

Additive manufacturing in steel constructions

Produkcja addytywna w konstrukcjach stalowych

DOI: 10.15199/33.2025.07.12

Abstract. Additive manufacturing (AM), informally known as 3D printing, has the potential to revolutionize the construction industry. Implementing this technology in the production of metal structures enables the creation of customized cross-sections and components with variable functional and mechanical properties. This allows for greater structural efficiency, reduced material consumption, and minimized waste. This article provides a brief overview of current metal additive manufacturing techniques in the construction sector and their practical applications.

Keywords: powder bed fusion (PBF); wire and arc additive manufacturing (WAAM).

Streszczenie. Produkcja addytywna (AM), nazywana mniej formalnie drukiem 3D, ma potencjał do zrewolucjonizowania przemysłu budowlanego. Wdrożenie tej technologii do produkcji konstrukcji metalowych umożliwia tworzenie niestandardowych przekrojów oraz elementów o zmiennych właściwościach funkcjonalnych i mechanicznych. Dzięki temu można uzyskać dużą efektywność strukturalną, redukcję zużycia materiału i odpadów. W artykule przedstawiono krótki przegląd aktualnych technologii addytywnego wytwarzania metali w budownictwie oraz jego zastosowania w praktyce.

Słowa kluczowe: selektywne spiekanie sproszkowanego materiału (PBF); wytwarzanie przyrostowe z wykorzystaniem drutu i łuku elektrycznego (WAAM).

Additive manufacturing (AM) is gaining increasing significance in the construction industry, offering numerous advantages over traditional production methods. This technology enables the creation of custom elements with optimized geometry, reduces material consumption, and minimizes waste. AM techniques facilitate the production of metal components, as well as the repair and reinforcement of structures. While the construction sector is less technologically advanced than the aerospace or biomedical industries (where 3D printing has long been widely used) the growing pressure from climate change and construction costs is driving the adoption of innovative solutions. However, the development of this technology requires the industry to adapt to the digital revolution, modern design methods, and new approaches to structural verification.

The history of additive manufacturing dates back to the 19th century [1], when the photosculpture technique was developed, allowing the creation of three-dimensional objects from a series of two-dimensional images. In the following decades, various methods such as photopolymerization, powder sintering, and laminated object manufacturing were developed. A breakthrough came in the 1980s with the commercialization of stereolithography, which marked the beginning of the rapid advancement of 3D printing technology. Today, there are seven main AM methods [2], covering a wide range of materials, including metals, ceramics, polymers, and composites.

The application of 3D printing in construction is still in the experimental phase, but it offers immense potential for reducing construction time, reduction of costs and greenhouse gas emissions, and creating more efficient structures.

Produkcja addytywna (AM) zyskuje coraz większe znaczenie w budownictwie, oferując wiele korzyści w porównaniu z tradycyjnymi metodami produkcji. Pozwala na tworzenie niestandardowych elementów o zoptymalizowanej geometrii, zmniejszenie zużycia materiałów i ograniczenie ilości odpadów. Technologia AM umożliwia produkcję elementów metalowych, ale także naprawę i wzmacnianie konstrukcji. Mimo że sektor budowlany jest mniej zaawansowany technologicznie niż lotniczy czy biomedyczny, w których druk 3D od dawna cieszy się dużą popularnością, rosnąca presja związana ze zmianami klimatycznymi i kosztami budowy skłania do wdrażania innowacyjnych rozwiązań. Rozwój tej technologii wiąże się jednak z koniecznością dostosowania do cyfrowej rewolucji, nowoczesnych metod projektowania i weryfikacji konstrukcji.

Historia produkcji addytywnej sięga XIX w. [1], kiedy opracowano technikę fotoskulptury pozwalającą na tworzenie trójwymiarowych obiektów z serii dwuwymiarowych zdjęć. W kolejnych dekadach rozwijano różne metody, takie jak fotopolimerizacja, spiekanie proszków czy laminowanie warstwowe. Przełomem było skomercjalizowanie stereolitografii w latach osiemdziesiątych XX w., co zapoczątkowało dynamiczny rozwój technologii druku 3D. Obecnie wyróżnia się siedem głównych metod AM [2], obejmujących różne materiały, w tym metale, ceramikę, polimery i kompozyty.

Zastosowanie druku 3D w budownictwie, który wciąż jest w fazie eksperymentalnej, umożliwi skrócenie czasu realizacji konstrukcji, redukcję kosztów i emisji gazów cieplarnianych oraz tworzenie efektywnych konstrukcji.

