



Technological Processes for Wire Arc Additive Manufacturing

Vladimir PETKOV, Manahil TONGOV, Marina MANILOVA,
Radostina ZAEKOVA, Valentin ANGUELOV

Institute of Metal Science, Equipment And Technology With Hydroaerodynamics Centre “Acad. A. Balevski”
at the Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria,

e-mails: vladimir2pe@yahoo.com, tongov.tu@gmail.com, mamanil@abv.bg, rzaekova@mail.bg,
valentin.anguelov@ims.bas.bg

Abstract

One of the most used technologies that has been rapidly developing in recent years is related to the application of 3D printing. Layer by layer building of details through selective remelting or sintering processes is based on different welding (or similar) processes. Metals, polymers and ceramics in the form of powder or wire are used as materials for additive manufacturing. Of the high concentrated heat sources the most commonly used are the laser beam, the electron beam and the plasma arc.

Keywords: additive manufacturing, processes, selective melting, electron beam, laser, plasma arc.

Технологични процеси за послойно изграждане на детайли

Владимир ПЕТКОВ, Манахил ТОНГОВ, Марина МАНИЛОВА,
Радостина ЗАЕКОВА, Валентин АНГЕЛОВ

1. Увод

Технологичните процеси, които се използват за послойно изграждане на детайли не могат да останат встрани от проблемите, рефлектиращи върху енергийната ефективност, които следва да бъдат решавани независимо от напредъка в технологичното и обществено развитие. Заваръчните технологични процеси, в частност ориентираните към нанасяне на слоеве, които са в основата на посочените технологични варианти, не правят изключение в това отношение. При нанасянето на слоеве чрез претопяване на добавъчния материал количеството използвана енергия за единица обем (или маса) наварен метал както и количеството енергия влагана в изделието е силно зависима от използвания метод. Друга важна характеристика на процеса е неговата производителност – количеството нанесен метал за единица време. По отношение на топлинното въздействие върху получаваният или обработван детайл най-добри резултати дават лъчевите и плазмените методи. Лъчевите методи имат предимство, че лесно може да се регулира фокусирането и не оказват газодинамично въздействие върху обработвания материал, което ги прави подходящи при прахообразен добавъчен материал. Плазмената дъга създава възможност за постигането на по-висока производителност от гледна точка на количеството стопен метал за единица време. В същото време въпросът с управляването на нейното фокусиране не е решен. Успоредно с това процесите в дъгата водят до съществено газодинамично налягане върху обработвания материал. Това затруднява използването на прахообразни добавъчни материали. При използването на добавъчни материали под формата на тел предимствата на плазмените технологии са съществени поради по-големият размер на петното на

нагриване и очевидната възможност за изключване на получаваният детайл (или обработваната повърхнина) от електрическата верига (използва се непряка дъга) в резултат, на което съществено намалява дълбочината на провара. От друга страна поточното познаване на енергийните характеристики на топлинния източник и тяхната зависимост от параметрите на процеса дава възможност за по-ефикасно използване на технологичната адаптация (промяна на технологичните параметри на процеса на заваряване, в зависимост от моментното състояние и пространственото положение на обработваната повърхнина по време на реализиране на процеса), която навлиза широко в практиката чрез роботизираните системи. Трябва да се отбележи, че въпреки огромните усилия на изследователите, работещи в областта на заваръчните и сродни на заваряването процеси, все още механизмът на разпределение на енергията на топлинния източник не е напълно изяснен. Използването на експериментални и изчислителни (на основата на математическо и симулационно моделиране) методи дава възможност, както за по-задълбочено познаване на процесите и протичащите физични явления при селективно плазмено претопяване, така и за получаването на резултати, приложими в етапа на проектиране на технологичния процес и при самото му реализиране.

