

## Integracja analiz numerycznych i badań doświadczalnych w procesie kształtowania lekkiej konstrukcji odlewanej

### Integration of numerical analyses and experimental research in the process of forming light cast structures

Robert Żuczek<sup>1\*</sup> , Stanisław Pysz<sup>1</sup> , Marcin Małysza<sup>1</sup> , Maria Maj<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>ŁUKASIEWICZ – Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Polska

<sup>2</sup>AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Odlewnictwa, Katedra Inżynierii Procesów Odlewniczych, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

<sup>1</sup>ŁUKASIEWICZ Research Network – Foundry Research Institute, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków, Poland

<sup>2</sup>AGH University of Science and Technology, Faculty of Foundry Engineering, Department of Foundry Processes Engineering, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Poland

\*Corresponding author: robert.zuczek@iod.krakow.pl

Received: 30.10.2019. Accepted in revised form: 31.03.2020.

DOI: 10.7356/iod.2019.15

#### Streszczenie

Ewolucja zintegrowanego projektowania procesów i konstrukcji inżynierskich, ze szczególnym uwzględnieniem zaawansowanego modelowania numerycznego i symulacji komputerowych, pozwala znacznie skrócić cykl wdrażania innowacyjnych rozwiązań materiałowych, technologicznych czy użytkowych, mających kluczowe znaczenie w projektach realizowanych w przemyśle lotniczym, energetycznym czy motoryzacyjnym.

Wykorzystanie zintegrowanego procesu projektowania materiałów i konstrukcji (ang. ICME – Integrated Computational Materials Engineering) pozwoliło na określenie najnowszych tendencji stosowania procesu oraz wstępne prześledzenie możliwości integracji metodyki w procesie projektowania ultralekkiej, wysokowytrzymałej konstrukcji odlewanej na przykładzie odlewu dźwigni pedału hamulca. Przeprowadzone badania dotyczyły zagadnień projektowych zmierzających do modyfikacji kształtu konstrukcji odlewanej z wykorzystaniem wzajemnych relacji na drodze badań materiałowych, procesów modelowania oraz prób doświadczalnych.

**Słowa kluczowe:** modelowanie numeryczne, lekka konstrukcja odlewana, stop aluminium

#### Abstract

The evolution of the integrated design of engineering processes and structures, including in particular advanced numerical modelling and computer simulations, has enabled a significant shortening of the implementation cycle of innovative material, technological and utility solutions that are essential in projects pursued in the aviation, power and automotive industries.

The use of Integrated Computational Materials Engineering (ICME) has allowed the determination of the latest trends in the use of the process, and the initial identification of the integration methods in the design process of ultra-light, high-strength cast structures using the example of a brake pedal lever casting. The research concerned design issues aimed at modifying the shape of the cast structure using interrelationships through material testing, modelling processes and experimental tests.

**Keywords:** numerical modelling, light cast structure, aluminium alloy

## 1. Wprowadzenie

Najnowsze tendencje rozwoju gospodarki, oparte o wytyczne Przemysłu 4.0, określają konieczność stosowania wszystkich metod pozwalających na przyspieszenie tempa badań i wdrożeń zaawansowanych materiałów oraz technologii. Zakres potrzeb przemysłu odlewniczego jest dyktowany przez zapotrzebowanie rynku na produkt wykonywany technikami odlewniczymi, wymuszający wprowadzanie konstrukcji lżejszych o zwiększonych parametrach eksploatacyjnych. Dlatego nowoczesne odlewnictwo musi opracowywać nowoczesne, znacznie lepsze stopy oraz innowacyjne technologie wykonywania odlewów, tak aby sam produkt (odlew) mógł sprostać tym wymaganiom. Najistotniejszym elementem w tej grze jest czas, a wszelkie metody przyspieszające tempo odkrywania i wdrażania zaawansowanych materiałów oraz technologii mają decydujące znaczenie. Prace badawcze i doświadczenia weryfikacyjne oparte na metodzie prób i błędów wydłużają czas procesu, a tym samym zmniejszają konkurencyjność. Taki liniowy cykl badań i wdrażania produktu (kolejno następujące po sobie etapy procesu projektowania) gubi istotne cechy, wydłuża czas i podraża koszt wprowadzenia wyrobu do produkcji oraz powoduje powstawanie z pozoru błahych błędów na poszczególnych etapach, których kumulacja na etapie końcowym może prowadzić do fiaska analizowanego projektu.

Obecnie wprowadzenie innowacyjnego produktu musi obejmować problemy będące złożeniem (integracją) wielu wzajemnie powiązanych zjawisk i parametrów, opartych m.in. na wybranych kryteriach projektowania:

- analizę nowej konstrukcji (kryterium minimalnej masy),
- badania materiałowe (kryterium wytrzymałości materiału, wytrzymałości zmęczeniowej, odporności korozyjnej, zastosowania stopów o niskiej gęstości),
- technologię wykonania oraz potrzeby rynku (kryterium minimalnych kosztów produkcji).

Wraz z powstawaniem dokładniejszych modeli numerycznych symulujących przebieg procesów fizykochemicznych w skali mikro i makro, jak również modeli do analiz procesów technologicznych oraz coraz dokładniejszych modeli procesów wyżęniowych, pojawiła się możliwość transferu danych z jednego modelu obliczeniowego do drugiego. Analizy symulacyjne zjawisk typu *multiphysics* (analizy zjawisk sprzężonych) znacznie dokładniej opisują rzeczywisty model i pozwalają uzyskać wiarygodne dane. Duże znaczenie ma modelowanie procesów termodynamicznych zachodzących w skali mikro, albowiem pozwala zrozumieć mechanizm powstawania określonych struktur. Właściwości otrzymane podczas analizy struktury stopu na poziomie

## 1. Introduction

The recent trends in economic development, based on Industry 4.0 guidelines, determine the necessity of using any methods to accelerate the research and implementation of advanced materials and technologies. The scope of needs of the foundry industry is determined by the market demand for products manufactured using casting technologies, which forces the introduction of lighter structures with increased performance. Therefore, the modern foundry industry must develop modern, improved alloys and innovative casting technologies so that the product itself (the casting) can meet these requirements. The most important factor in this game is time, and any methods that accelerate the discovery and implementation of advanced materials and technologies are essential. Research works and verification experience based on trial-and-error extend the duration of the process, which reduces the competitiveness. This linear cycle of research and product implementation (the subsequent stages of the design process) loses important features, extends the duration, and increases the cost of product implementation. It results in seemingly trivial errors at individual stages, of which the accumulation at the final stage could lead to the failure of the analysed project.

At present, the introduction of an innovative product must include problems that integrate multiple inter-related phenomena and parameters, based on e.g. selected design criteria:

- the analysis of a new structure (the criterion of minimum weight),
- material testing (the criteria of material strength, fatigue strength, corrosion resistance, the application of low-density alloys),
- the production technology and market needs (the criterion of minimum production costs).

With the creation of increasingly detailed numerical models to simulate the flow of physical and chemical processes at the micro and macro scales, as well as technological process analysis models and increasingly detailed stress process models, it has become possible to transfer data between computational models. Simulation analyses of multiphysics-type phenomena (analyses of coupled phenomena) provide a significantly more detailed description of the actual model, and enable credible data to be obtained. Modelling thermodynamic processes occurring at the micro scale is highly important, because it enables the formation mechanism of specific structures to be understood. The quantified properties obtained in alloy structure analysis at the micro scale, including e.g. the formation of intermetallic phases, and microporosity, should be input

mikroskali, w tym np. powstawanie faz międzymetalicznych, mikroporowatości, ujęte ilościowo powinny być implementowane do programów, które wykorzystywane są do analizy zjawisk w skali makro, podczas procesu technologicznego oraz eksploatacji analizowanej konstrukcji. Pozwala to na integrację obliczeń w jeden ciąg twórczego projektowania inżynierskiego w powiązaniu ściśle z badaniami naukowymi. Koncepcja zintegrowanego procesu modelowania i projektowania (ICME – *Integrated Computational Materials Engineering*) jest szerokim uzupełnieniem i rozszerzeniem zagadnień zarządzania cyklem życia produktu PLM (*Product Lifecycle Management*) [1].

