한국기계가공학회지, 제18권, 제11호, pp.103～108(2019.11) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 18, No. 11, pp.103~108(2019.11) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2019.18.11.103

곡선형 형상적응형 냉각채널을 갖는 금형 코어 제작을 위한 DMT 공정개발

한지수*, 유만준**, 이민규*, 이윤선*, 김우성*, 이호진*, 김다혜*, 성지현*, 차경제*,#

*한국생산기술연구원 극한가공기술그룹, **구미에이테크솔루션(주)

Development of Direct Metal Tooling (DMT) Process for Injection Mold Core with Curved Conformal Cooling Channel

Ji Su Han*, Man Jun Yu**, Min Gyu Lee*, Yoon Sun Lee*, Woo-Sung Kim*, Ho Jin Lee*, Da Hye Kim*, Ji Hyun Sung*, Kyoung Je Cha*#

*Extreme Fabrication Technology Group, KITECH, **KUMI A-TECH SOLUTION CO., LTD.

(Received 6 August 2019; received in revised form 5 September 2019; accepted 18 September 2019)

ABSTRACT

The cooling rate and the uniformity of mold temperature, in the injection molding process, possess great influences on the productivity and quality of replications. The conformal cooling channel, which is of a uniform spacing from the mold cavity by the metal additive manufacturing process, receives much attention recently. The purpose of this study is to develop a mold core with a curved conformal cooling channel for a pottery-shaped thick-wall cosmetic container through the hybrid method of direct metal tooling (DMT) process. In this study, we design a mold core that contains the curved cooling channel for the container. A method that divides the cavity is proposed and the DMT process is carried out to form the curved cooling channel. The test mold core, with the curved conformal cooling channel, has been fabricated by the proposed method to confirm the feasibility of the design concept. We show that no leakage is observed for the additive manufactured test mold core, and its physical properties demonstrate that it can be sufficiently used as the injection mold core.

Key Words : Conformal Cooling Channel(형상적응형 냉각채널), Mold Core(금형 코어), Thick Wall Injection Molding(후육사출성형), Direct Metal Tooling(직접 금속 조형)

1. 서 론

사출성형공정은 용융된 플라스틱 수지를 금형에 고압으로 채운 후 냉각시켜 원하는 형상의 성형품을 만드는 기술이며, 치수 정밀도가 우수하고 복잡한 형상의 제품을 한번에 제조할 수 있어 대량생산에 적합한 공정기술이다. 사출성형은 충진, 보압, 냉각, 이형의 순서로 이루어지며, 각 과정의 공정 조건은 사출품의 외관, 품질, 치수정밀도, 생산성 등에 직접적인 영향을 준다. 특히, 사출성형공정에서 냉각과정은 전체 사출 사이클의 약 70~80%를 차지하

Corresponding Author : kjcha@kitech.re.kr
Tel: +82-53-580-0138, Fax: +82-53-580-0130

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

며, 금형과 수지의 온도 변화는 사출품의 치수 정밀도와 변형에 가장 큰 영향을 주기 때문에 냉각 시스템에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다[1~3].

최근 제조업에 있어 4차 산업혁명과 더불어 적층가공(Additive manufacturing)기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 적층가공기술은 기존의 절삭가공공정과 달리 한층 씩 형상을 적층하여 제품을 제작하는 공정으로 최근 적층가공기술을 사출금형 산업분야에 적용하기 위한 많은 노력들이 이루어지고 있다[4]. 금형의 완성품 표면과 일정한 거리를 유지하여 효과적으로 금형의 온도를 제어하는 형상적응형 냉각채널(Conformal Cooling Channel) 기술이 대표적인 예이며, 이를 통해 사출품의 품질 뿐만 아니라 생산성과 경제성을 향상시킬 수 있다[5~6].

형상적응형 냉각채널을 구현하기 위한 금속적층가공 방법으로는 크게 PBF(Powder Bed Fusion) 방식과 DED(Direct Energy Deposition) 방식으로 나눌 수 있다. PBF 방식은 냉각채널의 형상 자유도는 높으나 분말이 장비에 국한되며 금형 코어 전체를 적층하기에는 많은 시간과 비용이 필요하다[7]. 반면에 DED 방식은 분말의 선택은 자유로울 수 있으나 복잡한 형상의 냉각채널을 직접적으로 구현하기에는 어려움이 있다. 그래서 냉각채널의 직선부는 기계가공을 하고 채널의 연결부분은 쿠폰으로 덮은 후 적층공정을 통해 냉각채널을 완성하는 하이브리드 적층방식으로 구현되어 왔다[8]. 하지만 곡선형 냉각채널의 경우에는 적층공정 장비의 노즐 간섭의 문제로 인해 이에 대한 연구 및 적용 사례는 적다.

