



CHARAKTERYSTYKA PROCESU PRODUKCJI OPON ORAZ ICH DEFECTÓW NA PRZYKŁADZIE WSPÓŁCZESNEGO PRZEDSIĘBIORSTWA

Wojciech Majewski, Ewa Dostatni, Jacek Diakun

Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Polska

Corresponding author:

Ewa Dostatni

Politechnika Poznańska

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska

phone: (+48) 61 6652731

e-mail: ewa.dostatni@put.poznan.pl

CHARACTERISTICS OF THE TIRE PRODUCTION PROCESS AND THEIR DEFECTS ON THE EXAMPLE OF A MODERN ENTERPRISE

ABSTRACT

The article presents contemporary challenges faced by tire manufacturers. General trends in the development of the tire industry are outlined. The negative impact of rubber waste on the environment was emphasized. The production process of radial tires used in passenger cars is presented. The basic constructions of tires and the components used for their production are discussed. The meaning and functions of the tire components are presented. The flow of the production process has been described, including all its stages. The possibilities of modern VMI MAXX tire assembling machines were commented, and the tire assembling process was characterized in detail. Methods of routine tire quality control used in mass production are discussed. The values describing the uniformity of tires were characterized. The division of tire defects used in the tire industry is presented. The tools and methods for detecting tire defects were characterized. Contemporary trends in the elimination of tire defects have been identified, especially emphasizing the potential of methods based on the use of artificial intelligence. It was noted that a solution to reduce the amount of tire waste due to exceeding the uniformity limits is needed. Authors noticed new opportunities thanks to the modern technologies used to register the tire assembling process.

KEYWORDS

Tire production, tire uniformity, radial tire construction, tire defects, tire assembling process, large-scale production.

1. Wstęp

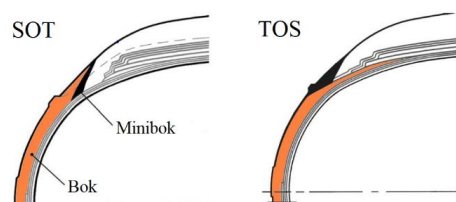
Zastosowanie we współczesnej motoryzacji napędów oraz paliw bazujących na alternatywnych źródłach energii, stawia przed przemysłem oponiarskim liczne wyzwania dotyczące osiągnięcia coraz niższych oporów toczenia opon [3]. Dochodzi do redukcji masy opony poprzez ciągłe zmniejszanie pola jej przekroju. Implikuje to spory problem ze spełnieniem limitów jednorodności opon, które nieustannie są zawężane przez producentów samochodów. Dodatkowo, dla każdego przedsiębiorstwa biorącego pod uwagę obecne uwarunkowania rynkowe, szczególnie istotna jest redukcja kosztów oraz podniesienie wydajności. Konieczne jest zatem wypracowanie rozwiązań obniżających ilość odpadów opon oraz umożliwiających ich produkcję zgodnie z współcześnie panującymi standardami. W wielkoseryjnej produkcji opon należy również mieć na uwadze aspekty ochrony środowiska. Odpady gumowe wykorzystywane jako paliwo alternatywne w cementowniach (odzysk energetyczny) odpowiadają za 6% emisji światowego CO₂ [16]. Nieustannie rozwijane sposoby zagospodarowania zużytych

opon poprzez recykling materiałowy [9, 15] i produktowy [4] nie mogą stanowić jedynej drogi maksymalizacji wykorzystania gumy jako surowca. Cykl życia opony rozpoczyna się w fabryce, zatem już w tym miejscu można przeciwdziałać generowaniu odpadów produkcyjnych bezpośrednio poddawanych recyklingowi.

2. Elementy składowe oraz konstrukcje opony radialnej

Konstrukcja opony (rys. 1) dobierana jest na podstawie szerokości i profilu opony oraz możliwości oprzyrządowania maszyny konfekcyjnej. Ogólny podział stosowanych współcześnie konstrukcji przedstawia się następująco:

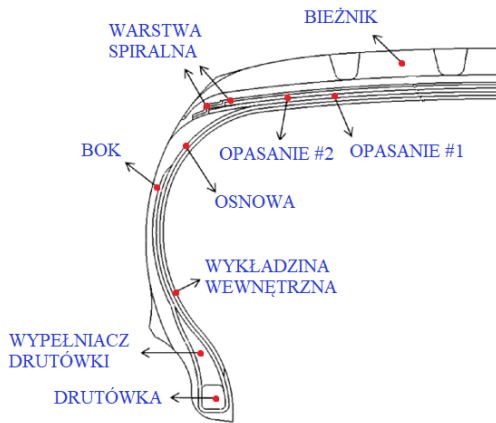
- SOT (*Sidewall Over Tread*) – rodzaj połączenia karasku z pakietem w taki sposób, aby boki przykrywały miniboki bieżnika;
- TOS (*Tread Over Sidewall*) – analogicznie do powyższego przypadku – pakiet jest nakładany po wywinięciu boków.



Rys. 1. Konstrukcje opon – podział ogólny (opracowanie własne na podstawie [21]).