ICME zdefiniowano jako system integrujący zespół osób (inżynierów, konstruktorów, naukowców, analityków itp.), modele numeryczne, narzędzia obliczeniowe, eksperymenty naukowe, testy, analizy, projektowanie oraz wytwarzanie przez cały okres trwania projektu, a głównym celem jest przyspieszenie opracowywania nowych materiałów lub ich ulepszenie. Pomimo iż nazwa sugeruje skupienie się na materiale, to system dotyczy zależności związanych z opracowaniem nowych materiałów, projektowaniem, wytwarzaniem i eksploatacją, co podkreślono w publikacjach [2,3].

Obecna rola wykorzystania obliczeń numerycznych jest niekwestionowana. Technika i nauka wkracza jednak w erę, w której odrębne programy obliczeniowe i dane eksperymentalne są łączone w pakiety, tworząc zintegrowany zestaw narzędzi pozwalający na szybki wybór, ulepszenie czy też opracowanie nowych materiałów konstrukcyjnych i ich zastosowanie w aplikacjach przemysłowych. Taką potrzebę dostrzeżono między innymi w badaniach nad lżejszymi pojazdami, w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym, zbrojeniowym [2,3,4,5,6]. Stwierdzono, że barierą dla szybszego wdrożenia nowych materiałów w nowoczesnych konstrukcjach jest dotychczas stosowany liniowy cykl badań i wdrażania produktu. System taki angażuje doświadczony zespół na każdym etapie procesu, jednak stwarza minimalne możliwości dialogu i wymiany informacji, w tym przekazywanie istotnych danych dla zespołów projektantów czy konstruktorów. Wiedza z tych badań i zbiorów wyników są rozproszone, a istotny brak sprzężenia myśli inżynierów wprowadza kumulacyjne błędy projektowe. Zintegrowany proces projektowania umożliwia powiązanie badań i uwzględnienie problemów, które pojawiły się w procesie technologicznym wykonywania odlewów, w trybie online.

Celem ogólnym pracy było przedstawienie i przekazanie wiedzy, w jaki sposób wykorzystując zintegrowany system obliczeń numerycznych zmniejszyć koszt badań i skrócić czasu wdrożenia wyników badań w aplikacji przemysłowej. Upowszechnienie wiedzy o projektowaniu zintegrowanym pozwoli dostosować możliwości branży odlewniczej do najnowszych trendów produkcji wysokojakościowych, innowacyjnych konstrukcji odlewanych oraz stosowania najnowszych materiałów metalicznych czy kompozytowych.

into the software to be used to analyse phenomena at the macro scale, during the technological process and operation of the analysed structure. This enables calculations to be integrated into one string of creative engineering design, in close connection with scientific research. The concept of Integrated Computational Materials Engineering (ICME) is a broad addition to and expansion of Product Lifecycle Management (PLM) [1].

ICME is defined as a system that integrates a team of persons (engineers, designers, scientists, analysts etc.), numerical models, calculation tools, scientific experiments, tests, analyses, design and production for the entire duration of the project with the main purpose to accelerate the development of new materials or their improvement. Although the name suggests a focus on the material, the system addresses the relations connected to the development of new materials, design, production and operation, which is emphasised in papers [2,3].

The current role of using numerical calculations is unquestionable. However, technology and science is entering an era in which separate computational software and experimental data are integrated into packages to form an integrated set of tools enabling a quick selection, improvement or development of new structural materials and their use in industrial applications. This need was noticed, among other areas, in research on lighter vehicles, and in the aviation, automotive and armaments industries [2,3,4,5,6]. It was found that the existing linear cycle of research and product implementation was an obstacle to quicker implementation of new materials in modern structures. This system involves experienced teams at each stage of the process, however it provides minimum opportunities for dialogue and information exchange, including the provision of important data to the teams of designers. The knowledge from this research and the collection of results are dispersed, while a significant lack of integration of engineering thoughts introduces cumulative design errors. The integrated design process allows you to link research, and take into account the problems that emerged in the technological process of production of castings in 'online' mode.

The main purpose of the study was to present and provide the knowledge of how the integrated numerical calculations system can be used to reduce the cost of research and shorten the duration of implementation of research results in industrial applications. The spreading of the knowledge of integrated design will enable the capabilities of the foundry industry to be adjusted to the recent trends in the production of high quality, innovative casting structures, and the application of the latest metallic and composite materials.

The use of the integrated design process economy will be essential for the broadly understood return recycling. In the analysis of the casting process economy, the possibility of using recycled materials, in particular



Szczególne znaczenie wykorzystania ekonomiki procesu zintegrowanego projektowania będzie miało w aspekcie szeroko rozumianego recyklingu zwrotnego. Analizując ekonomię procesu odlewniczego, możliwość wykorzystania surowców wtórnych, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym czy budowy maszyn, ma kluczowe znaczenie dla wzajemnej współpracy dostawców oraz odlewni w odzysku metalu i opracowaniu nowoczesnych materiałów wykorzystujących powszechny złom obiegowy.

Celem szczegółowym pracy było opracowanie metody realizacji pełnego procesu projektowania zintegrowanego, bazującego na możliwościach numerycznych badań materiałowych stopu, opracowania konstrukcji zoptymalizowanej pod kątem właściwości użytkowych i obniżenia masy, doboru technologii oraz sposobu wykonania nowoczesnej, ultralekkiej, wysokowytrzymałej konstrukcji dźwigni pedału hamulca, ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania jej w lekkich pojazdach o napędzie alternatywnym.

## 2. Metodyka badań i analiza wyników

Opracowanie i analiza kształtu konstrukcji odlewu jest zawsze krokiem najtrudniejszym i szczególnym wyzwaniem przy optymalizacji jego geometrii. Należy wygenerować kształt najkorzystniejszy z punktu widzenia wykonania w zakładanej technologii odlewania, a jednocześnie najbardziej zbliżony do propozycji optymalnej konstrukcji i spełnienia stawianych wymagań w założeniach projektowych.

Zastosowanie nowoczesnych systemów obliczeniowych pozwala znacznie skrócić czas potrzebny na poszukiwanie optimum zakładanych funkcji celu, uwzględniających m.in. zależności pomiędzy sztywnością elementu skończonego a jego umiejscowieniem w ramach dyskretyzowanego obszaru roboczego. Analiza optymalizacyjna, prowadzona na zasadzie wielokrotnych iteracji, sprowadza się do usuwania elementów skończonych z obszarów analizowanego kontinuum, dla których sztywność nie przekracza wartości granicznej, czego efektem jest uzyskanie topologii modelu konstrukcji o najkorzystniejszym obrysie dla zadanej funkcji celu. Rozważając różnego rodzaju tworzywa, wyznaczenie naprężenia zredukowanego powinno opierać się o różne hipotezy wytrzymałościowe. Ma to szczególne znaczenie w przypadku analizy grup stopów odlewniczych o szerokim spektrum właściwości mechanicznych, zależnych od składu chemicznego czy zastosowanej obróbki cieplnej, adekwatnych do zakładanych parametrów eksploatacyjnych projektowanej konstrukcji. Model eliminacji zbędnych elementów z siatki dyskretyzowanego modelu MES, dla przykładowego modelu wspornika, przedstawiony został na [rysunku 1](#).

