordu stalowego lub z włókien aramidowych czy szklanych stanowiących wzmocnienie. W celu uzyskania specjalnych właściwości pasa, np. zmniejszenia tarcia lub zapewnienia cichszej pracy, obie strony pasa mogą zostać pokryte odpowiednią powłoką (z pianki poliuretanowej, tkaniny nylonowej itp.).

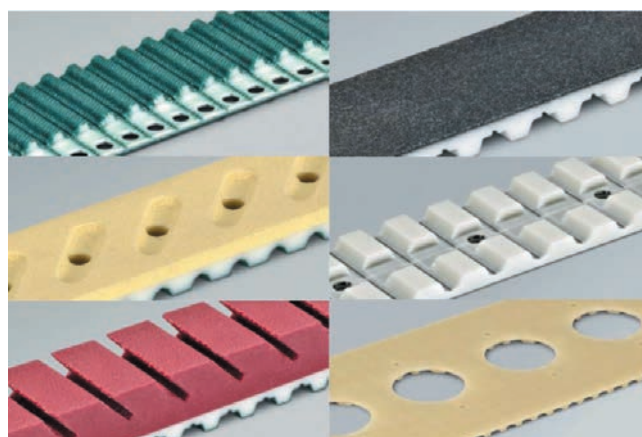


Rys. 2. Budowa pasa zębatego poliuretanowego wzmocnionego kordem i pokrytego powłokami od strony nośnej i bieżnej [21]

Aby spełnić rosnące wymagania dotyczące pasów przenośnikowych, wprowadza się liczne modyfikacje. Na rys. 3 przedstawiono przykładowe pasy zębate firmy Habasit.

Pasy zębate mają często sfrezowaną część zębów, co pozwala na ich odpowiednie prowadzenie, umożliwia zamontowanie dodatkowych elementów mechanicznych czy zapewnia płaską bieżnię, aby stworzyć odpowiednie podciśnienie. Za pomocą frezowania wykonuje się również rowki, które mają zwiększyć powierzchnię kontaktu przy transporcie podciśnieniowym między pasem a przenoszonym elementem. Z kolei aby uzyskać odpowiednie właściwości okładek pasa, nakłada się nowe warstwy lub kształtuje istniejące, np. przez nacinanie. Ostatnią, a zarazem najważniejszą w aspekcie transportu podciśnieniowego modyfikacją jest perforacja.

Oprócz transportu podciśnieniowego pasy perforowane można wykorzystywać do sterowania optycznego z zasto-



Rys. 3. Przykłady modyfikacji pasów zębatach przez firmę Habasit [22]

sowaniem fotokomórek, mocowania elementów mechanicznych na pasie, odsączania i suszenia transportowanych elementów, ich segregacji lub pozycjonowania.

Metody perforacji pasów kompozytowych

Jakość otworów pasa perforowanego ma istotne znaczenie dla jego właściwości, dlatego tak ważny jest wybór odpowiedniej metody perforacji i jej parametrów. Można wyróżnić mechaniczne metody perforacji pasów, do których należą wykrawanie oraz wiercenie, a także metody niemechaniczne, jak: cięcie laserowe, cięcie strumieniem wodno-ściernym (*abrasive waterjet* – AWJ), cięcie plazmą oraz elektrodrażenie (EDM).

Perforacja niemechaniczna ma tę przewagę nad perforacją mechaniczną, że nie towarzyszą jej siły kontaktowe pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym. Nie występuje więc deformacja elementu na skutek obciążenia mechanicznego albo zużycia ciernego narzędzia. Ta metoda jest jednak znacznie droższa ze względu na koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Ponieważ polimery są izolatorami elektrycznymi, niemożliwe jest zastosowanie cięcia plazmą bądź EDM [8]. W celu określenia, która z metod perforacji najlepiej nadaje się w przypadku pasów kompozytowych, krótko scharakteryzowano pozostałe metody.

Obróbka laserowa polimerów może być realizowana dwoma sposobami: przez rozbijanie wiązań cząsteczkowych promieniowaniem laserowym lub przez topienie materiału i odparowywanie w mieszaninie gazów osłonowych. Ze względu na właściwości polimerów zaleca się stosowanie gazowego generatora laserowego z CO₂, którego wiązka wysoko koherentnego promienia laserowego może być ciągła (*continuous wave*) lub sterowana pulsacyjnie.

