

ARCHITECTURE

ARCHITEKTURA

WOJCIECH KOCKI

PhD Eng. Arch.

Lublin University of Technology
Faculty of Civil Engineering and Architecture
Chair of Temporary Architecture
e-mail: w.kocki@pollub.pl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5954-7735>

PAWEŁ OLSZEWSKI

MSc

WSEI University in Lublin
Faculty of Transport and Computer Science
e-mail: pawel.olszewski@wsei.pl
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1015-1190>

FABRICATION IN ARCHITECTURAL PARAMETRIC DESIGN: ISSUES AND OPTIMIZATION POTENTIAL, CASE STUDY OF ARCHITECTURAL DETAIL

FABRYKACJA W ARCHITEKTONICZNYM PROJEKTOWANIU PARAMETRYCZNYM — PROBLEMATYKA I MOŻLIWOŚCI OPTYMALIZACJI STUDIUM PRZYPADKU DETALU ARCHITEKTONICZNEGO

ABSTRACT

Architectural design is constantly developing in terms of quality and digitalization of the design process. Among many advanced methods, such as 2D design in a CAD environment or BIM modelling, there are also digital solutions that allow for the introduction of a code of parameters that define a building's architecture. Such a design environment can be used, among others, in Revit Dynamo or Rhino 3D Grasshopper. This research verifies the planned method of fabrication by using selected numerically controlled equipment. In most examples, the designed elements, due to their complex geometry, are not possible to implement using traditional and commonly used technologies. Architectural elements designed in this way are manufactured using design data and appropriate machines and tools. The research methodology includes specialist software and tools enabling the production of a real, physical element. The main scope of the methodology is software and equipment. At the same time, the implementation of an architectural element would not be possible without the use of appropriate materials and reagents for their processing. The use of CNC technology and CAM data processing enables precise fabrication of designed elements using a process specially prepared for this purpose. The implementation of the detail, from the moment of design as a digital model to a physical model, reveals the positive aspects of the selected methods as well as imperfections resulting from the calibration of devices and selected materials. The research results confirm the validity of the planned fabrication activities, selected equipment, materials and reagents.

Keywords: Parametric design, fabrication, CNC, architectural design, 3D printing, CAM, architectural detail



STRESZCZENIE

Projektowanie architektoniczne stale rozwija się pod względem jakości i cyfryzacji procesu projektowego. Wśród wielu zaawansowanych metod, jak na przykład projektowanie 2D w środowisku CAD lub modelowanie BIM, istnieją również rozwiązania cyfrowe, umożliwiające wprowadzenie kodu parametrów określających architekturę obiektu. Takie środowisko projektowania można wykorzystać m.in. w Revit Dynamo lub Rhino 3D Grasshopper. Celem badań naukowych jest zweryfikowanie zaplanowanego sposobu fabrykacji poprzez wykorzystanie wybranej aparatury sterowanej numerycznie. Wykorzystanie parametryzacji danych dotyczących wymiarów, podziałów, ilości elementów itp. umożliwi dowolną ich modyfikację i wybór najlepszego i najbardziej optymalnego rozwiązania projektowego, zbieżnego z początkową ideą twórcy. W większości przykładów zaprojektowane elementy, ze względu na skomplikowaną geometrię, nie są możliwe w realizacji poprzez tradycyjne i powszechnie stosowane technologie. Elementy architektoniczne zaprojektowane w ten sposób fabrykowane są przy użyciu danych projektowych oraz odpowiednich maszyn i narzędzi. Metodyka badań uwzględnia specjalistyczne oprogramowanie oraz narzędzia umożliwiające wytworzenie rzeczywistego, fizycznego elementu. Główne zakresy metodyki to oprogramowanie oraz aparatura, natomiast realizacja elementu architektonicznego nie byłaby możliwa bez użycia odpowiednich materiałów oraz odczynników do ich obróbki. Wykorzystanie technologii CNC oraz obróbki danych CAM umożliwia precyzyjną fabrykację zaprojektowanych elementów z wykorzystaniem specjalnie przygotowanego na ten cel procesu. Natomiast w tym procesie istnieje wiele wyzwań oraz konieczność optymalizacji, które usprawniają i ułatwiają wykonanie rzeczywistych elementów na podstawie cyfrowych modeli. Realizacja detalu, od momentu zaprojektowania jako modelu cyfrowego, aż do fizycznego modelu, ujawnia pozytywne aspekty wybranych sposobów, jak i niedoskonałości wynikające z kalibracji urządzeń oraz wybranych materiałów. Wyniki badań wykazują potwierdzenie słuszności zaplanowanych czynności fabrykacyjnych, wybranej aparatury, materiałów oraz odczynników.

Słowa kluczowe: projektowanie parametryczne, fabrykacja, CNC, projektowanie architektoniczne, druk 3D, CAM, detal architektoniczny

1. INTRODUCTION

With the continuous advancement of design methodologies and implementation capabilities, architects increasingly integrate digital tools in the architectural design process. Will multi-axis industrial robots supplant the traditional craftsmanship (Hacka et al., 2020, pp. 4–5)? Will only computer-controlled machines be capable of meeting the stringent quality standards required for architectural elements?

Currently, the adoption of digital tools is evident not only in architectural studios but also on construction sites, where they play a crucial role in supporting the design and execution process. In fact, these tools do not merely assist but are often indispensable in implementing complex design and implementation workflows.

In large-scale projects, such as multi-family residential developments, Building Information Modelling (BIM) methodology has become an essential component in creating documentation. The increasing sophistication of design methodologies is achievable primarily through integrating advanced digital tools, particularly specialized computer software.

Parametric design of architectural and engineering forms is still an innovative and pioneering design direction (Ruttico, 2024, p. 181). The production of these digitally designed elements is highly complex, difficult, demanding and impossible to perform without devices and apparatus ensuring correlation between the design code and any coordinates in

space. Not only architects and designers, but also programmers and engineers are constantly working on the possibility of transferring parametric data from one IT environment to another, etc. (Pellis et al., 2021, p. 3). In many cases, this correspondence between different suppliers of software and machining machines is difficult and often results in data loss or deformation. The ideal solution would be to enable the designer to remain in one IT environment (software) at every stage, i.e., designing a digital model, designing additional and manufacturing elements and finally controlling the equipment. Regardless of these assumptions, the greatest responsibility for the production of the designed forms rests with the designer of the given element. This is because it is at the stage of creating a digital model, where a decision must be made on how it will be produced as a physical element. It is not possible to design a form correctly without knowledge and assumptions about how it will be produced. It is worth noting that this type of approach is required in many design fields (Jin et al., 2020, p. 4). In architectural, engineering or utility design, the designer always performs design work on the basis of which the work will then be materialized. It can be a building, a small architectural or utility form. On the other hand, in parametrically designed elements, all processes are more complicated and advanced because they are not repeatable. Each parametrically designed element is individually manufactured (Slepicka, Vilgertshofer and Borrmann, 2021, p. 3). In a unique manufacturing process, the selection

of materials, machines and reagents. This is the fundamental difference between traditional technologies and complex parametric design.

In the rapidly evolving architectural design environment, traditional tools such as *pens and charcoal*¹ have become little more than nostalgic relics of conceptual craftsmanship on the drawing board. This raises the question of whether digital design will remain merely an integral component of an architect's work or ultimately become the sole tool required for fulfilling design contracts. If the latter is the case, it is essential to explore how architects can further develop the use of digital design tools to enhance the realization of architectural visions and concepts on construction sites.

This article examines the fabrication of architectural details through the application of digital design tools and numerically controlled machinery (Hacka et al., 2020, pp. 4–5). Furthermore, it explores the outcomes of this approach in the context of architectural detail implementation, emphasizing the role of building materials and laboratory reagents in refining the processing of individual elements used in executing the designed form.

The design process involving the parametric modification of individual architectural details is inherently tied to the demands of mass production (Austern, Capeluto and Grobman, 2018, pp. 288–289). One key challenge in this context is optimizing shape variability to minimize fabrication costs while maintaining design integrity. Numerous approaches exist in this domain, and designers working within this paradigm continually explore solutions to enhance the feasibility of large-scale production of parametric elements.

Among the primary optimization challenges are efforts to maximize shape uniformity across as many instances of detail as possible, as well as strategies for implementing forms that can undergo modifications during the production process (Li, Xue and Xiong, 2025, pp. 3–4).

2. THESIS, PURPOSE AND SCOPE OF THE WORK

To successfully implement a design concept, it is necessary to determine numerous parameters and properties at the initial conceptual stage, before

formalizing the shape through computational modelling. The approach to form parameterization and the final geometric configuration defined within the software is contingent upon these initial assumptions.

The second stage, the fabrication of the finalized form, relies on the precise definition of output guidelines, necessitated by the need to establish fabrication methodologies in terms of equipment, tools, materials, and processing agents. Knowledge of the fabrication process directly influences design decisions and model solutions. For instance, such considerations as the milling tool diameter and geometry can significantly impact the production process. The selection of such parameters affects critical factors, including machining duration, operational pauses, material constraints, and the availability of specific dimensions.

All these variables must be carefully considered at the earliest phase of conceptualizing an architectural detail to ensure efficient and feasible design-to-production workflows.

When engaging in design work that involves the parametric specification of form and its subsequent modification, it is essential to define the entire process through to the final stage, i.e. the installation of the completed element within the structure. Fabrication has a direct and significant impact on the design process.

While one could assume that design work can proceed independently of fabrication considerations, this approach is inherently risky. It often necessitates revisions and modifications to the designed element, potentially leading to substantial delays in project implementation. Therefore, an integrated approach that accounts for fabrication constraints from the outset is crucial.