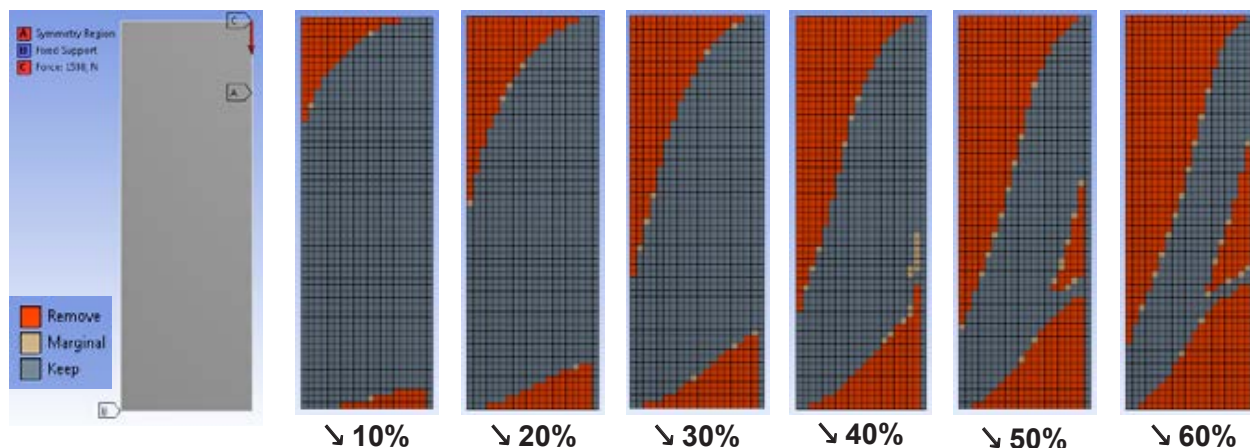
in the automotive industry and mechanical engineering, is crucial to the mutual cooperation of suppliers and foundries in the recovery of metal, and the development of new materials using the generally available circulating scrap.

The specific purpose of this study was to develop the method of completion of a full integrated design process, based on the numerical capabilities of alloy material testing, the development of structures optimised for performance and reduced weight, the selection of the technology and the method of producing a modern, ultra-light brake pedal lever structure, including in particular its use in light vehicles with an alternative drive.

## 2. Methodology of research and results analysis

The development and analysis of the casting structure shape is always the most difficult step and a special challenge in the optimisation of its geometry. The purpose is to generate the optimum shape from the perspective of production in the assumed casting technology, while keeping it as close as possible to the optimum design proposal and meeting the requirements of the design basis.

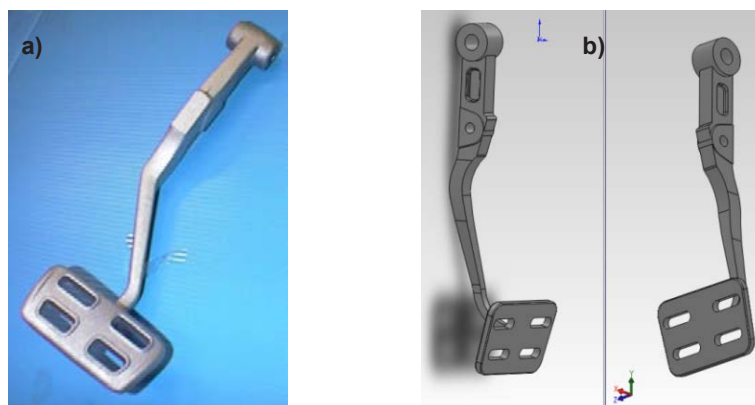
The application of new computational systems enables a significant reduction of the time necessary to find the optimum of the assumed objective functions, including the relation between the rigidity of the finished piece and its position within a discretised operating area. The optimisation analysis, conducted based on multiple iterations, is reduced to the removal of finished pieces from the areas of the analysed continuum, in which the rigidity does not exceed the limit value, which results in a structure model topology with the optimum outline for the given objective function. Considering different types of material, the determination of the reduced stress should be based on different stress hypotheses. This is essential for the analysis of casting alloy groups with a wide spectrum of mechanical properties, depending on the chemical composition or applied thermal processing, suitable for the assumed performance of the designed structure. The model of elimination of unnecessary components from the grid of the discretised MES model, for the example bracket model, is shown in [Figure 1](#).



Rys. 1. Optymalizacja kształtu wspornika w funkcji zmniejszenia masy z wykorzystaniem systemu ANSYS  
 Fig. 1. Optimisation of the bracket shape in the function of reduced weight using ANSYS

Ze względu na doświadczenia związane z wykorzystaniem lekkich konstrukcji odlewanych na elementy zawieszenia (konwersja wahacza kutego na odlewany czy wahacza spawanego na odlew o zakładanych strefach funkcjonalnych), jako przykład możliwości wykorzystania zintegrowanego procesu projektowania konstrukcji inżynierskich wytypowano konstrukcję dźwigni pedału hamulca wykonanego ze stopu aluminium o masie około 0,9 kg przedstawioną na rysunku 2a. Opracowana konstrukcja bazuje na powszechnie stosowanym rozwiązaniu w samochodach klasy wyższej lub komercyjnych pojazdach sportowych. Zarówno kształt, jak i wymagania odnośnie niezawodności pozwalają domniemywać o dużym potencjale odnośnie konwersji tej konstrukcji na bardzo lekki odlew stosowany w pojazdach elektrycznych lub lekkich konstrukcjach sportowych, bez utraty oczekiwanych wymagań zarówno jakościowych, jak również wytrzymałościowych. Charakterystyczną cechą omawianej konstrukcji jest nieosiowość części styku z butem oraz strefy otworów mocujących.

Due to the experiences related to the use of light cast structures on suspension components (conversion of forged arm to cast arm or welded arm to a casting with assumed functional sections), a brake pedal lever structure made of aluminium alloy with a weight of approx. 0.9 kg, shown in Figure 2a, was selected as an example of the possible use of integrated design of engineering structures. The developed structure is based on a solution commonly used in high class cars or commercial sports vehicles. Both the shape and reliability requirements support the presumption of high potential for the conversion of this structure to a very light casting used in electric vehicles or light sports structures without compromising the expected quality and strength requirements. A characteristic feature of the discussed structure is the non-axiality of the contact area with the shoe and the mounting opening sections.



Rys. 2. Dźwignia pedału hamulca: a) odlew ze stopu aluminium, b) model 3D na potrzeby analiz numerycznych  
 Fig. 2. Brake pedal lever: a) aluminium alloy casting, b) 3D model for numerical analyses

Proces optymalizacji topologii konstrukcji odlewanej elementów zawieszenia, polegający na opracowaniu nowej konstrukcji lub zastępowający dotychczas stosowane elementy kute czy spawane, pozwala na znacznie większą elastyczność zarówno w doborze tworzywa konstrukcyjnego, jak również w kształtowaniu samej topologii. Oryginalną konstrukcję odlewaną przedstawiono na [rysunku 2a](#), natomiast model 3D dla dalszych analiz przedstawiono na [rysunku 2b](#). Na podstawie tego modelu przygotowano model wykonany z wykorzystaniem techniki szybkiego prototypowania FDM.

## 2.1. Doświadczalne badania stopu Al-Zn-Mg-Cu

Badania materiałowe przeprowadzono w Łukasiewiczu – Instytucie Odlewnictwa na stopie aluminium z grupy Al-Zn-Mg-Cu. Stop ten charakteryzuje się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi, co pozwala na szerokie wykorzystanie jego potencjału jako odlewniczego stopu na wysokowytrzymałe konstrukcje dla przemysłu motoryzacyjnego. Badania wytrzymałościowe analizowanego stopu odlewniczego przeprowadzono na próbkach wyciętych z odlewanej detalu, z wykorzystaniem techniki Pressure Over Vacuum odlewania do form gipsowych. W trakcie realizowanych prac, na podstawie danych literaturowych i badań doświadczalnych wytypowano skład chemiczny stopu, przedstawiony w [tabeli 1](#), pozwalający na uzyskanie najbardziej korzystnych parametrów wytrzymałościowych materiału odlewu dźwigni. Uśredniony skład chemiczny uzyskany z prób odlewania przedstawiony został w [tabeli 1](#).

