

# INNOWACYJNA TECHNOLOGIA WYTWARZANIA MONOLITYCZNYCH ODLEWÓW OBUDÓW ZESPOŁÓW ENERGETYCZNYCH O PODWYŻSZONYCH PARAMETRACH EKSPLOATACJI

**Lukasz POLOCZEK, Bartłomiej DYBOWSKI, Andrzej KIELBUS, Robert JAROSZ**

**Streszczenie:** Niniejsza publikacja przedstawia wyniki realizacji projektu badawczego, którego głównym celem jest opracowanie a następnie wdrożenie w Zakładzie Metalurgicznym „WSK Rzeszów” technologii wytwarzania monolitycznych odlewów obudów zespołów energetycznych o podwyższonych parametrach eksploatacji. Opracowanie nowej technologii wytwarzania takich odlewów spowodowane jest bezustannym rozwojem przemysłu energetycznego, tym samym producenci elementów układów elektroenergetycznych zmuszeni są do spełniania coraz wyższych wymagań nie tylko konstrukcyjnych, ale także ekonomicznych.

**Słowa kluczowe:** obudowa zespołu energetycznego, monolityczny odlew, stopy aluminium AlSi5Mg,

## 1. Wprowadzenie

Bezustanny rozwój przemysłu energetycznego zmusza producentów elementów układów elektroenergetycznych do spełniania coraz wyższych wymagań nie tylko konstrukcyjnych, ale także ekonomicznych [1, 2]. Jednym z tego typu elementów są wewnętrzne rozdzielnie wysokiego napięcia izolowane gazem SF<sub>6</sub>. Podstawową konstrukcją takiej rozdzielni stanowią korpusy odlewane ze stopów aluminium, których głównym zadaniem jest zapewnienie wymaganej szczelności komór. Korpusy te jednocześnie stanowią nośny element konstrukcyjny, do którego montowane są kolejne elementy całego układu [3, 4].

Ze względu na swój bardzo skomplikowany kształt oraz duże gabaryty, odlewy te wykonywane są przy zastosowaniu metody odlewania grawitacyjnego do form piaskowych. Surowcem do produkcji tego typu odlewów są stopy aluminium AlSi5Mg charakteryzujące się dobrymi właściwościami odlewniczymi. Stopy te charakteryzują się również dobrymi właściwościami mechanicznymi, które uzyskuje się poprzez stosowanie utwardzania wydzieleniowego [5÷7].

Prace prowadzone nad uzyskaniem monolitycznego odlewu o podwyższonych parametrach eksploatacji stosowanych w rozdzielniach wysokiego napięcia bezpośrednio ukierunkowane są na ich zastosowanie w praktyce. Opracowana technologia zostanie wdrożona w Zakładzie Metalurgicznym „WSK Rzeszów”, przyczyniając się tym samym do poprawy jego innowacyjności i konkurencyjności na rynku światowym.

## 2. Grawitacyjne odlewanie aluminium

Pierwszym etapem procesu grawitacyjnego odlewania stopów aluminium jest przygotowanie wsadu, charakteryzującego się odpowiednią jakością pod względem składu chemicznego, czystości, itp. Następnie wsad poddawany jest wstępnemu topieniu. Topienie

