

Stan zagadnienia w zakresie odlewania dużych odlewów strukturalnych ze stopów aluminium

M. Łuszczak^a, R. Dańko^b

^a Nematik Poland Sp. z o.o.

^a Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków

*Kontakt korespondencyjny: e-mail address: Michal.Luszczak@nematik.com

Otrzymano 22.10.2013, zaakceptowano do druku 12.12.2013

Streszczenie

Wobec wprowadzenia coraz bardziej rygorystycznych norm emisji spalin, współczesne samochody muszą cechować się coraz mniejszym spalaniem paliwa. Jedną z możliwości osiągnięcia tego celu jest zmniejszenie całkowitej masy auta, co może być uzyskane poprzez wykorzystanie aluminiowych odlewów strukturalnych, stanowiących odpowiedzialne części zawieszenia, stref zgniotu czy też karoserii samochodów. W artykule przedstawiono zarówno przyczyny, dla których odlewy strukturalne stają się coraz bardziej pożądane przez największych producentów motoryzacji na świecie, jak również aktualny stan zagadnienia na temat ich produkcji w procesie ciśnieniowego odlewania aluminium.

Słowa kluczowe: odlewnictwo ciśnieniowe, maszyny, konstrukcja, stopy aluminium.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach można zaobserwować coraz większy udział odlewów aluminiowych, w szczególności tych wytwarzanych w procesie odlewania ciśnieniowego, w konstrukcji samochodów. Poza tradycyjnymi już elementami jakimi są bloki silnika czy łoża wału korbowego (ang. *bedplate*), aluminium zaczyna wypierać stal także w przypadku części strukturalnych auta (ang. *body in white*).

Trend ten spowodowany jest kilkoma czynnikami. Bez wątpienia głównym jest chęć zmniejszenia masy samochodu, co ma bezpośrednie przełożenie na spalanie oraz emisję spalin. Przykładowo szacuje się, że obniżenie całkowitej masy samochodu o 100 kg spowoduje zmniejszenie zużycia paliwa o około 0,5 l/km co z kolei przyczyni się do obniżenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery o około 8,5 g/km [1]. Dodatkowo duże elementy aluminiowe pozwalają uzyskać spore uproszczenie konstrukcji. Jak

zostanie to dalej przedstawione, w miejsce kilku części stalowych łączonych ze sobą, można zastosować pojedynczy odlew.

Jednocześnie wyższe wymagania stawiane własnościami mechanicznymi odlewów o takich zastosowaniach, które muszą zapewnić bezpieczeństwo osób podróżujących samochodem, wykorzystanie specyficznych technologii łączenia (nitowanie, spawanie), jak i sam ich rozmiar wymusza rozwój zarówno nowych stopów aluminium, jak i szereg zmian w samym procesie odlewania ciśnieniowego.

Kwestie te zostaną omówione dalej wraz z przedstawieniem aktualnego stanu zagadnienia oraz obecnych na rynku przykładów aluminiowych odlewów strukturalnych.

2. Europejskie normy emisji

Chociaż pierwsze normy emisji spalin zostały wprowadzone w Unii Europejskiej już w 1992 w postaci standardu EURO 1, to dopiero chęć wypełnienia postanowień Protokołu z Kioto, który wszedł w życie 16 lutego 2005 r. – trzy miesiące po ratyfikowaniu go przez Rosję 4 listopada 2004 r. – wymusiła wprowadzenie bardziej restrykcyjnych norm emisji spalin w styczniu 2004 – standard Euro 4, we wrześniu 2009 – standard Euro 5 oraz mającej wejść w życie we wrześniu roku 2014 – standard Euro 6 [2].

W praktyce normy te oznaczają, że do roku 2015 średni indywidualny poziom emisji CO₂ w odniesieniu do producenta powinien wynieść 130 g/km. Żeby dobrze zrozumieć ten zapis, należy podkreślić, że limit dla poszczególnych modeli jest zależny od masy samochodu (większe samochody mogą emitować więcej CO₂) oraz że średni poziom emisji dwutlenku węgla jest liczony dla wszystkich modeli znajdujących się w ofercie producenta. Oznacza to, że np. małe samochody o niskiej emisji mogą w pewnym stopniu rekompensować te modele, które przekraczają limity.

