

Krzysztof Bryta

## Stopy magnezu dla przemysłu motoryzacyjnego

Ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, głównie CO<sub>2</sub>, jest priorytetem dla krajów OECD oraz nowo uprzemysłowionych, szczególnie w dobie ocieplania się klimatu i nękających świat anomalii pogodowych. W tym celu – ratyfikując założenia Ramowej Konwencji ONZ w sprawie zmian klimatycznych oraz protokół z Kioto – podjęto działania uświadamiające międzynarodową społeczność i zapobiegające zmianom klimatycznym. Nowe ustalenia z Paryża w 2007 roku, zawarte w Czwartym Raporcie Międzyrządowego Zespołu do Spraw Zmian Klimatu (IPCC), wskazują na występowanie globalnej zmiany klimatu, która jest spowodowana przez antropogeniczną emisję gazów cieplarnianych [1].

Okolo 27% emisji dwutlenku węgla w krajach OECD pochodzi z transportu, z czego 80% z sektora transportu drogowego [2]. Uregulowania legislacyjne dotyczące redukcji emisji spalin wymuszają na producentach samochodów działania zmierzające do zmniejszania konsumpcji paliw. Jednym z ważnych rozwiązań, oprócz wzrostu eksploatacji paliw alternatywnych i opływowości pojazdów, jest zmniejszanie masy pojazdów, które prowadzi do znacznego ograniczenia zużycia paliw oraz emisji spalin do atmosfery [3].

Materiałami powszechnie stosowanymi w pojazdach osobowych są stale o dużej wytrzymałości, żeliwa, stopy aluminium, kompozyty oraz polimery. Istotne zmniejszenie masy pojazdów można osiągnąć poprzez substytuowanie obecnie stosowanych materiałów metalicznych lekkimi stopami magnezu, które dotychczas były wykorzystywane w przemyśle motoryzacyjnym w niewielkim stopniu. W najbliższej przyszłości większość producentów samochodów zamierza wprowadzić do pojazdów 40–100 kg komponentów wykonanych ze stopów Mg [3,4].

Stopy magnezu, które w porównaniu do innych stopów metalicznych posiadają największy wskaźnik wytrzymałości do ich ciężaru, były wykorzystywane w przemyśle nuklearnym, zbrojeniowym i lotniczym już podczas I i II wojny światowej.

Ważnym zastosowaniem, z punktu widzenia przemysłu motoryzacyjnego, było ich wykorzystanie w samochodzie osobowym Volkswagen Beetle w latach sześćdziesiątych [5]. Pierwsze felgi ze stopów magnezu zostały odlane przez Fiata w 1967 roku, a 11 lat później przez Alfa Romeo. W 1968 roku Porsche wprowadził 6-cylindrową skrzynię korbową odlaną ze stopu Mg. W późnych latach siedemdziesiątych nastąpiło zahamowanie rozwoju stopów magnezu dla przemysłu motoryzacyjnego na skutek wzrostu osiągnięć pojazdów oraz cen magnezu. Dziś, ze względu na konieczność zmniejszania masy samochodów, wielkie koncerny samochodowe ponownie interesują się tą grupą materiałów.

Zastąpienie tradycyjnych materiałów, z których wytwarzane są komponenty o dużym ciężarze, lekkimi stopami magnezu powoduje zauważalne zmniejszenie masy pojazdów (tabela 1). Z danych wynika, iż użycie 72 kg stopów Mg na części takie, jak blok silnika, skrzynia biegów, miska olejowa, felgi oraz łożo silnika pozwala na redukcję masy o 48,5 kg przy zastąpieniu stali i 19,5 kg przy zastąpieniu aluminium [6]. Zmniejszenie masy pojazdu o 10% powoduje obniżenie zużycia paliwa o około 5% [4], co z kolei w istotny sposób wpływa na zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego.