Do najczęściej stosowanych komponentów składowych opon radialnych dedykowanych do samochodów osobowych należą:

- Bieżnik (TT – *Top Tread*) – uzyskiwany w wyniku procesu wytłaczania 4-ślیمakowego, podczas którego każdy ślیمak odpowiada za inny obszar przekroju poprzecznego, na który składają się:
 - Kapa bieżnika (ang. CAP) – z mieszanki odpowiedniej dla zastosowania (typ pojazdu) oraz środowiska pracy opony (letnia, zimowa lub całoroczna);
 - Warstwa podbieżnikowa (UT – *Undertread*) – jej zadaniem jest odprowadzenie ciepła generowanego przez tarcie wewnątrz opony podczas ruchu;
 - Miniboki (MSW – *Minisidewalls*) – wyprodukowane z wykorzystaniem mieszanki przypominającej składem mieszankę boku i dzięki temu ułatwiającej połączenie pary bieżnik – bok podczas procesów konfekcji i wulkanizacji;
 - Antena (ANT – *Antenna*) – z mieszanki przewodzącej, służącej do odprowadzenia ładunku elektrycznego w czasie użytkowania opony.
 - Warstwa spiralna (SL – *Spiral Layer*/CP – *Cap Ply*) – nawinięta z wąskich pasków kalandrowanego kordu (PET, kevlar, nylon, aramid). Najczęściej stosuje się 1 lub 2 warstwy z dowiniętymi na brzegach dodatkowymi paskami o zadanej szerokości (poprzez sterowanie posuwem i ilością obrotów bębna BT).
 - Opasania (TP – *Tread Plies*; często nazywane także *Breakers*) – składają się z kalandrowanego kordu stalowego, którego wiązki ułożone są pod zadanym kątem (57–67°) decydującym o własnościach jezdnych opony.
 - Osnowa (BP – *Body Ply*) – to kalandrowany kord z PET lub wiskozy. Jej szerokość zależy od wysokości profilu, szerokości i konstrukcji opony. Znajdują się na niej *squeegee* (gumowe paski), których konfiguracja rozmieszczenia i szerokości dobierana jest w taki sposób, aby pokrywały miejsca krawędzi materiałów. Stosuje się je także w celu wzmocnienia wewnętrznej strony obszaru barku, gdyż jest to strefa przenosząca największe naprężenia zarówno podczas formowania jak i eksploatacji opony [14]. Najistotniejszym *squeegee* jest TPI (*Tread Ply Insert*, nazywany także BUC – *Belt Under Cushion*), który
- ochrania kord osnowy przed przetarciem przez krawędzie opasań w trakcie ruchu opony. Konstrukcja SOT wymusza jego zastosowanie. Opony samochodów osobowych posiadają najczęściej 1 lub 2 osnowy, a wybór kordu zastosowanego do ich wytworzenia pozwala sterować sztywnością, wytrzymałością oraz własnościami jezdnymi wyrobu końcowego.
- Skrzydelko (BB – *Bead Bundle*), które składa się z:
 - Drutówka (ang. *bead*) – wykonana ze stalowego drutu nawiniętego w odpowiedniej konfiguracji (zadana liczba wierszy i kolumn w przekroju wiązki), owinięta taśmą;
 - Wypełniacz drutówki (BF – *Bead Filler*) – nakładany na ciepło na drutówkę pas gumy o trójkątnym przekroju, wzmacniający obszar drutówki.
 - Bok (SW – *Sidewall*) – najczęściej wytłaczany z użyciem połączenia dwóch mieszanek:
 - AGS (*Abrasive Gum Strip*) – twarda mieszanka zabezpieczająca obszar drutówki przed przetarciem przez felgę;
 - Mieszanka boku – mieszanka gumowa opracowana tak, aby zapewnić odporność na pęknięcie z powodu czynników środowiska, takich jak ozon, tlen, promieniowanie UV i ciepło.
 - Wykładzina wewnętrzna – zapewnia szczelność w oponach bezdętkowych dzięki zastosowaniu do jej produkcji mieszanki butylowej.
 - Wzmocnienia tekstylne:
 - *Chafer* (nazywany również CCH – *Canvas Chafer*) – kalandrowany, ułożony w sposób krzyżowy kord tekstylny. Wzmacnia obszar drutówki. Stosowany zazwyczaj w oponach typu run flat (ochrona felgi i opony podczas wymiany);
 - *Flipper* (FL) – kalandrowany kord (PET lub kevlar), ułożony pod kątem 45°, którego funkcją jest usztywnienie obszarów drutówki i/lub boku. Wykorzystywany najczęściej do opon UHP (*Ultra High Performance*).
 - Wzmocnienia gumowe, spośród których najczęściej stosowaną jest wkładka *run flat* (RFI – *Run Flat Insert*) – uzyskana w wyniku procesu wytłaczania relatywnie twardej mieszanki gumowej. Zastosowanie jej gwarantuje przejechanie 80 km z prędkością do 80 km/h od momentu przebicia opony.
- Budowa typowej opony radialnej (bez wzmocnień tekstylnych i gumowych) została przedstawiona na rys. 2. W przedsiębiorstwie na bazie którego powstał niniejszy artykuł, przygotowanie przedstawionych powyżej komponentów wymaga zatrudnienia ok. 2000 osób. Produkuje się tam wielkoseryjnie 30 tys. opon dziennie, zaś wdrożonych do masowej produkcji jest ponad 500 różnych rozmiarów opon w zakresie 15–22 cali. Zakład zajmuje obszar o powierzchni 260 tys. m².