Ponieważ proces cięcia ma charakter termiczny, twardość oraz wytrzymałość obrabianego elementu nie mają wpływu na jego przebieg. Wydajność procesu spada natomiast znacząco wraz ze wzrostem grubości pasa. Wysoka temperatura podczas obróbki laserowej prowadzi do zmiany właściwości materiału w strefie wpływów cieplnych (HAZ) oraz termicznej deformacji elementu (zwęglania, spiętrzania materiału osnowy wokół krawędzi otworu czy delaminacji). Zapewnienie odpowiedniego stosunku mocy lasera i prędkości cięcia pozwala na zmniejszenie HAZ i redukcję wad otworów. Zaleca się stosowanie większej prędkości, gdyż skraca to czas, w którym kompozyt jest nagrzewany, jednak jednocześnie prowadzi do mniejszej penetracji lasera w głąb materiału. W kompozytach wzmocnianych włóknami dochodzi często do puchnięcia włókien, skurczu termicznego osnowy oraz przypalania niedociętych włókien.

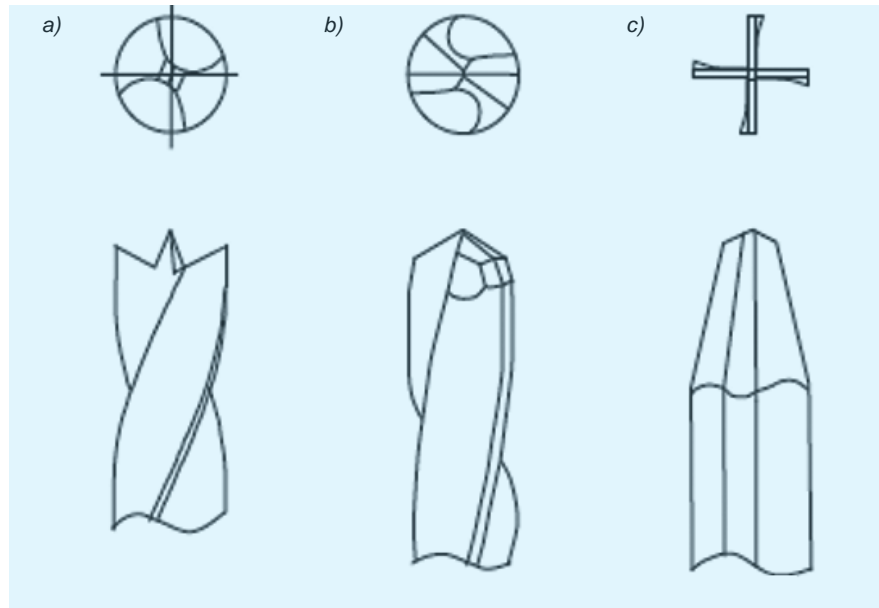
Im większa różnica między właściwościami osnowy i wzmocnienia, tym proces cięcia jest mniej efektywny. Dla włókien aramidowych i poliuretanu różnice te są niewielkie, ale podczas obróbki laserowej kevlaru dochodzi do jego zwęglenia i wydzielają się duże ilości toksycznego cyjanowodoru. Ze względu na anizotropię właściwości takich pasów cięcie prostopadłe do włókien powoduje zwiększanie się HAZ w porównaniu z cięciem wzdłuż włókien. Przy wykrawaniu otworów cylindrycznych o mniejszych średnicach można stosować wiercenie laserowe, w którym kierunek ułożenia włókien nie ma większego znaczenia, jednakże przy większych otworach i konieczności cięcia laserowego będzie to wprowadzać różnorodność w rozkładzie temperatury w strefie HAZ. Pod kątem geometrii wycinanego otworu stosowanie cięcia laserowego pozwala uzyskać wysoką dokładność kształtu, dzięki wąskiej szczelinie cięcia, i dość dobrą jakość powierzchni bocznej otworu. Na skutek stożkowości wiązki laserowej średnice po obu stronach pasa mogą się nieznacznie różnić [8–11].