The primary objective is to explore and implement strategies for optimizing both the fabrication time of the final elements and the associated production costs, ensuring efficiency and feasibility throughout the design-to-construction workflow.

In the classification proposed above, these conditions can be categorized into two groups of factors: the first pertains to the complexity of the form, and the second relates to the complexity of fabrication. During the initial conceptual phase, the number of individual components that constitute the overall form must be considered (Azam, Tan and Bosi, 2025, pp. 8–9). This implies that the greater the complexity of an architectural detail, characterized by an increased number of smaller shapes and intricate geometries, the more time and energy will be required for the design and fabrication processes.

Another critical aspect in this regard is the arc radius or the length of the segment between planes

¹ A reference to the television programme *Piórkem i węglem* hosted by Professor Wiktor Zin on Polish Television, in which he showcased the achievements of both Polish and international architecture. The programme was distinguished by the Professor's ability to enhance his lectures with hand-drawn illustrations, providing a visually engaging and educational experience.

with differing inclination angles. This parameter is directly linked to the manufacturing process of the final form or, in the case of cast elements, its negative mould. If, at the conceptual stage, the available equipment and tools for fabrication are known, precise determination of the arc radius and the minimum segment length between planes can be tailored to align with the technical capabilities of the machinery.

Moreover, the size of the designed element is a crucial factor, particularly in mass production. The final dimensions dictate the fabrication methodology, as production constraints are often determined by the operational parameters of numerically controlled machines.

For instance, this may include the size of the working area of a machining device or the operational range of a multi-axis robot. Defining the size of the manufactured form at an early conceptual stage enables deliberate adaptation of the element to the manufacturing technology process. It also facilitates planning form divisions if producing the entire form in one piece is not feasible. Such decisions made early in the design phase can significantly impact optimizing production time and managing the complexity of the manufacturing process.

To determine and illustrate the complexity of the process in a diagram, a set of three factors with common properties has been identified. These factors include: the compactness of the solid, the number of holes, and the complexity of the designed planes. These elements are grouped together due to their similar influence on the complexity of the form. The compactness of the solid directly affects several aspects of fabrication. The closer the solid approximates basic Euclidean shapes, the easier it is to manufacture. Conversely, if the geometry is complex in all three spatial directions (X , Y , Z), design complexity and the challenges in fabrication increase. This is due to the specific limitations and requirements of numerically controlled machines (Chen et al., 2024, pp. 6–7). The vast majority of fabrication systems are based on three-axis configurations, which impose certain limitations that must be considered when working with specialized equipment. Managing more than three axes requires advanced software and technologies capable of supporting such functionalities. One example of multi-axis control implementation is the use of multi-axis robotic systems. This represents only the initial stage of robotic integration, which can be further expanded by enhancing the unit itself or enabling movement capabilities, such as incorporating track-based motion systems.

The second group of factors is closely related to the first and concerns selecting appropriate

equipment for the fabrication process. The choice of machinery directly impacts production feasibility and efficiency. In the context of architectural fabrication, particularly parametric design, complex solutions are required to develop functional and efficient production workflows. The selection of machining tools, particularly for mechanical processing, plays a critical role in determining the final form and the time required for its execution.

It is crucial that, at an early stage of the design process, careful consideration is given to the types of machines that will be utilized for production. Beyond the primary fabrication tools, additional equipment can either extend the capabilities of the process or introduce further constraints, which must be considered to ensure a streamlined and optimized workflow. The next critical element is software-based processing. Among numerous software providers, only a select few offer seamless integration between the digital model creation process and its subsequent translation into machine-readable fabrication languages. The first step in this workflow involves generating and exporting G-code, followed by its adaptation within controller systems that directly interface with the fabrication equipment.

A key challenge in this domain is the lack of standardized access and a unified operational system for various devices. Manufacturers do not always rely on widely available software solutions; instead, they often develop proprietary features tailored specifically for use with numerically controlled machines. Additionally, multiple factors influence the optimization of the manufacturing process based on the designed parameters, requiring a comprehensive approach to ensure efficiency and precision (Caetano, 2024, pp. 8–9). At the outset of the design process, it is crucial to identify the specific types of software required and ensure seamless data export and import between programs. A smooth data flow, free from errors, minimizes unnecessary downtime, prevents material loss or damage during fabrication, and enables the timely achievement of the intended design outcomes.

In the context of the overall manufacturing workflow, optimizing material efficiency is equally important. Planning for the maximum possible waste reduction, such as minimizing excess formwork or moulds required during production — can significantly enhance sustainability and cost-effectiveness.

Finally, the defining characteristics of the end product, including its structural integrity and aesthetic qualities, must be established based on its intended application. Considering these factors during fabrication directly influences production

timelines, particularly when additional processing or strength testing is required to meet performance and durability standards.

3. METHODOLOGY

The research on the fabrication of architectural details involved multiple methodological approaches. Within the process of fabricating target elements and managing production workflows, reliance on a single type of software or equipment is not feasible. Each stage of fabrication necessitates the use of specialized software to ensure the precise operation of numerically controlled devices.

The first phase of the research involved utilizing advanced architectural and utility design software. In the domain of parametric design, Rhino 3D was employed alongside its integrated Grasshopper plugin, enabling algorithmic modelling and computational design processes.

Within this environment, a code was developed to define the design principles of the architectural detail. Based on this initial model, Autodesk Fusion 360 software was employed to create precise designs for casting moulds. The implementation of 3D printing was facilitated through PrusaSlicer, which enabled the generation of the appropriate G-code for the printer.

For elements requiring laser processing, designs were created using Autodesk AutoCAD, followed by execution through a dedicated CNC laser controller, specifically GRBL.

At the fabrication stage, a conventional 3D printing method utilizing ABS and PLA filaments was employed. Individual mould components were constructed from plywood, while the casting mould itself was produced using silicone casting. The final architectural details were obtained through the application of gypsum mass, a material known for its ability to achieve an almost perfect replication of the casting mould surface (Nian et al., 2024, pp. 4–5).

Within the scope of this research, the properties of gypsum allowed the evaluation of the quality of chemical post-processing applied to the 3D prints and an assessment of the negative mould created through silicone casting.

The final phase of the study involved a comparative analysis of the fabricated architectural details against the predefined parameters of the parametrically designed digital models. Dimensional measurements were conducted to determine the extent to which the fabrication process required adjustments, identifying stages that needed refinement or repetition to enhance accuracy and consistency.

4. FABRICATION

The fabrication process was structured into several stages. The first involved preparing 3D prints using filament-based technology. The printing materials — ABS and PLA — were chosen for their high mechanical strength and favourable chemical resistance properties.

3D printing technology remains one of the most versatile methods for producing designed mould components. It enables the rapid fabrication of physical elements, facilitating the verification and refinement of design solutions. However, certain constraints must be considered, particularly those related to the working parameters of the printer's build platform. Additionally, it was observed that material shrinkage necessitated modifications to the digital model, as it occasionally led to deformations in the final component, both during and after the printing process.

The subsequent implementation stage involved the fabrication of the remaining components of the casting mould. Plywood and plexiglass were selected as the primary materials due to their structural rigidity, cost-effectiveness, and suitability for achieving the intended geometric precision. These materials provided an optimal balance between durability and ease of processing.

A laser plotter was employed for the cutting and shaping processes. The mould components were meticulously designed to allow for universal disassembly of the formwork while minimizing the risk of damage to the final mould, ensuring both efficiency and precision in the fabrication process (Gokmen, 2022, pp. 7–8).

The final casting mould was fabricated using moulding silicone. Given the complex geometry of parametrically designed organic architectural forms, the elastic properties of the silicone mould significantly reduced the risk of damage during the demoulding process.

Leveraging its adaptability, multiple elements were produced, each varying in specific parameters defined within the design code of the Grasshopper application.

5. POST-PROCESSING OF DETAILS

The processing of elements designated for partial fabrication depends on the selected methodology. Below, various approaches to processing models printed using filament-based 3D printing technology are outlined and analysed.

Among the fundamental post-processing techniques, both mechanical and manual methods can

be distinguished. These processes primarily involve removing excess material, either residual from the printing process or intentionally added to facilitate fabrication. In filament-based 3D printing, it is common practice to introduce support structures that stabilize the model on the build platform and counteract shrinkage during printing.

For refining the external surface of a printed form, mechanical processing techniques such as grinding and polishing are typically employed. However, these methods require a high degree of precision, as mechanical interference with the material may compromise the dimensional tolerances of the model. Nevertheless, alternative post-processing techniques exist that allow the desired properties of 3D-printed components to be achieved without direct mechanical modification.

One alternative is using chemical reagents, which modify the structure of the printed material due to their inherent properties. This method eliminates surface imperfections directly caused by the printing process, which is an intrinsic characteristic of the technology. Employing this technique eliminates the risk of mechanical damage to the model structure and facilitates comprehensive processing, including on small shapes or intricate structures.

Chemical processing, like other post-processing methods, is subject to certain limitations. A critical factor when selecting this approach is the adjustment of reagent concentration and exposure duration, whether through immersion or vapour application (Reichert et al., 2014, pp. 31–32). This method is not universally applicable and necessitates continuous monitoring of the processed element to ensure the optimal smoothing of imperfections. Excessive exposure can lead to the destruction of the print. Additionally, heat treatment can be employed to remove imperfections and refine the surface. However, due to the thermal energy involved, this technique may cause distortion, deformation, or even complete structural failure of the printed element.