Charakterystyka produkcji addytywnej

Szybki rozwój produkcji addytywnej (AM) doprowadził do powstania wielu różnych nazw określających tę dziedzinę, z których najbardziej popularną jest **druk 3D**. Proces ten

¹⁾ Rzeszów University of Technology, The Faculty of Civil and Environmental Engineering and Architecture; e_bernat@prz.edu.pl

Characteristics of additive manufacturing

The rapid development of additive manufacturing (AM) has led to the emergence of numerous terms describing this field, with "3D printing" being the most commonly used. It is important to note that this process is highly complex and encompasses a variety of technologies and materials. An effort to establish a standardized terminology was undertaken in ISO/ASTM 52900 [2], where the general term "additive manufacturing" was adopted for all processes that successively join material to create physical objects as specified by 3D model data. Within this classification, seven key technology groups were identified [2, 3]:

- **Powder Bed Fusion (PBF)** – a technology that involves layer-by-layer sintering of powder material. It is one of the most commonly used additive manufacturing methods for producing metal components;

- **Binder Jetting (BJT)** – a process in which a liquid binding agent is selectively deposited onto a powder bed, bonding the material layer by layer;

- **Directed Energy Deposition (DED)** – a broad category of additive manufacturing processes that can utilize either a powder bed or molten wire, commonly used for manufacturing metal parts;

- **Material Extrusion (MEX)** – a process where material is extruded through a nozzle or orifice, primarily used for printing polymer-based structures;

- **Vat Photopolymerization (VPP)** – a technique in which a material powder is dispersed in a light-sensitive resin and selectively cured by exposure to UV light;

- **Material Jetting (MJT)** – a process in which droplets of building material are selectively deposited onto the work platform;

- **Sheet Lamination (SHL)** – a method that involves cutting individual cross-section layers from sheets and then laminating them together using diffusion bonding, low-melting alloys, adhesive polymers, or ultrasonic welding.

In addition, a new technology is being developed that has not yet been included in ISO standards [2]. This is **Electrochemical Additive Manufacturing (ECAM)**, which is in the early stages of development and is not yet commercially available. In this process, parts are built at the atomic level, with the maximum dimensions of produced elements reaching approximately 600 μm . The primary advantage of this technology is that, as a non-thermal process, it allows for the production of components with reduced internal residual stresses [4].

Most of these methods follow a similar workflow: first, a 3D model of the component is created using CAD software, which is then sliced into layers. This data is then transferred to the "printer" software, which defines the positioning of the working head. Finally, the part is built layer by layer.

Metals used in construction primarily include carbon steel, stainless steel, and aluminum. Structural elements made from these materials typically have a prismatic shape (uniform along their entire length), as this simplifies production using traditional manufacturing techniques such as hot rolling, cold forming, or extrusion. **Additive manufacturing enables the creation of non-standard cross-sections with greater**

jest bardzo złożony i obejmuje wiele technologii oraz materiałów. Próba ustandaryzowania terminologii została podjęta w normie ISO/ASTM 52900 [2], gdzie ogólnym terminem „additive manufacturing” określono wszystkie procesy polegające na stopniowym łączeniu materiału w celu utworzenia fizycznego obiektu zgodnie z danymi modelu 3D. W ramach tej klasyfikacji wyróżniono siedem kluczowych grup technologii [2, 3]:

- **Powder Bed Fusion (PBF)** – polega na warstwowym spiekaniu materiału w postaci proszku; jest to jedna z popularniejszych metod wytwarzania przyrostowego elementów z metalu;

- **Binder Jetting (BJT)** – ciekły środek wiążący jest selektywnie osadzany na złożu proszku, wiążąc materiał po jednej warstwie na raz;

- **Directed Energy Deposition (DED)** – obejmuje procesy wytwarzania przyrostowego i może wykorzystywać złożę proszkowe lub przetapiany drut; często używana do produkcji części metalowych;

- **Material Extrusion (MEX)** – proces, w którym materiał jest wyciskany przez dyszę lub otwór; technologia wykorzystywana głównie do drukowania polimerów;

- **Vat Photopolymerisation (VPP)** – proszek materiału jest rozproszony w światłoczułej żywicy i selektywnie utwardzany przez ekspozycję na światło UV;

- **Material Jetting (MJT)** – proces, w którym krople materiału budulcowego są selektywnie nanoszone na płytę roboczą;

- **Sheet Lamination (SHL)** – metoda laminowania arkuszy, której poszczególne warstwy przekroju są wycinane, a następnie laminowane razem za pomocą wiązania dyfuzyjnego, stopów o niskiej temperaturze topnienia, polimerów klejących lub ultradźwięków.

Rozwija się również nowa technologia, której norma ISO [2] jeszcze nie uwzględnia, tzw. **elektrochemiczne wytwarzanie addytywne (ECAM)**, które znajduje się we wczesnej fazie rozwoju i nie jest obecnie dostępne na rynku komercyjnym. W procesie tym wytwarzana część jest budowana na poziomie atomowym, a maksymalne wymiary elementów wynoszą ok. 600 μm . Główną zaletą tej technologii jest to, że jako proces nietermiczny pozwala na wytwarzanie części z niewielkimi wewnętrznymi naprężeniami szczątkowymi [4].

Większość z wymienionych procesów przebiega wg podobnego schematu: najpierw tworzony jest model 3D elementu w oprogramowaniu CAD, który następnie zostaje podzielony na warstwy. Informacje są przesyłane do oprogramowania „drukarki”, określając położenie głowicy roboczej. Na końcu element jest budowany warstwa po warstwie.