	Komponenty							
	blok silnika		skrzynia biegów + obudowa sprzęgła	miska olejowa	4 felgi		łożo silnika	
	żeliwo	stop Al	stop Al	stop Al	stal	stop Al	stal	stop Al
Tradycyjne rozwiązanie	32	23,5	21,5 + 5	3	36	23	25	17,5
Zastąpienie stopami Mg	19		15 + 3	2	18	18	15	15
Redukcja masy (kg)	13	4,5	6,6	1	18	5	10	2,5
Redukcja masy (%)	40	19	30	33	50	22,5	40	30

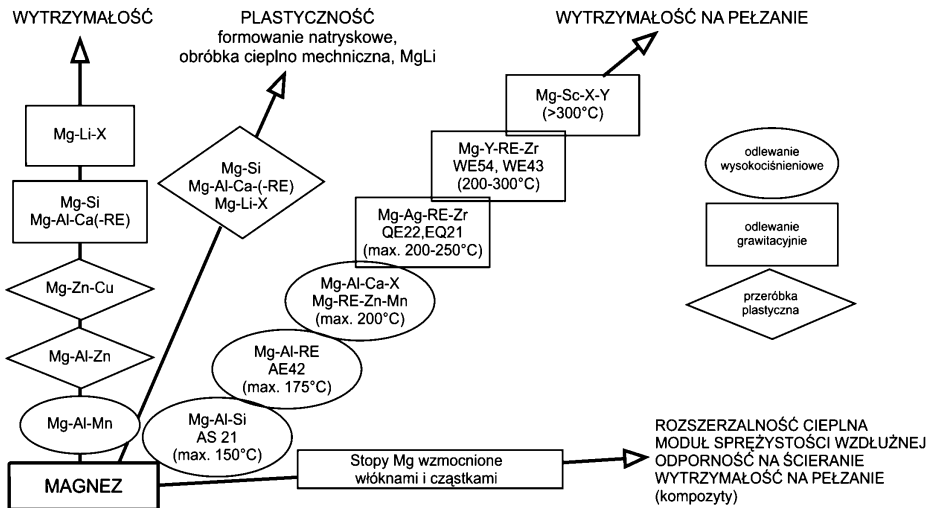
**Tabela 1.** Zmniejszenie masy pojazdów przez zastąpienie tradycyjnych materiałów stopami Mg [6]

W ciągu ostatnich piętnastu lat nastąpił intensywny rozwój stopów Mg, który zaowocował opracowaniem nowych stopów i technologii wytwarzania. Opracowano wiele stopów odlewniczych magnezu o lepszej lejułości oraz podwyższonych właściwościach eksploatacyjnych, których główne grupy przedstawiono w tabeli 2.

Rozwój stopów magnezu o pożądanymi właściwościami, takich jak wysoka wytrzymałość mechaniczna, plastyczność czy odporność na pełzanie, jest zdynamizowany i ukierunkowany w głównej mierze przez przemysł motoryzacyjny. Opracowane stopy magnezu otrzymywane w procesach odlewania oraz przeróbki plastycznej wraz z głównymi kierunkami ich rozwoju, w zależności od pożądanymi właściwościami, przedstawiono na rysunku 1.

Oznaczenia wg ASTM	AZ	AM	AS	AE
Główne skl. stopowe	Al, Zn	Al	Al, Si	pierwiastki ziem rzadkich
Zalety	- dobra wytrzymałość w temperaturze pokojowej - dobra lejniść	- wyższa plastyczność niż stopy typu AZ	- wyższa wytrzymałość i odporność na pękanie dzięki wydzieleniom $Mg_2Si$	- dobra wytrzymałość w podwyższonych temperaturach i odporność na pękanie dzięki wydzieleniom Mg-Re
Wady	- niska wytrzymałość termiczna - niska plastyczność	- ograniczone właściwości w temperaturze pokojowej - ograniczona lejniść	- ograniczona lejniść	- ograniczona lejniść

Tabela 2. Główne grupy stopów magnezu otrzymywanych metodami odlewania wysokociśnieniowego [7]



Rys. 1. Kierunki rozwoju stopów magnezu [7]

Liczba zastosowań stopów magnezu w przemyśle motoryzacyjnym stale się zwiększa. Nad wzrostem ich wykorzystania w pojazdach osobowych pracują światowe grupy badawcze, m.in. Volkswagen Group, BMW, Ford, Opel, Fiat, Volvo, General Motors i Jaguar. Prowadzone są także szeroko zakrojone prace badawcze w ramach światowych projektów.