Cięcie strumieniem wodno-ściernym polega na erozji materiału pod wpływem działania wąskiego strumienia pod bardzo wysokim ciśnieniem, formowanego w specjalnej dyszy, tak by osiągnąć moc wystarczającą do obróbki nawet najtwardszych materiałów. Metoda AWJ jest uniwersalna – można nią obrabiać większość materiałów, od bardzo cienkich do grubych. Najważniejszą jej zaletą jest brak oddziaływań cieplnych na obrabiany materiał, dlatego idealnie się nadaje do obróbki tworzyw sztucznych.

Ze względu na większą szerokość szczeliny cięcia niż przy obróbce laserowej precyzja cięcia jest mniejsza, lecz nadal wystarczająca, nawet gdy kształty są skomplikowane. Jakość obrabianych powierzchni jest przy tym znacznie lepsza i zależy głównie od wielkości ziaren ścierniwa i jego wydatku masowego. W materiałach o znacznych grubościach pojawiają się charakterystyczne zakrzywione ślady obróbkowe zależne od prędkości posuwu.

Cięcie metodą AWJ jest znacznie wolniejsze niż cięcie laserowe, za to jest przyjazne dla środowiska ze względu na brak wydzielania szkodliwych substancji i możliwość recyklingu medium. Erozyjny charakter procesu pozwala na stosowanie tej metody do kompozytów wielowarstwowych – delaminacja występuje tylko przy bardzo dużych prędkościach albo gdy materiał jest wrażliwy na wilgoć. W przypadku perforacji metodą AWJ największy wpływ na odchyłkę okrągłości ma prędkość głowicy tnącej – wzrost prędkości powoduje niemal liniowe zwiększanie się odchyłki. Pozostałe parametry procesu – takie jak odległość głowicy od obrabianego materiału oraz wydatek masowy ścierniwa – mają znacznie mniejszy wpływ na odchyłkę okrągłości otworów. W przypadku kompozytów wzmocnianych włóknami aramidowymi niedocięte włókna mogą zostać postrzępione [8, 11, 12]. Dodatkową wadą może być konieczność suszenia pasów po perforacji.

Wiercenie polega na wykonywaniu cylindrycznych otworów za pomocą skrawania materiału wiertłem obracającym się z dużą prędkością. Jest jedną z najczęściej stosowanych metod wykonywania otworów montażowych w materiałach kompozytowych. Niewłaściwy dobór para-



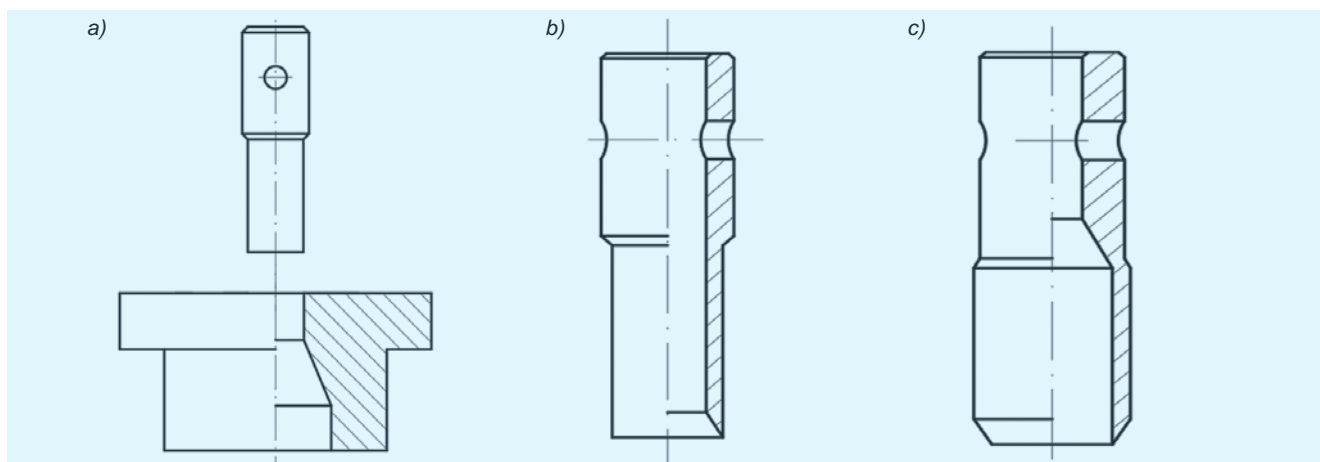
Rys. 4. Konstrukcje efektywnych narzędzi skrawających do wiercenia w kompozytach warstwowych i wzmocnianych włóknami (opis w tekście) [8]

metrów operacji bądź narzędzia skrawającego prowadzi do powstawania licznych uszkodzeń. Klasyczne wiertło kręte, dwurowkowe, nie jest przystosowane do obróbki kompozytów, dlatego konieczne jest stosowanie specjalnych efektywnych narzędzi (rys. 4). Konstrukcje (a) oraz (c) powodują najmniejszą delaminację, na skutek zmniejszenia długości ścinu wiertła, podczas gdy wiertło (b) minimalizuje niedocięcie wystających włókien. Do wiercenia w cienkich laminatach zaleca się narzędzia typu (a).