Metale, które są wykorzystywane w budownictwie, to przede wszystkim stal węglowa, stal nierdzewna i aluminium. Elementy konstrukcyjne z tych materiałów zazwyczaj mają pryzmatyczny kształt (jednolity na całej długości), co wynika z prostoty produkcji przy użyciu tradycyjnych technik wytwarzania, takich jak: walcowanie na gorąco, formowanie na zimno czy ekstruzja. **Produkcja addytywna umożliwia tworzenie niestandardowych przekrojów o większej efektywności strukturalnej, redukując zużycie materiału i odpadów, oraz usprawniając procesy projektowania i budowy.** Technologie wytwarzania addytywnego metali [2], które mogą znaleźć zastosowanie w sektorze budowlanym, to przede wszystkim

structural efficiency, reducing material consumption and waste while also improving design and construction processes. Metal additive manufacturing technologies covered by the standard [2] that could be applied in the construction sector primarily include **Powder Bed Fusion (PBF)** and **Directed Energy Deposition (DED)**, utilizing the Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) method. Each of these processes has its own limitations and characteristics, such as the maximum size of the produced part or the speed of layer deposition, making them suitable for different applications.

Powder Bed Fusion Technology

In this manufacturing method, metal in powder form is sintered layer by layer. A special component (known as a recoater) collects a layer of powder from an adjacent reservoir and spreads it over the build area. There, a laser (*Laser Beam Powder Fusion, PBF-LB*) or an electron beam (*Electron Beam Powder Bed Fusion, PBF-EB*) selectively sinters the powder particles together, constructing the model layer by layer. This additive manufacturing method is particularly suitable for small components with complex geometries (Fig. 1). During the printing process, an inert atmosphere filled with argon or nitrogen (for PBF-LB technology) or a vacuum (for PBF-EB technology) is required to prevent oxidation of the metal powders. Therefore, a sealed chamber is necessary, which limits the size of the produced components. Commercially available printers offer a build volume of up to 300 x 300 x 350 mm [5]. However, there is a growing trend towards larger print volumes and the use of multiple lasers, currently reaching up to 8 – 12 lasers. In PBF-LB technology, metal powder particles range in size from 15 to 45 μm , while for PBF-EB, they range from 50 to 120 μm [3], which results in a higher printing speed. Overall, additive manufacturing using PBF technology offers significantly higher precision than DED methods. The resulting surfaces typically have a roughness below 20 μm [6], though this is associated with long build times, sometimes lasting several dozen hours, with a melting rate of approximately 50 g/h [4]. Examples of components produced using PBF technology are shown in Figure 1. The first example is the Nematox façade node, developed to demonstrate how additive manufacturing

technologia PBF (powder bed fusion) oraz DED (directed energy deposition), wykorzystujące metodę WAAM (wire and arc additive manufacturing). Każdy z tych procesów ma swoje ograniczenia i zalety, takie jak maksymalny rozmiar wytwarzanej części oraz prędkość nadbudowywania kolejnych warstw, co sprawia, że nadają się one do różnych zastosowań.

Technologia Powder Bed Fusion

W tej metodzie wytwarzania, metal w postaci proszku jest spiekany warstwowo. Specjalny element (tzw. recoater) pobiera warstwę proszku z położonego obok złoża i nasuwa ją na obszar roboczy. Laser (*Laser Beam Powder Fusion, PBF-LB*) lub wiązka elektronów (*Electron Beam Powder Bed Fusion, PBF-EB*) selektywnie spieka ze sobą cząstki proszku, budując model warstwa po warstwie. Ta metoda produkcji addytywnej jest zalecana w przypadku małych elementów o skomplikowanej geometrii (rysunek 1). Podczas drukowania elementu wymagana jest atmosfera obojętna, wypełniona argonem lub azotem (technologia PBF-LB) lub próżnia (technologia PBF-EB), co ma zapobiec utlenianiu się proszków metalicznych. Z tego względu niezbędna jest szczelna komora, która wpływa na ograniczenie wielkości powstających w niej elementów. Dostępne na rynku drukarki oferują obszar roboczy wielkości do 300 x 300 x 350 mm [5]. Istnieje zapotrzebowanie w kierunku większej objętości wydruku i stosowania wielu laserów nawet 8 – 12. W technologii PBF-LB cząstki proszku metalicznego mają rozmiar 15 ÷ 45 μm , podczas gdy w przypadku metody PBF-EB ich wielkość wynosi 50 ÷ 120 μm [3], co przekłada się na większą prędkość procesu drukowania. Wytwarzanie addytywne z wykorzystaniem technologii PBF cechuje się znacznie większą precyzją niż metody DED. Uzyskane powierzchnie zwykle charakteryzują się chropowatością poniżej 20 μm [6], co wiąże się z długim czasem budowy, który może wynosić nawet kilkadziesiąt godzin, przy prędkości topienia na poziomie 50 g/h [4]. Przykłady elementów wytworzonych w technologii PBF pokazano na rysunku 1. Węzeł elewacyjny Nematox ma pokazać, w jaki sposób procesy wytwarzania addytywnego mogą umożliwić optymalizację kształtu, oferując jednocześnie większe możliwości innowacji oraz swobodę projektowania geometrycznego. Pełnowymiarowy prototyp (rysunek 1b) wymagał 120 h projektowania CAD, z czego 10 h poświęcono na konwersję modelu