The illustration demonstrates the effects of chemical processing on 3D prints. Achieving this type of surface finish was a crucial aspect of the research, necessary for successfully executing the subsequent stages, i.e., the creation of silicone moulds. Without surface processing, directly filling the model with silicone would result in a mould surface that reflects the inherent imperfections of the 3D print, which would then be reproduced on the cast surface.

The casts were fabricated using a gypsum mixture, selected for its straightforward preparation process and ease of application to the mould. Gypsum also possesses a structure that facilitates the identification

of mould imperfections, which can be verified and corrected in later stages of research, ensuring continuous improvement throughout the experimental process.

To verify the accuracy of the fabrication process, measurements of the obtained casting parameters were conducted. The results were compared with the specified dimensions in the digital model. The table presents the discrepancies observed between the two. For this type of detail, the differences in the assumed dimensions are relatively minor. However, it is essential, within this technological process, to consider the potential for dimensional tolerance deviations between the physical and digital models.

At the initial design concept stage, it is prudent to acknowledge that achieving exact dimensional values may not always be possible due to potential fabrication inaccuracies (Erdine and Kallegias, 2017, pp. 204–205). Nevertheless, it remains possible for the casting and digital model to align almost perfectly. Achieving this requires the careful identification of areas within the detail that may be susceptible to dimensional tolerance discrepancies. Particular attention should be given to elements subject to flexible modifications, as these are not uniform across every iteration of the model (Oxman, 2017, pp. 18–19). These areas within the fabrication process are more likely to exhibit slight deviations from the digital model. The values specified in the digital model were compared with those obtained from the physical, fabricated element. The observed differences fall within a tolerance range of a few per cent for the length and width of the detail, and its thickness. It can be concluded that the chosen manufacturing process for this type of architectural element is appropriate and effective.

6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The research is preliminary in nature. It is important to emphasize that the form of the model selected for the experiment was specifically designed to gather as much information as possible regarding the fabrication process of architectural elements. Both the models and the fabricated detail should be considered as working prototypes. The primary objective of this research is not to focus on the form of the detail or its architectural characteristics, but to assess the accuracy and effectiveness of the fabrication method. The selection of the architectural element was made with the intent to explore and verify as many aspects as possible related to the design of parametric forms (Wortmann and Tunc, 2017, pp. 181–182).

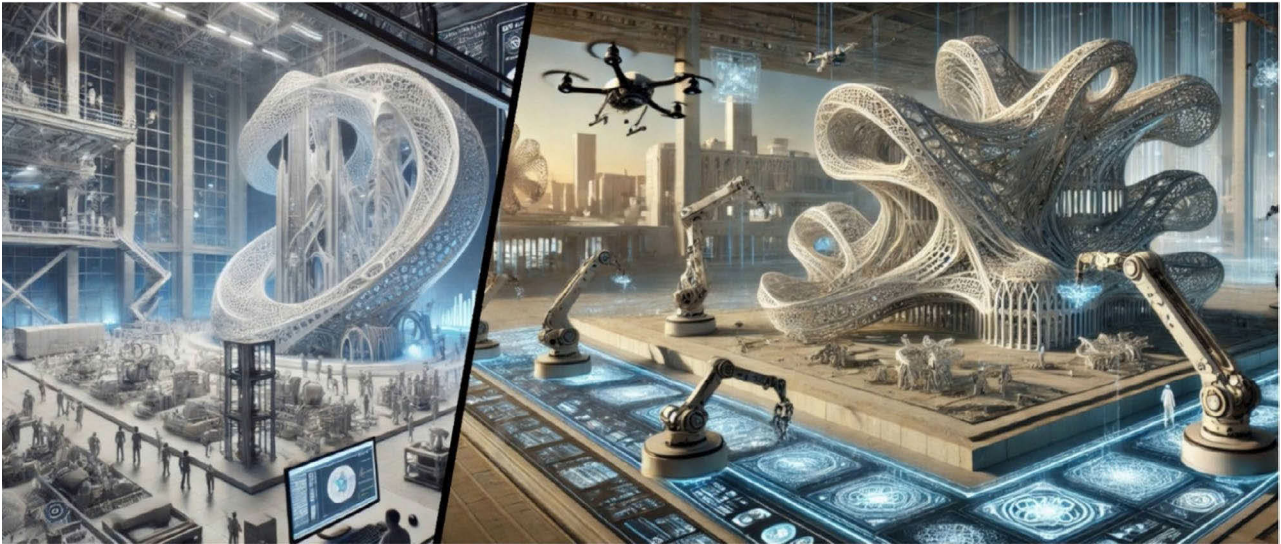
The scope of the research encompasses not only architectural topics but also production engineering and computer science. The research objective was

to assess the validity of the methods employed and identify areas for improvement and optimization, particularly in stages where defects or issues arose. The results will serve as guidelines and recommendations for subsequent studies focused on fabrication optimization, and for correcting and updating individual stages in the process. The fabrication procedure will be further expanded and refined in future phases of research. The ability to map the designed architectural details with parametric variables through casting moulds introduces significant cost and production time optimizations. The primary focus is the optimization and minimization of the number of moulds required to produce the intended castings (Bhoosan, 2017, pp. 119–120). However, despite its broad potential, this method also presents certain limitations, particularly in its application in foundry technology rather

than material processing. The elements designed should be constructed from a flexible material that can adapt to the negative of a modifiable mould. Research in this domain will continue to explore the use of various matrices and their potential for universal application in mass production.

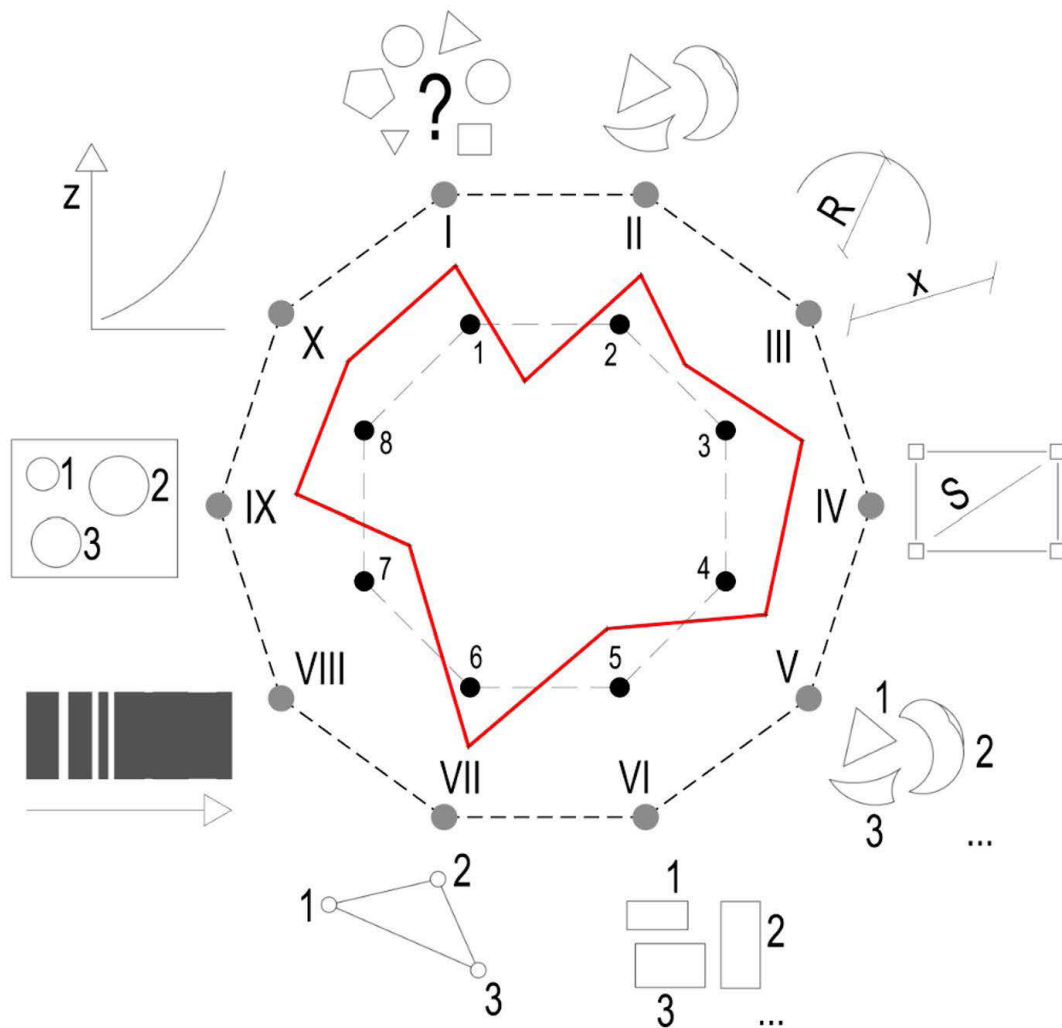
The grant was financed in the framework of the pro-quality program of the Lublin University of Technology ‘Grants for grants’ (Grant nr: 3/GnG/2023)

This research, in partial scope, is the result of the implementation of an inter-university internship as part of the second edition of ‘Staż za miedzą’ in 2023. at the Department of Intelligent Systems of the Institute of Computer Science | Faculty of Mathematics, Physics and Computer Science, UMCS, lasting 3 months