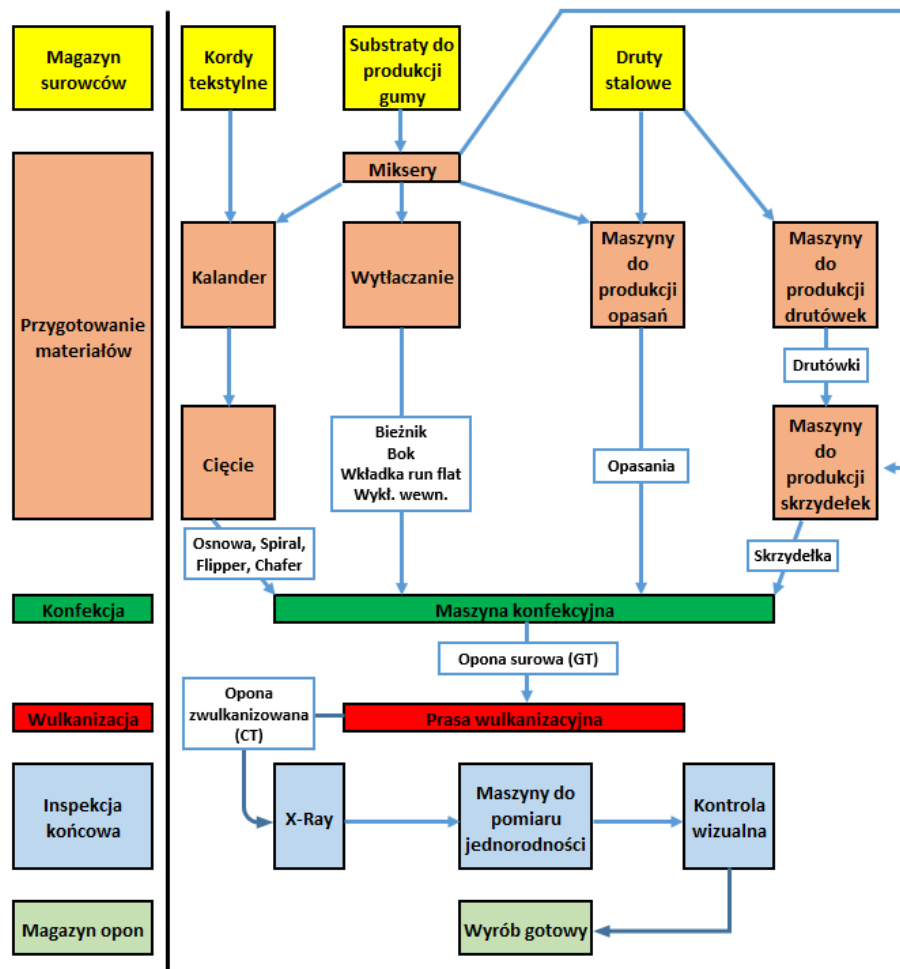
Rys. 2. Przykład przekroju poprzecznego opony radialnej (opracowanie własne na podstawie [21]).

3. Umieszczenie procesu konfekcji i inspekcji końcowej w procesie produkcji opon

Proces produkcji opon zobrazony na rys. 3 rozpoczyna się w Magazynie Surowców, gdzie każda dostawa przechodzi kontrolę jakości.

Miksery stanowiące centrum Działu Walcowni, produkują wszystkie mieszanki gumowe używane w fabryce. Od stosowanych obecnie mieszanek wymaga się stabilności właściwości lepko-sprężystych (przetwarzalność), stosunkowo krótkiego czasu wulkanizacji przy jednoczesnym zachowaniu zadowalających właściwości mechanicznych wyrobu końcowego [19]. Niniejszy kompromis osiągnięty jest poprzez odpowiedni dobór ich składu chemicznego oraz sposobu mieszania. Wynikiem pracy miksera jest surowa, spaletyzowana guma, którą wykorzystuje się do zasilania wylączarek, kalandra, maszyn do produkcji opasań oraz maszyn do produkcji skrzydełek. Poszczególne miksery dedykowane są do określonych grup mieszanek, posiadających zbliżony skład chemiczny ze względu na czasochłonny proces czyszczenia komory mieszania i walców.

W procesie wytłaczania wytwarzane są bieżnik, bok, wkładka *run flat* i wykładzina wewnętrzna. Podczas tego etapu na surowy bieżnik nakładane są linie kolorowe o indywidualnym dla każdego rozmiaru opony rozmieszczeniu (pozycja względem linii centralnej) i barwach. Ułatwiają one sortowanie opon na zautomatyzowanej linii montażu aut. Bieżnik nawijany jest na duże szpule na przekładkach, które minimalizują jego deformację podczas transportu. Boki, wkładka *run flat* oraz wykładzina



Rys. 3. Proces produkcji opon do samochodów osobowych (opracowanie własne).

dzina wewnętrzna nawijane są na dedykowane wózki, które zapewniają płynne podłączenie tych materiałów do maszyny konfekcyjnej. Cykliczna kontrola wymiarowa profilu poprzecznego prefabrykatów wytłoczonych (z wyjątkiem wykładziny wewnętrznej) odbywa się w Konturowni, a jej wynikiem jest decyzja o ich użyciu do produkcji masowej.

Opasania produkowane są na maszynie Bexter. Pobiera ona drut stalowy ze szpularnika, nadaje mu odpowiedni kąt, pokrywa gumą, przycina na zadaną szerokość oraz nakłada paski gumy krawędziowej (*edge gum*). Wspierają one ochronę osnowy przed uszkodzeniem i separacją (podobnie jak TPI) i są stosowane dla wszystkich konstrukcji opon. Gotowe opasania nawijane są na duże szpule z przekładkami na podobnej zasadzie jak bieźnik i w takiej formie transportowane na maszynę konfekcyjną.

