

Grzegorz DOMEK¹

TENDENCJE PROJEKTOWANIA PASÓW ZĘBATYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono stan rozwoju techniki przekładni z pasami zębatymi. Obszary zastosowań stwarzają nowe wyzwania dla konstruktorów przekładni. W artykule zostały wskazane materiały i technologie wykorzystywane w produkcji. Opracowany został algorytm projektowania pasów zębatych do nowych aplikacji.

Słowa kluczowe: pasy zębate, przekładnie pasowe, przekładnie mechaniczne

DESIGN TRENDS IN TIMING BELTS

Summary. Paper presents the state of the art gear with timing belts. Areas of use pose new challenges for designers gear. It has materials and technologies used in the production. Has been developed algorithm of design timing belts to new applications.

Keywords: timing belts, belt gears, mechanical gears

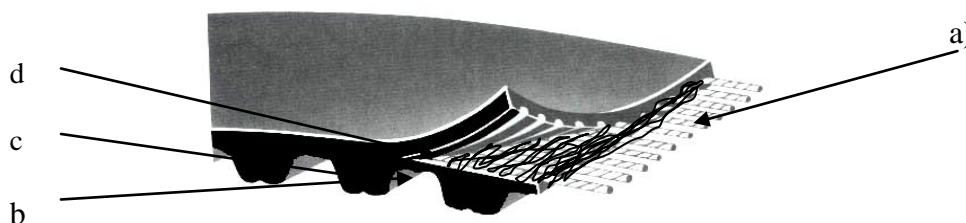
1. WPROWADZENIE

Pasy zębate, nazywane także pasami synchronicznymi, współpracują z kołem pasowym przez sprzężenie cierno-kształtowe [1]. Przez wiele lat podstawowym zastosowaniem tych przekładni było synchroniczne przeniesienie ruchu z wału korbowego na wał rozrządu w silniku spalinowym [12]. We współczesnych samochodach występuje od kilku do kilkunastu przekładni z pasami zębatymi m.in. w układach silnikowych, wspomagania kierownicy i hamulca oraz systemach poprawiających komfort pasażerów i kierowcy [2]. W 2004 r. renomowany szwajcarski producent zegarów wyprodukował model zegarka ręcznego dla znanych sportowców, w którym zastosowano trzy pasy zębate. Obecnie najbardziej intensywny rozwój tych przekładni występuje w aplikacjach przemysłowych i systemach użytkowych [9, 10]. Występują we wszelkiego rodzaju urządzeniach mechanicznych: obrabiarkach sterowanych numerycznie, manipulatorach, systemach automatycznego magazynowania, transportu i montażu, ploterach, drukarkach itp. [8]. Są one stosowane w najbardziej odpowiedzialnych systemach, takich jak: pompy infuzyjne, windy, a także samolotach i technice kosmicznej. Pasy zębate przeznaczone są do stosowania w mikro-napędach, gdzie mogą pracować z dużymi przełożeniami, jak np. Cyclobelt 1:20 000. Inny zakres zastosowań pasów to napędy ciężkich maszyn, w których z powodzeniem zastępują łańcuchy [3]. W różnych urządzeniach spotykane są napędy z pasami zębatymi jako: wielowałowe, tangencjalne, z pasami bezkońcowymi i otwartymi, łączące wały równoległe i skośne [4, 12].

¹ Faculty of Mathematics Physics and Technical Sciences, Kazimierz Wielki University, Bydgoszcz, Poland, email: gdomekl@whm.pl.

2. ROZWÓJ KONSTRUKCJI PASÓW ZĘBATYCH

Podstawowe elementy budowy pasa zębatego ulegały na przestrzeni lat wielu modyfikacjom (rys. 1). Ząb pasa w różnych konstrukcjach miał różną wielkość w stosunku do wrębu oraz różne kształty. Porównując przekładnie z pasami zębatymi do przekładni zębatej walcowej, zmieniano postać geometryczną zębów. Nie dostrzegano różnic w rzeczywistym ruchu elementów przekładni. Nie analizowano także pozostałych parametrów, jak znaczenie objętości zęba w stosunku do podziałki pasa lub też bardzo istotnej cechy kształtu powierzchni bocznej zęba. Wprowadzono konstrukcje pasów o zębach daszkowych i łukowych, aby obniżyć emisję hałasu w przekładni, nie rozwiązując problemu osiowego rozdzielania pasów.