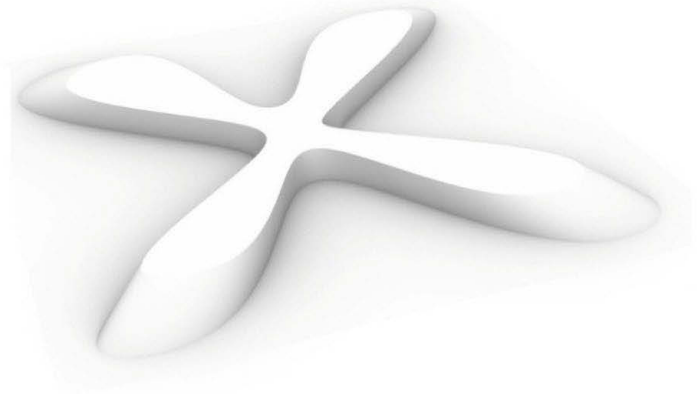
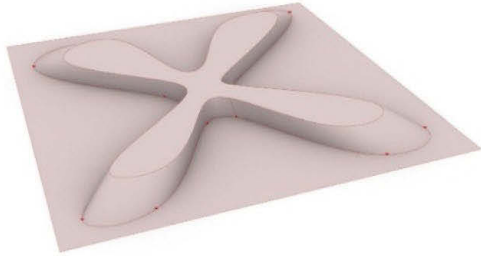
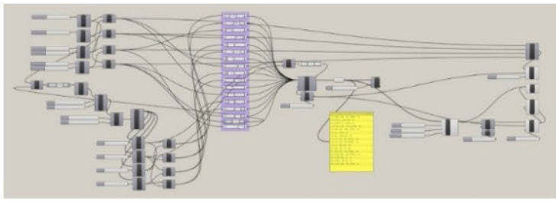
III. 1. Visualization of parametrically designed architecture implemented using numerically controlled machines and robots, source: OpenAI, ChatGPT 4.0 author Wojciech Kocki, read 14.02.2025, prompt: create a visualization showing the fabrication and construction of an object designed in the style of parametric architecture. The prompt was entered twice to compare the obtained effects, two visualizations were shown fragmentarily and separated by a line.

II. 1. Wizualizacja architektury projektowanej parametrycznie i realizowanej poprzez maszyny oraz roboty sterowane numerycznie. Źródło: OpenAI, ChatGPT 4.0, autor: Wojciech Kocki, odczyt 14 luty 2025, opis: utwórz wizualizację ukazującą fabrykację oraz budowę obiektu zaprojektowanego w stylu architektury parametrycznej. Opis wprowadzono dwukrotnie dla porównania otrzymanych efektów, dwie wizualizacje ukazano fragmentarycznie i oddzielono linią.



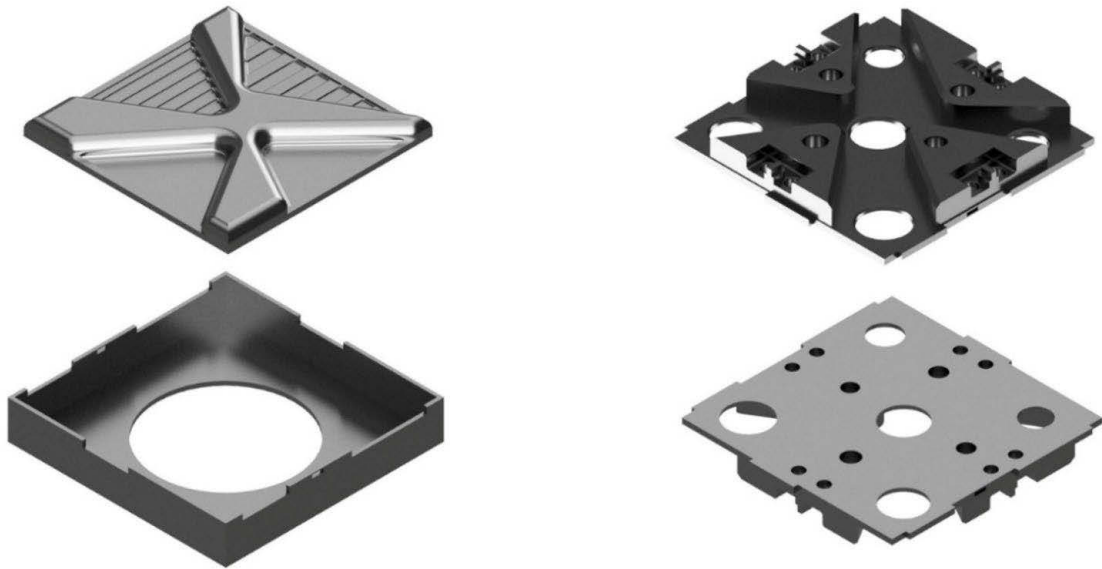
III. 2. A diagram showing the complexity of a parametric design affecting the design process and fabrication. Factors determining the complexity of the form: I — the number of forms creating the main shape; II — the number of different planes; III — the radius of the arc or the length of the section between the planes in a different direction (location of connecting the planes); IV — the actual dimension of the detail; V — the number of curved planes; VI — the number of straight-line planes; VII — the number of vertices; VIII — the level of solid compactness; IX — the number of holes; X — the level of complexity of the planes in the Z axis. Factors determining the complexity of fabrication: 1) equipment choice; 2) processing tools; 3) programming possibilities (G-code, CAD, CAM, CNC); 4) materials lost during fabrication (e.g., negative moulds); 5) castings, auxiliary materials; 6) selection of the target material for the fabrication of the detail; 7) purpose of the detail; 8) strength parameters, visual and aesthetic parameters. Red indicates an example result of selecting the level of advancement of individual parameters. Author: Wojciech Kocki.

II. 2. Schemat skomplikowania projektu parametrycznego wpływający na proces projektowy oraz fabrykację. Czynniki determinujące złożoność formy: I — ilość form tworzących kształt główny; II — ilość odmiennych płaszczyzn; III — promień łuku lub długość odcinka pomiędzy płaszczyznami w innym kierunku (miejsce połączenia płaszczyzn); IV — rzeczywisty wymiar detalu; V — ilość płaszczyzn krzywych; VI — ilość płaszczyzn prostokreślnych; VII — ilość wierzchołków; VIII — poziom zwartości bryły; IX — ilość otworów; X — poziom skomplikowania płaszczyzn w osi Z. Czynniki determinujące złożoność fabrykacji: 1) wybór aparatury; 2) wybór narzędzi obróbczych; 3) możliwości programistyczne (gcode, CAD, CAM, CNC); 4) materiały tracone w trakcie fabrykacji (np. formy negatywne, odlewy); 5) materiały pomocnicze; 6) wybór docelowego materiału do fabrykacji detalu; 7) przeznaczenie detalu; 8) parametry wytrzymałościowe, wizualne i estetyczne. Kolorem czerwonym oznaczono przykładowy wynik wyboru poziomu zaawansowania poszczególnych parametrów. Autor: Wojciech Kocki.



Ill. 3. Design code of an architectural detail made in Rhino Grasshopper 3D software. Initial form for fabrication. Form variability parameters were determined by modifying four locations. On the right, an example of detail arrangement using parametric variables is also shown. Author: Wojciech Kocki.

Il. 3. Kod projektowy detalu architektonicznego wykonany w oprogramowaniu Rhino Grasshopper 3D. Forma wyjściowa do fabrykacji. Parametry zmienności formy określono poprzez modyfikację 4 lokalizacji. Z prawej strony ukazano również przykład ułożenia detalu z zastosowaniem zmiennych parametrycznych. Autor: Wojciech Kocki.



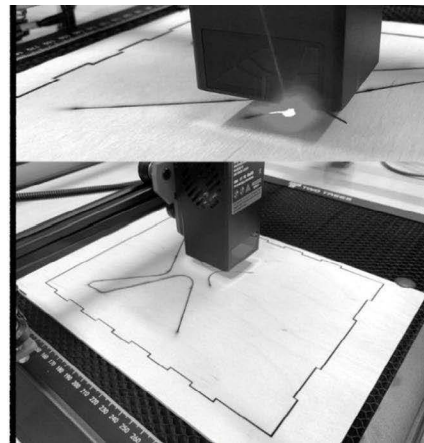
Ill. 4. Model made in Autodesk Fusion 360 software. Mold designed on the basis of the one obtained in Rhino Grasshopper 3D software. On the right side, individual elements making up the casting element of the negative of an architectural detail are shown. Author Wojciech Kocki.

Il. 4. Model wykonany w oprogramowaniu Autodesk Fusion 360. Forma zaprojektowana na podstawie uzyskanej w oprogramowaniu Rhino Grasshopper 3D. Z prawej strony ukazano poszczególne elementy składające się na odlewniczy element negatywu detalu architektonicznego. Autor: Wojciech Kocki.



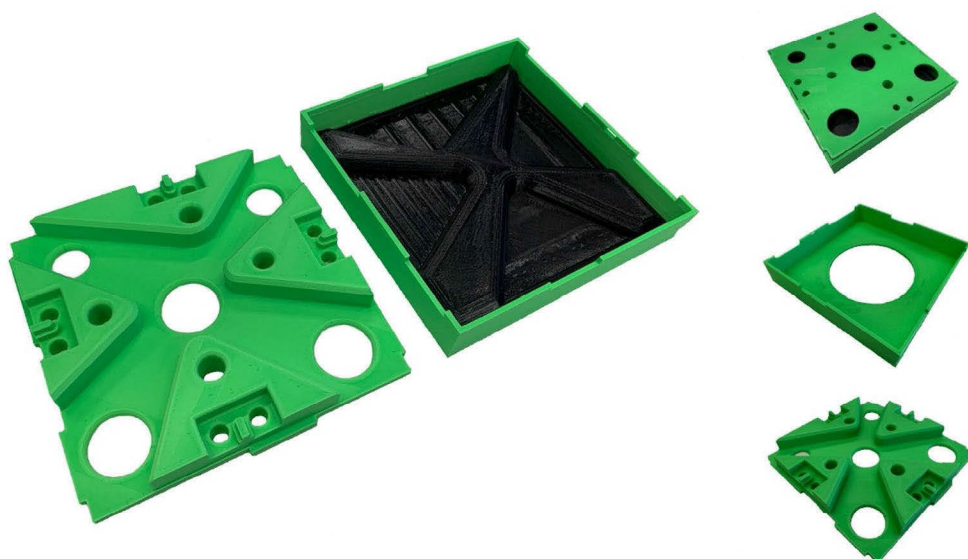
III. 5. A form used to fabricate architectural details - 3D printing. Author Wojciech Kocki.