본 연구에서는 곡선형 형상적응형 냉각채널을 포함하는 금형 코어 제작하기 위한 DMT(Direct Metal Tooling) 공정에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 곡선형 냉각채널이 포함된 대상 금형을 설계하고 DMT 공정을 통해 대상 금형을 구현하기 위해서 분할 코어 방식을 고안하였다. 고안한 방법의 가능성을 확인하기 위한 테스트 금형 코어를 제작한 후 누수와 표면 경도를 평가하였다.

2. 형상적응형 냉각채널

2.1 DMT 공정 시스템

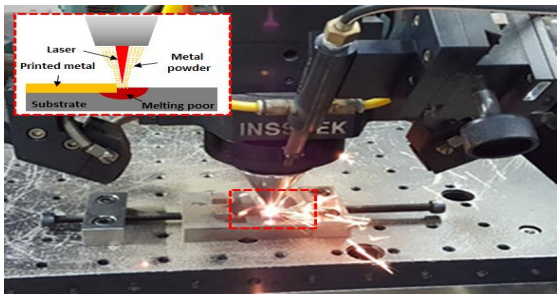

Fig. 1 Metal 3D printing by DMT process

DMT 공정은 고출력의 레이저 빔을 모재의 금속 표면에 국부적으로 조사하여 순간적인 용융 풀을 생성시킨 후 금속 분말을 공급하여 크래딩 층을 형성한다(Fig. 1). 이러한 공정을 layer-by-layer 형태로 반복하여 3D CAD 모델과 동일한 3차원 형상을 제작한다[9]. 고가의 특수 금속분말을 사용하는 PBF 방식과 달리 DMT공정은 구형의 일반 산업용 금속을 사용하기 때문에 사출이나 프레스, 전단 금형 기술 분야에 효과적으로 적용할 수 있는 장점이 있다[10, 11].

2.2 DMT 공정을 이용한 형상적응형 냉각채널

DMT 공정을 포함하는 DED 방식의 적층방법은 모재의 표면과 함께 금속분말을 녹여 적층하는 방식으로 실제 사출금형의 형상적응형 냉각채널을 포함하는 코어부를 모두 구현하기에는 비효율적이다. 일반적으로는 Fig 2와 같이 형상적응형 냉각채널의 직선부와 냉각채널의 연결부를 덮는 쿠폰은 기계가공을 통해 제작하고 쿠폰을 삽입한 후 남은 공간을 적층 가공하여 형상적응형 냉각채널을 구현하는 하

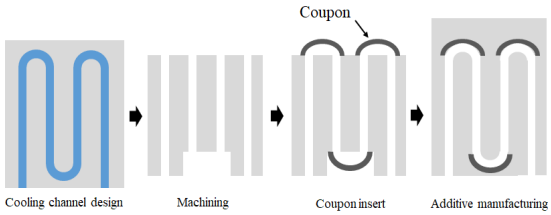

Fig. 2 Schematic diagram for the conformal cooling channel by hybrid method of DMT process

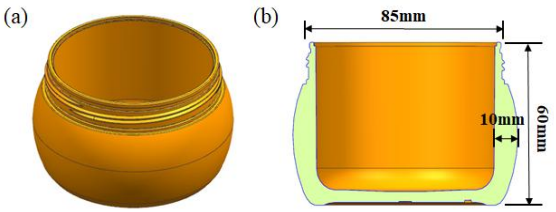

Fig. 3 Design of cosmetic bottle product with thick wall

이브리드 쾌속 툴링(Hybrid rapid tooling) 공정을 활용한다. 이러한 방법은 제품형상이 한 방향으로 길게 생긴 컵이나 피스톤과 같은 원통형 금형 코어에 효율적으로 적용할 수 있으며, 일정 수준 이상의 냉각효율도 기대할 수 있다.