wstępne przeprowadza się w piecach gazowych i trwa ~ 2 godzin, aż do osiągnięcia temperatury przelewania do kadzi. Temperatura przelewania do kadzi zależna jest od własności technologicznych stopu (zakres krzepnięcia, lejność, skłonność do segregacji), konstrukcji i wielkości odlewu, materiału formy i zdolności do oprowadzenia ciepła. Po zakończeniu topienia stop przelewany jest z pieca do kadzi. Podczas przelewania czoło strugi posypywane jest oczyszczającym topnikiem. Po przelaniu ponownie posypuje się lustro ciekłego stopu topnikiem. Następnie całość miesza się w obszarze górnym i za pomocą „zgarniaczki” zbiera wytworzony zgar (żużel, kożuchy tlenkowe itp). Kolejnym etapem procesu jest przeprowadzenie wstępnej rafinacji. Wstępnie zrafinowany stop stopniowo przelewa się do pieca odstożnikowego (piec musi być oczyszczony ze zgarów i pozostałości poprzednich wytopów) z zachowaniem jak najmniejszej wysokości strugi. Również podczas procesu przelewania do pieca odstożnikowego struga posypywana jest oczyszczającym topnikiem. Przed przystąpieniem do uszlachetniania ciekłego stopu (rafinacja i modyfikacja), oczyszcza się lustro ciekłego stopu z kożuchów tlenkowych powstałych w procesie przelewania. Rafinacja najczęściej przeprowadzana jest przy zastosowaniu grafitowej lancy, przez którą przepuszcza się gaz (np. argon). Koniec lancy umieszcza się w dolnych obszarach pieca, tak aby pęcherzyki wytworzonego gazu przepływały przez całą objętość ciekłego stopu i tym samym efektywnie oczyszczały stop. Po zakończonym zabiegu rafinacji, lustro ciekłego stopu ponownie oczyszcza się ze zgarów. Następnie przeprowadza się modyfikację stopu poprzez dodanie preparatu modyfikującego. Tak przygotowany stop przelewa się do wcześniej przygotowanych form, zapewniając spokojne wpływanie stopu do wnętrza układu wlewowego, co zapobiega turbulencją, które są powodem zwiększonej ilości zasysanego tlenu z powietrza i tworzenia się wtórnych wtrąceń tlenkowych w odlewach.

### **3. Innowacyjna technologia wytwarzania monolitycznych odlewów**

Ciągle wzrastające wymagania klientów wymuszają zmianę klasycznej technologii wytwarzania monolitycznych odlewów obudów zespołów energetycznych o podwyższonych parametrach eksploatacji. Stąd konieczność opracowania nowej technologii wytwarzania odlewów monolitycznych. Aby tego dokonać wymagane jest opracowanie innowacyjnej w skali Europy technologii odlewania z wykorzystaniem Magma Cast oraz nowatorskiego w skali kraju modułu do symulacji komputerowej „Non Ferrous”. W celu uzyskania odlewów o wymaganych parametrach konieczny jest szczegółowy dobór parametrów i czynności takich jak:

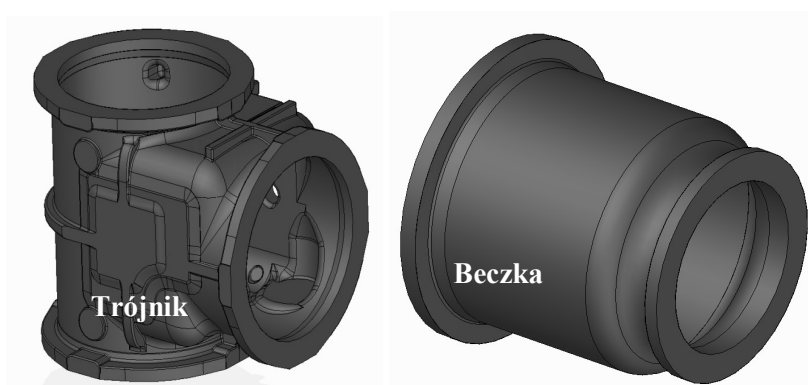
- dobór składu chemicznego stopu (niezbędny jest dobór składu chemicznego stopu AlSi5Mg, zapewniający wymagany poziom właściwości odlewniczych, mechanicznych i elektrycznych. W tym celu konieczne jest dobranie odpowiedniego składu chemicznego stopu pozwalające na określenie wpływu poszczególnych pierwiastków stopowych (Si, Fe, Cu, Mn, Mg, Zn, Ti) oraz modyfikatorów (Sr i Na) na mikrostrukturę i właściwości mechaniczne odlewów),
- dobór parametrów odlewania (zapewnienie wymaganej jakości odlewów korpusów zespołu energetycznego wymaga poprawnego doboru parametrów topienia i zalewania ciekłego stopu. Tym samym konieczne jest zasymulowanie tych parametrów, w celu określenie ich wpływu na mikrostrukturę i porowatość odlewów. Symulacje prowadzone będą w zakresie zmienności wielu parametrów. Odpowiedni dobór zakresu parametrów pozwala na wytypowanie