II. 5. Forma służąca do fabrykacji detalu architektonicznego — process wydruku 3D. Autor: Wojciech Kocki.



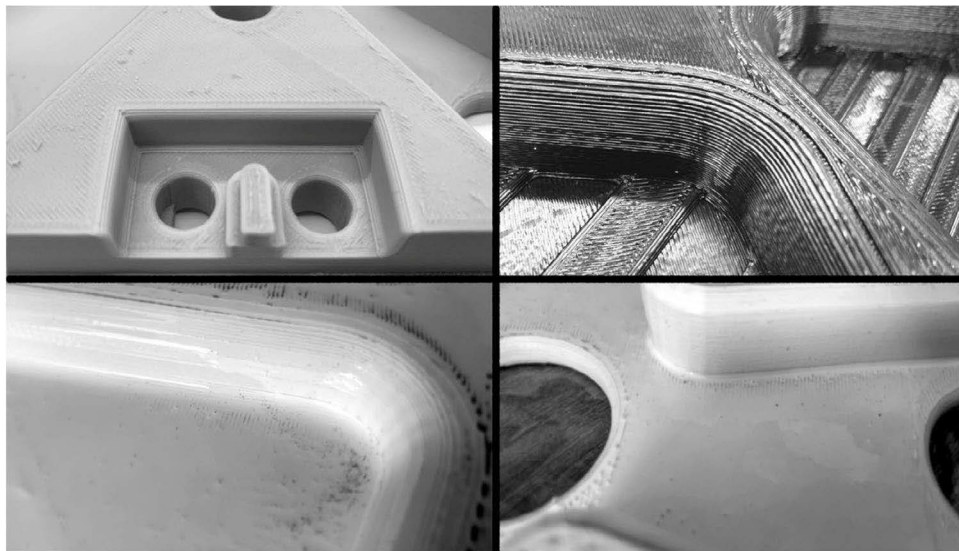
III. 6. The fabrication process of the remaining part of the casting module, laser CNC. Author Wojciech Kocki.

II. 6. Proces fabrykacji pozostałej części modułu odlewniczego, laser CNC. Autor: Wojciech Kocki.



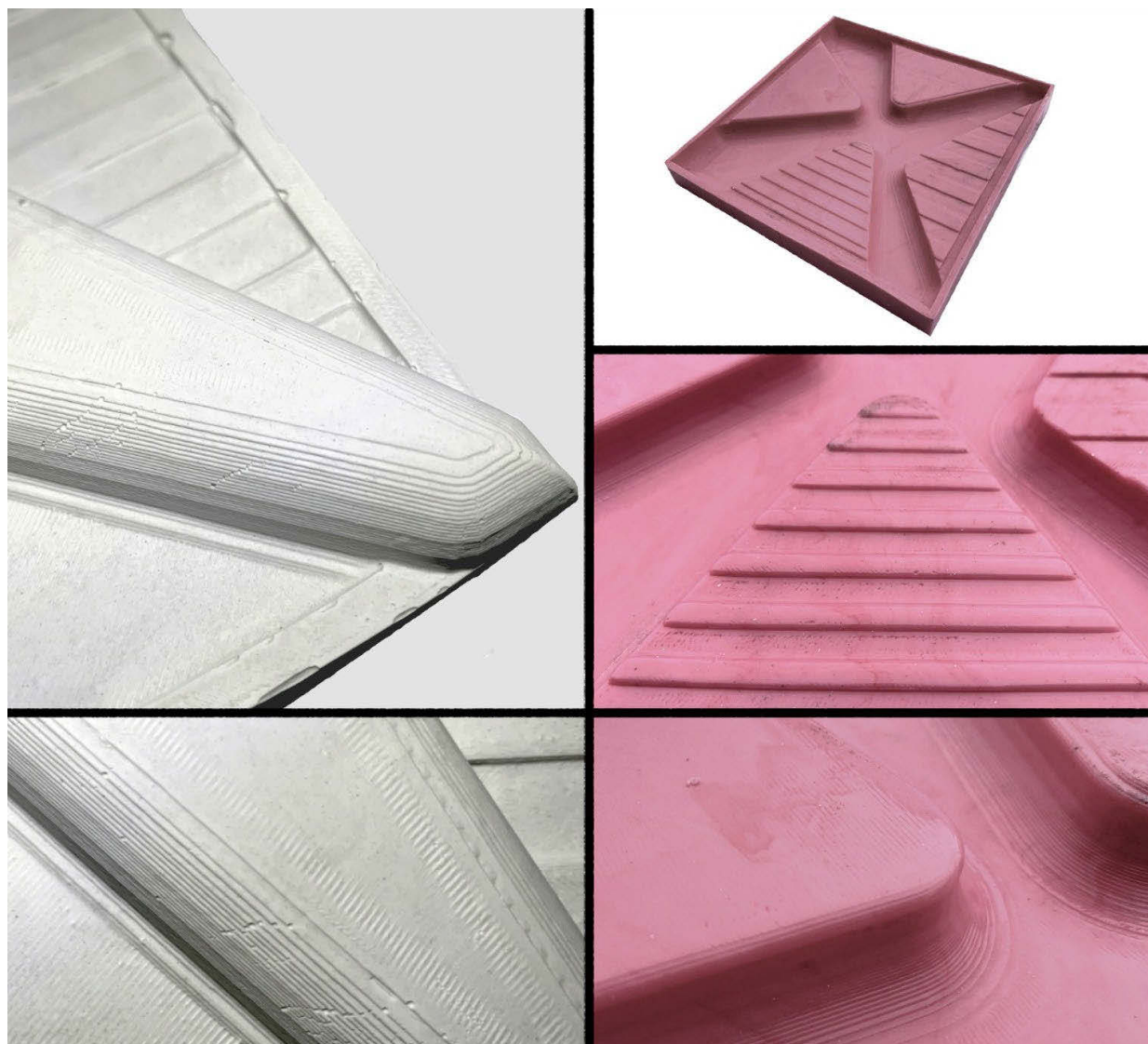
III. 7. Casting mold. The final mold after mechanical processing is shown on the right. Author Wojciech Kocki.

II. 7. Forma odlewnicza. Z prawej strony ukazano docelową formę po obróbce mechanicznej. Autor: Wojciech Kocki.



III. 8. 3D printing of a casting module. Detail of the plane before and after chemical treatment. Author Wojciech Kocki.

II. 8. Druk 3D modułu odlewniczego. Szczegół płaszczyzny przed i po obróbce chemicznej. Autor: Wojciech Kocki.



III. 9. Architectural detail. The right side shows a casting matrix made of silicone. Author Wojciech Kocki.

II. 9. Detal architektoniczny. Z prawej strony ukazano matrycę odlewniczą wykonaną z silikonu. Autor: Wojciech Kocki.

1. WSTĘP

Wśród postępującego rozwoju możliwości projektowych oraz realizacyjnych, coraz częściej architektki wykorzystują narzędzia cyfrowe w projektowaniu architektonicznym.

Czy rzemieślnik-wykonawca zostanie zastąpiony przez wieloosiowego robota przemysłowego? (Hacka i in., 2020, s. 4–5) Czy wymagania w zakresie poziomu jakości wykonania elementu architektonicznego będą mogły spełnić wyłącznie maszyny sterowane komputerowo? Widoczne jest obecnie, nie tylko w pracowniach projektowych, ale również na miejscu realizacji inwestycji, wykorzystywanie wielu narzędzi cyfrowych wspomagających proces projektowy. Zasadniczo można byłoby stwierdzić, że nie tylko wspomagających, ale również umożliwiających proces projektowy, jak i realizacyjny. W wielkoskalowych projektach, na przykład osiedli mieszkaniowych wielorodzinnych, nieodzownym elementem jest zastosowanie metodologii BIM w tworzeniu dokumentacji. Poziom zaawansowania sposobu projektowania jest możliwy wyłącznie poprzez wprowadzenie odpowiednich narzędzi cyfrowych dotyczących oprogramowania komputerowego.