2.3 금형 코어 형상 및 곡선형 형상적응형 냉각채널 설계

본 연구의 대상 제품은 Fig. 3과 같이 지름 85mm, 높이 60mm 크기의 화장품 용기이며, 제품의 최대 두께는 10mm로 두께 차이가 큰 사출성형품이다. 제품의 두께 차이가 크기 때문에 일반적인 냉각채널에서는 금형 표면의 균일한 온도 제어가 되지 않아 제품의 불균일한 수축에 의한 변형이 예상된다. 이에 대상금형을 2 캐비티 슬라이드 금형으로 설계하고 금형 코어 내부 냉각수로를 제품의 표면에 4mm 만큼 일정한 거리를 두고 둘레를 따라 5번 왕복하는 곡선형 냉각채널을 설계하였다 (Fig. 4).

하지만 설계된 대상 금형은 적층 테이블에 고정되어 있어 Fig. 5와 같이 곡선형 냉각 채널의 바깥 부분은 노즐의 간섭으로 인해 적층 공정이 불가한 문제점이 있다. 이에 노즐의 간섭 없이 캐비티를 모두 적층하기 위해서 슬라이드 코어 금형을 캐비티 중심부에서 분할하여 적층하는 방식을 구상하였다.

본 연구에서는 실제 대상 금형 중 1개의 캐비티를 유사한 형상으로 설계하여 앞서 구상한 분할 적층 방식의 구현 가능성 및 이를 구현하기 위한 적층 공정에 대한 연구를 수행하였다. 대상 금형의 캐비티 형상과 곡선형 냉각채널을 갖는 분리된 테스트 금형 코어와 함께 냉각 채널을 덮을 수 있는 4개의 쿠폰을 설계하였다(Fig. 6). 그리고 적층 공정

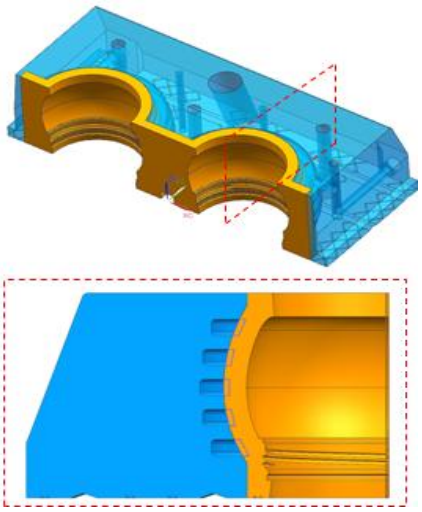

Fig. 4 Design of target slide mold core

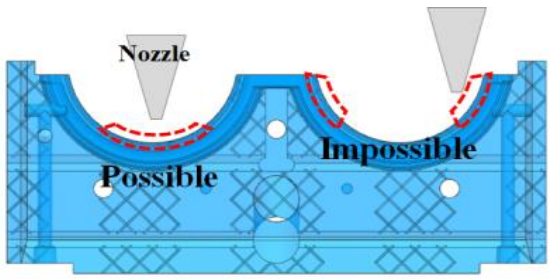

Fig. 5 Problem of the DMT process on side of cavity due to inference between nozzle and mold core

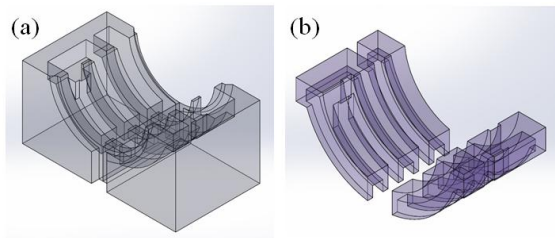

Fig. 6 Design of test mold core to check the possibilities of curved cooling channel: (a) Machined test mold core and (b) coupons

중에 발생할 수 있는 변형 등의 문제점들을 고려하여 적층 공정 순서를 Fig. 7과 같이 설계하였다.

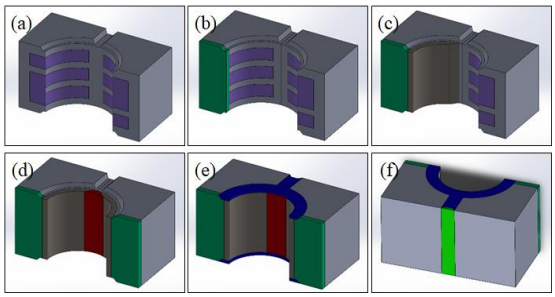

Fig. 7 Procedure of DMT process for fabricating of test mold core: (a) Assembling machined mold core and coupon, (b) the front side deposition, (c) the cavity deposition, (d) the connect side deposition, (e) the upper and lower side deposition, and (f) the back side deposition

3. 테스트 금형 코어 제작 및 특성

3.1 테스트 금형 코어 제작방법

적층에 앞서 설계한 곡선형 냉각채널이 포함되어 있는 분할된 테스트 금형 코어와 4개의 쿠폰을 기계가공을 통해 제작하였다 (Fig 8(a)). 화장품의 용기의 경면성을 확보하기 위해 스테인리스 금형공구강의 일종인 STAVAX ESR 소재를 사용할 계획이며, 본 연구에서도 이와 동일하게 STAVAX 소재로 테스트 금형 코어 및 쿠폰을 제작하였다. 기계 가공된 테스트 금형 코어와 쿠폰을 열박음을 통해 조립하여 냉각수의 누수 가능성을 최소화 하였다 (Fig 8(b)).

