

Ewa Kubińska-Jabcoń, Mariusz Niekurzak

Wykorzystanie nowoczesnych materiałów stosowanych w motoryzacji w celu poprawy jakości i bezpieczeństwa użytkownika pojazdów mechanicznych

JEL: R41, O33. DOI: 10.24136/atest.2019.207.

Data zgłoszenia: 07.01.2020. Data akceptacji: 08.01.2020.

W artykule zostały omówione materiały do produkcji pojazdów, które są najczęściej wykorzystywane. Niezmiennie podstawowym materiałem konstrukcyjnym są stale, szczególnie o zwiększonej wytrzymałości AHSS. Przedstawiono również materiały wykonane ze stopów lekkich, materiały kompozytowe z włókien węglowych w osnowie polimerowej oraz kompozyty w osnowie metalowej. W pracy opisane zostały również nanokompozyty, które są innowacyjnym materiałem, nad którym cały czas trwają badania. Przedstawiono także rodzaje wykorzystywanego szkła oraz możliwości łączenia szyb z innymi technologiami. Zawarto również analizę doboru materiałów przeznaczonych do produkcji pojazdów oraz przeanalizowano wybrane właściwości materiałów najczęściej stosowanych w motoryzacji. Porównano moduł sprężystości, wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie po zerwaniu i gęstości.

Słowa kluczowe: materiały wykorzystywane w motoryzacji, stal, stopy lekkie, materiały kompozytowe, materiały szklane.

Wstęp

Przemysł motoryzacyjny to bardzo dynamicznie rozwijająca się branża. Jest to spowodowane postępowaniem technologicznym oraz nowymi przepisami w zakresie ochrony środowiska. Oprócz nowych rozwiązań technologicznych, takich jak filtry, nowego rodzaju silniki czy paliwa, można zauważyć, że jest silna zależność pomiędzy wagą samochodu a emisją CO₂ do atmosfery. Ważne jest, aby materiały, z których wykonane są części, zapewniły bezpieczeństwo oraz komfort użytkownika. Nowoczesne rozwiązania pozwalają produkować materiały, które są nie tylko lżejsze, ale też mają lepsze właściwości. Nowe materiały nadają się lepiej do obróbki, są wytrzymalsze oraz posiadają lepszą plastyczność. Materiały opracowane obecnie, pomimo wysokiej wytrzymałości, bardzo dobrze nadają się do obróbki plastycznej – dzięki temu można produkować wytrzymałe części o skomplikowanych kształtach. Pośrednim skutkiem wytwarzania części, w których do produkcji używana jest mniejsza ilość materiału, jest zmniejszenie masy pojazdu oraz kosztów związanych z ich zakupem. Części, które produkowane są z większą dokładnością, przyczyniają się do wzrostu komfortu jazdy oraz ergonomii pojazdu, która znacząco wpływa na osiągi oraz spalanie. Można zauważyć stopniowe przechodzenie z drewna, odlewów stalowych czy zwykłej stali na materiały bardziej zaawansowane – stal o wzmocnionej wytrzymałości, stopy aluminium, stopy magnezu oraz kompozyty. Nowoczesne materiały mogą spełnić wymagania, które stawiają nam przepisy, jak i zaspokoić wysokie oczekiwania producentów oraz klientów.

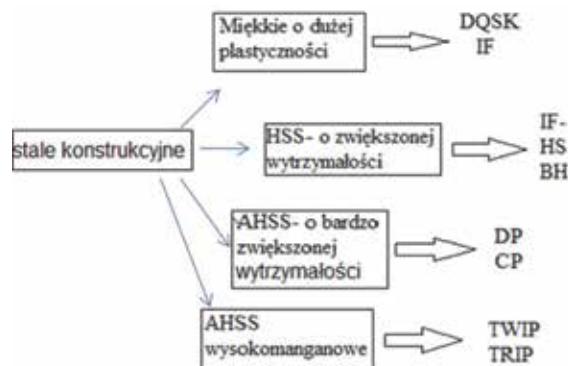
1. Podstawowe materiały stosowane w motoryzacji

1.1. Wykorzystanie stali

Przyjmuje się, że około 55% masy samochodów stanowią stale różnego typu. Stal znajduje zastosowanie głównie w konstrukcjach

podwozi oraz nadwozi samochodowych. Zaletą stosowania stali jest wysoki moduł sprężystości E, który wynosi 207 GPa i który sprawia, że stal jest głównym materiałem do produkcji konstrukcji samochodowych. Ponadto wykorzystanie stali o wysokiej wytrzymałości pozwala zmniejszyć rozmiar niektórych części, jednocześnie zwiększając bezpieczeństwo poprzez przejęcie większej ilości energii podczas kolizji. W przeciągu ostatnich kilkudziesięciu lat zmieniła się metoda produkcji stali. Wykorzystując nowoczesne metody, można uzyskać poziom zanieczyszczeń 10–20 ppm, a wykorzystując tradycyjne metody – co najwyżej 200–400 ppm [1]. W zależności od przeznaczenia stosuje się różne rodzaje stali lub łączy się stal z innymi substancjami. Aby stal była odporna na korozję, pokrywa się ją stopami cynku, np. Zn-Be, Zn-Ni. Z kolei nakładanie powłok odbywa się nie poprzez zanurzenie na gorąco, a poprzez elektroosadzanie. Klasyfikację stali wykorzystywanych przy produkcji pojazdów samochodowych przedstawia rys. 1.