Zgodnie z rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) Nr 443/2009 z dnia 23 kwietnia 2009 r. (1) osiągnięcie limitu 130 g/km następuje w kilku etapach począwszy od roku 2012, kiedy to 65% modeli samochodów oferowanych przez producenta musiało spełniać normy, poprzez wymóg osiągnięcia poziomu 75% w 2013, 80% w 2014 i 100% w 2015. Należy również podkreślić, że nowe ustawodawstwo europejskie, w przeciwieństwie do tego z pierwszej dekady XXI w., oprócz systemu zachęt dla producentów samochodów zakłada również surowe kary w przypadku przekroczenia norm. Dla każdego zarejestrowanego na terenie UE samochodu po roku 2012 pierwszy g/km ponad limit będzie ukarany 5€, drugi 25€, trzeci i każdy kolejny 95€. Oznacza to, że np. dla modelu, który będzie miał emisję na poziomie 135 g/km CO₂ producent będzie musiał zapłacić karę 315€ od każdego sprzedanego auta. W tabeli 1 przedstawiono średni indywidualny poziom emisji CO₂ dla poszczególnych producentów samochodów, oraz korespondujące z tym limity w latach 2015 i 2020.

Koncerny samochodowe – szczególnie niemieckie OEMy – chcąc uniknąć płacenia kar muszą zredukować emisję spalin swoich samochodów. W przypadku aut napędzanych silnikami wewnętrznego spalania, zasilanych zarówno olejem napędowym, jak i benzyną, możliwe są dwa rozwiązania: tzw. *downsizing* silników polegający na zmniejszeniu pojemności jednostki napędowej przy jednoczesnym zachowaniu osiąganych mocy lub redukcję masy pojazdu uzyskaną przez zastosowanie nowych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych.

Ta nowa sytuacja prawna stanowi podwaliny tak gwałtownego rozwoju aluminiowych odlewów strukturalnych, jak również stopniowego wzrostu ich zastosowania nie tylko w samochodach wyższych klas (E, F, G), ale także coraz częściej w segmentach D i C.

3. Odlewy strukturalne

Można wymienić kilka powodów, dla których aluminiowe odlewy zaczynają zastępować stalowe elementy prasowane w konstrukcji ramy samochodu. Pierwszym, oczywistym jest różnica w masie. Można przyjąć, że średnia gęstość stali wynosi

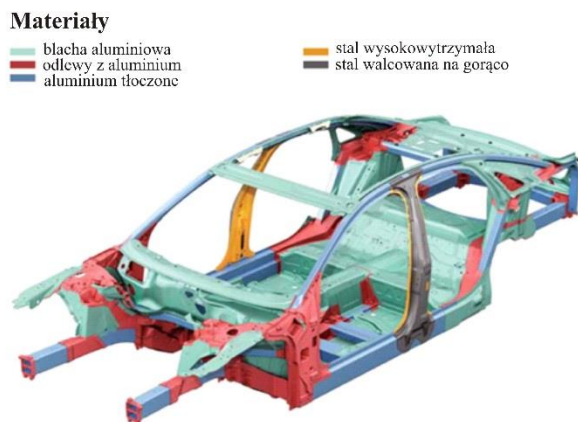
około 7,85 g/cm³ podczas gdy dla aluminium jest to około 2,70 g/cm³. W sytuacji, gdy wobec zmian w przepisach dotyczących emisji spalin każdy kilogram masy samochodu może mieć znaczenie, ta różnica jest znacząca.