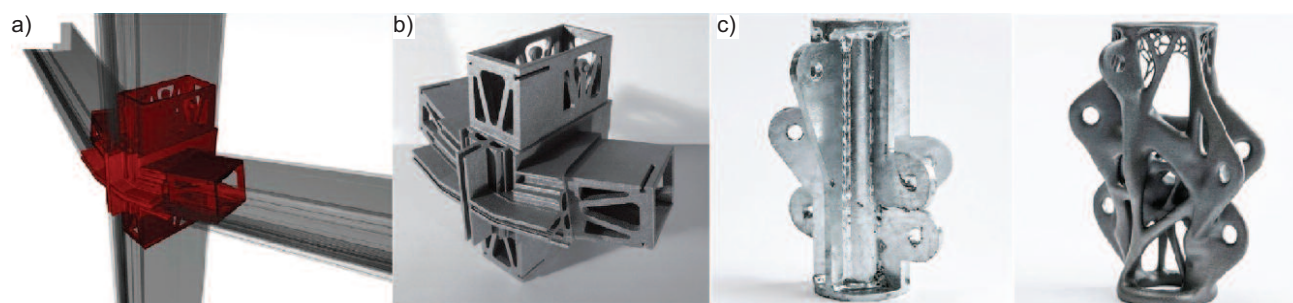


Fig. 1. Nematox façade node: a) visualization; b) full-scale prototype [7]; c) transition from a conventional lighting node to an AM-optimized node [10]

Rys. 1. Węzeł elewacyjny Nematox: a) wizualizacja; b) pełnowymiarowy prototyp [7]; c) przejście od konwencjonalnego węzła oświetleniowego do węzła zoptymalizowanego za pomocą AM [10]

processes can enable the optimization of façade shapes while offering greater innovation potential and increased geometric design freedom. The full-scale prototype (Figure 1b) required 120 hours of CAD design, including 10 hours for model conversion to the appropriate AM file format and an additional 2 hours for positioning the node in the AM device software. After 76.5 hours of build time, an additional four-hour finishing process was necessary [7, 8].

The second example of using PBF technology is the lighting node of a tensegrity structure (Figure 1c), which was redesigned by the engineering firm Arup [9, 10]. In its traditional version, the node consisted of up to seven unique steel plates that were cut and welded to a central tube. To optimize its topology, specialized software was used to generate an optimized node geometry based on predefined boundary conditions. The design was then adapted to the manufacturing process, allowing for material savings, cost reduction, and acceleration of the overall production process. The final version of the node features an organic form tailored to the internal force distribution. It is half the height and 75% lighter than the original, which resulted in the entire tensegrity structure weighing 40% less compared to using conventional nodes [4].

Directed Energy Deposition Technology

There are two primary manufacturing processes in DED technology. They involve directly feeding metallic powder (Powder-Based DED) or wire (Wire-Based DED) into the focal point of a laser, electron beam, or plasma arc, creating a molten pool that can be selectively deposited. The first method is suitable for producing parts with complex geometries. Similar to PBF technology, this process requires a sealed chamber with an inert atmosphere to prevent oxidation. As a result, it imposes limitations on the maximum part size and involves a long build time, currently around 1 kg/h [4]. The resulting surface roughness typically ranges from 20 to 100 μm . The second process, on the other hand, utilizes arc welding tools and wire as the feedstock material, forming the final object entirely from the deposited filler material. The combination of an electric arc as the heat source and wire as the feed material is referred to as WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing). This technique has been studied for additive manufacturing applications since the 1990s, although the first patent was filed in 1925 [11]. WAAM can employ various welding techniques, including Gas Metal Arc Welding (GMAW), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), and Plasma Arc Welding (PAW) [4]. These processes operate based on the "line-of-sight" principle, meaning that, unlike PBF methods, the movement path of the tool can be restricted, limiting the complexity of achievable geometries. Additionally, the produced components typically have a near-net shape, requiring post-processing for final precision. However, this technology enables a high deposition rate (currently around 3 – 10 kg/h [11]) and allows for virtually unlimited part sizes, with surface roughness of approximately 500 μm . WAAM is particularly beneficial for the construction

do odpowiedniego formatu pliku AM, a kolejne 2 godziny na umieszczenie węzła w oprogramowaniu urządzenia AM. Po 76,5 h budowy konieczne było dodatkowe czterogodzinne wykończenie elementu [7, 8].