Stale niskowęglowe DQSK (ang. *Drawing Quality Special Killed*) i IF (ang. *Interstitial Free*) są miękkie oraz plastyczne. Charakteryzują się wytrzymałością na rozciąganie R_m poniżej 300 MPa oraz wydłużeniem całkowitym A na poziomie 30–60%. Stale o zwiększonej wytrzymałości HSS (ang. *High Strength Steel*), do których zalicza się m.in. stal CMn (ang. *Carbon Manganese*) oraz stal BH (ang. *Bake Hardenable*), posiadają wytrzymałość na rozciąganie R_m wynoszącą 300–700 MPa, natomiast wydłużenie całkowite A jest mniejsze niż w stalach niskowęglowych. Stale o zaawansowanej zwiększonej wytrzymałości AHSS (ang. *Advanced High Strength Steel*) posiadają R_m 700–2 000 MPa oraz wydłużenie A 5–30%. Istnieje zależność pomiędzy zawartością węgla, która zwiększa wytrzymałość materiału, a zmniejszeniem jego plastyczności [2]. Stale DQSK oraz IF posiadają niską zawartość węgla. Nadają się do zaawansowanych operacji tłoczenia oraz posiadają strukturę ferrytyczną. Stale IF nie posiadają w swojej strukturze pierwiastków, które tworzyłyby roztwory międzywęzłowe. Poziomy takich pierwiastków jak węgiel, azot czy siarka nie przekraczają 0,005%. Kolejnymi stalami, które charakteryzują się wysoką wytrzymałością, są: IF z dodatkami oraz BH. W swoim składzie zawierają dodatki takie jak tytan, niob i wanad. Dodatki te mają za zadanie związanie



Rys. 1. Klasyfikacja stali w motoryzacji [1]

pierwiastków międzywęzłowych. Stale BH są utwardzane dopiero podczas wypalania lakieru na gotowej już karoserii. Stal HSLA również posiada zawartość węgla nieprzekraczającą 0,1%. Jest ona utwardzana mikrododatkami, m.in. Mn, Cr, Nb, Al, Si. Wszystkie te stale mają niską zawartość węgla, a co za tym idzie – bardzo dobrze nadają się do spawania oraz zgrzewania. Stale AHSS (ang. *Advanced High Strength Steel*) są umacniane poprzez transformację fazową, nie jak w przypadku stali niskowęglowych, do których jest stosowane umocnienie roztworowe lub dyspersyjne. Do stali o zaawansowanej podwyższonej wytrzymałości należą dwufazowe stale DP (ang. *Dual Phase*) oraz CP (ang. *Complex Phase*), które są umacniane wcześniej, na etapie przygotowania materiału, natomiast w przypadku stali TRIP (ang. *Transformation Induced Plasticity*) umocnienie zachodzi, gdy stal jest zginiata, np. podczas kolizji pojazdu. Częścią wspólną w przygotowaniu wszystkich stali z AHSS, zarówno stali DP, CP, jak i TRIP, jest obróbka w temperaturze bliskiej temperatury krytycznej, gdzie zarówno fazy α , jak i γ , istnieją wspólnie. Stale DP mają niską zawartość węgla, dlatego też bardzo dobrze się je spawa praktycznie wszystkimi tradycyjnymi technikami. Pozwalają na zmniejszenie masy produkowanych części. W porównaniu ze stalą głęboko tłoczną następuje redukcja masy o ok. 50%. Zmniejszenie masy sprawia, że można zaoszczędzić na wydatkach logistycznych, takich jak magazynowanie czy transport, natomiast na atrakcyjność oferowanych wyrobów wpływa zmniejszenie zużycia paliwa. Stale DP charakteryzuje dobra formowalność na zimno, odporność na korozję, dobra wytrzymałość i zdolność do pochłaniania znacznych ilości energii. Stale DP są wykorzystywane do produkcji takich elementów, jak ramy i podłużnice samochodowe, słupki A oraz B samochodu, fotele, belki wzmocnienia bocznego, krytyczne elementy bezpieczeństwa biernego. Stal DC jest to stal niskostopowa wykorzystywana do produkcji arkuszy blach, posiadająca bardzo dobre własności plastyczne. Nadaje się do gięcia, profilowania, głębokiego toczenia oraz rozciągania. Ma bardzo dobrą spawalność.

Stal TRIP jest to przykład materiału, który łączy bardzo dużą wytrzymałość z dobrymi właściwościami plastycznymi. Cechą charakterystyczną podanego materiału jest to, że przemiany fazowe zachodzą na etapie odkształcenia mechanicznego. Stale z efektem bliźniakowania TWIP (ang. *Twinning Induced Plasticity*) są to nowoczesne stale, które zostały opracowane w 2004 r. Ich cechą szczególną, podobnie jak w stalach TRIP, jest to, że posiadają wysoki stopień odkształceń plastycznych, nie wpływając na zachowanie wysokiej wytrzymałości. Te dwie cechy są istotne szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym, gdzie podczas kolizji pojazdu materiał zachowuje wysoką ciągliwość. Podczas uderzenia następują odkształcenia plastyczne. Dzięki efektowi bliźniakowania materiał może pochłonąć znaczne ilości energii, zachowuje wysoką stabilność i chroni kierowcę, ponieważ w pierwszej kolejności zachodzi umocnienie materiału. Dopiero kiedy cała część w obszarze odkształceń ulegnie umocnieniu, materiał może ulec zniszczeniu.

Stale AHSS posiadają wysoką wytrzymałość bez równie dobrej plastyczności. Efektem tego jest pękanie przy nadmiernym obciążeniu. Niektóre stale zachowują się zupełnie odwrotnie – posiadają wysoką plastyczność, ale za to są mało wytrzymałe. Dlatego wysokomanganowe stale z efektem TWIP i/lub TRIP stanowią przełom w branży motoryzacyjnej. Cały czas trwają badania, których celem jest upowszechnienie stosowania stali łączących wysoką wytrzymałość w połączeniu z dobrymi właściwościami plastycznymi. Podczas kolizji stal deformuje się tylko w określonych rejonach i w tych obszarach następuje utwardzenie, następnie energia jest przekazywana do kolejnych rejonów. W ten sposób energia jest skutecznie

absorbowana i rozpraszana. Zmiana składu chemicznego w postaci zmniejszenia zawartości manganu do ok. 15–20% sprawia, że w omawianych stalach pojawia się efekt TRIP. Są również stale mieszane – zarówno z efektem TWIP, jak i TRIP. Różnica pomiędzy tradycyjną stalą TRIP a wysokomanganową stalą TRIP jest taka, że przemiana austenitu do martenzytu przebiega dużo efektywniej oraz w dwóch etapach. W pierwszym etapie rodzi się martenzyt heksagonalny. Dopiero w drugim kroku powstaje martenzyt o strukturze przestrzennie centrycznej [3].