najkorzystniejszych wariantów składu chemicznego stopów. Konieczne jest również opracowanie doświadczalnych modeli odlewów i form 3D oraz przeprowadzenie symulacji komputerowej przepływu ciekłego metalu we wnętrzu doświadczalnych form odlewniczych oraz symulacji ich krzepnięcia. Następnie niezbędne jest wyznaczenie rozkładu temperatury w odlewie oraz dokonywana jest ocena skłonności do powstawania wad skurczowych w odlewach doświadczalnych),

- ustalenie wpływu czynników strukturalnych na własności mechaniczne i elektryczne stopu z grupy Al-Si (niezbędne jest określenie wpływu poszczególnych składników strukturalnych na właściwości mechaniczne i przewodnictwo elektryczne stopów Al-Si. Aby to zrealizować należy przeprowadzić kompleksową ocenę mikrostruktury, a następnie określić jej wpływ na właściwości odlewnicze, mechaniczne i fizyko-chemiczne),
- dobór parametrów utwardzania wydzieleniowego (konieczne jest zapewnienie wymaganego poziomu twardości i przewodności elektrycznej stopu AlSi5Mg poprzez określenie wpływu poszczególnych parametrów utwardzania wydzieleniowego na mikrostrukturę, w tym głównie na sekwencje wydzielenia faz umacniających podczas starzenia oraz właściwości mechaniczne i przewodnictwo elektryczne stopów. W tym celu należy przeprowadzić analizę wpływu składu chemicznego stopu na temperaturę i rodzaj przemian zachodzących w procesach przesycania i starzenia stopów z zastosowaniem badań kalorymetrycznych i metalograficznych, określić wpływ struktury pierwotnej w ściankach odlewów o zróżnicowanej grubości na właściwości użytkowe odlewów w procesie utwardzania wydzieleniowego oraz doboru parametrów obróbki cieplnej stopów ze względu na właściwości mechaniczne i przewodnictwo elektryczne),
- dobór parametrów technologicznych (konieczny jest taki dobór parametrów, aby zapewniły one uzyskanie wymaganej jakości i spełniały kryteria odbioru odlewów monolitycznych zespołu energetycznego. Po wykonaniu odlewy należy poddać badaniom metrologicznym, fluorescencyjnym, defektoskopowym oraz badaniom szczelności i wytrzymałości postaciowej. Następnie przeprowadza się weryfikujące badania niszczące polegające na: ilościowej ocenie porowatości, jakościowej i ilościowej ocenie faz międzymetalicznych w ściankach odlewów o zróżnicowanej grubości. Następnie, odlewy o wymaganej jakości należy poddać obróbce cieplnej o parametrach zapewniających: wymagany poziom twardości oraz wymagany poziom przewodnictwa elektrycznego),
- opracowanie wytycznych technologicznych oraz kryteriów odbiorowych (aby odlew został wdrożony do produkcji konieczne jest sporządzenie między innymi: rysunku konstrukcyjnego odlewu zespołu energetycznego, warunków technicznych odbioru odlewu, instrukcji wykonania formy odlewniczej, instrukcji przygotowania ochładzalników, instrukcji wykonania masy rdzeniowej i rdzeni, instrukcji przygotowania stopu, instrukcji odlewania, wykazu tolerancji wymiarowych, instrukcji obróbki poodlewniczej elementów, instrukcji obróbki cieplnej odlewów, procedury badań nieniszczących, procedury badania właściwości mechanicznych i elektrycznych, instrukcja BHP, normatyw zużycia stopu. Ponadto konieczne jest również opracowanie i wdrożenie systemu procedur monitorowania i zapewnienia jakości procesów wytwarzania odlewów).