Drugim przykładem wykorzystania technologii PBF jest węzeł oświetleniowy konstrukcji tensegrity (rysunek 1c), zaprojektowany przez biuro projektowe Arup [9, 10]. W tradycyjnej wersji węzeł składał się z maksymalnie siedmiu unikatowych blach, które były wycinane i spawane do rury centralnej. Aby przeprowadzić optymalizację topologii, wykorzystano oprogramowanie, które na podstawie określonych warunków brzegowych stworzyło zoptymalizowaną geometrię węzła. Następnie projekt został dostosowany do procesu produkcyjnego, co pozwoliło na zmniejszenie zużycia materiału, redukcję kosztów i przyspieszenie procesu wytwarzania. Ostateczna wersja węzła ma formę dopasowaną do przebiegu sił wewnętrznych. Jest on o połowę niższy i o 75% lżejszy od pierwowzoru, dzięki czemu cała konstrukcja tensegrity ważyła o 40% mniej niż w przypadku zastosowania węzłów tradycyjnych [4].

Technologia Directed Energy Deposition

Wyróżniamy dwa podstawowe procesy wytwarzania w tej technologii (DED). Polegają one na bezpośrednim podawaniu metalicznego proszku (Powder Based DED) lub drutu (Wire Based DED) do punktu skupienia lasera, wiązki elektronowej lub łuku plazmowego, co prowadzi do powstania stopionego „jeziorka”, które może być osadzane selektywnie. Pierwsza metoda jest zalecana do produkcji części o złożonej geometrii. Podobnie jak w przypadku technologii PBF, proces wymaga szczelnej komory, w której panuje środowisko obojętne, co ma zapobiec utlenianiu. Wiąże się z tym ograniczenia dotyczące maksymalnych rozmiarów części i długi czas budowy, obecnie ok. 1 kg/h [4]. Chropowatość powierzchni wynosi zazwyczaj $20 \div 100 \mu\text{m}$. Natomiast drugi proces wykorzystuje narzędzia do spawania łukowego i drut jako materiał osadzający, a końcowy obiekt jest formowany całkowicie z osadzonego spoiwa. Połączenie łuku elektrycznego jako źródła ciepła i drutu jako materiału wsadowego jest określane jako WAAM i było badane pod kątem zastosowania w produkcji addytywnej od lat dziewięćdziesiątych XX w., chociaż pierwszy patent został zgłoszony w 1925 r. [11]. WAAM może wykorzystywać procesy takie jak spawanie łukowe w osłonie gazów aktywnych (GMAW), spawanie łukowe wolframem w osłonie gazów obojętnych (GTAW) oraz spawanie łukiem plazmowym (PAW) [4]. Procesy zachodzą wg zasady „linii widzenia” (line-of-sight), co oznacza, że w przeciwieństwie do metod PBF, ścieżka, po której porusza się narzędzie, może być ograniczona, a tym samym geometria możliwa do uzyskania jest mniej skomplikowana. Dodatkowo, wytworzone elementy zazwyczaj mają kształt zbliżony do ostatecznego (near-net shape), co często wymaga dodatkowej obróbki końcowej. Technologia ta pozwala na szybkie tempo osadzania (obecnie ok. 3 – 10 kg/h [11]) i praktycznie nieograniczone rozmiary elementów, przy chropowatości powierzchni ok. 500 μm . Metoda ta jest niewątpliwie najkorzystniejsza do zastosowania w budownictwie ze względu na najmniejsze

industry due to its lower costs compared to other additive manufacturing methods. This cost advantage primarily results from the use of standard, commercially available equipment and the lower cost of wire feedstock compared to metal powder. Additionally, WAAM offers the possibility of producing components directly at their intended location rather than within a sealed chamber. However, the method has some drawbacks, including high residual stresses in the printed components and distortions caused by the significant heat input. These stresses arise from material shrinkage during cooling and are most pronounced along the deposition direction. Some techniques exist to mitigate these stresses [11]. Another challenge is horizontal printing, as molten steel tends to drip from the weld pool.

The most well-known structure produced using WAAM technology is the **MX3D bridge in Amsterdam**, measuring 2.5 meters in width and 12 meters in total length. The bridge was designed by Joris Laarman Lab in collaboration with the engineering firm Arup. In 2021, it was officially inaugurated by the Queen of the Netherlands. Another example of WAAM technology application is the pedestrian bridge on the Darmstadt University campus, which, unlike the MX3D bridge, was built in situ (photo 1). The total length of the bridge ranges from 2.5 to 2.8 meters, while its width varies between 0.9 and 1.5 meters. By implementing a specific production sequence, alternating welding directions, and a cooling system using compressed air mixed with atomized water, it was possible to print the cantilevered sections of the bridge without the risk of molten steel dripping [12, 13]. The construction of the bridge began in September 2019 using a six-axis robot equipped with a controller, welding equipment, gas, and wire (GMAW welding method) and was completed in early November of the same year. Due to the need to clear the construction site, the side sections were not fully printed on-site (photo 1c).