The topology optimisation process of the cast structure of suspension components, consisting in the preparation of a new structure or the replacement of existing forged or welded components, enables a significantly higher flexibility, both in the selection of the production material and in the shaping of the topology itself. The original cast structure is shown in [Figure 2a](#), while the 3D model for further analyses is shown in [Figure 2b](#). Based on this model, a model was developed using the fast prototyping method, FDM.

## 2.1. Experimental research on the Al-Zn-Mg-Cu alloy

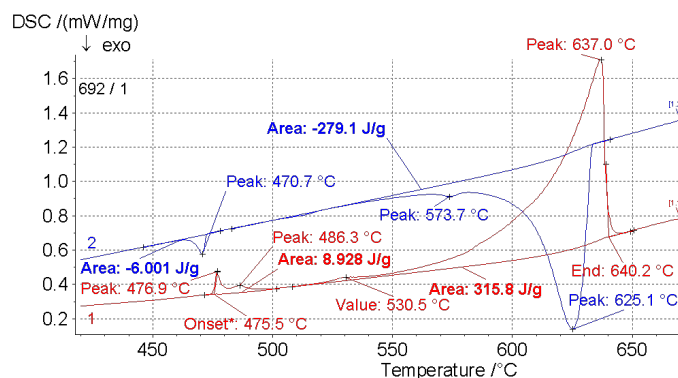
Material testing was conducted in the Łukasiewicz Research Network, the Foundry Research Institute, on a Al-Zn-Mg-Cu group alloy. This alloy is characterised by high strength, which enables wide use of its potential as a casting alloy for high strength structures for the automotive industry. The strength tests of the analysed casting alloy were conducted on samples cut from a cast detail, using the Pressure Over Vacuum technique of casting into gypsum molds. During the works, based on literature data and experimental research, the chemical composition of the alloy was selected, as shown in [Table 1](#), to achieve the optimum strength parameters of the lever casting material. The averaged chemical composition from casting tests is shown in [Table 1](#).

*Tabela 1. Skład chemiczny stopu grupy Al-Zn-Mg-Cu przeznaczony na odlew dźwigni pedału hamulca*  
*Table 1. The chemical composition of the Al-Zn-Mg-Cu group alloy for casting the brake pedal lever*

Skład chemiczny stopu, max. % wagowy									
Chemical composition of the alloy, max. % by weight									
Zn	Mg	Cu	Mn	Zr	Be	Ti	Fe	Si	Al
5,8	1,97	1,53	0,17	0,13	0,14	0,10	0,08	0,06	reszta/ remainder

Ze względu na konieczność zapewnienia pożądanych właściwości wytrzymałościowych próbek ze stopu Al-Zn-Mg-Cu oraz wybranie najkorzystniejszego wariantu obróbki cieplnej wykorzystano metodę różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC – ang. *Differential Scanning Calorimetry*). Uzyskane z prób krzywe nagrzewania i chłodzenia (parametry próby z wykorzystaniem kalorymetru DSC 404C Pegasus®: prędkość ok. 5 K/min, w atmosferze argonu), przedstawione na [rysunku 3](#), pozwoliły określić najbardziej korzystny schemat prowadzonej obróbki cieplnej.

Due to the necessity of providing the desired strength properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy samples, and the selection of the optimum variant of heat treatment, Differential Scanning Calorimetry (DSC) was used. The heating and cooling curves resulting from the tests (parameters of the test using a DSC 404C Pegasus® calorimeter: rate approx. 5 K/min, argon atmosphere), as shown in [Figure 3](#), enabled the optimum thermal processing scheme to be determined.

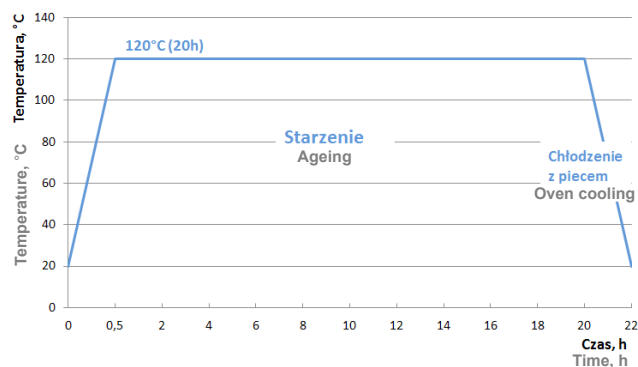
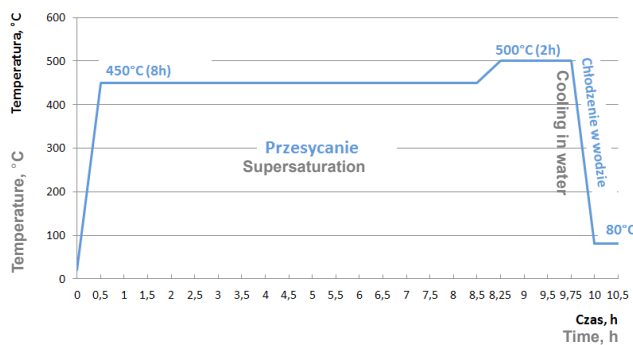


Rys. 3. Krzywe nagrzewania i chłodzenia dla stopu grupy Al-Zn-Mg-Cu  
 Fig. 3. Heating and cooling curves for the Al-Zn-Mg-Cu group alloy

Na podstawie przeprowadzonych badań, uwzględniając określone temperatury przemian, zaproponowano dwuetapowy proces obróbki cieplnej T6. Parametry zmian temperatury w czasie prowadzonych zabiegów obróbki cieplnej przedstawiono na rysunku 4:

Based on research, according to the specific transition temperatures, a two-stage T6 thermal processing process was proposed. The parameters of temperature changes during the thermal processing procedures are shown in Figure 4:

- Przesycanie: wygrzewanie przez 8 h w temperaturze 450°C, następnie przez 2 h w 500°C oraz chłodzenie w wodzie o temperaturze 80°C,
- Starzenie: wygrzewanie przez 20 h w temperaturze 120°C, a następnie chłodzenie z piecem.



Rys. 4. Schematy obróbki cieplnej stopu grupy Al-Zn-Mg-Cu  
 Fig. 4. Thermal processing schemes of the Al-Zn-Mg-Cu group alloy

Przeprowadzone zabiegi obróbki cieplnej, dla zakładanego składu chemicznego stopu aluminium, przeprowadzone na gotowych elementach odlewanych oraz próbkach wyciętych z tych elementów, pozwoliły na wykonanie serii badań wytrzymałościowych w celu określenia podstawowych parametrów na potrzeby wykorzystania w bazie programów symulacyjnych. Statyczne próby rozciągania przeprowadzone na normatywnych próbkach pozwoliły na określenie wytrzymałości stopu grupy Al-Zn-Mg-Cu, a reprezentatywne wyniki przedstawiono w tabeli 2.

The completed heat processing procedures, for the assumed chemical composition of the aluminium alloy, conducted on finished cast components and samples cut from these components, enabled the completion of a series of strength tests to determine the basic parameters for use in the simulation software. Static tensile tests conducted on normative samples enabled the determination of the Al-Zn-Mg-Cu group alloy strength and the representative results are shown in Table 2.



Tabela 2. Średnie wartości wytrzymałości i wydłużenia dla próbek ze stopu grupy Al-Zn-Mg-Cu przeznaczonego na odlew dźwigni pedału hamulca

Table 2. The average strength and elongation for Al-Zn-Mg-Cu group alloy samples for casting the brake pedal lever

Nr próbki Sample No.	Bez obróbki cieplnej Without thermal processing		Po przesycaniu After solutioning		Po przesycaniu i starzeniu After solutioning and ageing	
	$R_m$ , MPa	$A$ , %	$R_m$ , MPa	$A$ , %	$R_m$ , MPa	$A$ , %
1	212	0,39	315	1,17	412	0,71
2	196	0,40	306	2,15	395	0,70
3	157	0,28	290	1,35	405	0,67
4	195	0,30	303	1,70	415	0,65
Średni Average	190	0,34	303,5	1,59	406,8	0,68

Wzrost wytrzymałości materiału osiągnięto poprzez odpowiedni dobór parametrów obróbki cieplnej. Zagwarantowano prawidłowe umocnienie wydzieleniowe analizowanego stopu. Spowodowało to jednak znaczne obniżenie wydłużenia, a więc wzrost kruchości stopu.