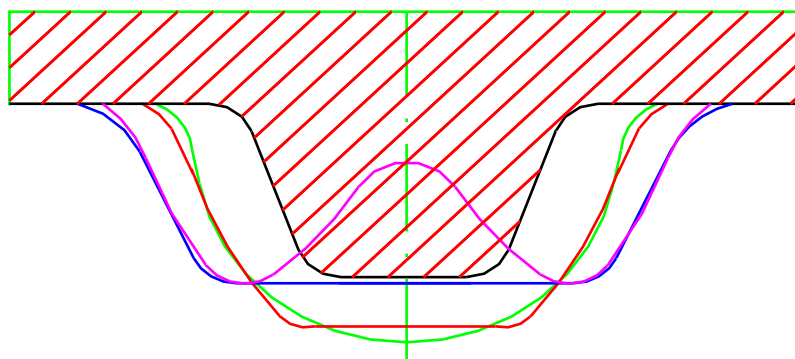


Rys. 1. Budowa pasa zębatego: a – kord, b – materiał, c – tkanina, d – dodatkowe włókna
 Fig. 1. Timing belts design: a – cord, b – material, c – fabric, d – additional fiber

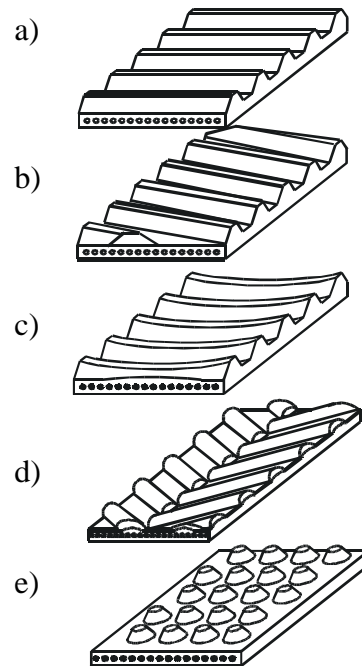
W budowie pasów ciągnowych stosowano różnorodne polimery. Pod obciążeniem zachodzą w nich charakterystyczne procesy reologiczne. Zjawiska, takie jak: pełzanie, relaksacja naprężeń, nawrót sprężysty, silne tarcie wewnętrzne i dyssypacja energii, orientacja struktury wewnętrznej i jej stabilizacja mechaniczna, pamięć materiałowa, relaksacja chemiczna, zmiana właściwości i zmiana budowy struktury wewnętrznej pod wpływem otoczenia o temperaturze dodatniej lub ujemnej, występują w pasach zębatych. Siły przyciągania międzycząsteczkowego van der Waalsa w materiale mają wpływ na kształtowanie się właściwości mechanicznych i reologicznych. Są od nich zależne doraźna granica wytrzymałości na zerwanie oraz zmienne wartości modułów sprężystości. Właściwości materiału pasa wpływają na sprzężenie kształtowo-cierne pasa zębatego z kołem oraz na rozkład sił w ciągnięciu pasa na łuku opasania. W pasach wykonanych z różnych materiałów inna jest zmiana kształtu przekroju poprzecznego pasa spowodowana siłami obwodową, promieniową i zginaniem. Jak zbadano, cykliczna deformacja przekroju poprzecznego pasa podczas zginania na kołach ma istotny wpływ na wartość strat energii na skutek tarcia wewnętrznego w materiale pasa oraz na podnoszenie się temperatury w pasie. Największe takie straty występują w warstwach ściskanych, poniżej osi obojętnej [5].