As demonstrated by the examples below, WAAM technology can be used not only for constructing entire structures but also for reinforcing steel beams (photo 2a), fabricating spatial nodes (photo 2b), producing clamping elements for bracing (photo 2c), and even as an alternative to end plates in T-stub connections (Figure 2) [13, 14].

koszty w porównaniu z innymi metodami wytwarzania addytywnego. Wynika to przede wszystkim z wykorzystania standardowego, dostępnego na rynku sprzętu oraz niewielkich kosztów materiałów – drut stosowany jako surowiec jest znacznie tańszy od proszku metalicznego. Metoda pozwala również na wykonywanie elementów w miejscu docelowym, a nie w szczelnie zamkniętej komorze. Jej wadą są duże naprężenia szczałkowe w powstającym elemencie oraz odkształcenia wynikające z dużego dopływu ciepła. Naprężenia te powstają na skutek kurczenia się materiału podczas chłodzenia i są największe w kierunku osadzania, ale istnieją pewne metody pozwalające na ich ograniczenie [11]. Problemem jest też drukowanie w pozycji poziomej, ponieważ stopiona stal ma tendencję do ściekania z „jeziorka” spawalniczego.

Najbardziej znanym obiektem wykonanym przy użyciu technologii WAAM jest **most MX3D w Amsterdamie** o szerokości 2,5 m i całkowitej długości 12 m. Jego projekt został opracowany przez laboratorium Jorisa Laarmana we współpracy z biurem projektowym Arup. Most został oficjalnie otwarty w 2021 r. przez królową Holandii. Kolejny przykład to **kładka dla pieszych na kampusie Uniwersytetu w Darmstadt**, która w przeciwieństwie do mostu MX3D została wykonana in situ (fotografia 1). Jej całkowita długość 2,5 ÷ 2,8 m, a szerokość 0,9 – 1,5 m. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej kolejności produkcji, naprzemiennego kierunku spawania i systemu chłodzenia sprężonym powietrzem zmieszany z rozpyloną wodą, możliwe było wydrukowanie części wspornikowych kładki bez ryzyka ściekania stopionej stali [12, 13]. Prace nad kładką rozpoczęto we wrześniu 2019 r. przy użyciu sześcioośiowego robota wyposażonego w kontroler, sprzęt spawalniczy, gaz i drut (spawanie metodą GMAW), a zakończono na początku listopada tego samego roku. Ze względu na konieczność oczyszczenia placu budowy, pasy po bokach nie zostały całkowicie zabudowane na miejscu (fotografia 1c).

Technologia WAAM może być stosowana także do wzmacniania belek stalowych (fotografia 2a), budowy węzłów przestrzennych (fotografia 2b), elementów zaciskowych do stężeń (fotografia 2c), czy stanowić alternatywę dla blach węzłowych w połączeniach doczołowych (rysunek 2) [13, 14].

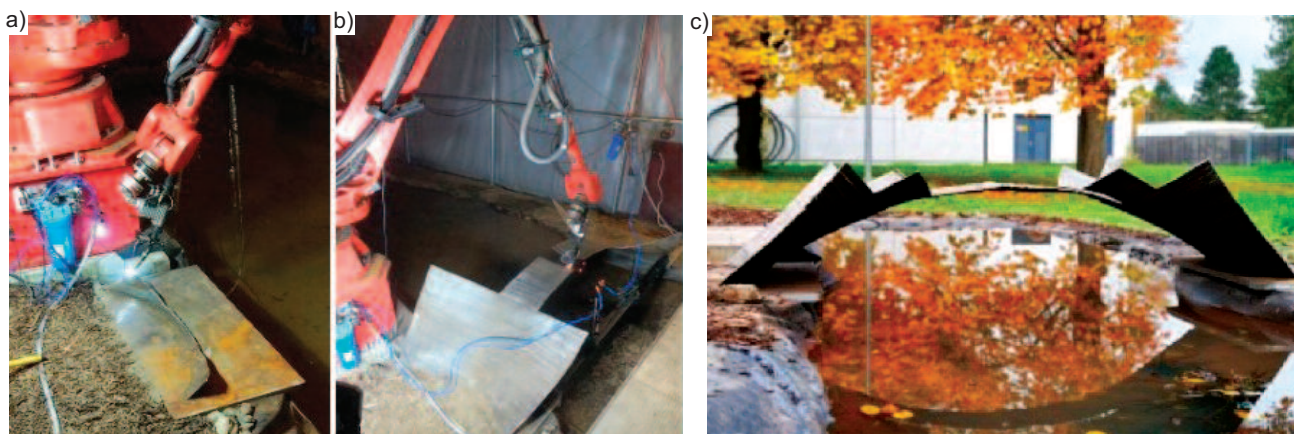


Photo 1. Stages of additive manufacturing of a pedestrian bridge using the WAAM method [12]

Fot. 1. Etapy addytywnej produkcji kładki dla pieszych metodą WAAM [12]