Koncepcja wykorzystania zintegrowanego projektowania zakładała implementację właściwości wytrzymałościowych w programie analiz eksploatacyjnych ANSYS. Przygotowano zmodyfikowaną bazę danych właściwości wytrzymałościowych zakładanego, wysokowytrzymałego stopu grupy Al-Zn-Mg-Cu, uzupełniając charakterystyki na podstawie bazy MAGMASoft oraz danych doświadczalnych ze statycznej próby rozciągania. Proces optymalizacji topologii zakładanego kształtu, w celu zmniejszenia masy detalu, przy jednoczesnym zachowaniu oczekiwanych poziomów naprężeń występujących w trakcie obciążania, przeprowadzono przy wykorzystaniu tak zmodyfikowanej bazy danych materiałowych.

## 2.2. Kształtowanie konstrukcji odlewu

Pierwszy etap kształtowania wytrzymałościowego omawianej dźwigni pedału hamulca z wykorzystaniem analiz numerycznych pozwolił na oszacowanie maksymalnego poziomu wyężenia konstrukcji przy zakładanej sile obciążającej równej 150 N, odpowiadającej standardowej sile nacisku dorosłego człowieka. Przyjęta siła odpowiada standardowej sile przyjmowanej w badaniach na hamowni. Zastosowano schemat obciążeń i warunków brzegowych, zakładających oddziaływaniem siłą na całą powierzchnię kontaktową pedału oraz uwzględniając warunki brzegowe w postaci obrotowej podpory osiowej na otworze środkowym oraz utwierdzenia na otworze w tylnej strefie dźwigni. Masa opracowanej konstrukcji wykonanej ze stopu aluminium wynosi około 0,89 kg.

Przeprowadzona analiza numeryczna przy zakładanym obciążeniu zewnętrznym wykazała znaczny zapas

Proper precipitation hardening was achieved by optimal parameters of heat treatment process which allows in increasing of mechanical properties of analyzed alloy. However, this resulted in a significant reduction in elongation, and therefore an increase in the alloy's ductility.

The concept of using integrated design assumed the implementation of strength properties in the ANSYS operation analyses software. A modified database was prepared, with the strength properties of the assumed high-strength Al-Zn-Mg-Cu group alloy, to supplement the characteristics based on the MAGMASoft database and experimental data from static tensile test. The topology optimisation process of the assumed shape, to reduce the detail weight, while maintaining its expected stress levels during loading, was conducted using this modified materials database.

## 2.2. Casting structure shaping

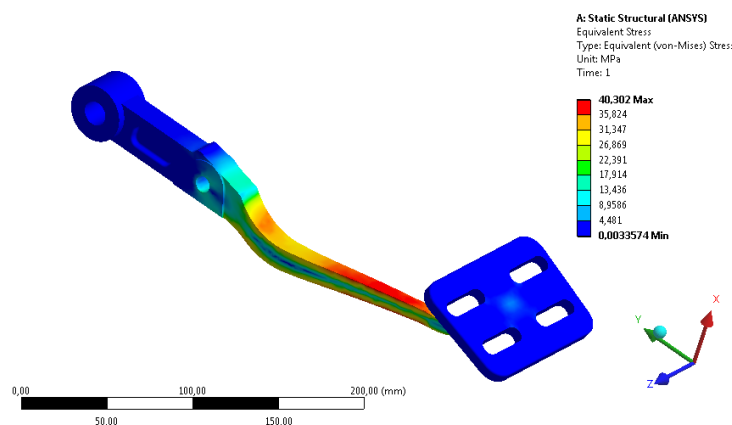
The first stage of strength shaping of the subject brake pedal lever using numerical analyses enabled the maximum structure stress level to be estimated at the assumed loading force of 150 N, corresponding to the standard pressure force of an adult human. The assumed force corresponds to the standard forced assumed in brake stand tests. A loads and boundary conditions scheme was applied, assuming force application to the entire contact area of the pedal and including the boundary conditions such as a rotating axial bracket in the central opening, and fixture to the opening in the rear section of the lever. The weight of the developed aluminium alloy structure is approx. 0.89 kg.

The numerical analysis conducted with the assumed external load showed a significant operation safety margin and the maximum values of reduced stresses determined according to the von Mises hypothesis does not



bezpieczeństwa pracy, a maksymalne wartości występujących naprężeń zredukowanych, oznaczonych zgodnie z hipotezą von Misesa, nie przekraczają wartości 41 MPa i zlokalizowane są w najcieńszej części ramienia. Schemat rozkładu naprężeń zredukowanych w pierwotnym modelu dźwigni przedstawiono na [rysunku 5](#).

exceed 41 MPa and are located in the thinnest part of the arm. The scheme of reduced stress distribution in the original lever model is shown in [Figure 5](#).



Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych w pierwotnym modelu dźwigni pedału hamulca

Fig. 5. Distribution of reduced stresses in the original brake pedal lever model

Już na tym etapie zaobserwowano duży potencjał w kierunku optymalizacji konstrukcji pod kątem obniżenia masy. Zarówno obszar płaski dźwigni, jak i tylna jego strefa nie przenosi znaczących wartości obciążeń i jest zbyt masywna w stosunku do pozostałych stref odlewu.

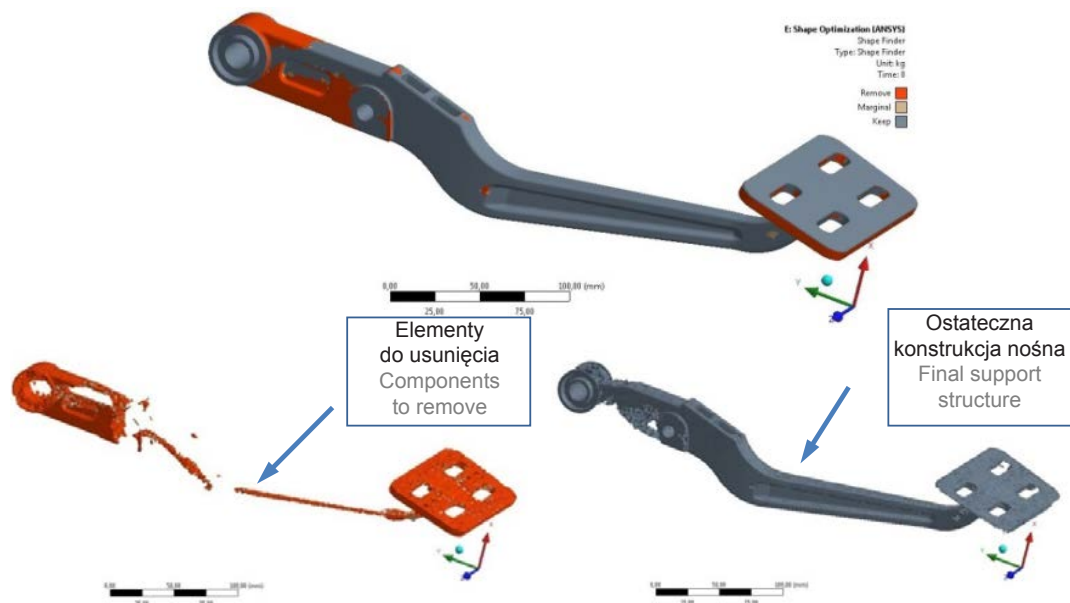
Dotychczasowa optymalizacja konstrukcji odlewu dźwigni zakładała znaczne zwiększenie sztywności elementu, przy jednoczesnym obniżeniu masy. Kolejne etapy optymalizacji topologicznej nie usunęły jednak nadmiaru materiału z najgrubszej, a jednocześnie mniej obciążanej strefy tylnej odlewu dźwigni. Przeprowadzono więc analizę symulacyjną optymalizacji powierzchni odlewu, pozwalając algorytmowi obliczeniowemu usunąć elementy skończone z całego dyskretyzowanego obszaru MES, eliminując elementy o znacznie niższej sztywności, dodatkowo uwzględniając kryterium wytrzymałościowe gwarantujące osiągnięcie przez materiał zakładanego stanu wyężenia. Konstrukcja odlewu wraz z elementami nieprzenoszącymi obciążeń przedstawiona została na [rysunku 6](#).