Podczas wiercenia wydziela się znaczna ilość ciepła związana z tarciami, które rośnie wraz z prędkością skrawania oraz posuwu. Dlatego wiercenie kompozytów odbywa się jedynie w wąskim zakresie parametrów technologicznych, by zapobiec nadmiernemu nagrzewaniu się elementu obrabianego i zniwelować deformację termiczną kompozytu. Dodatkowo słaba przewodność cieplna kompozytów polimerowych powoduje koncentrację ciepła w miejscu wiercenia i konieczność odprowadzania go przez wiertło, co znacznie skraca żywotność narzędzia. Zróżnicowanie właściwości składników kompozytu utrudnia uzyskanie dokładności wymiarowej – występuje bowiem skurcz materiału po jego ochłodzeniu. Włókna wzmocniające znacznie przyspieszają zużywanie się krawędzi skrawających, co prowadzi do wzrostu siły osiowej, a więc zwiększa ryzyko delaminacji.

Delaminacja kompozytu podczas wiercenia może nastąpić od strony wejścia i wyjścia wiertła. W pierwszym przypadku jest skutkiem zdzierania wierzchnich warstw skrawanych i zawijania się włókien wokół wiertła. Natomiast w drugim przypadku jest spowodowana wypychaniem dolnych warstw na skutek przekroczenia granicy spójności, przez dodatkowe naprężenia gnące i ściskające. Strategią zapobiegania delaminacji jest zwiększenie sztywności dolnej warstwy dzięki zastosowaniu płyty podporowej lub zmiennego posuwu roboczego. Innym defektem wiercenia w kompozytach może być owalność otworów związana z orientacją włókien w strukturze materiału [8, 13–15].

Wykrawanie polega na mechanicznym wycinaniu otworu na skutek wywołania na powierzchniach ścinania naprężenia niezbędnego do pokonania spójności materiału. Pracę cięcia wykonuje sztywne narzędzie, które, przemieszczając się, naciska na kształtowany materiał. Proces wykrawania można realizować za pomocą jednej lub dwóch



Rys. 5. Konstrukcje popularnych narzędzi wykrawających do perforacji pasów: a) stempel walcowy pełny z matrycą, b) stempel walcowy drążony z ostrzem skierowanym do wewnątrz, c) stempel walcowy drążony z ostrzem skierowanym na zewnątrz

krawędzi tnących, stanowiących zamknięty obrys. W pierwszym przypadku krawędź tnącą stanowi odpowiednio naostrzony stempel współpracujący z płytą podkładową, podczas gdy w przypadku dwóch krawędzi tnących najczęściej stosuje się walcowy stempel współpracujący z matrycą [16, 17]. Podstawowe narzędzia wykorzystywane do mechanicznego dziurowania pasów przedstawiono na rys. 5.

W porównaniu z wierceniem otworów proces wykrawania jest znacznie szybszy, a przy odpowiedniej konstrukcji wykrojnika można wykonywać wiele otworów jednocześnie (np. całych wzorów). Kolejną zaletą jest możliwość uzyskania otworów w dowolnym kształcie. Najważniejszą cechą, która sprawia, że proces wykrawania idealnie się nadaje do perforacji pasów kompozytowych, jest brak nagrzewania się materiału obrabianego lub narzędzia w trakcie obróbki, dlatego zużycie narzędzia jest znacznie wolniejsze niż podczas wiercenia i nie występuje deformacja termiczna ani zmiana właściwości mechanicznych pasa. Prosta kinematyka procesu ułatwia jego automatyzację, a koszt obróbki jest uzależniony jedynie od kosztu wykrojnika. Oczywiście otwory wykonywane metodą wykrawania nie są wolne od wad i kluczowe znaczenie ma tutaj odpowiedni dobór narzędzi oraz parametrów procesu [15–19].