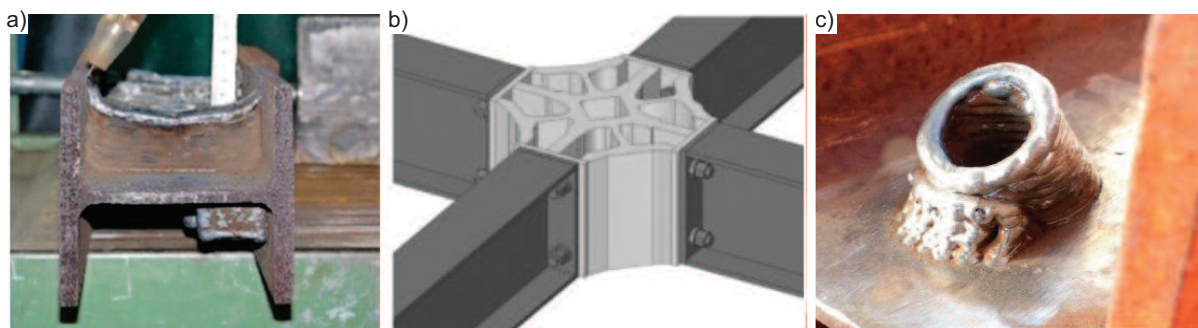


Photo 2. WAAM production of: a) stiffening rib; b) spatial node (visualisation); c) clamping element for bracing [13]

Fot. 2. Produkcja metodą WAAM: a) żebra usztywniającego; b) węzła przestrzennego (wizualizacja); c) elementu zaciskowego do stężeń [13]



Fig. 2. Beam end-plate connection: a) traditional solution; b) optimized connection [13]; c) connection prototype manufactured using the WAAM method [14]

Rys. 2. Węzeł doczołowy belek: a) tradycyjne rozwiązanie; b) zoptymalizowane połączenie [13]; c) prototyp połączenia wykonany metodą WAAM [14]

Advantages and disadvantages of additive manufacturing

The key advantages of additive manufacturing for metals are **primarily flexibility in creating complex geometries and optimizing structural elements**. Unlike traditional manufacturing, where increased design complexity leads to higher costs, in additive manufacturing, greater geometric complexity has little to no impact on the final cost. By placing material only in structurally optimal locations, material consumption is reduced. Traditional manufacturing methods rely on standardized components, such as steel profiles with fixed dimensions. These require cutting to size or shape, generating waste and increasing both economic and environmental costs. Additive manufacturing allows for the production of optimized structural elements tailored to specific project needs, reducing raw material consumption and the amount of waste requiring disposal [4].

However, additive manufacturing is currently seen as a complement to traditional construction methods rather than a complete replacement [4]. These so-called "hybrid solutions" combine conventional building materials with additively manufactured elements, which is particularly beneficial for geometrically complex structures. Additionally, 3D printing technologies can be used for repairing damaged or corroded structural elements and for reinforcing existing structures directly on-site.

The main drawbacks of additive manufacturing are the high costs of equipment, software, and (especially for powder bed technologies) the raw materials. It is estimated that the cost of basic WAAM technology equipment, including a six-axis

Zalety i wady produkcji addytywnej

Zalety produkcji addytywnej metali to przede wszystkim **elastyczność w tworzeniu geometrii elementów i ich optymalizacja**. W przeciwieństwie do tradycyjnej produkcji, gdzie im bardziej skomplikowany projekt, tym większe koszty, w produkcji addytywnej złożoność geometryczna ma niewielki lub wręcz żaden wpływ na ostateczny koszt. Dzięki możliwości umieszczenia materiału w miejscach optymalnych strukturalnie, uzyskuje się zmniejszenie zużycia materiału. Tradycyjne metody produkcji bazują na standaryzowanych komponentach, takich jak kształtowniki stalowe, które mają określone wymiary. Wymagają one przycinania do odpowiednich rozmiarów czy kształtu, co generuje odpady i zwiększa zarówno koszty ekonomiczne, jak i środowiskowe. Wytwarzanie addytywne umożliwia produkcję zoptymalizowanych elementów konstrukcyjnych dostosowanych do specyficznych potrzeb projektu. Dzięki temu zmniejsza się zużycie surowców oraz ilość odpadów wymagających utylizacji [4].

Wytwarzanie addytywne jest postrzegane raczej jako uzupełnienie tradycyjnych metod budowlanych niż ich całkowite zastąpienie [4]. Są to tzw. rozwiązania hybrydowe, łączące konwencjonalne materiały budowlane z elementami wytwarzanymi addytywnie, co może się sprawdzić przy bardziej złożonych geometrycznie elementach konstrukcji. Ponadto technologie druku 3D mogą być wykorzystywane do naprawy uszkodzonych lub skorodowanych elementów konstrukcyjnych, a także do wzmacniania istniejących konstrukcji.

Wady produkcji addytywnej, to przede wszystkim bardzo duże koszty sprzętu, oprogramowania, a w przypadku technologii opartej na złożu proszkowym również materiału. Szacuje się, że koszt podstawowego wyposażenia stosowane-

robot, power source, torch, and tooling, is around half a million PLN [11]. For simple geometries, it is uncertain whether AM will result in significant cost savings in labor or materials. Traditional manufacturing techniques, such as hot rolling and cold forming, remain effective for relatively simple and standardized geometries. Cases where AM can be cost-competitive compared to conventional manufacturing are primarily low-volume production runs.