Zgodnie z wytycznymi z optymalizacji automatycznej ukształtowano konstrukcję odlewu dźwigni. Założono obniżenie masy do wartości około 0,44 kg, co oznacza potencjalnie 50-procentowe obniżenie ciężaru konstrukcji w stosunku do zakładanej konstrukcji oryginalnej. Węzły konstrukcyjne odpowiedzialne na punkty mocowania muszą posiadać odpowiednie wymiary, tak aby nie ingerowały w istniejący łańcuch montażowy dźwigni. Obszary te również zostały poddane procesowi optymalizacji, jednak ingerencja ta była marginalna. Największe

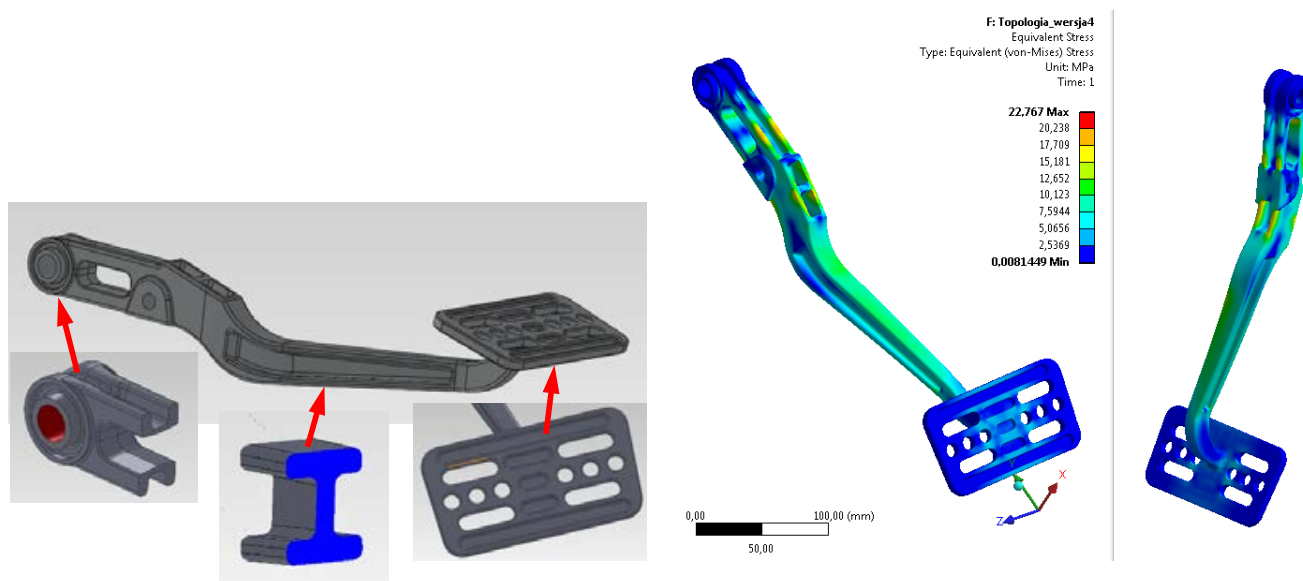
Already at this stage, a high potential was observed for structure optimisation for weight reduction. Both the flat area of the lever and its rear section do not support significant load values, and it is too bulky compared to other cast sections.

The existing optimisation of the lever casting structure assumed a significant increase of rigidity of the component, while reducing its weight. However, the subsequent stages of topological optimisation failed to remove excess material from the thickest and the least loaded rear section of the lever casting. Therefore, a simulation analysis of the optimisation of the casting area was conducted, to enable the computational algorithm to remove finished components from the discretised MES area, while eliminating the components with a significantly lower rigidity and in addition including the criterion of strength, ensuring the achievement of the assumed stress condition by the material. The casting structure with non-support components is shown in [Figure 6](#).

In accordance with the automatic optimisation guidelines, the lever casting structure was shaped. It was assumed that the weight will be reduced to approx. 0.44 kg, which constitutes a potential 50-percent reduction of the structure weight compared to the assumed original structure. The structural nodes responsible for attachment points must have the proper dimensions to avoid interfering with the existing lever mounting chain. These sections are also subject to the optimisation process, but the intervention was marginal. The most significant changes were made to the end bushing, due



Rys. 6. Efekt automatycznej optymalizacji kształtu dźwigni w celu obniżenia masy całkowitej  
 Fig. 6. The result of automatic optimisation of lever shape for reduced total weight



Rys. 7. Ostateczny kształt dźwigni modelowany na podstawie automatycznej optymalizacji topologicznej oraz rozkład pól naprężeń zredukowanych przy tym samym sposobie obciążania  
 Fig. 7. Final shape of the lever modelled based on automatic topological optimisation and distribution of reduced stress areas with the same loading method

zmiany poczyniono w końcowej tulei, ze względu na możliwość usunięcia z tego obszaru największej ilości materiału, jako części struktury nieprzenoszącej obciążenia. Zaproponowana konstrukcja przedstawiona została na rysunku 7.

Działania realizowane w trakcie kształtowania konstrukcji dźwigni pozwoliły zachować pożądaną sztywność przy jednoczesnym obniżeniu maksymalnych

to the possibility of removing the most material from this section, as part of the non-support structure. The proposed structure is shown in Figure 7.

The activities conducted during the shaping of the lever structure enabled the desirable rigidity to be maintained, while lowering the maximum reduced stress values. At a subsequent stage, an additional analysis was conducted to include the critical load increase in

wartości naprężeń zredukowanych. W dalszym etapie przeprowadzona została dodatkowa analiza uwzględniająca przyrost obciążenia krytycznego w przypadku dynamicznego uderzenia w stopę dźwigni dla hamowania awaryjnego. Przyjmuje się, zgodnie z wytycznymi próby badania siły hamowania na hamowni, że siła krytyczna działająca na dźwignię pedału hamulca roboczego dla pojazdu osobowego nie może przekraczać 500 N [7], co przedstawione zostało w tabeli 3.

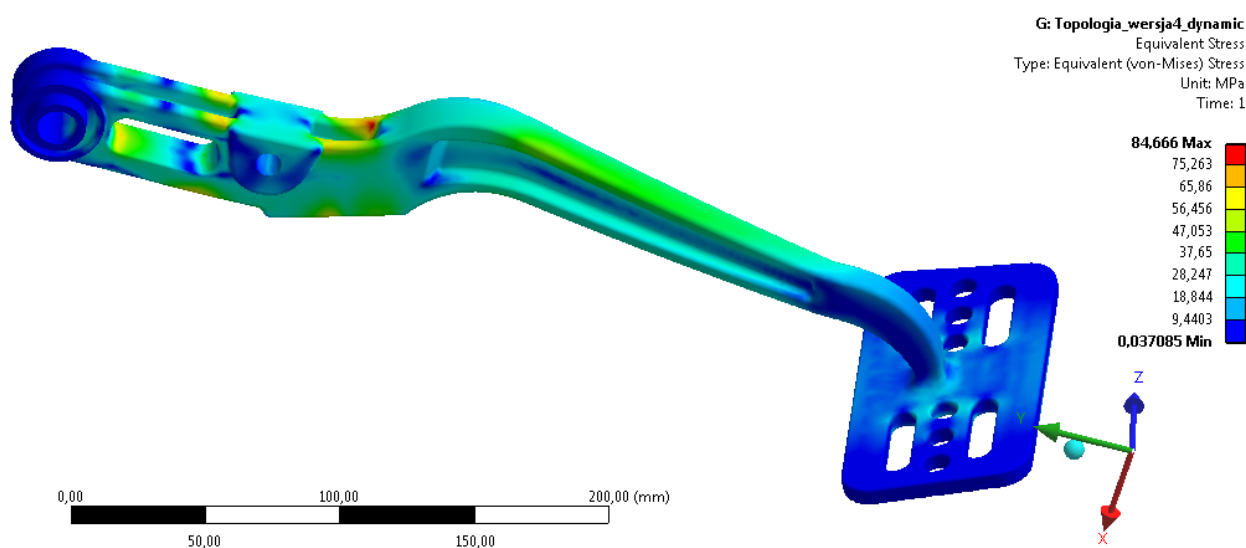
the case of dynamic impact against the lever foot for emergency braking. It is assumed, in accordance with the guidelines for brake stand braking force tests, that the critical force acting on the service brake pedal lever for a passenger vehicle cannot exceed 500 N [7], as shown in Table 3.