Problemy z perforowaniem pasów i taśm przenośnikowych metodą wykrawania

Niewiele jest publikacji i badań naukowych na temat wykrawania materiałów kompozytowych [18, 19], podczas gdy proces wykrawania metali i ich stopów jest szeroko i dokładnie opisany. Można znaleźć wytyczne dotyczące zarówno konstruowania wykrojników, jak i doboru parametrów procesu, dzięki czemu ten rodzaj obróbki plastycznej jest popularny w produkcji elementów metalowych [16, 17]. Brak usystematyzowanych wytycznych dla innych grup materiałowych znacznie wydłuża czas projektowania procesu i konstrukcji efektywnych narzędzi. Stanowi to główną przyczynę rzadkiego wykorzystywania wykrawania w przypadku kompozytów. Wbrew pozorom, proces ten jest bardzo złożony, a na jakość wykonywanych otworów i wartość siły perforacji ma wpływ wiele parametrów: geometria narzędzia, wartość luzu między stemplem i matrycą, prędkość i temperatura stempla, grubość i rodzaj materiału obrabianego, zużycie narzędzia, tarcie oraz docisk wykrawanego materiału [15–19].

W literaturze daje się zauważyć brak badań dotyczących perforacji kompozytowych pasów i taśm przenośni-

kowych, co jest źródłem problemów techniczno-konstrukcyjnych polskich i światowych producentów pasów.

Na podstawie analizy literatury, kontaktów z firmami zajmującymi się produkcją pasów oraz własnych doświadczeń badawczych zdefiniowano podstawowe problemy dotyczące perforacji pasów metodą wykrawania. W przypadku elastycznych pasów i taśm podczas wykrawania dochodzi do dużych odkształceń sprężystych, które mogą powodować zniekształcenie konturu otworu lub – przy zbyt dużym naprężeniu – trwałe odkształcenie plastyczne pasa. Dodatkowo właściwości ortotropowe pasów kompozytowych, zapewniające większą podatność w kierunku wzdłużnym niż poprzeczny, często powodują owalność otworów. Dla transportu podciśnieniowego nie ma to większego znaczenia, jednak przy otworach montażowych może powodować trudności.

Tkaniny – często stosowane w pasach o konstrukcji warstwowej jako przekładki ochronne lub okładki – mogą być niedocięte lub postrzępione. Podobnie dzieje się w przypadku pasów wzmacnianych włóknami (kordem), które bywają niedocięte i wystają poza obrys otworu. Takie włókna mogą uszkodzić delikatne towary na przenośniku lub mieć niepożądany kontakt np. z transportowaną żywnością. Aby temu zapobiec, wielu producentów zaleca perforację pasów w miejscach, w których nie ma wzmocnienia [6, 15–19]. Problemem są włókna aramidowe, które zwiększają zużycie narzędzia tnącego i wymagają jego bardzo wysokiej twardości. Problematyczna jest również perforacja pasów przenośnikowych z rdzeniem poliamidowym ze względu na konieczność zastosowania dużej siły perforującej oraz z powodu różnic pomiędzy średnicami otworów po obu stronach pasa (stożkowości otworów). Te wszystkie wady można zniwelować lub wyeliminować poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu oraz dzięki zastosowaniu efektywnej geometrii narzędzia.

Podsumowanie

Analiza procesu perforacji, z uwzględnieniem współczesnych tendencji w rozwoju materiałów stosowanych do produkcji pasów i taśm przenośnikowych, wyraźnie wskazuje na potrzebę rozwoju wykrawania kompozytów jako metody precyzyjnej mechanicznej perforacji pasów do transportu podciśnieniowego. Z myślą o tym zaplanowano serię badań, których zasadniczym celem jest opracowanie modelu perforacji kompozytowych pasów i taśm przenośnikowych. Wyniki tych badań umożliwią zaprojektowanie efektywnej geometrii narzędzia perforującego

oraz określenie efektywnych parametrów procesu wykrawania dla pasów z rdzeniem poliamidowym oraz pasów wzmacnianych włóknami aramidowymi.