Kordy tekstylne pokrywane są gumą w procesie kalandrowania w zadanym połączeniu typ kordu – rodzaju mieszanki gumowej. Podczas tego procesu na świeżo powstałą warstwę gumy w określonych odstępach nakładane są nitki wspomagające odprowadzenie powietrza z wnętrza opony podczas procesu konfekcji oraz wulkanizacji (nie dotyczy spirala). Kalandrowane kordy nawijane są w duże baloty, które zostają przetransportowane na Dział Cięcia. Tam nadawane są wymagane szerokości osnowie, flipperowi, chaferowi, i spiralowi. W przypadku osnow proces cięcia połączony jest z nakładaniem *squeegee* i/lub TPI zgodnie ze specyfikacją. Następnie chafer, flipper i spiral nawijane są na małe szpule. Osnowy natomiast transportowane są na dedykowanych wózkach, gwarantujących kompatybilność z maszyną konfekcyjną.

Owinięte taśmą drutówki umieszczane są na maszynie RTB-DE, która wytłacza wypełniacz drutówki o określonej w specyfikacji konturu wysokości i szerokości podstawy, po czym łączy oba prefabrykaty tworząc skrzydełka. Umieszcza się je na dedykowanych separatorach aby zapobiec ich wzajemnemu sklejeniu, deformacji oraz zabrudzeniu ciałami obcymi.

Konfekcja odbywająca się na maszynach VMI MAXX składa się z dwóch głównych faz i służy połączeniu wszystkich wyżej opisanych materiałów w odpowiedniej sekwencji, wynikającej z karty procesu. Pierwsza faza odbywa się na bębnie karkasu (CCS – *carcass drum*). Na początku serwery podają na bęben CCS wykładzinę wewnętrzną wraz z bokami (tzw. PA – *pre-assembly*), którego przygotowanie ma miejsce na transporterach taśmowych maszyny konfekcyjnej. Następnie na bęben nawijana jest osnowa, której złącze jest dociskane w sposób automatyczny przez rolkę (tzw. *stitcher złącze*). Dla opon 2-osnowowych, druga osnowa nakładana jest w sposób analogiczny bezpośrednio na pierwszą osnowę.

W kolejnym kroku dochodzi do wklejenia skrzydełek w karkas. Odległość pomiędzy skrzydełkami jest ściśle określona mianem „rozstawu drutówek” (BSEE – *Bead Set External Edge*) to najważniejsza stała indywidualna dla danej opony, wyznaczana na początkowym

etapie jej projektowania, która ma wpływ na napięcie wzdłużne nitek kordu w trakcie wulkanizacji.

Użycie chafera, flippera i wkładki run flat jest opcjonalne, zależne od wymagań stawianych oponie. W przypadku opon run flat’owych, wkładka nakładana jest jako pierwsza na tzw. sub spacer (segmenty aluminiowe, współtworzące konstrukcję bębna karkasu, z frezowaniem oddającym kształt profilu wkładki run flat), co zapewnia płaską powierzchnię bębna dla nakładania kolejnych materiałów. Chafer nawijany jest na PA. Flipper nakłada się na osnowę pod drutówkę lub po jej wewnętrznej/zewnętrznej stronie. Tak przygotowany karkas wjeżdża do Transfer Ring’u.

Druga faza konfekcji ma miejsce na bębnie BT (BT drum – *Band Transfer Drum*) i rozpoczyna się od nałożenia pierwszego i drugiego opasania. Kolejno dochodzi do nawinięcia warstwy spiralnej w taki sposób, aby krawędzie opasań zostały zakryte. Następnie nakłada się bieźnik, zaś jego złącze jest dociskane przez Multidiscrolkę (rolka zbudowana ze stalowych talerzy, pozwalających na sterowanie siłą docisku na danym segmencie szerokości).

Cięcie na odpowiednią długość (narzuconą na podstawie cała opony) wszystkich materiałów (oprócz skrzydełek) na maszynie VMI MAXX jest nadzorowane i realizowane w sposób automatyczny.

Połączone opasania, warstwa spiralna oraz bieźnik tworzą tzw. pakiet, który zostaje przechwycony przez Transfer Ring. Dochodzi w nim do wklejenia CCS w PA, wywinęcia boków, oraz usunięcia powietrza z wnętrza opony i wytworzenia połączenia MSW-SW dzięki rolowaniu (wymienione tu operacje stanowią składowe etapu formowania opony – ich kolejność jest różna dla konstrukcji SOT i TOS). Robot nakleja indywidualny kod paskowy po zewnętrznej stronie opony, w określonej odległości od złącza boku. Powstała w ten sposób opona surowa (GT – *green tire*) jest umieszczana przez operatora konfekcji na wózku (ilość opon na wózkach jest zależna od calu opony) i transportowana na Dział Wulkanizacji.