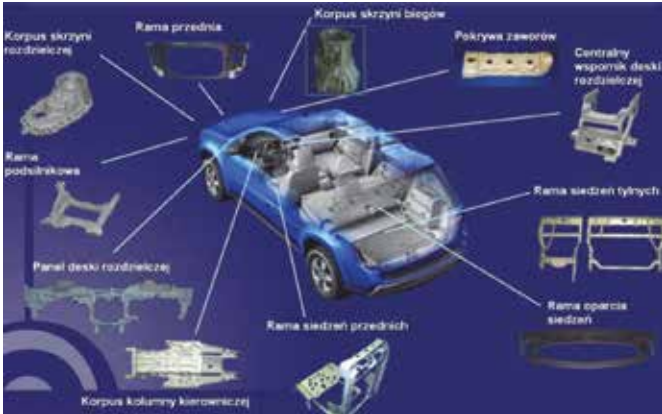
1.2. Wykorzystanie stopów lekkich w celu zmniejszenia masy pojazdu

Zaletą stopów aluminium w porównaniu do stali jest ich gęstość, która wynosi 2,7 g/cm³. Skutkiem produkcji części z materiałów o niskiej gęstości jest zmniejszenie ich masy o 60% w porównaniu do stali. Użycie stopów aluminium pozwala zaoszczędzić przy niektórych częściach do 50% masy. W samochodach aluminium znajduje zastosowanie do produkcji m.in. bloków silników, głowic, wałów czy konstrukcji. Dzięki wysokiej przewodności cieplnej stopy aluminium znalazły zastosowanie w produkcji wymienników ciepła i skraplaczy.

W branży motoryzacyjnej najczęściej stosuje się stopy aluminium takie jak [4]:

- ♦ seria 4000 – aluminium z krzemem – charakterystyczną cechą jest wysoka wytrzymałość oraz odporność na korozję; produkuje się z nich m.in. felgi samochodowe;
- ♦ seria 5000 – jest to stop aluminium z magnezem, który nie posiada wysokiej wytrzymałości, natomiast jest odporny na korozję; wykorzystywany jest do produkcji części, które nie muszą posiadać wysokiej wytrzymałości, natomiast mają ładnie wyglądać i być odporne na korozję;
- ♦ seria 6000 – aluminium zawierające magnez oraz krzem; cechuje się wysoką odpornością na korozję i posiada dobrą plastyczność, służy do produkcji części nośnych w ciężarówkach;
- ♦ seria 7000 – stop aluminium z cynkiem i magnezem; po poddaniu obróbce cieplnej zyskuje najwyższą wytrzymałość. W porównaniu z pozostałymi stopami aluminium nie ma wysokiej odporności na korozję, nadaje się za to do spawania oraz do obróbki skrawaniem.

Stopy magnezu są wykorzystywane w motoryzacji z podobnego powodu jak stopy aluminium. Ich zaletą jest jeszcze mniejsza gęstość w porównaniu do stopów aluminium – 1,74 g/cm³. Daje to jeszcze większe możliwości obniżenia masy i zmniejszenia zużycia paliwa oraz zwiększenia osiągnięć pojazdów. Stopy magnezu mają niską plastyczność, ale posiadają dobre własności odlewnicze. Można odlewać części o grubości 2 mm lub cieńsze. Pozwala to produkować części o skomplikowanych kształtach w całości, bez konieczności ich późniejszego łączenia. Pozwala to na uniknięcie kosztów związanych z łączeniem części. Zazwyczaj łączy się magnez z aluminium, manganem czy krzemem, jednak ich zawartość nie powinna przekraczać 10%. Jako dodatki stopowe w stopach magnezu nie stosuje się żelaza oraz chromu. Korzystny wpływ na magnez ma aluminium. Wraz ze wzrostem zawartości aluminium do ok. 6% polepszona zostaje twardość i wytrzymałość na rozciąganie. Staje się też łatwiejszy do odlewania. Cynk poprawia wytrzymałość w temperaturze pokojowej, jednak jego zawartość nie powinna być większa niż 1%. Większa zawartość sprawia, że stop pęka w podwyższonej temperaturze. W motoryzacji najczęściej wykorzystywane są odlewy z grupy AZ (Mg, Al, Zn) oraz AM (Mg, Al, Mn). Ze stopu AZ produkuje się: pokrywy zaworów, obudowy skrzyni biegów oraz ramy foteli. Części, które wymagają lepszej plastyczności, produkuje się ze stopu AM i są to m.in.: pokrywy baku, części tylnej klapy, niektóre części deski rozdzielczej. Na rys. 2



Rys. 2. Zastosowanie stopów magnezu w samochodzie [6]

przedstawiono przykłady zastosowania stopów magnezu w pojeździe samochodowym.