Tabela 3. Wytyczne stosowania obciążeń działających na dźwignię pedału hamulca w trakcie prób na hamowni  
Table 3. Guidelines for applying loads on the brake pedal lever during brake stand tests

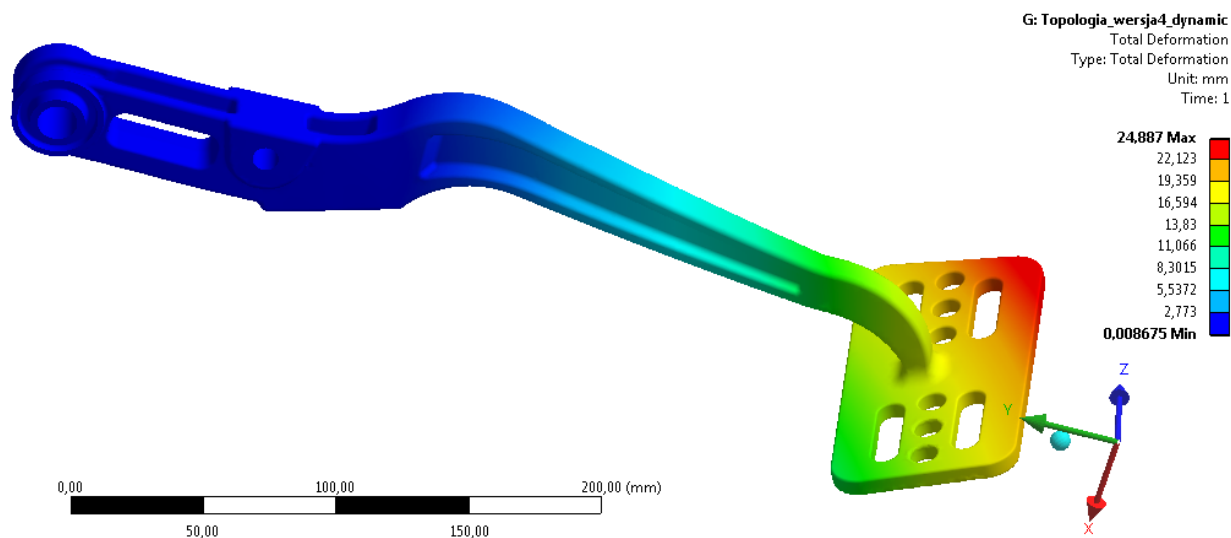
Nr zestawu próbek Sample set No.	Hamulec roboczy, N Service brake, N		Hamulec awaryjny, N Emergency brake, N		Hamulec postojowy, N Parking brake, N	
	nożny foot	ręczny hand	nożny foot	ręczny hand	nożny foot	ręczny hand
Motocykl i motorower Motorcycle and moped	400	400	–	–	–	–
Samochód osobowy Passenger car	500	500	500	400	500	400
Pozostałe Other	700	200	700	600	700	600

Do analiz dynamicznego sposobu obciążania przy krytycznej sile działającej na dźwignię przyjęto więc maksymalną wartość siły wymuszającej. Uzyskane rozkłady oczekiwanych wartości wyężenia konstrukcji dźwigni pozwolą określić newralgiczne miejsca koncentracji naprężeń. Rozkład naprężeń zredukowanych oraz przemieszczeń w odlewie przedstawione zostały odpowiednio na rysunkach 8 i 9.

In the analyses of dynamic loading with critical force applied to the lever, the maximum driving force was assumed. The obtained distributions of expected lever structure stress values will enable the critical stress concentration points to be determined. The distribution of reduced stresses and displacements in the casting are shown in Figure 8 and 9, respectively.



Rys. 8. Rozkład naprężeń zredukowanych przy obciążeniu krytycznym  
Fig. 8. Distribution of reduced stresses at critical load



Rys. 9. Rozkład przemieszczeń uogólnionych przy obciążeniu krytycznym  
 Fig. 9. Distribution of generalised displacements at critical load

### 2.3. Analizy numeryczne procesu odlewania

W analizowanych zagadnieniach zaproponowano stop grupy Al-Zn-Mg-Cu, który pomimo iż nie jest powszechnie stosowanym stopem odlewniczym, wykazuje duży potencjał, zwłaszcza jeśli bierzemy pod uwagę wysokie właściwości wytrzymałościowe. Wskaźniki funkcjonalności materiału brane pod uwagę w trakcie procesu kształtowania konstrukcji i zmniejszenia jej masy są dużo bardziej korzystne niż dla typowych stopów z grupy Al-Si.

### 2.3. Numerical analyses of the casting process

In the analysed problems, an Al-Zn-Mg-Cu group alloy was proposed, which shows high potential despite not being a commonly used casting alloy, in particular considering its high strength properties. The material functionality indicators included in the structure forming and weight reduction process are significantly better than in typical Al-Si group alloys.

a)



b)



Rys. 10. Model technologii odlewania dźwigni pedału hamulca: a) kształt pierwotny, b) model po kształtowaniu topologii konstrukcji

Fig. 10. Model of the brake pedal lever casting technology: a) original shape, b) model after structure topology shaping



Analizy procesu odlewania przeprowadzono z wykorzystaniem systemu do analizy procesu odlewania: Flow 3D. Oszacowano potencjalne nieciągłości w odlewie dźwigni, zarówno w wersji pierwotnej, jak i po optymalizacji topologicznej, przy czym założono możliwość odlewania elementu z wykorzystaniem techniki *Pressure Over Vacuum*. Celem analizy było porównanie sposobu wypełniania wnęki formy modelu pierwotnego oraz konstrukcji po przeprowadzonej optymalizacji topologicznej. Na [rysunku 10](#) przedstawiono dwa zestawy modelowe dla wybranych kształtów dźwigni pedału hamulca.

Symulacja została przeprowadzona dla technologii odlewania *Pressure Over Vacuum* (przy możliwości odlewania w piecu firmy INDUTHERM). Symulacje zostały wykonane przy ciśnieniu w komorze  $p = 300$  Pa i temperaturze formy gipsowej  $T_f = 400^\circ\text{C}$ . Na górnej części układu wlewowego założono warunek brzegowy określający wartość początkowej temperatury zalewania oraz ciśnienie o wartości występującej podczas rzeczywistego procesu wypełniania. Przeprowadzona analiza numeryczna pozwala na wizualizację procesu wypełniania formy przez ciekły stop odlewniczy, określenie prędkości strugi metalu, ciśnienia we wnęce formy, zawirowania czy zamykanie powietrza, zmiany temperatury, jak również oszacowania obszarów powstania wad odlewniczych typu porowatości. Kolejne etapy wypełniania wnęki formy przedstawiono na poniższym [rysunku 11](#), zestawiając zrzuty w kolejnych etapach symulacji.