Przed wulkanizacją do opony surowej od strony wykładziny wewnętrznej aplikowany jest środek antyadhezyjny (zawiesina miki lub silikon) zapobiegający przyklejaniu się opony do membrany wulkanizacyjnej. Proces wulkanizacji polega na usieciowaniu gumy i nadaniu ostatecznego kształtu oponie surowej – oddanie wzoru bieźnika, kształtu ścian bocznych oraz stampingu (opisu nt. rozmiaru, producenta, certyfikatów, etc.). Jego najważniejszymi parametrami są ciśnienie, czas i temperatura, których prawidłowy dobór gwarantuje zwulkanizowanie surowej opony w całej grubości przekroju.

Opona surowa jest odkładana przez operatora wulkanizacji przy stole pozycyjnym prasy na miejscu odbioru przez przenośnik załadowniczy, który umieszcza ją na membranie wulkanizacyjnej. Do membrany najpierw podawana jest para o ciśnieniu wstępnym. Następnie wygrzana forma wulkanizacyjna zamyka się na oponie surowej, zaś do membrany zostaje podane ciśnienie wy-

sokie, które równomiernie dociska oponę do powierzchni formy. Po rozformowaniu, zwulkanizowane opony (CT – *Cred Tires*) odkładane są na taśmociąg transportujący je na trzymowanie (maszynowe obcinanie wypływek pochodzących od odpowietrzników formy wulkanizacyjnej – nie dotyczy to opon, których formy wykorzystują technologię spring vent’ów) i kolejno na Dział Inspekcji Końcowej (FI – *Final Inspection*).

Niektóre rozmiary opon, dodatkowo wymagają stabilizacji (PCI – *Post Curing Inflator*), która ma miejsce bezpośrednio po wyjściu opony z formy. Polega ona na swobodnym stygnięciu opony w temperaturze otoczenia z jednoczesnym zadaniem ciśnienia w jej wnętrzu poprzez membranę. Proces stabilizacji opony zapobiega deformacji opon, zapadaniu się boków, ale również ma wpływ na określone własności opony.

Ze względu na wymogi bezpieczeństwa stawiane przez rynek, inspekcji końcowej podlegają wszystkie opony opuszczające fabrykę. Podstawową kontrolę opon zwulkanizowanych można podzielić na 3 etapy:

- Wykrywanie potencjalnych zanieczyszczeń na maszynie X-Ray – detekcja metalowych ciał obcych w objętości opony, stanowiących podstawowe zagrożenie niekontrolowanego przebicia podczas eksploatacji.
- Pomiar wielkości opisujących jednorodność na maszynach Rim Flow i TUO (*Tire Uniformity Grinding Machine*) – jednorodność jest jednym z aspektów jakościowych świadczących o jednolitej strukturze opony, który jednocześnie stanowi miarę zdol-

ności opony do płynnej pracy pozbawionej wibracji [6]. Wspomniane wielkości zostały scharakteryzowane w tabeli 1.

- Kontrola wizualna – wykonywana przez operatorów FI pod kątem wykrycia defektów¹, na stanowiskach zapewniających odpowiednie natężenie światła, wyposażonych w zespół rolek (ułatwiają obrót opony w celu jej oględzin) i rozwieraki (umożliwiają rozchylenie boków opony do oceny jej wnętrza).

W określonych sytuacjach realizowane są również dodatkowe etapy kontroli, np. szerografia, która służy do wykrywania pęcherzy powietrza uwieczonych we wnętrzu opony. Wykorzystywany jedynie do badania opon zaprojektowanych do pracy w najbardziej ekstremalnych warunkach (segment aut sportowych).

W trakcie masowej produkcji oprócz powyższych etapów kontroli realizowany jest również tzw. nadzór, polegający na przeprowadzeniu testów w Stacji Badania Opon tj.: HS (*High Speed*), LS (*Low Speed*), Plunger (test przebicia), RRc (*Rolling Resistance* – opory toczenia), BFF (*Bead Fit Force*), *Bead Unseating Pressure*, CSA (*Cut Section Analysis*), *Footprint* (odcisk rzeźby bieżnika), wymiary fizyczne, czy rezystancja elektryczna. Zakres nadzoru, czyli ilość badanych opon, typy testów oraz częstotliwość badań ustalana jest na podstawie konstrukcji, homologacji oraz wymagań klienta dotyczących danego rozmiaru opony.

Po uzyskaniu pozytywnej oceny na FI, opony zostają przetransportowane przez przenośnik rolkowy do Magazynu Opon.

Tabela 1

Charakterystyka wielkości opisujących jednorodność opon (opracowanie własne na podstawie [6, 14]).