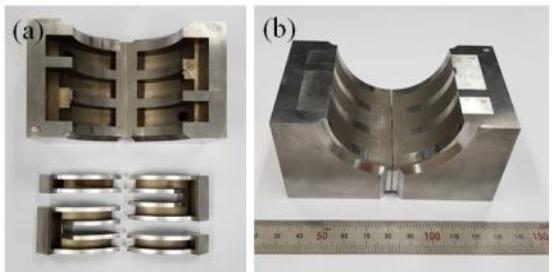

Fig. 8 (a) Machined core parts and coupons and (b) assembled test mold core

Table 1 DMT Processing conditions

Process parameter	Units	Value
Laser power	W	300~480
Feed rate	g/min	5.5
Scan speed	m/min	0.85
Gas flow rate	L/min	8
Slicing layer height	mm	0.25

본 연구에서는 대상 금형의 소재(STAVAX)와 같은 계열의 고경도 스테인리스 분말인 Sandvik Osprey의 SUS420J2 분말을 사용하여 적층 공정을 수행하였다. 직경 45~150㎛의 구형 분말로 제조되었으며, 이와 같은 고경도 스테인리스 소재는 경면성, 내마모성, 내부식성이 우수하여 정밀 사출금형에 많이 사용된다[12].

적층 공정은 (주)인스텍의 MX-311 적층 장비로 수행되었으며, 본 장비는 Yitterbium fiber laser (max. 2.0kW)를 사용하며, 분말 공급기, 빔 전공 광학계. 불활성 가스 공급 장치 등으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 레이저 파워(Laser power) 300~480 W, 분말공급량(Feed rate) 5.5 g/min, 적층 속도(Scan speed) 0.85 m/min, 보호가스유량(Shielding gas flow rate) 8 L/m 으로 적층조건을 설정하였다 (Table 1).

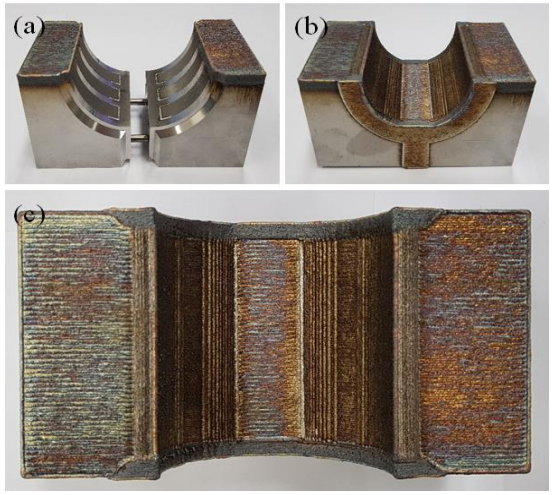

Fig. 9 Additive manufactured test mold core by DMT process

Fig 9은 적층공정 과정의 테스트 금형 코어를 보여준다. 앞서 설계한 공정 순서대로 적층을 수행하였으며, 적층 후 금형 표면부 가공의 가공 여유를 고려하여 약 4mm 두께로 적층하였다. 분리된 테스트 금형 코어를 각각 적층한 다음 결합하여 결합부 및 측면을 적층하여 하나의 금형 코어를 제작하였다(Fig. 9(a) and (b)). 금형 코어의 표면부 또한 특별한 결함이나 변형은 발생하지 않고 성공적으로 적층되었음을 확인할 수 있다(Fig. 9(c)).

3.2 테스트 금형 코어 제작결과 및 분석

일반적으로 DMT 공정 시 고온에서 녹은 모재와 분말은 증착됨과 동시에 냉각 되면서 경도가 높아지는 현상이 발생한다. 이는 추후 표면부 가공에 있어 공구의 파손이나 적층물 표면 크랙을 발생시킬 수 있어 풀림 열처리 공정을 수행 후 경면가공을 통해 테스트 금형 코어를 완성하였다(Fig. 10).