2. Състояние на изследванията по проблема

Днес се наблюдава огромен интерес към процесите на адиятивното производство (технологии за триизмерно отпечатване). Очаква се тези процеси коренно да променят начина и организацията на промишленото производство. В основата на тези очаквания са компютърното проектиране; възможността за изработване на детайли, които е трудно или невъзможно да бъдат изработени по друг начин; изработването на детайли непосредствено при потребителя; универсалност по отношение на формата на детайлите; преразпределяне на производството от големи към малки предприятия; понижаване на енергийните разходи и по такъв начин намаляване на въздействието върху околната среда. Всички тези методи [1]÷[5] имат една обща черта – послойно изграждане на детайла и отпадане на необходимостта от използването на различно технологично оборудване и планирането на множество последователни технологични операции. Засега изработването на детайли на конкурентни цени е насочено главно към тези, за които са приложими полимерни материали (обикновено термопласти) [6]. Детайлите от метали и сплави все още трудно достигат характеристиките на получаваните чрез конвенционални технологии. Това означава, че са необходими задълбочени научни изследвания в тази област. Класификация на основните използвани методи за изграждане на детайли от метали и сплави е показана на фиг. 1.

Едни от първите технологични процеси, изследвани по отношение на приложимостта им за изграждане на триизмерни детайли от метали и сплави, са селективното лазерно (Selective Laser Melting – SLM) и електроннолъчево (Electron-Beam Melting – EBM) претопяване (СЛП и СЕЛП, респективно) [4]÷[7]. Впоследствие приложение намират електродъговите ([7]÷[17]) и плазмените ([18]÷[22]) методи. Процесите на СЛП вече се използват за производството на метални изделия [23]. Тези процеси дават възможност за получаване на продукти чрез стопяване на прахообразна смес от различни метали и сплави с последваща кристализация на стопилката. Предимствата са висока степен на детайлизиране на получаваният продукт, висока плътност (до 99%), както и точност от порядъка на ± 5 микрона. В същото време СЛП има редица ограничения: необходимостта от използване на скъпо оборудване; високи експлоатационни разходи; високи енергийни разходи; ниска производителност (обикновено не повече от $10 \text{ [cm}^3/\text{h]}$); използване на скъпи добавъчни материали с високи изисквания по отношение на гранометричния и химичния състав, динамичния

вискозитет и други характеристики; недостатъчно високи якостни характеристики на получаваните изделия (в сравнение с конвенционалните технологии).



Фиг. 1. Класификация на методите за изграждане на детайли от метали и сплави.

В редица изследователски центрове (главно в САЩ – например изследователския център на НАСА в Ленгли (Хюстън) и космическия център Джонсън (Хамптън) [23]) се разработват процеси с използване на електронен лъч: изработване на изделия с произволна форма (Electron beam freeform fabrication – EBF3) и електроннолъчево претопяване (Electron-Beam Melting – EBM). При технологията за изработване на детайли с произволна форма електронният лъч се използва като източник на енергия за топене на добавъчен материал под формата на тел. Демонстрирани са резултати при алуминиеви и титанови сплави, представляващи интерес за космическа индустрия [23]. Има възможност за използването на сплави на основата на никел и желязо. Използването на технологията в други индустрии се ограничава от относително скъпата апаратура, високата цена на продукта, ограниченията за размерите на обработваните детайли и др.

В [23] е дадена следната хронология на опитите за използване на заваръчни технологии за получаване на триизмерни метални конструкции със сложни форми по метода на послойно изграждане на детайла или част от него:

- 1926 г. – патентовано е „използването на електрическа дъга като източник на топлина за получаване на обемни предмети чрез пръскане на разтопен метал в нанасяните слоеве“;
- 1971 г.– произведен е съд за високо налягане с използването на електродъгово заваряване (Mitsubishi, Япония), електрошлакова и ВИГ технология за получаване на продукт с функционално градиентни стени;
- 1983 г. – в САЩ се използва фасонно заваряване (комбиниран процес на заваряване и пластично деформиране) (Shape Welding) за производството на

големи по размер изделия от високолегирана стомана ($20MnMoNi5$) с тегло 79 тона;

- 1993 г. – в САЩ е патентована комбинирана технология за наваряване и фрезование на машина с ЦПУ (Shape Deposition Manufacturing – SDM);
- 1994–99 г. – разработена е технология за фасонно наваряване (Shaped Metal Deposition – SMD) за производство на корпуси на двигатели за корпорацията Rolls Royce (Великобритания).