Wielkość	Znaczenie
RFV [N]	Zmienność Siły Promieniowej (<i>Radial Force Variation</i>) – okresowa zmiana siły normalnej opony obciążonej, podczas ruchu tocznego, która powtarza się przy każdym obrocie. Spowodowana niejednorodnością masy na obwodzie opony. Obszary cięższe to np. złącza komponentów opony, natomiast obszary lżejsze stanowią np. miejsca rozrzedzenia kordów.
RFV1H - RFVxH [N] LFV1H - LFVxH [N]	Wyższe harmoniczne (<i>Higher Harmonics</i>) – siły składowe RFV i LFV. Obecnie w przemyśle oponiarskim wyznacza się składowe nawet do 11-tej harmonicznej.
LFV [N]	Zmienność Siły Bocznej (<i>Lateral Force Variation</i>) – okresowa zmiana siły stycznej opony obciążonej do kierunku ruchu tocznego. Wynika z niejednorodności masy komponentów opony.
CON [N]	Stożkowatość (<i>Conicity</i>) – skłonność opony do ściągania pojazdu (w lewo lub w prawo) z zamierzonego toru ruchu. Związana z brakiem symetrii i przecentrowaniami elementów składowych względem osi opony.
Balance [g]	Balans – rozkład masy na obwodzie opony, jego pomiaru dokonuje się za pomocą wyważarek. Wyznacza się zazwyczaj balans statyczny (ciężar wypadkowy opony w bezruchu) oraz balans dynamiczny (w ruchu na stałej osi o określonej prędkości obrotowej).
RRO [mm]	Bicie Promieniowe (<i>Radial Runout</i>) – różnica pomiędzy maksymalnym i minimalnym wynikiem obwodowego pomiaru promienia opony zamontowanej na feldze o stałej osi, wykonanym prostopadle do tej osi i możliwie najbliżej linii centralnej opony. Pomiaru zawsze dokonuje się na żebrach bieżnika (niektóre rzeźby posiadają centralnie umieszczony rowek – stąd sformułowanie "możliwie najbliżej").
LRO [mm]	Bicie Boczne (<i>Lateral Runout</i>) – różnica pomiędzy maksymalnym i minimalnym wynikiem obwodowego pomiaru opony zamontowanej na feldze o stałej osi, wykonanym równolegle do tej osi w najszerszym miejscu ściany bocznej opony.
LRP [mm]	Najwyższy [LRP bump] i najniższy [LRP depression] punkt wyznaczony podczas obwodowego pomiaru opony zamontowanej na feldze o stałej osi, wykonanym równolegle do tej osi, mierzony w obszarze barku.

¹Pojęcia „defekt” i „wada” w ramach niniejszego artykułu są traktowane równoważnie.

4. Podział defektów występujących podczas procesu masowej produkcji opon

Efektywne zarządzanie odpadami w przedsiębiorstwie produkującym opony, wymaga określenia klasyfikacji przyczyn powstawania odpadów. Przykładem takiej klasyfikacji jest podział na defekty wizualne (tzw. *molding defects*) i defekty związane z przekroczeniem limitów własności opisujących jednorodność opon. Do defektów wizualnych zalicza się:

- Ciało obce w oponie, np.: luźny drut opasania, odstający drut drutowki, papier, metal, nić, plastik, olej, silikon, drewno, mika, spieki gumowe, podwulkanizowana guma;
- Obecność powietrza w przekroju poprzecznym opony, np.: pod IL, pod barkiem, pod bieźnikiem, pod bokiem, pod drutowką, pomiędzy IL-SW, pomiędzy IL-RFT, powietrze pod IL na złączach materiałów;
- Pęcherze powietrza na powierzchni zewnętrznej opony np.: na drutowce, na boku;
- Ubytki powierzchniowe, np.: ubytek bieźnika, barku, boku, drutowki, wykładziny wewnętrznej, ubytek IL na złączu BP, ubytek IL między CCH – RFT, obwodowy ubytek IL;
- Nadlewki, np.: drutowki, na łączeniu segmentów bieźnika, na linii podziału formy (MPL – *Mold Partition Line*);
- Defekty wynikające z niewłaściwej jakości złącz: rozejścia (przerwa w ciągłości danego materiału wynikające ze zbyt małej zakładki złącza), zbyt duże złącza, psie ucho;
- Zniekształcenia, np.: drutowki, bieźnika, całej opony, zapadnięcie boków;
- Separacje, np.: separacja IL od wkładki RFT;
- Pęknięcia, np.: pęknięcie wkładki RFT, podstawy drutowki;
- Podwinięcia, np.: podwinięcie CCH;
- Uszkodzenia mechaniczne wynikające z przemieszczania podczas procesów produkcyjnych, np.: przez przenośniki (wulkanizacja), trymowarkę (zacięcia), TUO (zgniecenie opony), przytarcia (transportery rolkowe);
- Defekty związane z niedoskonałościami formy lub membrany wulkanizacyjnej, np.: zabrudzenia (negatyw ciała obcego odbity w oponie zwulkanizowanej), zagłębiony/wystający odpowiedźnik, brak wkładki (element oddający odpowiednią część stampingu formy), błąd cyklu wulkanizacyjnego (niezwulkanizowana opona), uszkodzona/pęknięta/podwinięta/zużyta membrana;
- Defekty związane z kordami tekstylnymi, np.: widoczny chafer/osnowa na podstawie drutowki, zmarszczka osnowy, wypłyniecie osnowy, przemieszczenie nitek osnowy, widoczna nitka osnowy, rozejście kordu przy złączu osnowy.

Metodami i narzędziami służącymi do identyfikacji wspomnianych w tym podpunkcie defektów są kontrola wizualna, X-Ray i szerograf. Korzystając z powyższej li-

sty wad, możliwe jest również zaproponowanie podziału według etapu procesu produkcyjnego („podziału procesowego”), tj. defekty spowodowane nieprawidłowościami w procesie wytłaczania, konfekcji, wulkanizacji, etc. Natomiast do defektów związanych z przekroczeniem limitów własności opisujących jednorodność opon zalicza się:

- wada RFV;
- wada RFV1H – RFVxH;
- wada LFV;
- wada CON;
- wada LRO;
- wada LRP – wybrzuszenie;
- wada LRP – wgłębienie;
- wada RRO;
- wada wyważenia dynamicznego;
- wada wyważenia statycznego.