Główne badania będą obejmować wieloparametryczną analizę wpływu parametrów procesu – takich jak: geometria narzędzia (np. kąt i kierunek pochylenia ostrza, średnica, grubość ścianek), charakter współpracy stępła z matrycą (luz) bądź z płytą podkładową (jej właściwości mechaniczne), rodzaj i sposób mocowania materiału obrabianego (grubość, struktura i materiały składowe kompozytu oraz docisk pasa), prędkość stępła, jakość narzędzia (stopień zużycia, materiał i twardość), a nawet temperatura stępła – na siłę perforacji, jakość otworów oraz trwałość narzędzia.

Wstępne badania wykazały, że odpowiednio przeprowadzone celowe podwyższanie temperatury stępła ma pozytywny wpływ na jakość otworu i może być kluczowe np. w przypadku perforacji pasów z rdzeniem poliamidowym. Stąd badanie wpływu temperatury na proces perforacji traktuje się jako ważne. Na dopełnienie badań składają się również badania właściwości mechanicznych omawianych grup pasów w celu opracowania modeli materiałowych niezbędnych w analizach MES, które będą stanowić istotę pracy naukowej. Na dalszych etapach planuje się rozszerzenie badań o pozostałe grupy pasów i taśm przENOŚNIKOWYCH.

LITERATURA

1. Perneder R., Osborne I. „*Handbook Timing Belts – Principles, Calculations, Applications*”. Berlin: Springer, 2012.
2. Hardygóra M. „*Taśmy przENOŚNIKOWE*”, rozdz. 1 i 2. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1999.
3. Gładyszewicz L. „*Przenośniki taśmowe – teoria i obliczenia*”. Wrocław: Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 2003
4. Dudziak M. „*Przekładnie cięgnowe*”. Warszawa: PWN, 1997.
5. Domek G. „Tendencje projektowania pasów zębatych”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Transport*. 82, nr kol. 1903 (2014): s. 59–66.
6. Optibelt. „*Technical manual polyurethane timing belts – katalog*”. www.optibelt-usa.com (data dostępu: 06.07.2017).
7. Krawiec P., Domek G. „Nowe perspektywy stosowania przekładni z pasem zębatym w technice sterowania i napędu”. *Technologia i Automatyzacja Montażu*. 4 (2007): s. 15–19.
8. Sheikh-Ahmad J. „*Machining of polymer composites*”. Springer, 2009.
9. Chryssolouris G., Salonitis K. „Fundamentals of laser machining of composites”. *Machining Technology for Composite Materials*. R. 10 (2011): s. 266–287.
10. Negarestani R., Li L. „Laser machining of fibre-reinforced polymeric composite materials”. *Machining Technology for Composite Materials*. 11 (2011): s. 288–308.
11. Krajcarz D. „Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting”. *Procedia Engineering*. 69 (2014): s. 838–843.
12. Krajcarz D., Spadło S. „Wpływ wybranych parametrów procesu cięcia strugą wodno-ścierną na odchyłkę okrągłości otworów cylindrycznych”. *Mechanik*. 1 (2017): s. 64–65.
13. Lachaud F., Piquet R., Collombet F., Surcin L. „Drilling of composite structures”. *Composite Structures*. 52 (2001): s. 511–516.
14. Leppert T., Paczkowski T., Polasik R., Serwacki D. „Delaminacja materiału kompozytowego włóknistego podczas wykonywania otworów”. *Mechanik*. 10 (2016): s. 1422–1423.
15. Lambiase F., Durante M. „Mechanical behavior of punched holes produced on thin glass fiber reinforced plastic laminates”. *Composite Structures*. 173 (2017): s. 25–34.
16. Suchy I. „*Handbook of Die Design*”. McGraw-Hill Companies, 2006.
17. Marciniak Z. „*Konstrukcja tłoczników*”. Ośrodek Techniczny Marciniak, 2002.
18. Chan H.Y., Abdullah A.B., Samad Z. „Precision punching of hole on composite panels”. *Indian Journal of Engineering & Material Sciences*. 22 (2015): s. 641–651.
19. Zain M.S.M., Abdullah A.B., Samad Z. „Effect of puncher profile on the precision of punched holes on composite panels”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 89 (2017): s. 3331–3336.
20. Katalog produktów Nitta PolyBelt® i PolySprint® firmy Wilhelm Herm. Müller.
21. Katalog pasów zębatych Brecoflex® firmy Breco.
22. Katalog produktów HabaSYNC® firmy Habasit.