W konstrukcjach pasów zębatych, po stronie bieżnej, grzbietowej oraz w warstwie nośnej, dokonywane są zmiany pozwalające na wykonywanie dodatkowych funkcji. Pierwsze pasy zębate wyprodukowane zostały w latach czterdziestych ubiegłego wieku z gumy. Początkowe konstrukcje pasów zostały znormalizowane w DIN/ISO 5296 i były to pasy typu: MXL, XXL, XL, L, H, XH, XXH. Przykładowe oznaczenie pasa wyglądało następująco: 270 L 100, co oznaczało, że pas ma długość $l = 270 \times 2,54$ mm, postać geometryczną zęba L, szerokość $b = 100 \times 0,254$ mm. W 1948 r. wykonano pierwszy poliuretanowy pas zębaty. Opracowano wiele procesów technologicznych produkcji pasów. W latach pięćdziesiątych pojawiły się konstrukcje pasów o uzębieniu dwustronnym oraz pasy, w których na stronie grzbietowej odlewane były dodatkowe elementy. W 1951 r. wyprodukowano pierwszy pas zębaty z poliuretanu o technicznej nazwie „Vulkollan”. Ze względu na to, że w tym pasie zębatym kord był nawijany bezpośrednio na uzębienie, znalazł się poniżej strefy podziałowej, dlatego

wyniki eksploatacyjne tych pasów zębatych były niezadowalające. We wcześniejszych pasach zębatych warstwa nośna była umieszczana w żądanej płaszczyźnie za pomocą kołków mocowanych do formy. Technologia ta była kłopotliwa i z powodu wyginania się kołków rdzeniowych można było produkować tylko wąskie paski. Zaczęto poszukiwać bardziej ekonomicznych rozwiązań, a niewielka ilość wyrobów wykonanych tą metodą odznaczała się trwałością, także dzięki doskonałym właściwościom stosowanych materiałów oraz doskonałej przyczepności materiału do kordu. Z upływu czasu eksploatacji wiadomo, iż trwałość tej pierwszej wersji pasów dochodziła do ok. 17 lat. W 1952 r. rozpoczęto prace nad tzw. technologią zgrzeblenia, w której rdzeń formy został wyposażony w trójkątny profil, na który nawinięta była warstwa nośna. Uzębienie było umieszczone w zewnętrznej części formy. Za pomocą tej technologii można było produkować szersze nawoje, co pozwoliło na wydajniejszą produkcję poszczególnych typów pasów, z zachowaniem bardzo równomiernego naciągu kordu. Wadą tej technologii było to, że kord po nawinięciu znajdował się nieco poniżej warstwy podziałowej pasa. W wyniku dalszych prac powstała wersja z wąskimi nacięciami na grzbiecie pasa, co umożliwiło lepsze i dokładniejsze pozycjonowanie kordu w pasie. Znaczny postęp uzyskano, gdy w formie odwrócono pas stroną bieżną do środka i zastosowano tzw. noski nawojowe. Precyzja takiej technologii powodowała, że podziałka pasa znalazła się dokładnie w osi kordu. W ten sposób udało się uzyskać wartość U, tzn. dokładny i równomierny odstęp między podstawą zęba i kordem. Wykonany w ten sposób rdzeń formy umożliwiał uzyskanie optymalnej wartości tolerancji dla długości i podziałki pasa. W 1994 r. wprowadzono na rynek pas zębaty ATP10, 1998- ATP15. Po 2000 r. pracowano nad optymalizacją kształtu zęba, opracowano pasy o zębach nierównomiernie rozmieszczonych na szerokości pasa, stożkowych N, w 2004 r. – łukowych BAT, w 2006 r. – daszkowych Eagle i w 2008 r. – skośnych o kącie nachylenia 5 st (rys. 2, rys. 3). Rozwój technologii kompozytowych owocuje u kolejnych producentów pasów alternatywą dla pasa POLYCHAIN: pasami Synchrochain i Falcon oraz specjalizowanymi pasami do określonych warunków obciążeniowych, w zakresie prędkości liniowych (częstości obciążeń). Należy odnotować w rozwoju pasów opracowanie i wprowadzenie pasów zębatych z powłoką antystatyczną (1984), wprowadzenie linek nośnych E (1990), wprowadzenie pasa zębatego ATS (1991), wprowadzenie antystatycznych pasów zębatych z antystatycznego materiału PU (1993), rozszerzenie liczby rodzajów kordu. Obecnie na świecie jest kilkunastu producentów pasów zębatych z gumy i poliuretanu, każdy z nich produkuje podstawową, nieobjętą patentami grupę pasów, oraz próbuje stosować własne unowocześnienia. Działania te nie zawsze korespondują z pracami producentów kół zębatych, którzy starają się wykorzystywać technologie i doświadczenia z produkcji przekładni walcowych zębatych [6].