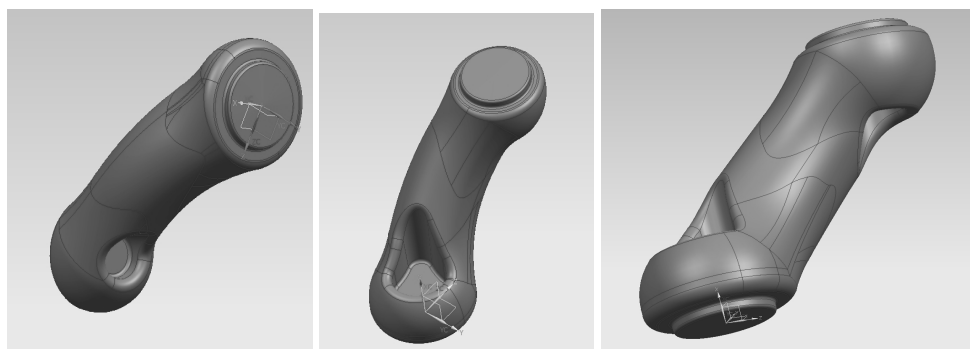
### 3.1. Obecnie wytwarzane obudowy zespołów energetycznych

W chwili obecnej konstrukcja obudowy zespołu energetycznego zbudowana jest z kilku odlewów, które połączone są ze sobą w całość podczas etapu montażu, co zilustrowano na rysunku 1. Sytuacja ta znacznie komplikuje proces, ponieważ powoduje zwiększenie ilości operacji technologicznych koniecznych do wykonania, tym samym zwiększając koszt produkcji.



Rys. 1. Przykładowe odlewy wchodzące w skład zespołów energetycznych

Od korpusów nie jest wymagane zachowanie podwyższonej przewodności elektrycznej, zadanie to przejmują odlewy łączników, montowane wewnątrz obudów. Przykładowo odlewy łączników pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przykładowe odlewy łączników montowanych wewnątrz obudów

Powyższe rozwiązania konstrukcyjne wymuszają przeprowadzenie szeregu następujących czynności dla każdego odlewu wchodzącego w skład całego zespołu:

- wykonania osobnego oprzyrządowania odlewniczego;
- zasymulowania i zweryfikowania parametrów procesu odlewania w warunkach rzeczywistych;
- przeprowadzenia standardowej dwu stopniowej obróbki cieplnej;

- przeprowadzenia obróbki mechanicznej;
- zbadania szczelności helem z automatycznym wydrukiem certyfikatu.

Tym samym po wytworzeniu pojedynczych odlewów niezbędny jest montaż całego zespołu z użyciem połączeń śrubowych oraz z zastosowaniem specjalnych uszczelnień, które wykorzystują odlewane i obrobione pierścienie. Następnie przeprowadzana jest kolejna ocena szczelności całego zespołu. Ze względu na to, iż zespół obudowy charakteryzuje się dużymi gabarytami, powyższe czynniki wpływają na znaczne zużycie materiału, energii oraz wiążą się z dużą pracochłonnością wykonania. Od obecnie wykonywanych odlewów wymagane jest:

- wykonanie ze stopu z grupy Al-Si, o standardowym składzie chemicznym,
- zachowywanie szczelności na ciśnienie robocze gazu SF<sub>6</sub> (po obróbce mechanicznej). Próba szczelności przeprowadza się z użyciem helu. Kryterium szczelności jest maksymalny dopuszczalny spadek ciśnienia gazu < 1x10<sup>-6</sup> mbar x l/s, co przeliczeniowo odpowiada utracie gazu roboczego SF<sub>6</sub> w ilości 0,1 % wagowego na rok pracy urządzenia,
- zachowanie ciśnienia roboczego gazu SF<sub>6</sub> wewnątrz obudowy na poziomie 6,3 bar, co przy uwzględnieniu 5-cio krotnego współczynnika bezpieczeństwa, skutkuje wymaganiem wytrzymałości na rozrywanie ciśnieniem wody w obudowie na poziomie min. 31,5 bar podczas niszczącej próby rozrywającej,
- minimalne właściwości wytrzymałościowe dla tej grupy stopów R<sub>m</sub>=230MPa, R<sub>0,2</sub>=180MPa,
- twardości na poziomie minimum 80HB dla obudów i minimum 60HB dla łączników.