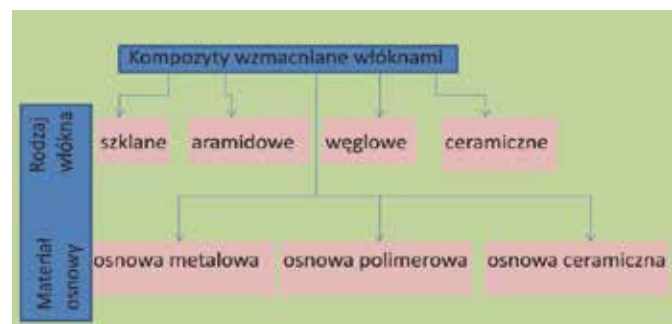
Stopy tytanu, jak wszystkie stopy lekkie, charakteryzuje się niską gęstością: $4,43 \text{ g/cm}^3$. Jest ona wyższa od stopów aluminium czy magnezu, ale też prawie o połowę niższa od gęstości stali. Części wykonane ze stopów tytanu, w przeciwieństwie do stopów magnezu czy aluminium, posiadają dobrą odporność na korozję oraz mogą pracować w temperaturach przekraczających 500°C . Największą wadą tytanu są bardzo wysokie koszty. Stopy tytanu wykorzystuje się np. do sprężyn śrubowych, gdzie niska odporność na ścinanie oraz wysoka wytrzymałość zmęczeniowa dają przewagę nad stalą. Stopy tytanu są często żaroodporne oraz posiadają wysoką wytrzymałość. W sytuacji, kiedy ma się do czynienia z luksusowymi samochodami, producent zezwala na wykonanie części z droższych materiałów. Ważniejszymi kryteriami stają się zmniejszenie masy oraz zwiększenie osiągnięć. Przykładem jest BMW, gdzie układ wydechowy w modelach M3 E92 i M3 E90 został całkowicie wykonany z stopu tytanu. Zmiana materiału na tytan pozwoliła na zmniejszenie masy pojazdu o 16 kg. Zmianie uległ również moment obrotowy, który wzrósł o 18 Nm. Stal nierdzewna w swoich właściwościach bardzo przypomina stale niskostopowe, lecz posiada kilka istotnych różnic, dlatego też została umieszczona w kategorii stopów lekkich. Gęstość stali nierdzewnych zbliżona jest do gęstości tradycyjnych stali, w związku z czym zastąpienie stali stalą nierdzewną nie wprowadza korzyści. Istnieje jednak kilka powodów, dla których w niektórych sytuacjach wykorzystanie stali nierdzewnej sprawia, że można zaoszczędzić na masie: stosunek wytrzymałości do gęstości jest wyższy niż w przypadku stali o wysokiej wytrzymałości, stale nierdzewne posiadają lepszy współczynnik utwardzenia oraz są lepsze do formowania, są bardziej podatne na odkształcenia oraz można zmniejszyć ich grubość podczas formowania, mają również większą prędkość odkształcania, czyli mogą pochłonąć więcej energii podczas uderzenia, posiadają dużą odporność na korozję, co sprawia, że nie wymagają dodatkowych powłok antykorozyjnych. Mimo wielu zalet jest to drogi materiał, dlatego też stosuje się go tylko do produkcji nielicznych części samochodowych, takich jak: zbiorniki paliwa czy felgi. W przemyśle samochodowym wykorzystuje się dwa rodzaje stali nierdzewnej: austenityczna (seria 300) z dodatkami chromu Cr oraz niklu Ni oraz w odmianie ferrytycznej tylko z dodatkiem chromu. Wersja austenityczna jest niemagnetyczna, posiada wyższą granicę plastyczności oraz ma lepszą odporność na korozję niż wersja ferrytyczna. W dzisiejszych samochodach ten materiał jest używany przede wszystkim w układach wydechowych, gdzie jest potrzebna odporność na korozję oraz na utlenianie. Pomimo

wysokiej ceny stal nierdzewna jest stosowana do produkcji pojazdów transportu publicznego. Powodem stosowania jest długi okres eksploatacji tych pojazdów. Uwzględniając w dłuższym okresie czasu eksploatacji remonty pojazdów oraz wydatki ponoszone na naprawę, można zauważyć, że korzystniejszą opcją jest wybór stali nierdzewnych. Optymalizując dobór materiałów pod względem najniższej ceny, przy uwzględnieniu kryterium zachowania wymaganych właściwości w dłuższym okresie eksploatacji, obserwuje się, że stal nierdzewna uzyskuje przewagę w porównaniu do stali o wzmocnionej wytrzymałości.

2. Zastosowanie materiałów kompozytowych w motoryzacji

Materiały kompozytowe stały się popularne, ponieważ posiadają bardzo dobre właściwości mechaniczne przy dużo niższej masie właściwej w porównaniu do metali. Dzięki temu oferują nowe możliwości produkowania lekkich oraz wytrzymałych wyrobów. Podział kompozytów stosowanych w motoryzacji przedstawiono na rys. 3.

Kompozyty z osłoną polimerową PMC (ang. *Polimer Matrix Composites*) są to kompozyty, które posiadają wysoką wytrzymałość. Do ich produkcji jako materiał wzmacniający stosuje się włókna o wysokim module Younga. Są to: włókna szklane, włókna węglowe i włókna aramidowe (kevlarowe). W motoryzacji stosuje się zarówno osnowy termoplastyczne, jak i termoutwardzalne. Termoplastyczne są używane do produkcji m.in.: instrumentów samochodowych, siedzenia, wewnętrznych części drzwi czy zderzaków. Kompozyty termoplastycznych w swoim składzie zawierają włókna krótkie o długości ok. 1 mm. W ostatnim czasie pojawił się nowy rodzaj kompozytów – kompozyty samowzmacniające. Charakteryzują się tym, że zarówno materiał wzmacniający, jak i osłona, wykonane są z tego samego materiału (np. osnowa z polipropylenu i wzmocnienie z takiego samego tworzywa). Gęstość samowzmacnianych kompozytów jest niższa niż w kompozytach z wzmocnieniem z włókien szklanych w osnowie polipropylenu. Najczęściej używanym kompozytem termoutwardzalnym są kompozyty produkowane metodą SMC (ang. *Sheet Moulding Compounds*). Zawierają w sobie włókna ułożone w sposób losowy. Wzmocnieniem są włókna z E-szklą (długość 12–50 mm), natomiast osnową mogą być polimery termoutwardzalne, takie jak poliester czy żywica winyloestrowa. Przykładem zastosowania kompozytów tworzonych poprzez metodę tłoczenia SMC jest produkcja ram do szyberdachów, dźwiękochłonnych osłon pod silnik czy reflektory. Przewagą kompozytów nad stalą jest nie tylko zmniejszenie masy, ale również mniejsza obróbka oraz utwardzenie części. Wykonanie części metodą SMC jest o ok. 50% tańsze od tłoczenia części stalowych. Kolejnym przykładem przewagi jest mocowanie chłodnicy samochodowej. Można wykonać ją z kompozytu w dwóch częściach lub ze stali w dwudziestu lub więcej, łącząc je za pomocą znacznej liczby śrub [5-7]. Włókno węglowe w kompozytach nadaje lepsze