Rys. 2. Porównanie wielkości zębów w pasach zębatych
Fig. 2. Comparison of teeth in the timing belts



Rys. 3. Pasy zębate o różnym rozmieszczeniu zęba na szerokości pasa: a) proste, b) skośne, c) łukowe, d) daszkowe, e) stożkowe
 Fig. 3. Figure 3 Timing Belts with different tooth distribution on the belt width: a) simple, b) oblique, c) arc, d) attached, e) cone

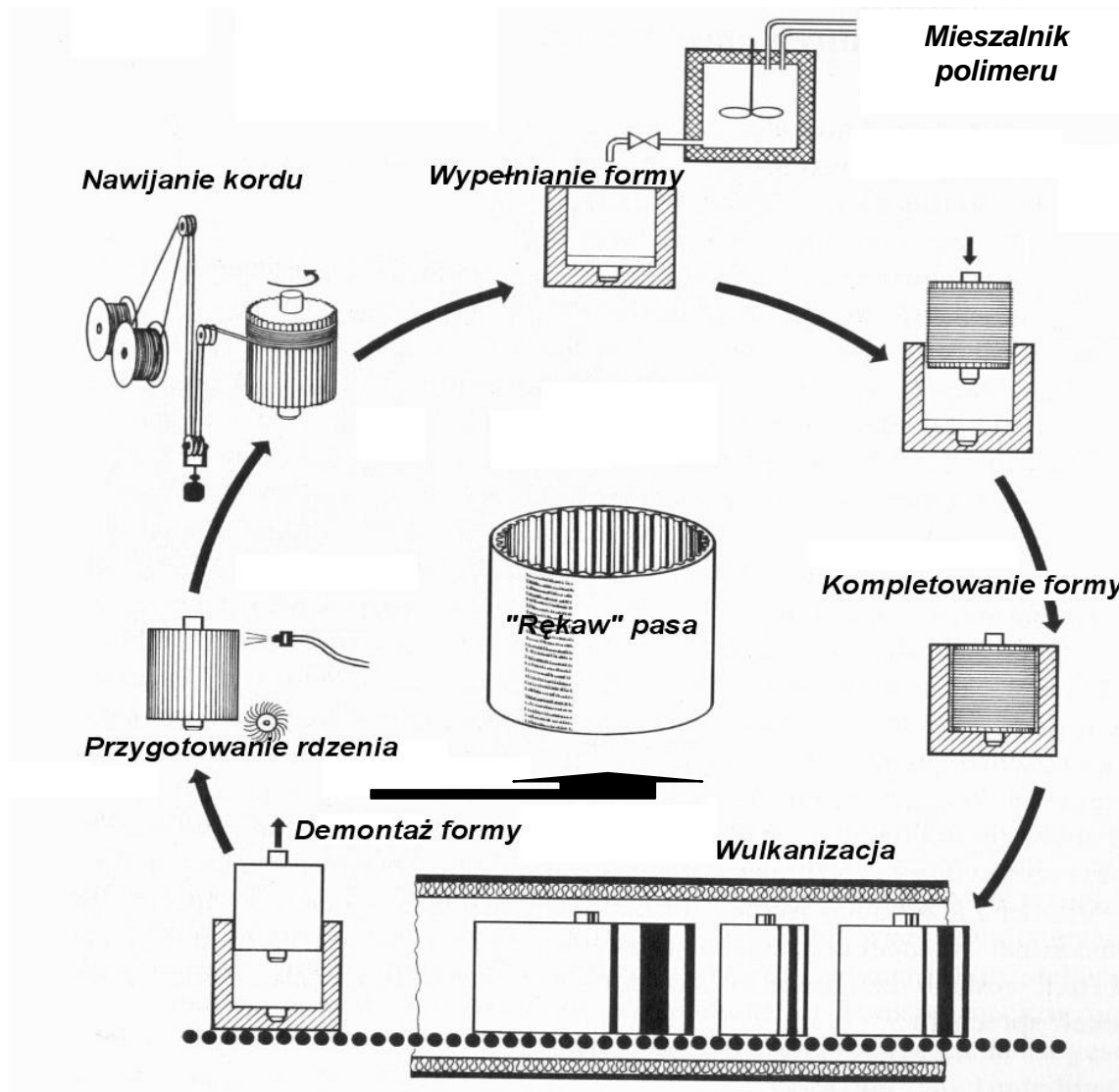
Ostatnie rozwiązania konstrukcyjne polegają na zmianie rozmieszczenia zębów na szerokości pasa (rys. 3). Zmiany zapoczątkował w 2000 r. pas N10 o zębach stożkowych, kolejnymi rozwiązaniami były zęby łukowe, daszkowe, przesunięte i skośne [6].