Projektowanie parametryczne form architektonicznych oraz inżynierskich jest nadal nowatorskim i pionierskim kierunkiem projektowym (Ruttico, 2024, s. 181). Wytworzenie tych cyfrowo zaprojektowanych elementów jest niezwykle złożone, trudne, wymagające i niemożliwe do wykonania bez urządzeń i aparatury zapewniającej korelację pomiędzy kodem projektowym a dowolnymi współrzędnym w przestrzeni. Nie tylko architekci i projektanci, ale również programiści oraz inżynierowie nieustannie pracują nad możliwością przenoszenia danych parametrycznych z jednego środowiska informatycznego do kolejnego itd. (Pellis i in., 2021, s. 3). W wielu przypadkach ta korespondencja pomiędzy różnymi dostawcami oprogramowania oraz maszyn obróbczych jest trudna i powoduje niejednokrotnie utratę lub deformację danych. Idealnym rozwiązaniem byłoby umożliwienie projektantowi pozostanie w jednym środowisku informatycznych (oprogramowaniu) na każdym etapie, tj. projektowania cyfrowego modelu, projektowania elementów dodatkowych, fabrykacyjnych oraz finalnie sterowanie aparaturą. Niezależnie jednak od tych założeń, największa odpowiedzialność w zakresie wytworzenia projektowanych form spoczywa na projektancie danego elementu. Jest to spowodowane tym, że to właśnie na etapie tworzenia modelu cyfrowego musi zostać podjęta decyzja, w jaki sposób będzie on wytworzony jako fizyczny element. Nie jest możliwe

prawidłowe projektowanie formy bez wiedzy i założeń, w jaki sposób zostanie wyprodukowana. Warto zauważyć, że tego typu podejście jest wymagane w wielu dziedzinach projektowych (Jin i in., 2020, s. 4). W projektowaniu architektonicznym, inżynierskim czy form użytkowych, zawsze projektant wykonuje prace projektowe, na podstawie których zostanie następnie zrealizowane dzieło. Może to być budynek, mała forma architektoniczna lub użytkowa (Slepicka, Vilgertshofer, Borrmann, 2021, s. 3). Natomiast w elementach projektowanych parametrycznie wszystkie procesy są bardziej skomplikowane i zaawansowane, ponieważ nie są powtarzalne. Każdy element projektowany parametrycznie jest indywidualnie wytwarzany — w unikatowym dla niego procesie wytwórczym, dobraniem materiałów, maszyn oraz odczynników. Jest to podstawowa różnica pomiędzy technologiami tradycyjnymi a złożonym projektowaniem parametrycznym.

W tym dynamicznie zmieniającym się środowisku projektowym architekta narzędzia takie jak *piórko i węgiel*² wydają się jedynie romantycznym wspomnieniem o rzemieślniczej, koncepcyjnej pracy przy desce kreślarskiej. Warto sformułować tezę — czy projektowanie komputerowe będzie nieodłącznym elementem pracy architekta? A może jedynym narzędziem, którego architekt będzie zobligowany używać w celu realizacji umowy projektowej? Jeżeli tak, to również należałoby sformułować tezę, jak możemy jako architekci rozwinąć stosowanie cyfrowych narzędzi projektowania w celu usprawnienia realizacji na budowie wizji i idei architektonicznych?

W niniejszym artykule ukazano fabrykację detalu architektonicznego z wykorzystaniem cyfrowych narzędzi projektowych oraz aparatury sterowanej numerycznie (Hacka i in., 2020, s. 4–5). Ukazano również efekt pracy w zakresie realizacji detalu architektonicznego poprzez wykorzystanie materiałów budowlanych oraz odczynników laboratoryjnych wspomagających obróbkę poszczególnych elementów wykorzystanych w realizacji zaprojektowanej formy.

Proces projektowy polegający na parametrycznej modyfikacji poszczególnych detali architektonicznych jest nieodłącznie powiązany z koniecznością realizacji produkcji masowej (Austern, Capeluto, Grobman, 2018, s. 288–289). Wyzwaniem dla tego aspektu jest optymalizowanie zmienności kształtu w taki sposób, aby koszt wykonania detalu był jak

² Odwołanie do programu telewizyjnego prowadzonego przez Profesora Wiktora Zina w Telewizji Polskiej. W programie autor ukazywał osiągnięcia architektury zagranicznej oraz polskiej wzbogacając wykłady rysunkami.

najmniejszy. Możliwości w tym zakresie jest wiele, a projektanci tego nurtu stale poszukują rozwiązania w celu umożliwienia wykonywania obiektów parametrycznych w większym zakresie. Wśród wyzwań optymalizacyjnych możemy wyróżnić próby związane z utrzymaniem tego samego kształtu w jak największym zakresie detalu lub realizacji form podlegających modyfikacji w trakcie fabrykacji (Li, Xue, Xiong, 2025, s. 3–4).

2. TEZA, CEL, ZAKRES PRACY I PROBLEMATYKA

W celu realizacji pomysłu projektowego konieczne jest określenie wielu parametrów i właściwości na wczesnym etapie koncepcyjnym, ideowym, przed etapem kodowania formy. Od tych założeń, w pierwszym etapie, będzie zależał sposób parametryzacji formy oraz jej docelowy kształt określony w oprogramowaniu. Drugi etap, czyli fabrykacja docelowego kształtu, będzie uzależniona od określenia wytycznych wyjściowych. Spowodowane jest to koniecznością zdefiniowania sposobu fabrykacji poprzez aparaturę, narzędzia, materiały oraz odczynniki. Wiedza na temat fabrykacji projektowanego elementu wpływa na rozwiązania modelowe. Przykładowo, może to być związane ze średnicą i kształtem narzędzia do frezowania. Wybór tego typu elementu może wpływać na czynniki dotyczące wytwarzania docelowej formy, takie jak: czas obróbki, przerwy robocze, materiały oraz ich dostępność w określonej wielkości. Te wszystkie uwarunkowania powinny zostać określone na wstępnej fazie określania koncepcji ideowej detalu architektonicznego.

Podjmując pracę projektową, polegającą na parametrycznym sprecyzowaniu kształtu i jego modyfikacji w opracowywanej formie, niezbędne jest określenie całości tego procesu, aż do ostatniego etapu, czyli wbudowania gotowego elementu w obiekcie. Fabrykacja wpływa bezpośrednio na proces projektowy. Oczywiście, można byłoby przyjąć, że prace projektowe nie uwzględniają procesu fabrykacji, natomiast jest to z założenia ryzykowne podejście i obarczone koniecznością aktualizacji i wprowadzania korekt do projektowanego elementu, co w znaczny sposób może wydłużyć realizację przedsięwzięcia. Głównym celem jednakże jest poszukiwanie i wprowadzanie optymalizacji czasu fabrykacji docelowych elementów oraz kosztów ich przygotowania.

W zaproponowanej powyżej klasyfikacji, uwarunkowania te możemy podzielić na dwie grupy czynników. Pierwsza charakteryzuje się właściwościami z zakresu złożoności formy, a druga — z zakresu zło-

żoności fabrykacji. Podczas wstępnej fazy koncepcyjnej uwzględnia się ilość form współtworzących formę główną. Oznacza to, że im bardziej rozbudowany detale architektoniczny, im więcej w nim zawartych mniejszych kształtów oraz geometrii, tym więcej czasu oraz energii, koniecznej do ich wykonania, będą zajmowały zarówno proces projektowy, jak i fabrykacji (Azam, Tan, Bosi, 2025, s. 8–9).

Kolejnym i istotnym pod tym względem aspektem jest promień łuku lub długość odcinka pomiędzy płaszczyznami o różnym kącie nachylenia. Ten parametr jest ściśle związany z procesem wytwarzania formy docelowej lub negatywu w przypadku odlewów. Jeżeli na etapie koncepcji posiadamy wiedzę z zakresu aparatury i narzędzi, które będą użyte w celu produkcji detalu, możemy precyzyjnie określić promień łuku lub długość minimalną odcinka łączącego płaszczyzny, aby współgrały z możliwościami sprzętowymi. Ważnym czynnikiem w produkcji masowej jest również wielkość projektowanego elementu. Docelowe wymiary uzależniają sposób fabrykacji poprzez ograniczenia w ich produkcji wynikające z parametrów maszyn sterowanych numerycznie. Przykładowo, może to być wielkość pola roboczego urządzenia obróbczego lub zakres zasięgu robota wieloosiowego. Ustalanie wielkości fabrykowanej formy na wczesnym etapie koncepcyjnym umożliwia celowe dopasowanie elementu do procesu technologii wykonania. Możliwe jest również zaplanowanie podziałów formy, jeżeli nie jest możliwa jej fabrykacja w pełnym zakresie. Tego typu uwarunkowania i decyzje na wczesnym etapie projektowym mogą znacząco wpłynąć na optymalizację czasu produkcji i poziom jej skomplikowania. Na potrzeby określenia złożoności procesu i ukazania ich na schemacie wyodrębniono jeszcze grupę trzech czynników wspólnych pod względem właściwości. Są to: poziom zwartości bryły, ilość otworów oraz poziom skomplikowania projektowanych płaszczyzn. Czynniki te stanowią grupę ze względu na podobny charakter określający złożoność formy. Zwartość bryły wpływa na wiele czynników z zakresu fabrykacji. Im bryła bardziej dąży w formie do podstawowych form euklidesowych, tym jest łatwiejsza w wykonaniu. Natomiast jeżeli geometria jest złożona w każdym z trzech kierunków (X, Y, Z), to poziom złożoności jej zaprojektowania i — tym bardziej — fabrykacji również rośnie. Jest to spowodowane specyfiką maszyn sterowanych numerycznie (Chen i in., 2024, s. 6–7). Zdecydowana większość oparta jest o system trzyosiowy. Jednakże powoduje to ograniczenia, które należy wziąć pod uwagę, jeżeli dysponujemy jedynie taką aparaturą. Obsługa większej ilości osi niż trzy wymaga już bardziej zaawansowanego oprogramowania oraz tech-