Wymienione wyżej defekty wykrywane są na podstawie pomiaru maszyn Rim Flow i TUO. Odnalezienie źródła tych wad wymaga najczęściej wieloetapowej analizy danych z rejestru masowej produkcji. Ich detekcja jest ważna, ponieważ bicie promieniowe wywołane niejednorodnością masy opony może powodować powstawanie wyczuwalnych drgań, często błędnie interpretowanych jako awaria części zawieszenia lub układu kierowniczego samochodów osobowych [2].

5. Współczesne kierunki eliminacji defektów opon

Złożoność procesu produkcji opon jest powodem ciągłego rozwoju metod wspomagających eliminację defektów wymienionych w poprzednim rozdziale. W literaturze przedmiotu można odnaleźć wiele różnych podejść stosowanych w obszarze wykrywania i eliminacji wad generowanych w procesie produkcji opon.

Pierwszym podejściem stosowanym w tym zagadnieniu jest zastosowanie *Metody Elementów Skończonych* (MES). W pracy [8] udowodniono, że może być ona użyteczna do oceny wpływu zmian sztywności oraz niedoskonałości wymiarowych opony radialnej na jej jednorodność. Możliwość uwzględnienia w komputerowym trójwymiarowym modelu rzeczywistych niedoskonałości, stanowi również podstawę do przewidywania wyników jednorodności opon na podstawie nierównomiernego rozkładu ich masy. Stwierdzenia te potwierdzili autorzy [13, 20] dodając, że do estymacji siły stycznej można użyć dużo prostszych modeli i technik.

Kolejny sposób to implementowanie *narzędzi jakościowych* w przedsiębiorstwach. Dzięki zastosowaniu metody QFD (*Quality Function Deployment*) Autorom [7] udało się doprecyzować faktyczne potrzeby klienta, co rzutowało na poprawę procesu produkcji już od etapu projektowania nowego produktu.

Jednocześnie *rozwijane są istniejące metody pomiarowe* w celu uzyskiwania coraz bardziej wiarygodnych wyników, które są przecież podstawą do budowy i weryfikacji modeli matematycznych. Przykładem jest [10], gdzie udało się uzyskać większą dokładność pomiaru ba-

lansu dynamicznego poprzez użycie metody najmniejszych kwadratów. W publikacji [22] skoncentrowano się na zaproponowaniu algorytmu automatycznego wykrywania defektów z obrazów wykonywanych przez X-ray. Jego zastosowanie pozwoli zwiększyć dokładność realizowanej kontroli, a także pomoże zredukować ilość pracy wykonywanej przez operatorów. Nowatorska technika wykorzystująca otwartą sondę falowodową zaproponowana przez autorów [18] może być w przyszłości alternatywą ujawniającą defekty wewnętrzne opony. Usprawniane są także metody kontroli wizualnej powierzchni zewnętrznej opony, jak np. propozycja opisana w [5], gdzie wykorzystywane są paski świetlne wykrywające wady o niewielkich rozmiarach.

Kolejnym kierunkiem rozwijanym w celu lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w oponie jest *tworzenie całkowicie nowych metod pomiarowych*. W najbliższym czasie do przemysłu oponiarskiego może zostać wprowadzony obowiązkowy pomiar jednorodności HSU (*High-Speed Uniformity*). W porównaniu do przeprowadzanych aktualnie pomiarów (nazywanych także *Low-Speed Uniformity*), test ten pozwala dodatkowo wykryć fluktuacje momentów obrotowych opony [11], co odzwierciedla rzeczywiste zachowanie opony podczas użytkowania w sposób bardziej wiarygodny.

Intensywnie eskalowane są również *techniki oparte na wykorzystaniu sztucznej inteligencji*, które stanowią jedną z możliwości przeprowadzania analizy na dużych zbiorach danych, w celu identyfikacji ich cech charakterystycznych. Metoda oparta na ich wykorzystaniu została przedstawiona przez autorów [17]. W artykule [1] porównano zastosowanie różnych modeli uczenia maszynowego do przewidywania sił bocznych występujących podczas ruchu opony. Proces Gaussowski okazał się najdokładniejszym rozwiązaniem, gwarantującym najmniejsze błędy w stosunku do pomiarów akcelerometru. Podobny problem został poruszony w [12], gdzie rejestr danych przyspieszeniemia był podstawą do przeprowadzenia uczenia sieci neuronowej, wykorzystanej następnie do przewidywania sił opony w czasie rzeczywistym.

6. Podsumowanie

Przedstawiony powyżej stan rzeczy wskazuje na możliwość utworzenia modelu, umożliwiającego predykcję wartości określających jednorodność opon. Wielkości opisujące jednorodność są precyzyjnie zdefiniowane i powszechnie stosowane w przemyśle oponiarskim. Ciągłe zmniejszanie wartości ich limitów, doprowadza producentów opon do granic możliwości poprawy obecnej technologii wytwarzania w kierunku poprawy wyników mierzonych przez maszyny TUO. Wysoki stopień skomplikowania procesu produkcyjnego, utrudnia szczegółową identyfikację wszystkich czynników wpływających na poszczególne wielkości charakteryzujące jednorodność opon. Osiągnięcie przez oponę satysfakcjonującej wartości np. RFV, wymaganej przez obecny rynek nie sprowadza się już jedynie do minimalizacji ga-