3. TECHNIKI WYTWARZANIA PASÓW ZĘBATYCH

3.1. Wytwarzanie z polimerów termoutwardzalnych

Jednym ze sposobów produkcji pasów zębatach z materiałów termoutwardzalnych jest metoda kształtowania na rdzeniu umieszczonym w formie (rys. 4). Rdzeń formy musi być tak ukształtowany, aby kord znalazł się na właściwej wysokości w gotowym pasie. Jego kształt powinien uwzględniać umieszczanie tkanin i włókien w procesie wulkanizacji. W metodzie tej zasadniczą rolę odgrywają szybkość procesu przygotowania do wulkanizacji i możliwość wykonania wielu powtarzalnych form. Pierwszym etapem w procesie produkcji tą metodą jest konfekcja, czyli odpowiednie przygotowanie formy do wulkanizacji. Na początku bęben autoklawu wulkanizacyjnego jest smarowany płynem antyadhezyjnym. Płyn ten uniemożliwia przywieranie materiału wejściowego wprowadzonego do autoklawu wulkanizacyjnego z powierzchni bębna. Na tak przygotowaną powierzchnię bębna dla pasów o stronie bieżnej pokrytej tkaniną, nakładana jest tkanina powłokowa wykonana z bardzo elastycznego materiału. Kolejnym krokiem konfekcji jest spiralne nawinięcie kordu z zachowaniem właściwej siły napięcia wstępnego. Obecnie nawija się kord w postaci dwóch linek o przeciwbieżnych splotach włókien. Linki te, jeżeli nie były wcześniej zaimpregnowane materiałem pasa, muszą być przed wulkanizacją nasączone materiałem poprawiającym adhezję do materiału pasa. Operacja przygotowania warstwy nośnej ma ogromny wpływ na cechy

eksploatacyjne gotowych pasów. Ostatnim zadaniem w produkcji pasów gumowych jest nawinięcie na warstwę nośną płyty surowej mieszanki gumowej i umieszczenie w formie; w produkcji pasów PU formę wypełnia się płynnym polimerem.



Rys. 4. Schemat technologii produkcji pasów z materiałów termoutwardzalnych

Fig. 4. Schematic technology lanes of thermosetting materials

Przygotowaną formę z materiałem PU umieszcza się w piecu lub podgrzewa do określonej temperatury z materiałem gumowym w autoklawie wulkanizacyjnym. W zależności od rodzaju materiału, w określonych warunkach temperatury i ciśnienia następuje sieciowanie łańcuchów polimeru. Proces wulkanizacji pasów gumowych jest bardzo szybki, trwa około 20 minut, dla pasów poliuretanowych trwa kilka do kilkunastu godzin. Po tym procesie forma zostaje schłodzona, bęben zostaje wyjęty i zostaje z niego zdjęty *surowy rękaw pasa*. W kolejnych procesach zostają obcięte nadlewki wulkanizacyjne, następują szlifowanie grzbietu, wykonywanie napisów i ewentualna konfekcja na gotowe pasy. Z tego rodzaju materiału wykonuje się także pasy we wstęgach. Polega to na wykonaniu rękawa o średnicy kilku metrów i spiralnym wycięciu z niego wstęgi.