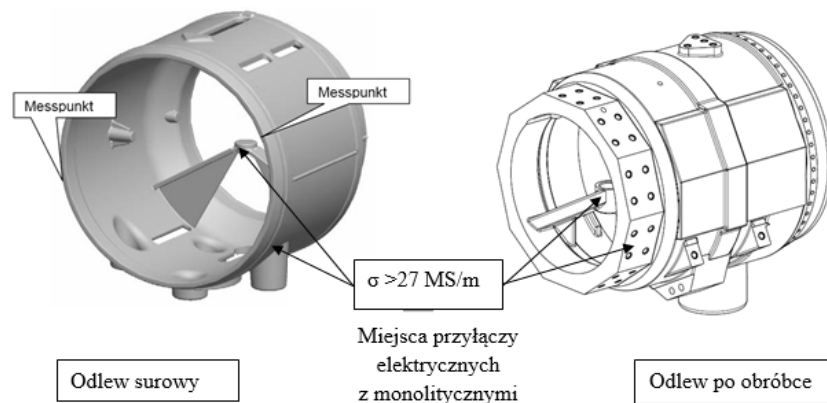
### 3.2. Monolityczne odlewy obudów zespołu energetycznego

Duży nakład pracy i ciągle rosnące wymagania potencjalnych odbiorców wymuszają zastąpienie dotychczas wykonywanej obudowy zespołu energetycznego jednym monolitycznym odlewem korpusu. Przykład takiego monolitycznego odlewu przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przykładowy odlew monolityczny zespołu energetycznego

W tym przypadku trzy komplety wcześniej wykonywanych osobno odlewów trójników i beczek (przedstawionych na rysunku 1) zostały zespolone w jedną integralną konstrukcję, eliminując tym samym odlewy pierścieni stosowane do połączeń kołnierzowych. Dodatkowo funkcję związaną z przewodnictwem elektrycznym, którą do tej pory spełniały łączniki montowane wewnątrz, przejmuje cały zespół obudowy. Przykład takich odlewów przedstawiono na rysunku 4. Na rysunkach zaznaczono również obszary, w których badane jest przewodnictwo elektryczne.



Rys. 4. Przykładowy odlew monolityczny zespołu energetycznego z wymaganiami wysokiego przewodnictwa elektrycznego

Wprowadzone zmiany konstrukcyjne i technologiczne pozwolą na:

- zmniejszenie gabarytów odlewu,
- zmniejszenie ilości odlewów stanowiących cały zespół,
- zwiększenie wymagań stawianych odlewom zespołu energetycznego:
  - odlewy wykonane będą ze stopu z grupy siluminów podeutektycznych o zmodyfikowanym składzie chemicznym;
  - zwiększone zostanie ciśnienie gazu SF<sub>6</sub> wewnątrz zespołu do 6,8 bar, co przy uwzględnieniu 5-cio krotnego współczynnika bezpieczeństwa, skutkuje wzrostem wymagań wytrzymałości na rozrywanie ciśnieniem wody w obudowie do 34 bar,
  - przewodność elektryczna utrzymana będzie na poziomie nie mniejszym niż  $\sigma=27$  MS/m,
  - właściwości wytrzymałościowe zachowane będą na poziomie Rm=220MPa, R<sub>0,2</sub>=170MPa, przy uzyskaniu twardości minimum 70HB.