barytów złącza bieżnika. Konieczne jest nowe podejście do ciągłego monitorowania każdego etapu procesu produkcji. Staje się to jednak możliwe, dzięki wykorzystaniu funkcji rozbudowanej weryfikacji materiałów, przeprowadzanej przez nowoczesne maszyny konfekcyjne, takie jak np. VMI MAXX. Rozwinięcie wspomnianego modelu, bazującego na zależności pomiędzy zmiennymi wejściowymi (mierzonymi podczas procesu konfekcji) a zmiennymi wyjściowymi (wyniki pomiarów maszyn do badania jednorodności) może być podstawą dla nowego sposobu eliminacji defektów w przemyśle oponiarskim. Ponadto, może to pomóc w podjęciu decyzji dotyczącej dyspozycji opony (wyrób zgodny/niezgodny) bezpośrednio po jej konfekcji (rys. 3), co wpłynęłoby na zmniejszenie kosztów odpadów poprzez możliwość pominięcia kilku etapów produkcji (tańszy złom).

Niniejszy artykuł został przygotowany w ramach Programu Doktorat Wdrożeniowy Ministerstwa Edukacji i Nauki realizowanego w latach 2021–2025 (Umowa nr DWD/5/0376/2021).

Literatura

- [1] Barbosa B.H.G., Xu N., Askari H., Khajepour A., *Lateral force prediction using Gaussian process regression for intelligent tire systems*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 52, 8, 5332–5343, 2022.
- [2] Bęczkowska S., Korzeb J., Koziak S., Weyssenhoff A., *Niejednorodność i wady materiałowe opon samochodów osobowych – zagadnienia wybrane*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z. 121, 9–20, 2018.
- [3] Chicu N., Prioteasa A.L., Deaconu A., *Current trends and perspectives in tyre industry*, Studia Universitatis “Vasile Goldis” Arad. Economics Series, 30, Special Issue 2, 36–56. 2020.
- [4] Chomka G., Chudy J., Kasperowicz M., *Techniczne aspekty regeneracji opon samochodowych*, Autobusy: Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe, 5110–1115, 2012.
- [5] Funahashi T., Taki K., Koshimizu H., Kaneko A., *Fast and robust visual inspection system for tire surface thin defect*, 21st Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV), 1–6, 2015.
- [6] Gent A.N., Walter J.D., *Pneumatic Tire*, Mechanical Engineering Faculty Research, 2006.
- [7] Hadi H.A. et al., *The implementation of Quality Function Deployment (QFD) in tire industry*, ComTech Computer Mathematics and Engineering Applications, 8, 4, 223–228, 2017.
- [8] Jeong K.M., Kim K.W., Beom H.G., Park J.U., *Finite element analysis of nonuniformity of tires with imperfections*, Tire Science and Technology, TSTCA, 35, 3, 226–238, 2007.
- [9] Kosmela P., Olszewski A., Zedler Ł., Burger P., Formela K., Hejna A., *Structural changes and their implications in foamed flexible polyurethane composites filled*

- with rapeseed oil-treated ground tire rubber, *J. Compos. Sci.*, 5, 90, 2021.
- [10] Li C., *Research on tire dynamic balancing machine based on least square method*, IEEE 6th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP 2021), 2021.
- [11] Meng D., Pengfei S., Shuiting Z., Hongwu H., Jie Z., *A study on the influence of tire speed and pressure on measurement parameters obtained from high-speed tire uniformity testing*, MDPI, *Vehicles*, 2, 559–573, 2020.
- [12] Nan Xu, Hassan Askari, Yanjun Huang, Jianfeng Zhou, Amir Khajepour, *Member, IEEE, Tire Force Estimation in Intelligent Tires Using Machine Learning*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 23, 4, 2022.
- [13] Oertel C., Wei Y., *Tyre rolling kinematics and prediction of tyre forces and moments: part I – Theory and method*, *Vehicle System Dynamics*, 50, 11, 1673–1687, 2012.
- [14] Rodgers B., Waddell W., *Science and technology of rubber* (third edition), Academic Press, Chapter 14 – Tire Engineering, 619–661, 2005.
- [15] Skarbek-Żabkin A., Kamińska E., *Kierunki zagospodarowania zużytych opon samochodowych*, *Transport Samochodowy*, 1, 2015.
- [16] Skrzyniarz M., *Cykl życia odpadów gumowych na przykładzie zużytych opon samochodowych*, *Gospodarka Materiałowa i Logistyka*, 9, 44–53, 2020.
- [17] Strano S., Terzo M., Tordella C., *A supervised machine learning framework for smart tires*, IEEE 6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry (RTSI), 2021.
- [18] Sutthaweekul R., Buhari M., Sunny A.M., Tian G., *Influence of lift-off on microwave open-ended waveguide time of flight based tire inspection*, 2016 International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE), 275–279, 2016.
- [19] Tardiff J.L., Harper M., Haakenson D., Joandrea M., Knych M., *Effect of sSBR composition, functionality on tire tread compound performance characteristics*, *Rubber World*, 256, 6, 35–48, 2017.
- [20] Wei Y., Oertel C., Shen X., *Tyre rolling kinematics and prediction of tyre forces and moments: part II – Simulation and experiment*, *Vehicle System Dynamics*, 50, 11, 1689–1706, 2012.
- [21] Zasoby wewnętrzne firmy Bridgestone Poznań Sp. z o.o., 2022.
- [22] Zhu Q., Ai X., *The Defect Detection Algorithm for Tire X-Ray Images Based on Deep Learning*, IEEE 3rd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC), 138–142, 2018.