3.2. Wytwarzanie z materiałów termoplastycznych

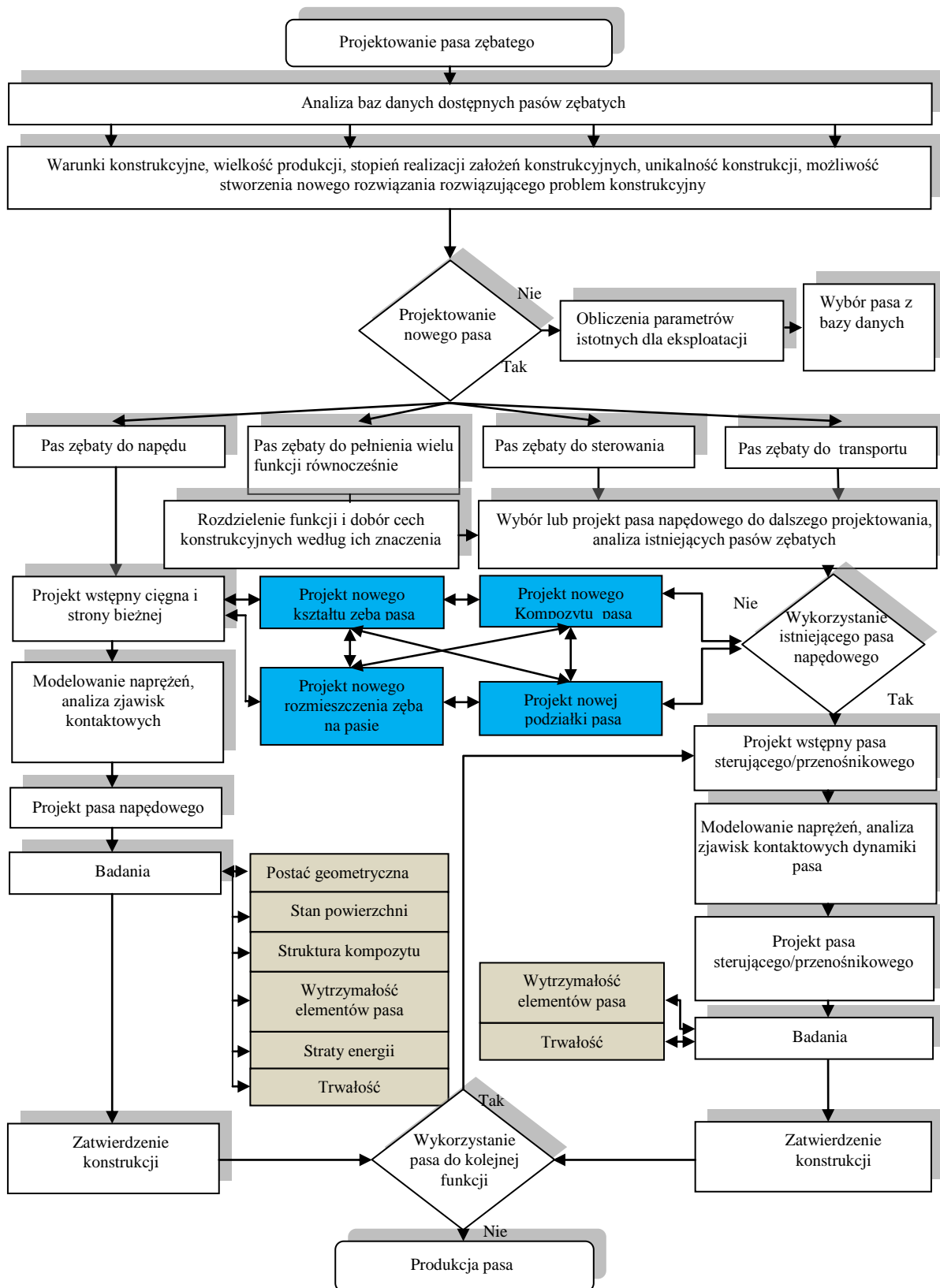
Pasy zębate z poliuretanu obecnie najczęściej wytwarzane są metodą odlewania wokół warstwy nośnej. Proces technologiczny, podobnie jak w większości innych metod produkcji pasów zębatach, rozpoczyna się od przygotowania warstwy nośnej, w tej metodzie na bębnie lub na dwóch bębnach pozwalających odlać pasy o dowolnej długości. Bębny zostają pokryte środkiem antyadhezyjnym, a następnie, z zachowaniem odpowiedniego napięcia wstępnego, nawija się kord, najczęściej bifilarnie. Bębny z kordem wprawiane są w ruch i z wtryskarki wylewany jest materiał, który jest natychmiast chłodzony. Po pełnym obiegu wykonywana jest nadlewka, która jest usuwana w końcowym szlifowaniu. Pasy o uzębieniu dwustronnym w tej technologii mają zęby na stronie grzbietowej, wykonane przez frezowanie.