nologii wykorzystującej takie możliwości. Jednym z powszechnie stosowanych wieloosiowych urządzeń jest robot o ramieniu wieloosiowym. Oczywiście jest to początek możliwości, ponieważ stanowiska pracy z wykorzystaniem robotów mogą być rozbudowane w podobne jednostki lub możliwości przemieszczenia się urządzenia wzdłuż osi, na przykład po kompatybilnych torach jazdy. Druga grupa czynników jest powiązana z pierwszą i dotyczy wyboru odpowiedniej aparatury w celu realizacji procesu fabrykacji. Każda z technologii realizacji posiada odpowiednie możliwości i ograniczenia stanowiące jej typ. W przypadku zadania związanego z produkcją obiektu architektonicznego zaprojektowanego parametrycznie, o złożonym kształcie i skomplikowanej formie, wybór ścieżki fabrykacyjnej jest zasadniczo kluczowym zadaniem. Wybór narzędzia, w tym przypadku maszyny obróbczej, może znacząco wpłynąć na jakość uzyskanej formy oraz czas realizacji niezbędny do jej wykonania. Dlatego tak istotne jest, aby już na wczesnej fazie projektu koncepcyjnego sprecyzować typy maszyn, które będą wykorzystane do realizacji zadania. Poza urządzeniami istotne są również narzędzia obróbcze, które również mogą rozszerzać możliwości lub narzucać pewne ograniczenia. Następnym elementem, równie istotnym jak aparatura, są możliwości programistyczne. Wśród wielu dostawców oprogramowania konieczne jest poszukiwanie najmniej złożonego procesu — od uzyskania cyfrowego modelu poprzez przełożenie jego fabrykacji na język wybranej aparatury. W tym zakresie pierwszym etapem jest poprawne opisanie i wyeksportowanie gcode, a następnie jego adaptacja w odpowiednim sterowniku dedykowanym bezpośrednio do urządzenia. W aspekcie programistycznym istnieją pewne uwarunkowania braku otwartego dostępu i ujednoliconego systemu pracy dla większości urządzeń. Producenci nie zawsze bazują na szeroko dostępnym oprogramowaniu i wymagają użycia dedykowanego, w celu prawidłowego korzystania z urządzenia sterowanego numerycznie. Ten aspekt również znacząco wpływa na optymalizację procesu wytwarzania form projektowanych parametrycznie (Caetano, 2024, s. 8–9). Ważne jest, aby na początku procesu projektowego przewidzieć poszczególne rodzaje oprogramowania koniecznego do zastosowania oraz wiedzy z zakresu eksportu i importu danych pomiędzy programami. Jeżeli dane przepływają swobodnie, nie generując błędów, to z procesu fabrykacji również możemy wyeliminować niepotrzebne przestoje w pracy, utratę lub zniszczenie materiału obróbczego, co wpłynie na terminowe uzyskanie zakładanych efektów. W zakresie docelowego przebiegu procesu wytwórczego istotne jest również zaplanowanie jak największej redukcji

materiału odpadowego lub traconego (np. szalunki lub formy), które muszą powstać w trakcie produkcji. Ostateczne uwarunkowania, które mogą być określone jako wytyczne finalne produktu, to cechy wytrzymałościowe oraz estetyczne wynikające z przeznaczenia elementu. Jeżeli taki zakres jest uwzględniany podczas fabrykacji, wpływa on na czas realizacji, np. poprzez konieczność obróbki elementu lub przeprowadzenia badań z zakresu wytrzymałości.

3. METODYKA

Realizacja badań z zakresu fabrykacji detali architektonicznych obejmowała kilka metod badawczych. W procesie fabrykacji elementów docelowych oraz procesu produkcji nie jest możliwe ograniczenie się do jednego typu oprogramowania lub aparatury. Każdy z poszczególnych etapów fabrykacji wymaga użycia odpowiednio innego typu oprogramowania w celu prawidłowej pracy urządzeń sterowanych numerycznie.

Pierwsza metoda polegała na użyciu specjalistycznego oprogramowania służącego projektowaniu architektonicznemu oraz użytkowemu. W zakresie projektowania parametrycznego wykorzystano oprogramowanie Rhino 3D z wewnętrznym programem Grasshopper.

W tym środowisku utworzono kod generujący zasadę projektową detalu architektonicznego. Następnie na tym modelu wyjściowym, w celu dokonania precyzyjnego projektu form odlewniczych, zrealizowano modele w oprogramowaniu Autodesk Fusion 360. Realizacja wydruków 3D była możliwa poprzez zastosowanie PrusaSlicer i wygenerowanie odpowiedniego gcode dla drukarki. Elementy poddane obróbce laserowej zaprojektowano w oprogramowaniu Autodesk AutoCAD a następnie użyto dedykowanego sterownika dla lasera CNC tj. GRBL.

Na etapie fabrykacji wykorzystano klasyczną metodę druku 3D opartą o filamenty ABS oraz PLA. Poszczególne części formy wykonano ze sklejki. Formę odlewniczą zrealizowano poprzez odlew silikonowy. Docelowe detale architektoniczne uzyskano poprzez wykorzystanie masy gipsowej. Jest to materiał o właściwościach umożliwiających uzyskanie niemal idealnego odwzorowania powierzchni formy odlewniczej (Nian i in., 2024, s. 4-5). W niniejszym zakresie badań takie właściwości gipsu umożliwiają weryfikację jakości obróbki chemicznej wydruków, jak również negatywu formy wykonanego z odlewu silikonowego.

Ostatnim etapem badawczym było zastosowanie metody porównawczej uzyskanych detali architektonicznych z zakładanymi parametrami cyfrowych

modeli zaprojektowanych parametrycznie. Badania pomiarowe umożliwiły weryfikację, na jakim poziomie proces fabrykacji wymaga korekty. Dostarczyły też informacji, które etapy należy powtórzyć oraz w jakim zakresie.

4. FABRYKACJA

Proces fabrykacji został zaplanowany w kilku etapach. Pierwszym z nich było sporządzenie wydruków 3D w technologii filamentowej. Materiały wykorzystane do druku charakteryzują się wysoką wytrzymałością mechaniczną oraz dobrymi właściwościami w zakresie odporności chemicznej. W tym celu zastosowano dwa typy: ABS oraz PLA. Technologia wydruku 3D jest jedną z najbardziej uniwersalnych sposobów na uzyskanie zaprojektowanych elementów form. Ponadto umożliwia szybką realizację fizycznych elementów i tym samym weryfikację rozwiązań projektowych. W zakresie czynników wpływających na ograniczenia tej technologii można wymienić parametry stołu roboczego danego urządzenia. Zaobserwowano również konieczność wprowadzania dodatkowych modyfikacji w modelu cyfrowym bryły ze względu na skurcz materiału powodujący w niektórych przypadkach deformację gotowego elementu lub jeszcze w fazie druku.

Kolejnym etapem realizacji była konieczność wykonania pozostałej części formy odlewniczej. Jako główny materiał do jej wykonania wybrano sklejkę drewnianą oraz plexi. Materiały te zapewniają odpowiednią sztywność konstrukcji oraz możliwość osiągnięcia zakładanej geometrii relatywnie niewielkim kosztem w zakresie materiału oraz jego obróbki. W zakresie aparatury wykorzystano ploter laserowy. Elementy formy zaprojektowano w taki sposób, aby był możliwy uniwersalny demontaż szalunku ze zminimalizowaniem ryzyka uszkodzenia docelowej formy (Gokmen, 2022, s. 7–8).

Docelową formę odlewniczą wykonano z silikonu formierskiego. Ze względu na skomplikowaną geometrię organicznych form architektonicznych zaprojektowanych parametrycznie, właściwości elastyczne formy silikonowej minimalizują ryzyko jej uszkodzenia podczas demontażu. Przez możliwości adaptacyjne zrealizowano kilka elementów różniących się pomiędzy sobą parametrami wprowadzonymi w kod projektowy aplikacji Grasshopper.

5. POST-PROCESSING DETAILS

Obróbka elementów przeznaczonych do częściowej fabrykacji uzależniona jest od zastosowanej metody. Poniżej opisano i przedstawiono metody określające

obróbkę modeli wydrukowanych aparaturą druku 3D z użyciem filamentów.

Wśród podstawowych metod obróbczych możemy wyróżnić mechaniczne lub ręczne opracowywanie modeli. Zakres tego typu prac polega na usunięciu pozostałości materiału niepotrzebnego do celu realizacji obiektu lub naddatkowego pozostawionego, np. w celu wykonania elementu poprzez aparaturę. W zakresie druku 3D z wykorzystaniem filamentów częstym zabiegiem jest wprowadzenie dodatkowego materiału utrzymującego model na stole roboczym i przeciwdziałającego skurczom występującym w drukowanym elemencie. W zakresie wykończenia powierzchni zewnętrznej drukowanej formy stosuje się obróbkę mechaniczną, polegającą na szlifowaniu i polerowaniu płaszczyzny. Jest to jednakże metoda wymagająca precyzji i ze względu na mechaniczną ingerencję wpływa na naruszenie materiału, co może powodować brak utrzymania zakładanej tolerancji modelu. Istnieją jednakże inne metody obróbki wydruków 3D, poza mechanicznym doprowadzaniem elementu do zakładanych właściwości. Jedną z nich jest zastosowanie odczynników chemicznych, które poprzez swoje właściwości modyfikują wydrukowaną strukturę materiałową. Zastosowanie tego typu metod umożliwia zniwelowanie niedoskonałości powierzchni powstałych poprzez proces wydruku, związanych bezpośrednio z technologią (Reichert i in., 2014, s. 31–32). Wybranie tej metody niweluje aspekt naruszenia mechanicznego struktury modelu oraz umożliwia obróbkę całościową, w tym również niewielkich kształtów lub struktur. Obróbka chemiczna, podobnie jak inne formy obróbcze, charakteryzuje się pewnymi ograniczeniami. Istotnym aspektem podczas wyboru tej metody jest dopasowanie stężenia odczynnika oraz czasu kąpieli modelu w nim lub w jego oparach. Metoda ta nie jest uniwersalna w zastosowaniu i wymaga stałej obserwacji obrabianego elementu w celu optymalnego wygładzenia niedoskonałości. Zbyt długi proces może spowodować zniszczenie wydruku. Możliwe jest również zastosowanie metody obróbki cieplnej w celu niwelacji niedoskonałości oraz wygładzenia powierzchni. Metoda ta jednak, ze względu na energię cieplną, może powodować wypaczanie kształtu wydrukowanego elementu lub jego deformację, a nawet destrukcję struktury.