В Германия през 60-те години са провеждани изследвания за създаване на триизмерни метални конструкции с помощта на фасонно заваряване. Въз основа на този процес компании като Krupp и Thyssen са организирали производството на големи части с проста геометрия, например съдове под налягане с тегло до 500 тона [23]. Компанията Babcock & Wilcox (САЩ) прилага процеса на „топене с пресоване“ (Shape Melting) за производство на големи метални конструкции и изделия от аустенитни стомани [7]. Понастоящем Rolls-Royce Corporation (Великобритания) работи върху използването на електродъгово заваряване, за да увеличи производителността на формоването и да намали нивото на отпадъци при производството на продукти от скъпи сплави [23]. Тази технология е успешно внедрена за производството на различни части за самолети от сплави на основата на никел и титан.

Чрез електродъгово наваряване с тел (Welding Arc Additive Manufacturing – WAAM) се изработват детайли от различни материали – конструкционни нисковъглеродни стомани [10], алуминиеви сплави [4] и др. (фиг. 2 и фиг. 3). За реализирането на процеса може да бъде изработено специализирано заваръчно оборудване [11].



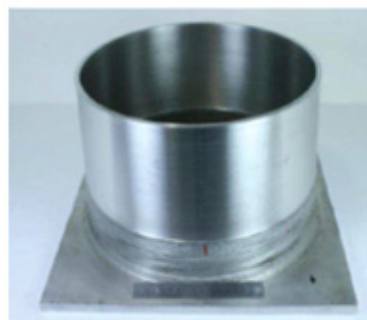
а)



б)



в)

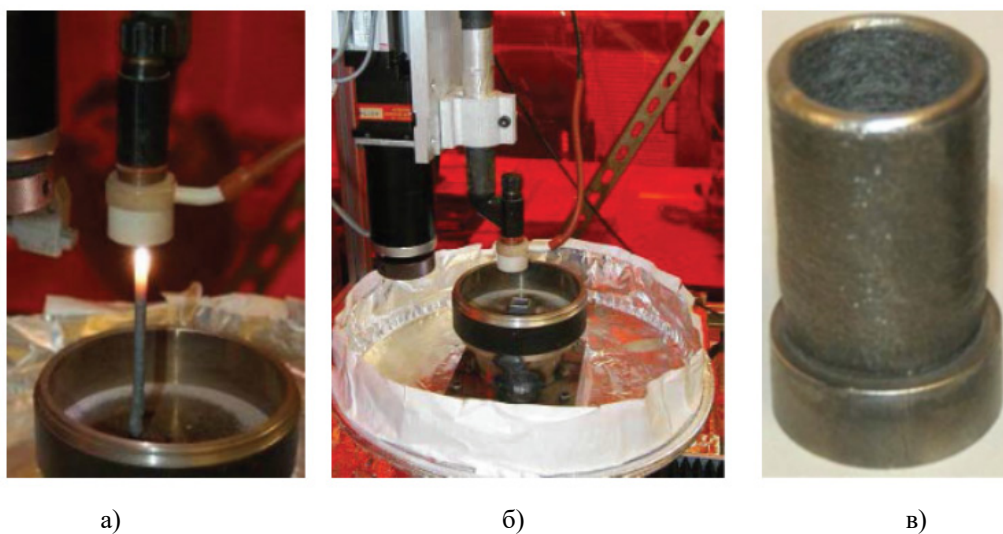


г)

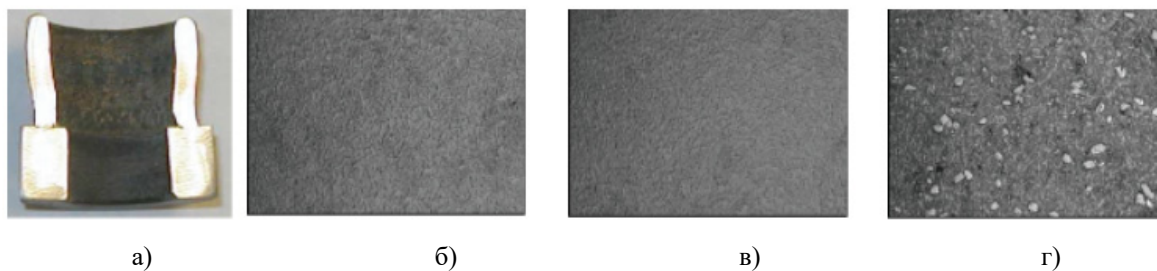
Фиг.2. Детайли, получени чрез електродъгови технологии. Изграждане на ребра на панели от въглеродна стомана (а, б и в) и алуминиева сплав (г).