Rys. 3. Zastosowanie stopów magnezu w samochodzie [6]

właściwości niż włókna szklane, gdyż zwiększa się moduł sprężystości oraz wytrzymałość. Cena włókien węglowych jest jednak wyższa niż szklanych. Wyższa cena jest spowodowana skomplikowanym procesem technologicznym oraz wysokimi nakładami energii wykorzystywanej do produkcji włókien węglowych. W przypadku droższych samochodów producenci mogą wykorzystywać włókna węglowe. Przykładem jest BMW M6, gdzie panel dachowy został wykonany z włókien węglowych w osłonie epoksydowej. Panel jest dwukrotnie grubszy, aczkolwiek 5,5 kg lżejszy. Zmniejszenie ciężaru dachu sprawia, że środek ciężkości ulega obniżeniu. Ma to wpływ na stabilność pojazdu. Do produkcji włókien węglowych na masową skalę wykorzystywany jest PAN – poliakrylonitryl w postaci włókien. Pierwszy etap produkcji polega na ustabilizowaniu termicznym materiału. Odbywa się to poprzez wygrzewanie w temperaturze 200–300 °C przez 30 min do 2 godz. Proces może przebiegać z przerwami, aby nie przepalić włókien. W kolejnym etapie włókna są nagrzewane w temperaturze 1 000–3 000 °C w próżni. Brak tlenu sprawia, że włókna się nie palą. Zabieg ten sprawia, że wszystkie atomy inne niż węgiel zanikają, a w ich miejsce powstają struktury z tym pierwiastkiem. Po procesie karbonizacji materiał staje się jednolity, przez co nie łączy się dobrze z osnową. Celem poprawienia struktury wykonuje się proces utleniania. Zawartość tlenu w materiale sprawia, że materiał lepiej łączy się z osnową. Powłoka staje się szorstka, przez co proces łączenia przebiega w lepszych warunkach. W ostatnim etapie włókno zostaje pokryte warstwą materiału, co ma na celu jego ochronę podczas nawijania na rolkę lub tkania. Kompozyty w osnowie metalowej MMCs (ang. *Metal Matrix Composites*) są to kompozyty, które cechują się wysoką wytrzymałością, sztywnością oraz stabilnością wymiarów w wysokich temperaturach. Posiadają dobre właściwości mechaniczne oraz wyższy stosunek właściwości mechanicznych do gęstości w porównaniu do nieuzbrojonego materiału osnowy. Materiały takie stosuje m.in. do produkcji tłoków, bębnow hamulcowych czy tarcz hamulcowych. Spośród kompozytów w osnowie metalowej najbardziej popularne są materiały w osnowie wykonanej z aluminium AlMCs (ang. *Aluminium Matrix Composites*). Cechują się dobrym przewodnictwem cieplnym, wysoką wytrzymałością na ścianie oraz tym, że można je obrabiać na konwencjonalnych obrabiarkach. Tego typu materiały z powodzeniem mogą zastąpić żelazo, stopy tytanu, aluminium czy kompozyty z osłoną polimerową. Wykorzystywane są na części, gdzie występują złożone obciążenia jak bloki silników czy tłoki. Nanokompozyty są to materiały, gdzie co najmniej jeden ze składników ma wymiary Nano (10-9 m). W motoryzacji stosuje się kompozyty w osnowie polimerowej. Nanokompozyty w osnowie wykonanej z polimerów odznaczają się m.in.: wysokim modułem sprężystości, dużą wartością wytrzymałości udarowej, dobrą odkształcalnością, wysoką wytrzymałością zmęczeniową, niską gęstością, wysoką odpornością na działanie rozpuszczalników, dobrym przewodnictwem elektrycznym, wysoką odpornością ogniową i stabilnością cieplną. Nanokompozyty mogą być stosowane w motoryzacji jako elementy antystatyczne, np. zbiorniki paliwa oraz elementy układu paliwowego, obudowy filtrów, moduły pomp [8]. Słaba przepuszczalność gazowa również sprawia, że są bardzo dobrym materiałem do produkcji elementów układu paliwowego. Zastosowanie tworzyw, które cechują się przewodnością elektryczną, sprawia, że możliwe jest elektrostatyczne lakierowanie części samochodowych, jak np.: zderzaki, kołpaki, lusterka oraz elementy wyposażenia kabiny. Ford planuje wprowadzić tablice rozdzielcze oraz panele nadwozia wykonane z nanokompozytów. Zabieg ma na celu zwiększenie odporności na zarysowania oraz uszkodzenie powierzchni.