Another barrier to the adoption of additive manufacturing is the need for a larger workforce of engineers familiar with digital technologies and advanced computational analysis. Due to the unknown material properties and behavior, as well as the lack of standardized design guidelines for AM-constructed structures, a new approach to structural design and verification is needed – one based on inspection and load testing.

Conclusions

3D printing, also known as additive manufacturing (AM), generally involves adding material layer by layer to build a specified structure. The Powder Bed Fusion (PBF) and Directed Energy Deposition (DED) technologies are among the most suitable additive manufacturing methods for metal construction. PBF and powder-based DED processes offer high precision, but they come with limitations in terms of production time and maximum component size. On the other hand, the Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) method, within the DED technology, enables faster and more cost-effective production with an almost unlimited scale of manufactured parts, although this comes at the expense of dimensional accuracy and surface quality.

Received: 24.03.2025

Revised: 12.05.2025

Published: 23.07.2025 r.

go w technologii WAAM, obejmującego sześciociosowy robota, źródło zasilania, palnik oraz oprzyrządowanie, wynosi ok. 0,5 mln zł [11]. W przypadku nieskomplikowanej geometrii nie jest pewne, czy AM przyniesie znaczne oszczędności kosztów ludzkich lub materiałowych. Dotychczas stosowane metody produkcji typu walcowanie na gorąco i formowanie na zimno sprawdzają się w przypadku prostych i znormalizowanych geometrii. AM może być konkurencyjna cenowo w porównaniu z konwencjonalną produkcją przy małych seriach produkcyjnych. Barię w stosowaniu produkcji addytywnej jest też konieczność zatrudnienia dużej liczby inżynierów posiadających wiedzę dotyczącą technologii cyfrowych i zastosowania zaawansowanej analizy komputerowej. Ze względu na nieznanne właściwości i zachowanie materiałów oraz brak wytycznych normowych dotyczących projektowania konstrukcji wytwarzanych metodami AM, potrzebny jest nowy sposób myślenia o projektowaniu i weryfikacji konstrukcji, bazujący na inspekcji i testach obciążeniowych.

Podsumowanie

Druk 3D, czyli produkcja addytywna (AM), w większości przypadków polega na dodawaniu materiału warstwa po warstwie w celu budowy danej struktury. Technologie Powder Bed Fusion (PBF) oraz Directed Energy Deposition (DED) należą do najbardziej odpowiednich metod addytywnego wytwarzania metali w budownictwie. Procesy PBF i DED bazujące na proszku zapewniają doskonałą precyzję wykonania, ale wiążą się z ograniczeniami dotyczącymi czasu produkcji oraz maksymalnych rozmiarów elementów. Z kolei metoda WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*), w ramach technologii DED, pozwala na szybką i ekonomiczną produkcję oraz niemal nieograniczoną skalę wytwarzanych elementów, mimo że odbywa się to kosztem dokładności wymiarowej i jakości powierzchni.

Artykuł wpłynął do redakcji: 24.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 12.05.2025 r.

Opublikowano: 23.07.2025 r.

Literature

- [1] Kathryn M. et al. Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. CIRP Annals – Manuf Technol. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
- [2] ASTM International. ISO/ASTM 52900:2015 (E), 2015, Standard terminology for additive manufacturing technologies – general principles – terminology.
- [3] <https://www.metal-am.com/introduction-to-metal-additive-manufacturing-and-3d-printing/metal-3d-printing-additive-manufacturing-processes>.
- [4] Buchanan C. Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. Engineering Structures. 2019; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>.
- [5] <https://prosolutions.pl/technologie-pbf/#more>.
- [6] Gu DD, Meiners W, Wissenbach K, Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. Int Mater Rev 2012; <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>.
- [7] Strauss H, Emmer Pfenninger Partner AG, Knaack U. Additive manufacturing for future facades: the potential of 3D printed parts for the building envelope. J Façade Des Eng 2015; <https://doi.org/10.7480/jfde.2015.3-4.875>.

- [8] Strauss H. AM envelope – the potential of additive manufacturing for façade construction. vol. 3, TU Delft; 2013.
- [9] Galjaard S, Hofman S, Ren S. New opportunities to optimize structural designs in metal by using additive manufacturing. Advances in architectural geometry. Springer International Publishing; 2014; 79–93.
- [10] <https://www.dezeen.com/2014/06/11/arup-3d-printed-structural-steel-building-components/>.
- [11] Williams SW. et. al. Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology. 2015; <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.
- [12] Feucht T, Waldschmitt B, Lange J, Erven M. 3D Printing with Steel: Additive Manufacturing of a Bridge in situ, Eurosteel 2021, Ernst&Shon; <https://doi.org/10.1002/cepa.1475>.
- [13] Lange J, Feucht T, Erven M. 3D printing with steel. Additive Manufacturing for connections and structures, Steel Construction. 2020; <https://doi.org/10.1002/stco.202000031>.
- [14] Erven M, Lange J, Feucht T. 3D Printing with steel of a bolted connection. Eurosteel 2021, Ernst&Shon; <https://doi.org/10.1002/cepa.1367>.