Tabela 1 Średnia emisja CO₂ i masa samochodów pasażerskich sprzedawanych w UE w roku 2012 oraz limity emisji obowiązujące w latach 2015 i 2020 [2]

Producent	Masa samochodu	Limit 2012	Limit 2015	Limit 2020
	kg	g/km	g/km	g/km
Daimler	1583	143	140	101
BMW	1563	138	139	100
GM	1445	134	133	96
Volkswagen	1417	133	132	96
Ford	1322	129	128	92
Renault-Nissan	1329	128	128	93
Fiat (z Chryslerem)	1209	124	123	89
Toyota	1325	122	128	92
PSA (Peugeot-Citroen)	1374	122	130	94
Fiat (bez Chylera)	1141	118	119	86

Mniej oczywistym argumentem jest stopień integracji części aluminiowych. Element, który wykonany ze stali, musiał składać się z kilku części otrzymanych metodą tłoczenia, a następnie łączonych ze sobą, może zostać w procesie odlewania ciśnieniowego aluminium wytworzony jak jedna część. Przykładowo słupek boczny (B-pillar) w obecnej generacji Audi A8 wykonany był z 8 elementów i ważył 4180 g. Natomiast analogiczny element w Audi A2 wykonany jako jeden odlew ze stopu aluminium miał masę 2300g. Czyli dla całego samochodu jest to oszczędność 4 kg. Dodatkowo proces produkcji zostaje skrócony o kilka operacji łączenia elementów stalowych [4].

Na rysunku 1 przedstawiono schemat konstrukcji samochodu Audi A8 z roku 2012 z zaznaczeniem kolorem czerwonym odlewów z aluminium wykonanych w technologii ciśnieniowej.



Rys. 1. Materiały i technologie wykorzystane do konstrukcji samochodu na przykładzie 2012 Audi A8 [5]

4. Stopy aluminium do odlewów strukturalnych

Ponieważ odlewy strukturalne stanowią nie tylko elementy konstrukcji ramy samochodu, ale pełnią również rolę elementów bezpieczeństwa muszą spełniać rygorystyczne wymagania dotyczące właściwości mechanicznych. Przykładowo, w przypadku kolizji takie elementy jak podłużnice nie powinny pękać, tylko ulegać deformacji przejmując część energii mechanicznej zderzenia. Stąd wymagane jest dość wysokie wydłużenie – ogólnie można przyjąć, że powyżej 10%. Dodatkowo odlewy strukturalne odgrywają rolę w przenoszeniu obciążeń związanych z użytkowaniem samochodu. Taką funkcję pełni między innymi shock tower, czyli miejsce mocowania amortyzatora do ramy. Przykładowe wartości własności mechanicznych podano w tabeli 2.

Tabela 2. Przykładowe własności mechaniczne odlewów ciśnieniowych

	Wytrzymałość na rozciąganie	Granica sprężystości	Wydłużenie
	[MPa]	[MPa]	[%]
Standardowe odlewy ciśnieniowe	≥ 240	≥ 140	0,5 - 1,5
Odlewy strukturalne zapewniające bezpieczeństwo w przypadku zderzenia	≥ 180	≥ 120 - 150	≥ 10
Odlewy strukturalne odpowiedzialne za przenoszenie obciążeń	≥ 215	≥ 150 - 180	≥ 7

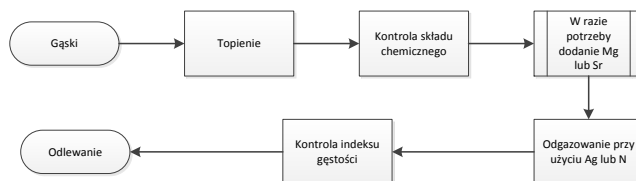
Osiągnięcie takich parametrów wymaga nie tylko zastosowania odpowiedniego stopu aluminium – standardowo używany $AlSi_9Cu_3(Fe)$ nie jest w stanie tego zagwarantować – ale również jego odpowiedniego przygotowania oraz obróbki cieplnej. Przykładowe stopy, stosowane na ciśnieniowe odlewy strukturalne wraz z zawartością wybranych pierwiastków zostały przedstawione w Tabeli 3.