3. Zastosowanie materiałów szklanych w motoryzacji

Materiały szklane w pojazdach samochodowych stanowią istotny element łańcucha bezpieczeństwa. Odpowiednio wykonana i zamontowana szyba sprawia, że zwiększa się odporność nadwozia na naprężenia powstałe przy skręcaniu, jak również poprawia funkcjonowanie poduszek powietrznych w razie kolizji. W motoryzacji stosuje się kilka rodzajów szkła. Największe zastosowanie w motoryzacji znajduje szkło laminowane, z którego produkuje się przednie szyby. Szkło hartowane ze względów bezpieczeństwa montowane jest w szybach bocznych oraz tylnych. Szkło hartowane jest odporniejsze na uderzenia oraz zginanie. Przy mocniejszym uderzeniu jednak rozpada się na małe, lecz nieostre, kawałki, które mają na celu zmniejszyć ryzyko uszkodzeń ciała. Hartowanie szkła polega na nagrzaniu go do temperatury ok. 650 °C i nagłym chłodzeniu. W strukturze pojawiają się naprężenia, które sprawiają, że szyba staje się bardziej wytrzymała, ale i bardziej krucha. Najważniejszą wadą szkła hartowanego jest brak przejrzystości po rozbiciu, dlatego też nie można go stosować do wyrobu szyb przednich. Szkło laminowane jest produkowane poprzez umieszczenie folii wykonanej z poliwinyllobutyli (PVB). Folia jest mocna oraz przezroczysta. Produkcję szyb laminowanych rozpoczyna się od uformowania prostokątnych arkuszy szkła. Kolejny etap polega na obróbce krawędzi oraz na umyciu całego arkusza. Następnie w wewnętrznej części szyby wykonuje się ceramiczny nadruk, który ma na celu płynne przejście między ciemną warstwą przy krawędzi a jej jasną częścią. W kolejnym kroku następuje gięcie materiału. Szkło jest gięte parami – częścią wewnętrzną oraz zewnętrzną. Ponieważ części po zakończeniu procesu gięcia muszą być rozdzielone przed wykonaniem operacji, powierzchnia styku pokrywana jest preparatem rozdzielającym. Po zakończeniu gięcia warstwy są oddzielane i dokładnie myte. Następnie pomiędzy warstwą wewnętrzną oraz zewnętrzną umieszczana jest folia PVB. Folia staje się przezroczysta dopiero po połączeniu, wcześniej jest matowa. Kolejny etap polega na usunięciu pęcherzyków powietrza uwięzionych między folią a szkłem. Proces ten odbywa się przy pomocy metody próżniowej lub mechanicznej. Później szyba jest nagrzewana do ok. 140 °C i dociskana siłą 10–15 kg/cm². Końcowy etap polega na montażu elementów dodatkowych, taki jak: uchwyt lusterka, bolców ustalających ozdobnej ramki itd. Szyby przyciemniane o wysokiej jakości produkowane są poprzez barwienie szkła. Standardowe szyby przyciemniane produkuje się poprzez montowanie barwionych folii PVB. Zaletą tego rodzaju wyrobu jest przejrzystość, nawet po rozbiciu, oraz to, że wszystkie kawałki trzymają się razem. Jest to ważny element bezpieczeństwa, ponieważ po rozbiciu kawałki szkła nie zagrażają zdrowiu osób znajdujących się w pojeździe. Zmieniające się konstrukcje samochodowe mogą sprawić, że szyby boczne oraz tylne również będą wykonywane ze szkła laminowanego. Jest to spowodowane tym, że w nowych konstrukcjach, nawet po deformacji pojazdu, będzie możliwy prosty demontaż drzwi. Przewagą szyb laminowanych jest większy stopień przejrzystości, redukcja dźwięków o wysokiej częstotliwości oraz pochłanianie promieni UV [9]. Szyby w samochodach pełnią również szereg dodatkowych funkcji. Podgrzewana przednia szyba w pojazdach jest standardem. Ogrzewanie szyby odbywa się poprzez przepływ prądu elektrycznego przez umieszczony na wewnętrznej stronie szyby drut wolframowy. W nowoczesnych pojazdach szyba laminowana jest ogrzewana na jej całej powierzchni. Od przedniej szyby wymagana jest idealna przejrzystość, dlatego przewody oporowe mają rozmiar ok. 20 μm i są drukowane na folii PVB. Moc takiego systemu wynosi ok. 2–5 W/dm². System oferuje możliwość odmrożenia szyby oraz usunięcie zapań od wewnątrz. Kolejnym nowoczesnym

rozwiązaniem są anteny umieszczone w szybie. Odpowiadają za pracę radia oraz systemu nawigacyjnego. Antena w pojazdach osobowych powinna być umieszczona na dachu konstrukcji auta, natomiast w autobusach w jego przedniej szybie. Powodem jest umieszczenie jej z dala od silnika, który mógłby emitować zakłócenia w odbiorze. W szymbach laminowanych drukowana jest na folii, natomiast w szymbach hartowanych na jej wewnętrznej stronie. Istotną funkcję, którą muszą spełniać nowoczesne szyby, jest odbijanie promieniowania cieplnego. W pojazdach montowane są coraz większe powierzchnie szklane, przez co wnętrze pojazdu jest narażone na przegrzanie. W szymbach laminowanych, aby zapobiec przegrzaniu, montowana jest podwójna warstwa folii. Szyba, jak i folia, mają za zadanie odbijać promieniowanie ultrafioletowe, przez co następuje zmniejszenie ilości ciepła przedostającego się do wnętrza. Kolejnym rozwiązaniem, które pozwala na zmniejszenie ilości promieniowania przedostającego się do wnętrza pojazdu, jest szyba barwiona na kolor zielony. Szyby są wykonane w taki sposób, aby zmniejszyć ilość ciepła przedostającego się do samochodu o ok. 20%. Mniejsza ilość ciepła w pojeździe sprawia, że można lepiej wykorzystać klimatyzację, a co za tym idzie możliwe jest zmniejszenie zużycia paliwa.

Szyby elektrochromowe to technologia, która pozwala na kontrolę zaciemnienia szyb w pojeździe. Szyba elektrochromowa zbudowana jest z ogniw elektrochemicznych umieszczonych na dwóch taflach szkła, które są oddzielone elektrolitem przewodzącym prąd. Po jednej stronie szyby umieszczona jest folia połączona z drugą stroną elektrodami umożliwiającymi przesył energii. Pod wpływem napięcia nanocząsteczki w foliowej powłoce blokują przepływ fal słonecznych [10]. Jednocześnie szkło okienne pozostaje przezroczyste. Przyciemnienie możemy kontrolować manualnie lub za pomocą czujników. Przyciemnienie może wynosić od 2 do 63%. Oprócz kontroli światła oraz ciepła przedostającego się do pojazdu klient ma kontrolę nad swoją prywatnością. Może przyciemnić szybę do takiego stopnia, aby wnętrze pojazdu stało się niewidoczne dla osób z zewnątrz. Szyby akustyczne sprawiają, że wnętrze pojazdu staje się wyciszone w większym stopniu. Szyby akustyczne w swojej budowie zawierają dodatkową warstwę dźwiękochłonną. Warstwa zewnętrzna jest zbudowana ze zwykłej folii PVB, natomiast warstwa wewnętrzna z miękkiego materiału, który ma za zadanie neutralizację wibracji oraz wyciszenie hałasu. Szyby dźwiękochłonne zatrzymują 20% więcej hałasu niż szyby laminowane bez warstwy dźwiękochłonnej, natomiast zwykłe szyby laminowane są skuteczniejsze o 30% od szyb hartowanych.