The analyses of the casting process were conducted using the Flow 3D casting process analysis system. Potential discontinuities in the lever casting were estimated, both in the original version and after topological optimisation, however it was assumed that components can be cast using the Pressure Over Vacuum method. The purpose of the analysis was to compare the mould cavity filling between the original model and the structure after topological optimisation. [Figure 10](#) shows two model sets for the selected shapes of the brake pedal lever.

The simulation was conducted for the Pressure Over Vacuum casting technology (with the possibility of casting in a furnace by INDUTHERM). The simulations were completed with chamber pressure  $p = 300$  Pa and gypsum mould temperature  $T_f = 400^\circ\text{C}$ . In the upper section of the gating system, a boundary condition was assumed to specify the initial casting temperature and pressure during the actual filling process. The conducted numerical analysis enables the process of mould filling with liquid casting alloy to be visualised, determining the metal stream rate, pressure in the mould cavity, swirl or air closing, and temperature change, and the areas of formation of porosity-type casting defects to be estimated. The subsequent stage of mould cavity filling were shown in the following [Figure 11](#), by comparing discharges at the subsequent stages of simulation.



Rys. 11. Etapy wypełniania wnęki formy w trakcie symulacji procesu zalewania

Fig. 11. Stages of mould cavity filling during the casting process simulation

W zaproponowanej koncepcji odlewania nowo opracowanej wersji dźwigni zoptymalizowanej konstrukcyjnie, założony układ wlewowy powoduje, że ciekły metal z wnęki odtwarzającej model, niejako wyprzedza strugę i powoduje przelanie się czoła metalu przez doprowadzenie. Brak dodatkowego doprowadzenia w górnej

In the proposed casting concept of the newly prepared lever version with an optimised structure, the assumed gating system causes the liquid metal from the model reproduction cavity to overtake the stream and cause a metal front overflow in the feed. The lack of additional feed in the upper part of the set in the

części zestawu w wersji po optymalizacji spowodowany jest wybraniem materiału z dźwigni.

Przeprowadzona analiza numeryczna procesu odlewania pozwoliła opracować najkorzystniejszy wariant proponowanej technologii odlewania dla wykonania prototypowego odlewu dźwigni pedału hamulca. W dalszych rozważaniach zakładana jest jednak możliwość wykorzystania odlewania do formy metalowej, ze względu na przewidywaną produkcję seryjną.

### 3. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza możliwości konwersji konstrukcji zaproponowanego odlewu dźwigni pedału hamulca, zwłaszcza pod kątem wykorzystania tak lekkiej konstrukcji w pojazdach elektrycznych, pokazuje, że istnieją duże możliwości zainteresowania tego typu zagadnieniem rodzimych producentów elementów odlewanych. Możliwość tak znacznego (prawie 50%) obniżenia masy w stosunku do konstrukcji pierwotnej daje wymierny efekt ekonomiczny i powinna być szczególnie upowszechniana na rodzimym rynku produkcji odlewów. Szczególny potencjał wykorzystania zaawansowanych systemów obliczeniowych oraz systemów analizy danych materiałowych, w nowoczesnym podejściu zintegrowanego projektowania będzie w kolejnych latach obszarem głównego zainteresowania producentów odlewów, zwłaszcza na potrzeby przemysłu motoryzacyjnego czy energetycznego.

Wykorzystanie opracowanej metodyki w przemyśle odlewniczym powinno zapewnić konkurencyjność rodzimych rozwiązań konstrukcji odlewanych, a zwłaszcza w szeroko rozumianej inżynierii pojazdów elektrycznych, gdzie zminimalizowanie masy elementów składowych ma szczególne znaczenie.

Dalsze prace w zakresie optymalizacji topologicznej analizowanej konstrukcji będą dotyczyły możliwości dostosowania kształtu do zakładanej technologii odlewania. Uwzględniona zostanie również możliwość prowadzenia analiz sprzężonych pozwalający implementować wariacje optymalizacyjne doboru składu stopu odlewniczego w aspekcie oczekiwanych właściwości odlewniczych na potrzeby oprogramowania MAGMASoft oraz analizy implementacji oczekiwanych właściwości mechanicznych konstrukcji odlewanej z programu MAGMASoft jako pola warunków brzegowych w analizach eksploatacyjnych konstrukcji dźwigni pedału hamulca w programie ANSYS.

### Podziękowania

Część prac realizowano w ramach:

- działalności statutowej: „Integracja analizy numerycznej w procesie kształtowania lekkiej konstrukcji

optimised version is caused by material removal from the lever.

The numerical analysis of the casting process enabled the optimum variant of the proposed casting technology to be prepared for producing the prototype brake pedal lever casting. In further analysis, it is assumed that casting to a metal mould could be used, due to the planned serial production.

### 3. Conclusion

The conducted analysis of the possibility to convert the proposed brake pedal lever casting structure, in particular for the use of this light structure in electric vehicles, shows great opportunities for drawing the interest of national casting component manufacturers to this type of question. The possibility of this significant (almost 50%) weight reduction compared to the original structure provides a measurable economic result and should be popularised in particular on the national castings production market. The specific potential for using advanced computational systems and material data analysis systems in the modern integrated design approach will be the main area of interest of the manufacturers of castings, in particular for the automotive and power industries, in the coming years.

Using the developed methods in the foundry industry should ensure the competitiveness of national casting structure solutions, in particular in the broadly understood electric vehicles engineering, in which minimising component weight is essential.

Further works on the topological optimisation of the analysed structure will address the possibility of shape adjustment to the assumed casting technology. In addition, the possibility of conducting coupled analyses will be included, which enable the implementation of optimisation variations to the selection of casting alloy composition in the aspect of expected casting properties for the purposes of the MAGMASoft software and implementation analysis of the expected mechanical properties of the casting structure from the MAGMASoft software as a pool of boundary conditions in the operating analyses of the brake pedal lever structure in ANSYS.

### Acknowledgements

Part of works was completed under:

- statutory activity: 'Integration of numerical analysis in the process of shaping a light casting structure

- |   |   |
|---|---|
| odlewu z wysokowytrzymałych stopów aluminium” (zlec. 8028/00),  | of high strength aluminium alloys’ (in Polish, order No. 8028/00),  |
| – pracy doktorskiej: „Kształtowanie odlewu elementu zawieszenia ze strefami o odmiennych funkcjach celu”. | – doctoral dissertation: ‘Shaping the casting of a suspension component with section with different objective functions’ (in Polish). |

## Literatura/References

1. Committee on Integrated Computational Materials Engineering, National Research Council. 2008. *Integrated Computational Materials Engineering: A Transformational Discipline for Improved Competitiveness and National Security*. Washington, D.C.: National Academies Press.
2. *Integrated Computational Materials Engineering (ICME): Implementing ICME in the Aerospace, Automotive, and Maritime Industries*. 2013. Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society.
3. Committee on Benchmarking the Technology and Application of Lightweighting, National Research Council. 2012. *Application of Lightweighting Technology to Military Aircraft, Vessels, and Vehicles*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
4. Menne R.J., U. Weiss, A. Brohmer, M. Weber, P. Oelling, A. Egner-Walter. 2007. *Implementation of Casting Simulation for Increased Engine Performance and Reduced Development Time and Costs – Selected Examples from FORD R&D Engine Projects*. 28. Internationales Wiener Motorensymposium 2007, VDI-Verlag.
5. Schmitz G.J., U. Prahl. 2012. *Integrative Computational Materials Engineering, Concepts and Applications of a Modular Simulation Platform*. Wiley-VCH.
6. Żuczek R. 2019. *Kształtowanie odlewu elementu zawieszenia ze strefami o odmiennych funkcjach celu*. Rozprawa doktorska. Kraków: Wydział Odlewnictwa AGH.
7. Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej „Zakres i sposób przeprowadzania badań technicznych pojazdów”, Dz.U. 2012 poz. 996, z dn. 26 czerwca 2012 r.



Open Access. This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 (CC BY-SA 3.0).