Obecnie około 14 kg stopów magnezu, głównie stopu odlewniczego AZ91DP (9% wag. Al, 1% wag. Zn), wykorzystano w podzespołach samochodów VW Passat, Audi A4 i A6 jako zamienniki stopów aluminium, zyskując o 20–25% mniejszą masę pojazdów. W vanach Savana i Expres wyprodukowanych przez amerykański General Motors wykorzystano do 26 kg komponentów wytworzonych ze stopów Mg [8]. Przykładem innowacyjnego zastosowania stopów magnezu w modelach 325i i 330i samochodów osobowych koncernu BMW jest płaszcz chłodzący aluminiowe ścianki cylindrów wykonany ze stopu AJ62A (6% wag. Al, 2% Sr) [9]. Kolejnym przykładem jest łożo silnika wykonane ze stopu AE44 (4% wag. Al, 4% RE) w samochodach Corvette Z06. Do innych zastosowań, takich jak tablice rozdzielcze, przewody wlotowe, pokrywy głowic cylindrów, elementy układów kierowniczych, użyto stopów o większej plastyczności AM50A i AM60B (5 i 6% wag. Al, 0,5% wag. Mn).

### Aktualne i potencjalne wykorzystanie stopów magnezu w przemyśle motoryzacyjnym

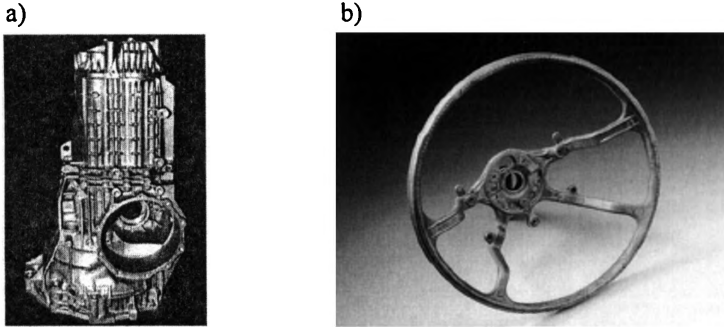
Głównym obszarem zastosowań stopów magnezu jest obecnie układ napędowy i wnętrze samochodu. W tym zakresie stopy Mg są wytwarzane w różnych procesach odlewania: do formy odlewniczej, grawitacyjnego, wysokociśnieniowego, prasowania w stanie ciekłym (ang. *squeeze casting*), w stanie częściowej krystalizacji z wykorzystaniem tiksotropowych właściwości metali (ang. *thixocasting*, *thixomolding*), które stale są udoskonalane [10]. Liczba zastosowań stopów Mg stale rośnie i spodziewane jest ich wykorzystanie również na elementy konstrukcyjne nadwozia i podwozia. Dla tych zastosowań niezbędne jest uzyskanie wysokiej wytrzymałości, odporności na korozję i plastyczności. Osiągnięcie takich właściwości stopów magnezu otrzymanych metodami konwencjonalnymi jest często niemożliwe, dlatego konieczne okazuje się zastosowanie zaawansowanych technik odlewania i przeróbki plastycznej na gorąco (wyciskania, walcowania, kucia). Przeróbka plastyczna stopów Mg nadal stanowi wyzwanie technologiczne, gdyż pierwiastek ten charakteryzuje się małą plastycznością ze względu na heksagonalną strukturę.