#### 4. Aspekty ekonomiczne wdrożenia nowej technologii

W przypadku wytworzenia odlewów monolitycznych stosowanych na obudowy zespołów energetycznych o podwyższonych parametrach eksploatacji, modyfikacja konstrukcji elementarnych odlewów w jedną całość i zastosowania w zespołach montażowych wiąże się również z wieloma aspektami ekonomicznymi. Dla odbiorców tego typu odlewów bardzo ważny element stanowi:

- redukcja kosztów tworzenia dokumentacji technologiczno-konstrukcyjnej złożonych projektów montażu zespołów tj. symulacji przepływu wysokich prądów elektrycznych w zespołach łączonych, rysunków części elementarnych, rysunków złożeniowych itp.,
- zmniejszenie kosztów związanych z zamówieniami odlewów elementarnych,
- obniżenie pracochłonności związanej z montażem poszczególnych produktów w zespół,
- znaczne zmniejszenie kosztu lub całkowita eliminacja stosowania dodatkowych materiałów wynikających z konieczności łączenia elementów odlewanych w całość tj. uszczelki, śruby itp.,
- skrócenie czasu kontroli jakości zmontowanego zespołu,
- stworzenie rezerw produkcyjnych i możliwości łatwiejszego planowania produkcji na poszczególnych liniach montażowych,
- zapewnienie pewniejszych przyszłościowych horyzontów planów produkcyjnych,
- skrócenie czasu realizacji zamówień,
- znaczne skrócenie czasu trwania i ułatwienie w przeprowadzaniu przeglądów oraz konserwacji urządzeń,
- skrócenie i uproszczenie napraw związanych z ewentualnymi awariami urządzeń.

Rozpatrując całokształt harmonogramu wdrożeniowego odlewu monolitycznego w stosunku do pojedynczych harmonogramów wdrożeniowych kilku odlewów wynika, że:

- czas tworzenia dokumentacji technologiczno-konstrukcyjnej odlewu monolitycznego jest znacznie krótszy w porównaniu z sumowanym czasem dla kilku odlewów elementarnych,
- w tworzeniu dokumentacji technologiczno-konstrukcyjnej dla jednego detalu jest zaangażowana mniejsza ilość pracowników inżynieryjno-technicznych, niż w przypadku dużej ilości odlewów przypadających na jeden zespół montażowy,
- powyższe rezerwy w zakresie pracowników inżynieryjno-technicznych, można przeznaczyć do innych zadań technologiczno-produkcyjnych,
- czas na wykonanie oprzyrządowania odlewniczego dla odlewu monolitycznego i ilość pracowników bezpośredniej produkcji niezbędna do tych prac jest mniejsza w stosunku do kilku odlewów dla których trzeba wykonać odrębne komplety oprzyrządowania odlewniczego,
- cały proces wdrażania nowego produktu dla odlewu monolitycznego w zakresie zgodności wymiarowej i jakości metalurgicznej w oparciu o warunki techniczne odbioru jest po pierwsze krótszy, a po drugie nie wprowadza dezorganizacji pracy przy planowaniu prób produkcyjnych, jak to jest w przypadku kilku odlewów elementarnych zastąpionych tym odlewem monolitycznym,

Po wdrożeniu do produkcji seryjnej odlewu monolitycznego zyskuje się:

- rezerwy produkcyjne w zakresie wykorzystania maszyn i pracowników bezpośredniej produkcji na wszystkich liniach począwszy od wykonania formy, odlewu poprzez obróbkę poodlewniczą i operacje kontrolne produktu finalnego,
- przejrzyste i łatwiejsze planowanie miesięcznej produkcji
- możliwość tworzenia odległych horyzontów planowania produkcji dla odlewów monolitycznych
- możliwość dokładnej gospodarki materiałami bezpośrednio i pośrednio produkcyjnymi niezbędnymi do wykonania odlewów monolitycznych w zakresie: zamówień, zakupów, magazynowania itp.