Фиг. 3. Триизмерни детайли, получени чрез електродъгова технология с 3D-принтера Value Arc MA5000-S1 (Япония) [23]: детайли от въглеродна стомана (а), алуминий (б) и титан (в) без механично обработване; детайл от титан след механично обработване (г).



Фиг. 4. Микроплазмено изграждане на триизмерни детайли с използването на добавъчен материал под формата на прах [23]. Реализиране на процеса (а) с лабораторната апаратура (б); получен кух цилиндър от инструментална стомана (в).



Фиг. 5. Микроплазмено изграждане на триизмерни детайли с използването на добавъчен материал под формата на прах [23]. Напречно сечение на полученият цилиндър (а) и структура на метала в горната (б), средната (в) и долната (г) част на цилиндъра.

През последните години се проучват възможностите за използване на плазмени технологии за изграждане на триизмерни обекти. Като пример може да се посочат резултатите от изследвания в Тексас, САЩ (Southern Methodist University) на процеса на послойно изграждане на детайли с използването на прахообразен добавъчен материал и микроплазмен процес на претопяване [23] (фиг. 4). Показана е възможност за получаване на градиентни композитни структури по този метод (фиг. 5). Плазмен процес за получаване на детайли с градиент на свойствата е изследван и в Аахен (Германия) [18]. Добавъчният материал е под формата на тел и се използват телове с различен химичен състав.

3. Заключение

Анализираните литературни източници за изграждане на триизмерни детайли чрез електродъгови процеси (главно МИГ/МАГ и ВИГ) изучават предимно възможностите за тяхната реализация. Основните предимства на тези процеси: относително ниска цена; достъпност на технологията; осигуряване на добри условия за физико-металургичните процеси; ефективна локална защита на заваръчната вана; висока производителност на претопяване на добавъчния материал. Недостатъците на разглежданите процеси включват: значителния размер на зоната на термично влияние; големият размер на изграждащия слой; формиране на временни и остатъчни напрежения; понижена гъвкавост по отношение на химичния състав при използване на плътни електродни телове. Технологиите за плазмено претопяване с пряка дъга (РТА) имат по-широки технологични възможности [11]. Използването на тези технологии за производство на триизмерни метални предмети вместо МИГ/МАГ и ВИГ процеси може да намали или премахне някои от посочените недостатъци. Това означава, че с напредването на изследванията в областта на плазмените технологии тяхната приложимост за изграждане на триизмерни обекти ще нараства.

Благодарности

Тази разработка е направена с финансовата подкрепа на проект КП-06-Н57/10 към ФНИ.

Литература

1. Melecio, J.I., Mohammed, A., Schofield, N., Djurovic, S., 3D-Printed rapid prototype rigs for surface mounted PM rotor controlled segment magnetisation and, assembly, (2019) 2019 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2019, 2019-January, art. no. 8785121, pp. 1830-1836. DOI: 10.1109/IEMDC.2019.8785121