Badania wykazują duży wpływ wielkości ziarna na wytrzymałość i plastyczność stopów magnezu. Wysoką plastyczność można uzyskać przy wielkości ziarna mniejszej od 10  $\mu\text{m}$  [11]. Jednymi z efektywnych metod uzyskiwania drobnoziarnistej struktury stopów Mg jest mechaniczne stopowanie [12] i wytwarzanie metodami natryskiwania (ang. *spray forming*) [13]. Obiecującą i stosunkowo nową techniką otrzymywania jednorodnej i drobnoziarnistej (nanokrystalicznej) struktury o wysokiej gęstości dyslokacji jest wyciskanie do kanału kąтового ECAP (ang. *Equal Channel Angular Pressing*) [14].

Nie jest wykluczone, iż w niedalekiej przyszłości wykorzysta się ponad 100 kg stopów magnezu w samochodach osobowych na elementy podwozia i nadwozia [4].

### Stopy Mg na elementy układu napędowego

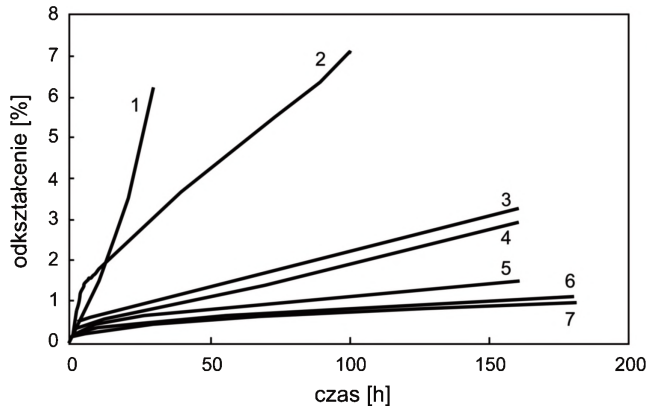
Większość komponentów układu napędowego jest wykonana ze stopu odlewniczego AZ91. Przykładowe elementy odlewane ze stopów Mg używanych w układzie napędowym samochodu osobowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Odlewane podzespoły układu napędowego ze stopów magnezu: a) obudowa skrzyni biegów, b) szkielet kierownicy [5]

Wysokosprawne skrzynie biegów czy też skrzynie korbowe silnika narażone są na działanie podwyższonych temperatur i środowiska korozyjnego, dlatego celem dalszych badań jest rozwój stopów bazujących na układzie Mg–Al(–Zn) o odpowiednich właściwościach:

- wytrzymałości w temperaturze pokojowej i podwyższonej podobnej do stopu AZ91,
- odporności na pełzanie w temperaturze 130–150°C (lepszey niż stop AE42),
- odporności na korozję (zbliżonej do stopu AZ91),
- leżności podobnej do stopu AZ91.



Rys. 3. Krzywe pełzania dla stopów AZ91D (1) i AE42 (2) oraz grupy nowych stopów MRI: MRI-155 (3), MRI-153 (4), MRI-154 (5), MRI-151 (6), MRI-152 (7) w temperaturze 135°C przy naprężeniu 85 MPa [6]

Koncern samochodowy Volkswagen i Magnesium Research Institute opracowały i opatentowały nową grupę stopów magnezu MRI, które posiadają bardzo dobrą wytrzymałość na pełzanie w porównaniu do konwencjonalnych stopów AZ91 i AE42 w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy pokryw skrzyni biegów (rys. 3) [6].