Ta technologia wykorzystywana jest także do produkcji pasów zębatach we wstęgach. Kord tworzący warstwę nośną podawany jest z zestawu szpul pod wstępnym naprężeniem, gotowy materiał w postaci wstęgi zwijany jest po drugiej stronie procesu technologicznego. Bardzo istotne jest w tym procesie nadzorowanie napięcia wstępnego kordu na poszczególnych szpulach, gdyż drobne zmiany jego wartości powodują wykrzywienie gotowej wstęgi. Materiały termoplastyczne pozwalają na wykorzystywanie technologii zgrzewania do łączenia pasów na dowolne długości oraz do przygrzewania do powierzchni grzbietowej dodatkowych elementów. Największymi zaletami tej technologii są szybkość wykonania pasa oraz możliwość wykonania pasa o długości kilkudziesięciu metrów.

4. PROJEKTOWANIE PASÓW ZĘBATYCH

Grupa pasów zębatach jest tak liczna, że w większości przypadków można wykorzystać istniejący typ pasa. Występuje wiele rodzajów zębów pasów o różnych postaciach geometrycznych, brak jest natomiast wiarygodnych porównań, opisu znaczenia kształtu zęba oraz wskazówek dotyczących zmian kształtu. Brak jest w literaturze opisu znaczenia: wielkości, wysokości podziałki oraz innych istotnych cech geometrycznych pasa. Podejmowane są próby zmiany rozmieszczenia zęba na szerokości pasa bez wnikliwej naukowej analizy zagadnienia. Pasy o zębach łukowych poprawnie pracują z centralnie umieszczonym klinem prowadzącym. Pasy o zębach daszkowych musiały zostać wzmocnione włóknem zapobiegającym rozdławianiu pasa; zęby po obu stronach zostały przesunięte o pół podziałki. Wykonując pasy o zębach skośnych, wybrano kąt nachylenia 5° , prawdopodobnie bez wnikliwej analizy. Prowadzone są prace nad wyznaczeniem i badaniem cech eksploatacyjnych różnych rodzajów pasów zębatach, zdolności do przenoszenia napędu, sprawności i trwałości. Badania te dotyczą oceny skutków zmian i ich związków, a nie poszukiwania przyczyn. Dalszy postęp w konstrukcji pasów zębatach możliwy jest pod warunkiem ustalenia przesłanek pozwalających na zwiększenie transferowanej mocy, sprawności i trwałości przekładni. Nowoczesna technika pomiarowa pozwala określić stan powierzchni pasa i kół, dokładności wykonania elementów oraz połączenia układu i ich wpływ na parametry przekładni. Główne parametry stanu obciążeń statycznego i dynamicznego przekładni w różny sposób wpływają na zużycia przekładni, które można podzielić na zużycia eksploatacyjne, objętościowe i energetyczne. Rozwój techniki pomiarowej GPS wniósł i wniesie jeszcze wiele nowych, istotnych informacji na temat wykorzystania inżynierii materiałowej w budowie maszyn.