Tabela 3. Przykładowe stopy aluminium wykorzystywane do odlewania ciśnieniowego elementów strukturalnych [3]

Stop	Si	Cu	Fe	Mn	Mg	Zn	Ti
AlSi9MgMn	9,5-11,5	0,03	0,15	0,5-0,8	0,1-0,5	0,07	0,15
AlSi10MnMg	9,0-11,5	0,03	0,2	0,4-0,8	0,1-0,6	0,07	0,15
AlMg5Si2Mn	1,8-2,6	0,03	0,2	0,4-0,8	5,0-6,0	0,03	0,2

W celu zagwarantowania wysokiej jakości odlewu pełny proces obróbki stopu od momentu stopienia do odlewania powinien zawierać również analizę składu chemicznego (takie dodatki jak

np. stront, który może zostać pochłonięty przez każdą czy też magnez, który może się wypalić muszą być kontrolowane i w miarę konieczności dodawane do stopu), odgazowanie metalu przy użyciu argonu lub azotu oraz kontrolę indeksu gęstości. Zostało to zilustrowane na rysunku 2.

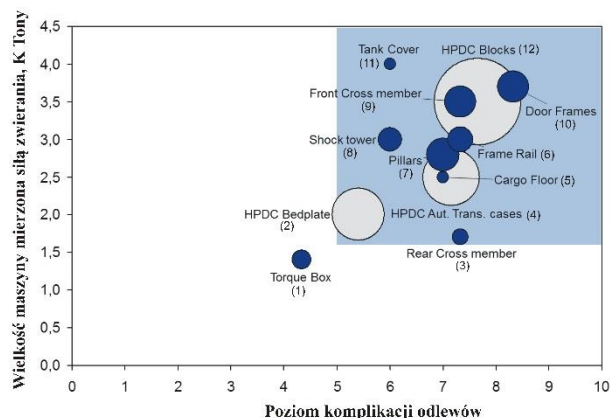


Rys. 2. Przykładowy proces przygotowania stopu

5. Stanowisko odlewania ciśnieniowego

Charakter odlewów strukturalnych stwarza również specyficzne wymagania, tak odnośnie do przygotowania i wyposażenia stanowiska odlewania ciśnieniowego, jak również samej ciśnieniowej maszyny odlewniczej [6] oraz przebiegu procesu odlewania w poszczególnych jego fazach [8-10]. Duży stopień integracji elementów strukturalnych jak i ich rozmiar – słupki B lub też podłużnica tylna mogą mieć długość do 1,5m, z przelewkami i układem wlewowym odlewy te mogą się zamykać w wymiarach gabarytowych wynoszących nawet 2000 x 2000 x 600 mm – powoduje, że konieczne jest użycie największych dostępnych maszyn odlewniczych o sile zwarcia od 3200 T do 4000 T (32 - 40 MN). Choć masa wtrysku nawet w przypadku tak dużych odlewów jest stosunkowo mała – w szczególności jeżeli porównać ją z blokami silnika na przykład o konfiguracji V6, które są odlewane na tego typu maszynach (masa bloku 40 kg, podłużnica tylna masa 20 kg) – to ich cienkościennosc powoduje, że powierzchnia rzutu w płaszczyźnie płyt mocujących formy, a w związku z tym i siła dążąca do otwarcia formy podczas wtrysku jest znaczna.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność wielkości maszyny od stopnia skomplikowania odlewu motoryzacyjnego.



Rys. 3. Zestawienia poziomu komplikacji odlewów oraz siły zwarcia maszyn odlewniczych

Ponieważ odlewy wykonane ze stopu AlSi10MgMn muszą przejść obróbkę cieplną T6 lub T7, aby osiągnąć wymagane właściwości mechaniczne, konieczne jest zapewnienie jak najmniejszego stopnia ich porowatości. W tym celu korzysta się

z zaawansowanych systemów próżniowych, które pozwalają na ewakuację powietrza z wnętrza formy przed wtryskiem. Optymalna wartość ciśnienia w formie przed rozpoczęciem drugiej fazy powinna się zawierać pomiędzy 100 a 200 mbar (0,01 - 0,02 MPa).