Na ilustracji ukazano efekty obróbki chemicznej wydruków 3D. Uzyskanie tego typu powierzchni było niezbędnym elementem badań w celu prawidłowej realizacji kolejnych etapów, czyli wykonania form silikonowych. W przypadku wykonania zalewu silikonem modelu bez obróbki jego płaszczyzny,

uzyskana nawierzchnia odzwierciedlałaby niedoskonałości wydruku 3D, co finalnie byłoby odwzorowane na płaszczyźnie odlewu.

Realizacja odlewów została wykonana poprzez zastosowanie mieszanki gipsowej. Materiał ten wybrano ze względu na niski poziom skomplikowania przygotowania mieszanki oraz jej podawania do przygotowanej formy. Gips ma również strukturę umożliwiającą obserwację niedoskonałości form, które mogą zostać zweryfikowane i poprawione na kolejnych etapach badań naukowych jako kontynuacja prac badawczych.

W celu weryfikacji poprawności wykonanej fabrykacji dokonano pomiarów uzyskanych parametrów odlewów. Uzyskane wyniki porównano z zakładanymi wymiarami w modelu cyfrowym. W tabeli ukazano występujące różnice. Dla tego typu detalu różnice w zakładanych wymiarach nie mają zbyt dużego znaczenia. Jednakże w tego typu procesie technologicznym warto uwzględnić możliwości uzyskania nietolerancji modelu fizycznego względem modelu cyfrowego. W etapie wstępnej koncepcji projektowej warto uwzględnić możliwości nieuzyskania dokładnie tych samych wartości parametrów określających model poprzez ewentualne wady fabrykacji (Erdine, Kallegias, 2017, s. 204–205).

Nie jest natomiast wykluczone doprowadzenie do niemal idealnej zgodności odlewu i modelu cyfrowego. Wymaga to jednak szczegółowego wyznaczenia miejsc w detalu, które mogą być narażone na brak tolerancji wymiarów. W szczególności należy zwrócić uwagę na elementy, które podlegają elastycznej modyfikacji i nie są stałe w każdym elemencie (Oxman, 2017, s. 18–19). Te miejsca w takim procesie fabrykacji będą ulegały nieznacznym odchyleniom względem modelu cyfrowego. Porównano zakładane wartości w modelu cyfrowym i uzyskane w fizycznym, fabrykowanym elemencie. Różnice dotyczą tolerancji na poziomie kilku procent, zarówno przy długości i szerokości detalu, jak i jego grubości. Można stwierdzić, że wybrany proces fabrykacyjny dla tego typu elementów architektonicznych jest celowy i poprawny.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaprezentowane w niniejszym artykule badania należą do wstępnych. Należy podkreślić, że forma modelu wybranego do realizacji eksperymentu została zaprojektowana w taki sposób, aby zweryfikować jak najwięcej informacji o procesie fabrykacji elementów architektonicznych. Modele oraz realizowany detal należy traktować jako wersję roboczą. Głównym celem realizacji badań nie jest forma

detalu i jego cechy architektoniczne, ale ustalenie poprawności metody fabrykacyjnej. Wykorzystanie elementu architektonicznego zostało dobrane w taki sposób, aby zweryfikować jak najwięcej szczegółów związanych z projektowaniem form parametrycznych (Wortmann, Tunc, 2017, s. 181–182). Zakres badań obejmuje tematykę nie tylko architektoniczną, ale również z zakresu inżynierii produkcji oraz informatyki. Cel realizacji badań dotyczył weryfikacji poprawności zastosowanych metod oraz usprawnienia i optymalizacji etapów, w których wystąpiły wady lub problemy. Uzyskane wyniki będą wykorzystywane w kolejnych badaniach jako wytyczne i zalecenia z zakresu optymalizacji fabrykacji oraz korekty i aktualizacji poszczególnych jej etapów. Proces fabrykacyjny w kolejnych fazach badań będzie rozbudowywany i optymalizowany (Bhoosan, 2017, s. 119–120). Możliwości odwzorowania projektowanych detali architektonicznych ze zmiennymi parametrycznymi poprzez formy odlewnicze wprowadzają wiele optymalizacji z zakresu kosztu i czasu ich wytworzenia. Głównym aspektem jest optymalizacja i minimalizacja ilości form koniecznych do wykonania, aby w fabrykacji uzyskać zaplanowane odlewy. Jednakże metoda, poza szerokimi możliwościami, posiada również pewne ograniczenia. W szczególności dotyczy to możliwości jej aplikacji w technologii odlewniczej, a nie obróbki materiału. Projektowane elementy z założenia powinny być wykonane z materiału elastycznego, który można dopasować do negatywu modyfikowalnej formy. Badania w tym zakresie będą rozwijane w celu możliwości aplikacji różnorodnych matryc i ich uniwersalnego wykorzystania w produkcji masowej.

Grant został sfinansowany z programu projakościowego Politechniki Lubelskiej pn. „GRANTY NA GRANTY” (Grant nr 3/GnG/2023).

Prowadzone badania, w częściowych zakresach, są wynikiem realizacji stażu międzyuczelnianego w ramach II edycji „Staż za miedzą” w 2023 roku w Katedrze Systemów Inteligentnych Instytutu Informatyki Wydziału Matematyki, Fizyki i Informatyki UMCS, trwającego 3 miesiące.

REFERENCES

- Austern, G., Capeluto, G., I., Grobman, J.Y. (2018) ‘Rationalization methods in computer aided fabrication: A critical review’, *Automation in Construction*, 90, pp. 288–289. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.027> (accessed: 8.09.2025).
- Azam, F.I., Tan, P.J., Bosi F. (2025) ‘Multi-objective parametric optimisation of architected hexagonal honeycomb with stepped struts’, *Materials & Design*,

- 250, pp. 8–9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113569> (accessed: 8.09.2025).
- Bhooshan, S. (2017), ‘Parametric design thinking: A case-study of practice-embedded architectural research’, *Design Studies*, 52, pp. 119–120. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.destud.2017.05.003> (accessed: 8.09.2025).
- Caetano, I., Leitão, A. (2024), ‘Connecting design and fabrication through algorithms: current and future prospects for AEC’, *Automation in Construction*, 164, pp. 8–9. Available at” <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105445> (accessed: 8.09.2025).
- Chen, M.-T. et al. (2024), ‘Parametric topology optimization design and analysis of additively manufactured joints in spatial grid structures’, *Engineering Structures*, 300, pp. 6–7. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117123> (accessed: 8.09.2025).
- Erdine, E., Kallegias, A. (2017) ‘Interwoven reinforced concrete structures: Integration of design and fabrication drivers through parametric design processes’, *Design Studies*, 52, pp. 204–205. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.002> (accessed: 8.09.2025).
- Gokmen, S. (2022), ‘Computation and Optimization of Structural Leaf Venation Patterns for Digital Fabrication’, *Computer-Aided Design*, 144, pp. 7–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.103150> (accessed: 8.09.2025).
- Hack, N. et al. (2020), ‘Structural stay-in-place formwork for robotic in situ fabrication of nonstandard concrete structures: A real scale architectural demonstrator’, *Automation in Construction*, 115, pp. 4–5. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103197> (accessed: 8.09.2025).
- Jin W. et al. (2020), ‘Wire arc additive manufacturing of stainless steels: a review’, *Applied Sciences*, 10(5):1563. Available at: <https://doi.org/10.3390/app10051563> (accessed: 8.09.2025).
- Li, Z., Xue, P., Xiong, J. (2025), ‘Fabrication and mechanical properties of CFRP honeycomb cylinder based on the transforming from the flat honeycombs’, *Composites Science and Technology*, 259, pp. 3–4. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2024.110948> (accessed: 8.09.2025).
- Nian, Y. et al. (2024), ‘Nature-inspired 3D printing-based double-graded aerospace negative Poisson’s ratio metastructure: Design, Fabrication, Investigation, optimization’, *Composite Structures*, 348, pp. 4–5. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.118482> (accessed: 8.09.2025).
- Oxman, R. (2017), ‘Thinking difference: Theories and models of parametric design thinking’, *Design Studies*, 52, pp. 18–19. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2017.06.001> (accessed: 8.09.2025).
- Pellis, D. et al. (2021), ‘Architectural freeform surfaces designed for cost effective panelling through mold re-use’ (in:) *Proceedings of the Advances in Architectural Geometry*, Paris, France, May 2021.
- Reichert, S. et al. (2014), ‘Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles’, *Computer-Aided Design*, 52, pp. 31–32. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.005> (accessed: 8.09.2025).
- Ruttico, P. (2024), *Coding Architecture, designing toolkits, workflows, industry*, Springer.
- Slepicka, M., Vilgertshofer, S., Borrmann, A. (2021), ‘Fabrication information modeling’, (in:) *International symposium on automation and robotics in construction (ISARC 2021)*.
- Wortmann, T., Tunc, B. (2017), ‘Differentiating parametric design: Digital workflows in contemporary architecture and construction’, *Design Studies*, 52, pp. 181–182. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.destud.2017.05.004> (accessed: 8.09.2025).