Projektowanie pasa zębatego rozpoczyna się od gruntownej analizy baz danych istniejących typów pasów zębatach. Decydując się na tworzenie nowego pasa, który ma spełniać inne funkcje pozanapędowe, należy przeanalizować ponownie bazę danych i zdecydować, czy stworzymy kompletnie nową konstrukcję.



Rys. 5. Schemat procesu projektowania pasów zębatych

Fig. 5. Schematic design process timing belts

W projekcie wstępnym pasa napędowego można skupić się na wybranych grupach zagadnień związanych z budową pasa zębatego. W najnowszych konstrukcjach najczęściej dokonywane są zmiany kompozytu pasa zębatego. Projekt wstępny musi być poddany wielu

badaniom, w schemacie wymienione są podstawowe grupy, niestety różni producenci mają do tego różne podejście. Nowe konstrukcje tworzone są dla prestiżu, z okazji wystaw targowych, żeby przedstawić się jako producent innowacyjny. Poza wnikliwymi badaniami należy zaprojektować cykl życia produktu – od wyprodukowania, poprzez okres eksploatacji, do wycofania z rynku i utylizacji. Dzięki badaniom można coraz lepiej zaprojektować okres eksploatacji, nie ma jednak jeszcze dobrego programu wycofywania pasów z rynku.

5. WNIOSKI

Opracowany algorytm projektowania przekładni pasowych wskazuje nowe podejście do metod projektowania przekładni pasowych. Uwzględnia on ocenę ich funkcjonalności oraz właściwości eksploatacyjnych pod kątem kryteriów błędów kształtu i położenia oraz chropowatości powierzchni (stereometrii) uzębienia pasa i koła. Ma to wpływ na stworzenie nowych możliwości rozgraniczenia i oceny jakościowej tarć konstrukcyjnego oraz wewnętrznego. Odpowiednia konstrukcja pasa zębatego pozwala na zredukowanie w konstrukcji maszyn liczby przewodów zasilających i sterujących, redukcję liczby osłon i przewodnic kabli. Przesyłanie sygnału sterującego przez umieszczone nośniki magnetyczne, perforację lub kable sygnałowe, powoduje możliwość redukcji w urządzeniu konstrukcji złożonych systemów sterujących.

Bibliografia

1. Domek G.: Meshing model in gear with timing belt. *Journal of Advanced Materials Research*, Vol. 189-193, p. 4356-4360.
2. Domek G.: Leistungverluste in Zahnriemengetrieben. *Antriebstechnik*, No. 12/2006, p. 30-31.
3. Domek G., Malujda I.: Modeling of timing belt construction. *Wiley Inter Science PAMM*, Vol. 7, Issue 1, December 2007, 4070045-4070046.
4. Dressig H., Holzweissig F.: *Dynamics of Machinery, Theory and Applications*. Springer Verlag.
5. Dudziak M.: New aspects of driving rubber belts life determination. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, z. 4, s. 455-469.
6. Dudziak M., Domek G.: Mechanics of bending of timing belts with non straight teeth. *The Tenth Pan American Congress of Applied Mechanics, X PACAM' 08*, Cancun, p. 215-218,
7. Dudziak M., Domek G., Kołodziej A.: Modelling of constructional features of timing belts made of material with macromolecular structures. *XI PACAM'10*, Sao Carlos, SP, Brasil.
8. Muller F.: *Experimentelle Analyse und Modellbildung des dynamischen Betriebsverhaltens von Zahnriemen-Steuertrieben*. VDI Verlag, Dusseldorf 2000.
9. Nagel T.: Zahnriemengetriebe 2010 - neueste Entwicklungen und Trends. *Tagungsband zur 14. Internationalen Fachtagung Zahnriemengetriebe*, Dresden 20/30.09.2010, s. 5-8.
10. Nagel T.: *Zahnriemengetriebe*. Carl Hanser Verlag, Wien-München 2008.
11. Perneder R.: *Handbuch Zahnriementchnik*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2009.
12. Takagashi H., Yoneguihy H., Sopouch M., Thiele I.: Simulation of belt system dynamics using a multi-body approach: Applications to synchronous belts and V-ribbed-belts. *Tagung „Zahnriemengetriebe“*, TU Dresden, 2005.