### Stopy Mg na elementy wnętrza

Większość komponentów wnętrza samochodów, takich jak elementy siedzeń, tablice przyrządów, elementy kolumny kierownicy, elementy mocujące poduszki powietrzne, wsporniki pedałów, jest wykonanych ze stopów magnezu AM50A i AM60B, które posiadają dostateczną wytrzymałość i plastyczność oraz dobre właściwości pochłaniania energii. Przykładowe podzespoły wnętrza pojazdów osobowych przedstawiono na rys. 4.

a)



b)



Rys. 4. Odlewane podzespoły wnętrza samochodów osobowych ze stopów Mg: a) obudowa kolumny kierownicy, b) szkielet siedzenia (Jaguar) [15]

W celu zapewnienia odpowiedniego bezpieczeństwa komponentów dąży się do uzyskania stopów magnezu o lepszych właściwościach (wytrzymałości, plastyczności oraz właściwości pochłaniania energii) niż stopy AM50A i AM60B. Innym sposobem uzyskania takich właściwości jest optymalizacja techniki odlewania ciśnieniowego stopów Mg w próżni.

### Stopy Mg na elementy podwozia i nadwozia

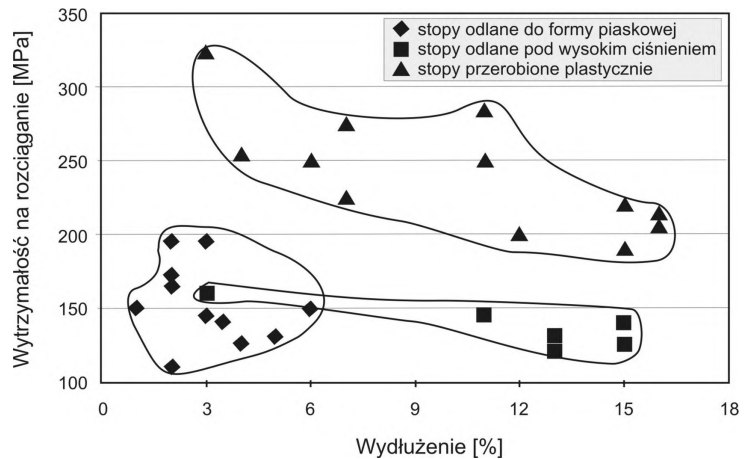
Elementy wchodzące w skład podwozia i nadwozia powinny spełniać wysokie wymagania bezpieczeństwa stawiane pojazdom osobowym. Stopy magnezu mogą znaleźć zastosowanie w takich elementach podwozia, jak felgi kół samochodowych, łoża silników oraz elementy osi przedniej i tylnej. Wśród potencjalnych zastosowań stopów Mg na elementy nadwozia wymienić można odlewane elementy wewnętrzne drzwi i okien dachowych, wsporniki, profile wyciskane i poszycia.

Wykonanie odpowiednich komponentów ze stopów Mg, które spełniałyby wymagania bezpieczeństwa stanowi nadal wyzwanie. Materiały na takie elementy powinny odznaczać się wysoką wytrzymałością, plastycznością i wytrzymałością zmęczeniową w środowisku korozyjnym. Otrzymanie stopów magnezu posiadających

taką kombinację właściwości jest trudne, ponieważ wiąże się z wprowadzaniem wielu składników stopowych wpływających na mikrostrukturę oraz otrzymaniem odpowiedniej charakterystyki warstwy powierzchniowej.

Oprócz opracowywania nowych stopów, dąży się do ulepszenia metod odlewania wysokociśnieniowego, prasowania w stanie ciekłym, odlewania tiksotropowego i reodlewania w celu zmniejszenia porowatości i ilości wtrąceń w stopach.

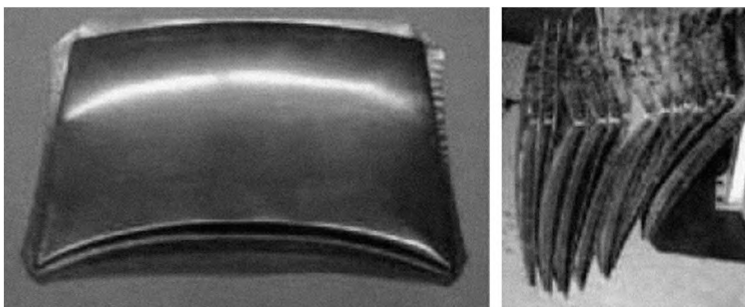
W porównaniu ze stopami odlewanymi, znacznie lepszą wytrzymałość mechaniczną i plastyczność posiadają stopy przerobione plastycznie (rys. 5). Jednak, aby możliwe było zastosowanie tych stopów na elementy podwozia i nadwozia, niezbędny jest dalszy rozwój stopów do przeróbki plastycznej oraz udoskonalenie technologii produkcji.