4. Analiza doboru materiałów stosowanych w motoryzacji

Dobór odpowiednich materiałów zwiększających bezpieczeństwo oraz odpowiednia konstrukcja pojazdu mają za zadanie zminimalizować ryzyko uszkodzeń ciała podczas kolizji. Podczas projektowania konstrukcji pojazdu projektanci powinni uwzględnić właściwości materiałów stosowanych w poszczególnych strefach pojazdu. Niektóre rejony powinny posiadać zwiększoną odporność na zgniatanie oraz absorbować duże ilości energii. Są to strefy kontrolowanego zgniotu. Prawdopodobnie zaprojektowany pojazd powinien posiadać wytrzymały przedział pasażerski, który podczas kolizji zapobiegnie przedostawaniu się elementów do wnętrza kabiny, jak np. silnik. Jednocześnie siły odczuwalne podczas zderzenia powinny być minimalizowane [11].

Można to osiągnąć poprzez zastosowanie części energochłonnych zarówno z przodu, jak i z tyłu pojazdu. Zadaniem tych części jest pochłanianie energii oraz jej rozpraszanie podczas wypadku [12]. Budowane współcześnie pojazdy spełniają podane założenia.

Szytywne kabiny pasażerskie są wykonywane z materiałów o wzmocnionej wytrzymałości. Granice plastyczności tych materiałów dochodzą do 1 000 MPa. Podczas kolizji kabina jest odkształcona w najmniejszym stopniu. Do produkcji zewnętrznych stref pojazdu są używane materiały o dużo mniejszej granicy plastyczności: 200–500 MPa. Prawdopodobnie wykonane części energochłonne znajdujące się z przodu lub tyłu pojazdu potrafią pochłonąć do 25% energii uderzenia. Wraz ze zgniotem przedniej części pojazdu przyspieszenie ulega obniżeniu i w rejonie klatki pasażera uzyskuje wartości dopuszczalne dla ciała ludzkiego. Elementy, które mają za zadanie przejmować duże ilości energii, muszą być odpowiednio zaprojektowane. Każdy z elementów nadwozia o zróżnicowanej sprężystości, masie i tłumieniu powinien zachowywać się w przewidziany przez projektanta sposób. Materiały stosowane w elementach pochłaniających energię charakteryzują się wysoką wytrzymałością przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej plastyczności. W podane kryteria wpisują się w znacznej mierze stale wysokomanganowe z efektem TWIP oraz TRIP.

Pomimo rozwoju innych materiałów, które mają na celu zmniejszenie ciężaru konstrukcji pojazdu, nie przewiduje się zmniejszenia udziału stali w najbliższych latach. Głównym powodem jest stabilność właściwości mechanicznych oraz chemicznych stali. Stale AHSS pozwalają również na zmniejszenie wymiarów części, przez co możliwe jest zmniejszenie masy pojazdu. Jednym z podstawowych parametrów branych pod uwagę podczas doboru materiałów jest moduł sprężystości wzdłużnej. Określa zdolność ciała do przeciwstawienia się odkształceniu zarówno na ściskanie, jak i rozciąganie. Kolejnym istotnym wskaźnikiem branych pod uwagę podczas doboru materiałów jest wytrzymałość na rozciąganie R_m . Jest to największa wartość siły podczas statycznej próby rozciągania, po której przekroczeniu przekrój ulega zwężeniu. Określa zdolność do przenoszenia obciążeń niszczących. Największe wartości uzyskują kompozyty. Jest to spowodowane wysokimi właściwościami włókien wchodzących w ich skład. Szczególnie wysoką wytrzymałością na rozciąganie charakteryzują się kompozyty, w których składzie znajduje się wzmocnienie z włókien węglowych. Wydłużenie po zerwaniu ilustruje, o ile próbka odkształci się plastycznie, zanim ulegnie zerwaniu. Znaczącą wartość wydłużenia, projektanci wiedzą, czy dany materiał odkształci się plastycznie, czy niemal natychmiast po przekroczeniu krytycznej wartości obciążenia ulegnie zerwaniu. Przepisy dotyczące ograniczeń w emisji dwutlenku węgla przez pojazdy oraz dążenie do zmniejszenia zużycia paliwa w pojazdach sprawiły, że konieczne stało się zmniejszenie masy pojazdu. Obniżenie masy pojazdu o ok. 12 kg sprawia, że emisja dwutlenku węgla zmniejsza się o 1 g/km [13]. Rozwiązaniem tego problemu może być użycie materiałów o mniejszej gęstości. Najlepszymi materiałami do obniżenia masy pojazdu są kompozyty oraz stopy aluminium oraz magnezu. Stopy metali lekkich posiadają dużo mniejszą wytrzymałość. Zwiększenie grubości materiałów może sprawić, że pomimo większych gabarytów zostaną uzyskane właściwości mechaniczne, a masa i tak pozostanie mniejsza. Stal pozostaje najczęściej wykorzystywanym materiałem. Powodem są niższe koszty wytwarzania oraz koszt zakupu materiałów do produkcji. Koszt produkcji stali jest znacznie niższy od np. kosztu produkcji włókna węglowego. Proces technologiczny produkcji włókien jest wysoko energochłonny oraz wymaga zakupu droższej, bardziej skomplikowanej aparatury. Zastąpienie stali zwykłą stalą wysokowytrzymałą nie zwiększa kosztu wytworzenia, natomiast masa wyprodukowanych części może być zmniejszona do 25%. Produkując pojazdy na masową skalę, producenci nie wprowadzają niektórych lżejszych zamienników, ponieważ ich koszty wytworzenia są zbyt

wysokie (np. zastąpienie stali kompozytem). Następuje redukcja masy do 60%, ale koszt wytworzenia zwiększa się kilkukrotnie. W przypadku pojazdów luksusowych producenci nie muszą się ograniczać i mogą stosować lżejsze zamienniki. Zastąpienie niektórych materiałów lżejszymi zamiennikami nie wprowadza dodatkowych kosztów. Wraz z pojawianiem się nowych rozwiązań na rynku udział procentowy materiałów w konstrukcji samochodów zmienia się – udział stali miękkich w produkcji samochodu uległ gwałtownemu obniżeniu, natomiast stale o średniej wytrzymałości nie są już używane. Zwiększył się udział stali o zaawansowanie zwiększonej wytrzymałości AHSS. Na przełomie ostatnich lat można zauważyć wzrost użycia materiałów lekkich na bazie aluminium i magnezu. Stale do wypiekania stały się również bardziej popularne, szczególnie w produkcji poszycia pojazdów.