- zwolnienie przestrzeni magazynowej oprzyrządowania odlewniczego tj. zamiast kilku kompletów oprzyrządowania odlewniczego dla odlewów wchodzących w skład określonego zespołu, magazynowaniu podlega tylko jeden dla odlewu monolitycznego,
- możliwość łatwiejszego sterowania procesem przeglądu i regeneracji oprzyrządowania odlewniczego,
- skróceniu czasu realizacji zamówień odlewów wchodzących w określony zespół montażowy (zamiast 6 szt. odlewów elementarnych, odlewnia musi wykonać 2 szt. odlewów monolitycznych),

## 5. Podsumowanie

Obecnie w Europie nikt nie produkuje jeszcze tego typu odlewów monolitycznych zespołów energetycznych. Tylko nieliczne odlewnie zachodnie potrafią wykonać odlewy z wymaganiami wysokiego przewodnictwa elektrycznego. Połączenie ze sobą tych funkcji w jednym odlewie stanowić będzie całkowitą innowacją w procesie odlewniczym. Opracowanie i wdrożenie technologii wytwarzania integralnych monolitycznych odlewów obudów zespołów energetycznych o podwyższonych parametrach eksploatacji gwarantuje dla odlewni produkcję na co najmniej 20 lat, przyczyniając się jednocześnie do wzrostu konkurencyjności Zakładu Metalurgicznego „WSK Rzeszów” oraz możliwość rywalizacji o nowe zamówienia z odlewniami zachodnimi.

Zastosowanie monolitycznych odlewów obudów zespołów energetycznych o podwyższonych parametrach eksploatacji w rozdzielniach wysokiego napięcia wiąże się przede wszystkim ze znacznym zmniejszeniem masy, zwiększeniem wymaganego poziomu wytrzymałości oraz z podwyższeniem przewodnictwa elektrycznego tak wykonanych odlewów. Tym samym znacznie zmniejszy się koszt ich wykonania oraz czas tworzenia dokumentacji technologiczno-konstrukcyjnej, co przyczyni się do niemałych oszczędności energii, powstania rezerw produkcyjnych w zakresie wykorzystania maszyn i pracowników oraz przyczyni się do zmniejszenia kosztów eksploatacji. Jednakże, aby wszystkie te warunki zostały spełnione potrzebne jest opracowania innowacyjnej technologii wytwarzania, która stanowić będzie konkurencyjny atut zapewniający wieloletnią współpracę ze światowymi liderami w przemyśle energetycznym, którzy są bardzo zainteresowani takimi rozwiązaniami.

Praca naukowa finansowana ze środków NCBiR z projektu nr PBS2/B5/28/2013

## Literatura

1. Łucki Z., Misiak W., Energetyka a społeczeństwo, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012
2. Zator S., Tomaszewski M., Wybrane zagadnienia gospodarki remontowej energetyki, Wybrane zagadnienia gospodarki remontowej energetyki, Nowa Energia, Racibórz, 2012
3. Markiewicz H.: Instalacje elektryczne, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2009,
4. Musiał E., Instalacje i urządzenia elektroenergetyczne, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, 2014
5. Liu Y.L., Kang S.B., Kim H.W., The complex microstructures in an as-cast Al–Mg–Si alloy, *Materials Letters* 41 (1999) 267–272



6. Rana G., J.E., Zhoua Wang Q.G., Precipitates and tensile fracture mechanism in a sand cast A356 aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology 207 (2008) 46-52
7. Poniewierski Z., Krystalizacja, struktura i właściwości siluminów, WNT Warszawa (1989).

Mgr inż. Łukasz POLOCZEK

Katedra Inżynierii Produkcji

Mgr inż. Bartłomiej DYBOWSKI

Dr hab. inż. Andrzej KIEŁBUS, prof. nzw. w Politechnice Śląskiej

Instytut Nauki o Materiałach

Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii,

Politechnika Śląska,

ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska

Dr Robert JAROSZ

Zakład Metalurgiczny „WSK Rzeszów”

ul. Hetmańska 120, 35-078 Rzeszów, Polska

e-mail: lukasz.poloczek@polsl.pl