Na rynku dostępne są obecnie dwa rozwiązania techniczne, które można zastosować w formach ciśnieniowych w celu uzyskania takich wartości próżni: zawory próżniowe oraz chill blocki. O ile te pierwsze gwarantują znacznie krótszy czas ewakuacji powietrza – co przekłada się na większą swobodę przy doborze profilu wtrysku – to wymagają też znacznie większych nakładów pracy przy konserwacji niż chill blocki. Wybór pomiędzy tymi dwoma metodami powinien być dokonany indywidualnie w zależności od charakteru odlewu oraz doświadczenia i poziomu technicznego odlewni.

Duże znaczenie w procesie odlewania elementów strukturalnych ma także dobór odpowiedniego smaru do formy. Jest to spowodowane zarówno dążeniem do zminimalizowania porowatości, ale również przygotowaniu odlewu do dalszej obróbki. Wielu producentów samochodów maluje elementy strukturalne za pomocą procesu kateforezy. Żeby uniknąć niepożądanych reakcji z pozostałościami po smarze używanym do form, przedstawiają oni listę zatwierdzonych do użycia smarów, które przeszły proces walidacji. Jednocześnie dąży się do zminimalizowania ilości używanego smaru na cykl oraz skrócenia czasu smarowania. Wymaga to zastosowania odpowiednio zaawansowanych głowic smarujących, których kształt jest dobierany do geometrii formy.

6. Wnioski

Podsumowując, proces zastępowania stalowych elementów strukturalnych w ramie samochodu odlewami aluminiowymi, który został zapoczątkowany nowymi regulacjami prawnymi dotyczącymi ochrony środowiska, ulega obecnie przyspieszeniu. Jest to możliwe dzięki znacznemu rozwojowi technik odlewania ciśnieniowego. Ponieważ proces ten jest tańszy i coraz szerzej dostępny, aluminiowe odlewy strukturalne, które do tej pory były

zarezerwowane dla aut klasy premium, zaczynają również być wykorzystywane przy produkcji samochodów klasy średniej.

Literatura

- [1] European Parliament, Council. Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles (Text. Brussel: Official Journal of the European Union, 2009).
- [2] International Council on Clean Transportation. European vehicle market statistics - pocketbook 2013. Berlin: <http://eupocketbook.theicct.org/>, 2013.
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. DIN EN 1706. 2010.
- [4] Bühler AG. Bühler Annual Report 2010. 9240 Uzwil (CH) : BühlerAG, 2010.
- [5] Hirsch Jurgen (2004). Automotive Trends in Aluminium - the European Perspective. Material Forum. 2004, Tom 28.
- [6] Audi. Audi Collision Repair. Audi Collision Frame Technology Guide. [Online] [Zacytowano: 15 11 2013.] http://audicollisionrepair.com/media/CollisionFrame_v9.pdf
- [7] Dańko, J. (2000). Machines and Equipment for High Pressure Die Casting. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków, p. 277.
- [8] Dańko, R. & Stojek J. (2014). *Model testing of the 2nd phase of die casting process. Diffusion and Defect Data – Solid State Data. Part B, Solid State Phenomena*, vol. 208, s. 52–62.
- [9] Dańko, J., Dańko, R. & Lelito, J. (2008). Modelling of flow phenomena in the process of filling the die mould –an application of the Nova Flow Program. *Foundry Engineering*. vol 8, special issue 4, ISSN (1897-3310), pp. 31-36.
- [10] Dańko, J., Dańko, R. & Stojek J. (2008). Cognisable effect of model investigations of die casting processes. *Foundry Engineering*. vol 8, special issue 1/2008, ISSN (1897-3310), pp. 57-62.

The State of Art of Production of Automotive Structural Die Casted Elements

Summary

The paper presents the reasons for structural castings are becoming necessary by major automotive manufacturers in the world, as well as current issues regarding their production by the aluminum die-casting process.