**Rys. 5.** Wytrzymałość na rozciąganie stopów magnezu otrzymywanych metodami odlewania i przerobionych plastycznie w zależności od wydłużenia [6]

Obecne komponenty ze stopów magnezu przerobione plastycznie, na przykład blachy, nie spełniają wymagań, jakie stawiane są płatom poszycia nadwozia ze względu na ich słabe właściwości mechaniczne, słabą odporność korozyjną i jakość powierzchni [11]. Na rysunku 6 przedstawiono przykład prototypowego elementu karoserii z blachy ze stopu magnezu tłoczony na gorąco, powstałej w ramach współpracy koncernu Volkswagen z niemieckimi ośrodkami przemysłowymi [16].

Elementy wytworzone w procesie wyciskania również posiadają lepsze właściwości mechaniczne od części odlewanych, niemniej jednak profile wyciskane ze stopów Al posiadają lepszą wytrzymałość i plastyczność niż obecnie elementy wyciskane ze stopów Mg. Dlatego rozwój nowych stopów do przeróbki plastycznej, szczególnie wyciskanych, jest ważnym wyzwaniem.



Rys. 6. Prototypowa część karoserii – blacha ze stopu magnezu wytłoczona na gorąco [7]

Inne ważne obszary badań stanowią techniki łączenia, obróbka powierzchniowa oraz powłoki ochronne elementów wykonanych ze stopów magnezu. Obecne prace badawcze skupiają się na udoskonaleniu technik łączenia za pomocą spawania laserowego, spawania metodami MIG/TIG, zgrzewania tarcowego z mieszaniem zgrzeiny (FSW, ang. *friction stir welding*) oraz łączenia mechanicznego za pomocą łączników elementów wykonanych z różnych materiałów [4, 7]. Badania dotyczące powłok ochronnych zapewniających odpowiednią odporność na ścieranie i korozję skupiają się na opracowaniu technologii nanoszenia warstw ochronnych z wykorzystaniem procesów fizycznego nakładania warstw z udziałem plazmy PAPVD (ang. *Plasma-assisted Physical Vapour Deposition*), chemicznego osadzania próżniowego wspomaganego plazmą PECVD (ang. *Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition*), nakładania warstw w procesie zol-żel i procesie PEO (ang. *Plasma Electrolytic Oxidation*) [7].

## Podsumowanie

Zainteresowanie lekkimi materiałami konstrukcyjnymi, jakimi są stopy magnezu, stale rośnie. Odbiorcami stopów magnezu jest m.in. przemysł lotniczy, kosmiczny, medyczny, sportowy, elektroniczny (obudowy telefonów komórkowych i komputerów przenośnych), jednak na głównego odbiorcę wyrasta przemysł motoryzacyjny, który systematycznie zwiększa ilość podzespołów wytwarzanych ze stopów Mg, zmniejszając masę pojazdów, co w istotny sposób wpływa na zmniejszenie zużycia paliw oraz emisji szkodliwych spalin do atmosfery.