2. Withers, J.C., Pickard, S.M., Additive manufacturing to produce standard and custom alloy titanium, (2017) Minerals, Metals and Materials Series, Part F6, pp. 81-89.
3. Korzhyk, V., Khaskin, V., Voitenko, O., Sydorets, V., Dolianovskaia, O., Welding technology in additive manufacturing processes of 3D objects, (2017) Materials Science Forum, 906, pp. 121-130. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.906.121
4. Gu, J. The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy / J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, J. Bai, Y. Zhai, P. Ma // Materials Science and Engineering: A. – 2016. – Vol. 651. – P. 18–26. doi: 10.1016/j.msea.2015.10.101
5. Hascoet, J.Y., Karunakaran, K.P., Marya, S., Additive manufacturing viewed from material science: State of the art & fundamentals, (2014) Materials Science Forum, 783-786, pp. 2284-2289. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.783-786.2284
6. Bruce, M. R. Measurement and Simulation of Titanium Alloy Deposit Temperature in Electron Beam Additive Manufacturing // M. R. Bruce, S. F. Riley, M. J. Cola, V. R. Dave, J. E. Talkington // Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International Conference. – Chicago, Illinois, USA, 2012. – P. 963–969.
7. Martina, F. Investigation of methods to manipulate geometry, microstructure and mechanical properties in titanium large scale Wire+Arc Additive Manufacturing / F. Martina. – School of Aerospace, Transport and Manufacturing, Cranfield University, UK, 2014. – 178 p.
8. Williams, S. W. Wire + Arc Additive Manufacturing / S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove // Materials Science and Technology. – 2016. – Vol. 32, Issue 7. – P. 641–647. doi: 10.1179/1743284715y.0000000073
9. Colegrove, P. High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology / P. Colegrove, S. Williams. – Cranfield University, 2013. – 42 p. – Available at: <https://www.xyzist.com/wp-content/uploads/2013/12/Paul-Colegrove-Cranfield-Additive-manufacturing.pdf>
10. Wang, F. Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V / F. Wang, S. Williams, P. Colegrove, A. A. Antonysamy // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2012. – Vol. 44, Issue 2. – P. 968–977. doi: 10.1007/s11661-012-1444-6
11. Ding, J. Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture / J. Ding, P. Colegrove, F. Martina, S. Williams, R. Wiktorowicz, M. R. Palt // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 226. – P. 99–105. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.005
12. Donoghue, J. The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V / J. Donoghue, A. A. Antonysamy, F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, P. B. Prangnell // Materials Characterization. – 2016. – Vol. 114. – P. 103–114. doi: 10.1016/j.matchar.2016.02.001
13. Martina, F. Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components / F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, J. Meyer // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – Vol. 46, Issue 12. – P. 6103–6118. doi: 10.1007/s11661-015-3172-1
14. Colegrove, P. A. High Pressure Interpass Rolling of Wire + Arc Additively Manufactured Titanium Components / P. A. Colegrove, F. Martina, M. J. Roy, B. A. Szost, S. Terzi, S. W. Williams et. al. // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 996. – P. 694–700. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.996.694
15. Zahid, M., Hai, K., Khan, M., Shekha, A., Pervaiz, S., Ali, S.M., Abdul-Latif, O., Salman, M., Wire arc additive manufacturing (WAAM): Reviewing technology, mechanical properties, applications, and challenges, (2020) ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE), 2A-2020, art. no. V02AT02A042, DOI: 10.1115/IMECE2020-23961
16. Li, J.L.Z., Alkahari, M.R., Rosli, N.A.B., Hasan, R., Sudin, M.N., Ramli, F.R., Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing, (2019) International Journal of Automation Technology, 13 (3), pp. 346-353. DOI: 10.20965/ijat.2019.p0346
17. Haselhuhn, A.S., Wijnen, B., Anzalone, G.C., Sanders, P.G., Pearce, J.M., In situ formation of substrate release mechanisms for gas metal arc weld metal 3-D printing, (2015) Journal of Materials Processing Technology, 226, pp. 50-59. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.06.038

18. Reisgen, U., Sharma, R., Oster, L., Plasma multiwire technology with alternating wire feed for tailor-made material properties in wire and arc additive manufacturing, (2019) *Metals*, 9 (7), art. no. 745, DOI: 10.3390/met9070745
19. Alhuzaim, A. F. Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture / A. F. Alhuzaim. – Montana Tech of the University of Motana, 2014. – 246 p.
20. Korzhik, V. N. 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review) / V. N. Korzhik, V. Y. Khaskin, A. A. Grinyuk, V. I. Tkachuk et. al. // *The Paton Welding Journal*. – 2016. – Vol. 2016, Issue 6. –P. 117–123. doi: 10.15407/tpwj2016.06.20
21. Korzhyk, V. Features of joint formation in hybrid plasma-arc welding of aluminum alloys [Text] / V. Korzhyk, V. Khaskin, A. Grinyuk, O. Babych // *American Scientific Journal*. – 2016. – Issue 6. – P. 36–43.
22. Rosli, N.A., Alkahari, M.R., Ramli, F.R., Sudin, M.N., Maidin, S., Single layer formation of plasma based wire arc additive manufacturing, (2020) *International Journal on Engineering Applications*, 8 (3), pp. 89-95. DOI: 10.15866/irea.v8i3.17953
23. Peleshenko, S., Korzhyk, V., Voitenko, O., Khaskin, V., Tkachuk, V., Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review), (2017) *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (1-87), pp. 42-52.