Podsumowanie

Obecny popyt technologiczny i komercyjny wymusza stosowanie nowoczesnych materiałów w pojazdach, poprawiających komfort i bezpieczeństwo jazdy. Do tego celu szczególnie nadają się stale z efektem TWIP i/lub TRIP. Nowe gatunki posiadają wysoką wytrzymałość przy jednocześnie dobrej plastyczności. Efektem jest możliwość produkcji części o mniejszych gabarytach oraz bardziej skomplikowanych kształtach. Dobra możliwość obróbki sprawia również, że proces technologiczny produkcji części staje się tańszy. Materiały o wyższej wytrzymałości oraz o niższej gęstości pozwalają na produkcję części o mniejszej masie. Pozwala to zmniejszyć masę całkowitą pojazdu. Wpływa to korzystnie na zmniejszenie zużycia paliwa i zmniejszenie poziomu zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery. Materiały kompozytowe z wykorzystaniem włókien lub rurek węglowych posiadają niską masę oraz dobre właściwości wytrzymałościowe. Wykorzystanie tych materiałów nie jest opłacalne ze względu na wysoki koszt zakupu surowców koniecznych do wytworzenia oraz energochłonność procesu produkcyjnego. Stal pozostanie podstawowym materiałem konstrukcyjnym. Jest to spowodowane coraz lepszymi właściwościami nowo opracowanych stali oraz stosunkowo niewielkim kosztem wytworzenia. Stale potrafią absorbować większe ilości energii w porównaniu do innych materiałów. Stal nierdzewna ze względu na wysoki koszt wytworzenia w pojazdach samochodowych będzie stosowana do produkcji części ozdobnych, natomiast w pojazdach, gdzie wymagana jest dłuższa żywotność, np. autobusy, stal nierdzewna nadal będzie stosowana. Materiały ceramiczne, dzięki wysokiej twardości, niskiej gęstości oraz odporności na ściskanie i wysokie temperatury, będą stosowane do produkcji części, które będą pracować w trudnych warunkach, jak np. katalizatory, świece zapłonowe i żarowe oraz tarcze hamulcowe. Udział stali węglowych oraz odlewów żeliwnych stosowanych do produkcji samochodów staje się coraz mniejszy. Jest to spowodowane opracowaniem materiałów o lepszych właściwościach mechanicznych oraz wyższej przewodności cieplnej. Nowoczesne technologie sprawiły, że koszt produkcji nowych materiałów bywa porównywalny do kosztu użycia starszego typu materiałów, dlatego wykorzystanie nowych materiałów może być bardziej opłacalne.

Bibliografia:

1. Senkera J., *Współczesne stale karoseryjne dla przemysłu motoryzacyjnego i wytyczne technologiczne ich zgrzewania*, „Przeгляд Spawalnictwa” 2009, nr 11.
2. Norma PN-EN 10130:2009, Wyroby płaskie walcowane na zimno ze stali niskowęglowych do obróbki plastycznej na zimno.
3. Jabłońska M. B., *Struktura i właściwości austenitycznej stali wysokomanganowej umacnianej wskutek mechanicznego bliźniakowania w procesach deformacji dynamicznej*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2016.
4. Fajkiel A., Białobrzeski A., Dudek P., Reguła T., *Nowoczesne stopy oraz metody odlewania magnezu w zastosowaniach motoryzacyjnych*, „Przeгляд Mechaniczny” 2009, nr 2.
5. Kalinowski M., *Budowa nadwozi samochodowych – kompozyty węglowe* [cz. 3], <https://autokult.pl/28141,budowanadwozi-samochodowych-kompozyty-weglowe-cz-3,all> (dostęp: 14.03.2019).
6. Oczóś E. K., *Kompozyty włókniste – właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa*, „Mechanik” 2008, nr 7.
7. Hebda M., *Zastosowanie energetycznego kryterium wyężeniowego do analizy wytrzymałościowej kompozytów włóknistych*, Biblioteka Cyfrowa Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
8. Królikowski W., Rosłaniec Z., *Nanokompozyty polimerowe*, „Kompozyty” 2004, nr 4 (9).
9. Wielgołaski W., *Szyby w nowoczesnych samochodach*, „Świat Szkła”, nr 7-8/2-11.
10. Ptak K., *Nowe, inteligentne okna elektrochromowe*, <http://www.dominnowacji.pl/nowe-inteligentne-okna-elektrochromowe/> (dostęp: 15.03.2019).
11. Iwanow W. N., Lalin W. A., *Bierne bezpieczeństwo samochodu*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1984.
12. Kaczyński P., Rusiński E., *Ocena wytrzymałości połączeń punktowych w cienkościennych strukturach energochłonnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2014.
13. Rowe J. i in., *Advanced materials in Automotive engineering*, Woodhead Publishing Limited, cop. 2012.

The use of modern materials used in the automotive industry to improve the quality and safety of use of motor vehicles

The article discusses the materials for the production of vehicles that are most often used. The constant basic construction material is constantly, especially with the increased strength of AHSS. Also presented are materials made of light alloys, composite materials made of carbon fibers in a polymer matrix and composites in a metal matrix. The work also describes nanocomposites that are an innovative material that studies are underway all the time. The types of glass used and the possibilities of combining glass with other technologies are also presented. An analysis of the selection of materials for vehicle production was also included, and selected properties of materials most commonly used in the automotive industry were analyzed. The modulus of elasticity, tensile strength, elongation after rupture and density were compared.

Keywords: materials used in the automotive industry, steel, light alloys, composite materials, glass materials.

Autorzy:

dr inż. **Mariusz Niekurzak** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Zarządzania
dr inż. **Ewa Kubińska-Jabcoń** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Zarządzania