Dotychczas najwięcej komponentów ze stopów Mg zastosowano w układzie napędowym i we wnętrzu pojazdów osobowych, które zostały otrzymane w różnych procesach odlewania: do formy odlewniczej, grawitacyjnego, wysokociśnieniowego, tisko- i reodlewania. Natomiast największym wyzwaniem dla ośrodków naukowo-badawczych i koncernów samochodowych jest wykorzystanie stopów magnezu na



podzespoły podwozia i nadwozia, które spełniłyby wymagania bezpieczeństwa stawiane pojazdom osobowym. W tym celu prowadzone są prace badawcze nad opracowaniem nowych stopów odlewniczych i do przeróbki plastycznej, udoskonaleniem zaawansowanych technologii odlewania, ale przede wszystkim wykorzystaniem przeróbki plastycznej (walcowania, kucia, wyciskania), pozwalającej na uzyskanie lepszych właściwości użytkowych.

Inne ważne zagadnienie stanowi konieczność opracowania technologii łączenia elementów ze stopów Mg, również z innymi materiałami oraz opracowanie powłok zapewniających odpowiednią ochronę przed korozją i odporność na ścieranie.

## Bibliografia

- [1] *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, The IPCC Working Group I Fourth Assessment Report Summary for Policymakers, IPCC, 2007, s. 1–21
- [2] *Strategies to reduce greenhouse gas emissions from road transport: analytical methods. Overview*. OECD, 2003
- [3] Cole G., *Magnesium In to the Next Millennium*, International Magnesium Association, Rome 1999, s. 21
- [4] Fridrich H., Schumann S., *Research for a „new age magnesium” in the automotive industry*, Journal of Material Processing Technology 117 (2001) s. 276–281
- [5] Mordike B.L., Ebert T., *Magnesium. Properties – applications – potential*, Materials Science and Engineering A302 (2001) s. 37–45
- [6] Aghion E., Bronfin B., Eliezer D., *The role of the magnesium industry In protecting the environment*, Journal of Materials Processing Technology 117 (2001) s. 381–385
- [7] *MAG TECH I: Magnesium alloys and processing technologies for lightweight transport applications – a mission to Europe*, Report of a DTI Global Watch Mission, 2004
- [8] Zaludova N., *Mg-RE Alloys and their Applications*, WDS’05 Proceedings of Contributed Papers, Part III, 2005, s. 643–648
- [9] Fischersworing-Bunk A., Landerl Ch., Fent A., Wolf J., *The new BMW inline six-cylinder composite Mg/Al crankcase*, IMA, 2005
- [10] Aguilar J., Fehlbier M., Sahm P.R., *SSM processing of magnesium alloys*, Diecasting Times vol. 4, nr 3, 2002, s. 13–14
- [11] Watanabe H., Mukai T., Higashi K., *Scripta Materialia* 40 (1999) s. 447
- [12] Lu L., Lai M.O., Yan C., Ye L., *Nanostructured high strength Mg-5%Al-x%Nd alloys prepared by mechanical alloying*, Rev. Adv. Mater. Sci. 6 (2003) s. 28–32
- [13] Chen C.Y., Tsao C.Y.A., *Spray forming of silicon added AZ91 magnesium alloy and its workability*, Materials Science and Engineering A 2004, vol. 383, s. 21–29
- [14] Kim W.J., An C.W., Kim Y.S., Hong S.I., *Mechanical properties and microstructures of an AZ61 Mg Alloy produced by equal channel angular pressing*, Scripta Materialia 47 (2002) s. 39–44
- [15] *Magnesium Vision 2020: A NORTH AMERICAN AUTOMOTIVE STRATEGIC VISION FOR MAGNESIUM*, A consortium of the United States Council for Automotive Research, 2006

## Magnesium alloys for automotive industry

### Abstract

The automotive industry shows an interest in magnesium alloys due to the necessity to reduce weight of car components, and thereby to improve fuel economy and reduce CO<sub>2</sub> emission.

The aim of this paper is to provide an overview of current and future applications of magnesium alloys in automotive industry. The paper presents actual Mg alloy components produced mainly by various casting processes and indicates the need to increase wrought magnesium components; therefore the current research work is focused on the development of advanced Mg alloys and technologies to produce Mg sheets and extrusions for body and chassis applications.

**Key words:** magnesium alloys, Mg components, automotive industry.