적층 가공된 금형 코어는 내부 응력으로 인한 미세 균열이 발생할 수 있다. 이에 냉각채널의 미세 균열 및 누수 여부를 확인하기 위해 코어 내부의 형성된 냉각채널에 약 0.7 MPa 의 공압을 가해 공압이 유지되는지를 확인하였다(Fig. 11). 그 결과 10분이 지남에도 압력을 유지하는 것을 확인하였으며 이를 통해 코어 내부에 형성된 곡선형 냉각채널이 누수 없이 성공적으로 제작되었음을 확인할 수 있었다.

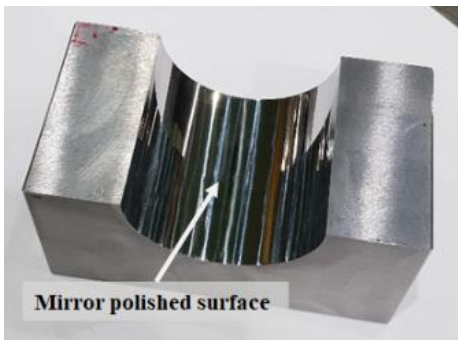

Fig. 10 Finally fabricated test mold core with the curved conformal cooling channel

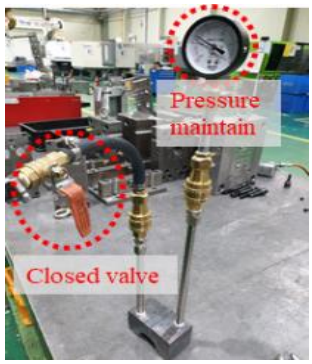

Fig. 11 Air leakage test of the test mold core

테스트 금형 코어를 절단하여 적층부와 쿠폰의 경계를 현미경으로 관찰한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Table 2는 적층부, 쿠폰, 모재의 완전 풀림(Annealing) 전후의 경도 측정 결과이다. 적층부의 경우 적층과정에서 상온 냉각이 이루어지면서 경도가 582Hv로 증가하였으며, 완전 풀림 처리를 한 이후에는 세 부분 모두 210Hv 수준으로 비슷한 경도값을 나타내었다. 이는 본 대상 금형과 같이 적층 후 적층부에 후가공이 필요한 경우 적층부의 취성을 개선하기 위해서 풀림 열처리가 필요한 것으로 판단된다.

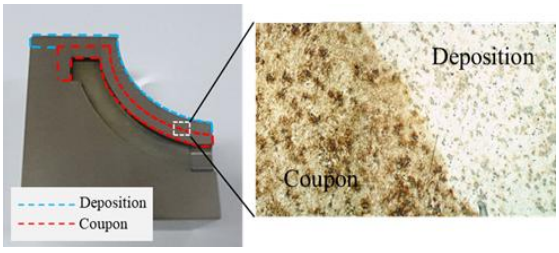

Fig. 12 Photograph and microscope image of the sectioned test mold core

Table 2 Measured hardness of the test mold core

Measure	Hardness (Hv)	
	Before Annealing	After annealing
Deposited part	582	212
Coupon part	364	213
Base part	362	210

4. 결 론

본 연구에서는 DMT공정을 이용한 후육 화장품 용기용 곡선형 형상적응형 냉각채널이 포함된 금형 코어 개발을 위한 연구를 수행하였다. 대상 제품의 생산성 향상을 위한 냉각채널을 설계하고 이를 구현하기 위한 DMT 공정 방법을 제안하였다. DMT 공정 중 노즐 간섭으로 인한 적층가공의 한계를 캐비티를 분할 적층 방법을 통하여 적층 및 결합함으로써 곡선형 형상적응형 냉각채널이 포함된 테스트 금형 코어를 구현할 수 있었다. 또한, 이렇게 완성된 테스트 금형 코어는 누수가 없음을 확인하였고 표면경도를 분석하여 금형 코어로 활용 가능한 것을 확인 할 수 있었다.

추후 본 연구를 통해 개발된 방법을 통해 대상 금형의 슬라이드 코어를 제작하고, 그 밖에 금형 파트를 제작을 완료하여 곡선형 형상적응형 냉각채널이 포함된 적층 금형의 특성 분석 및 생산성에 대한 연구가 진행되어야 될 것으로 사료된다.

후 기

“이 논문은 2018년도 산학연(산연전용) 기술개발사업(S2635352)과 한국생산기술연구원 복합기능구현 적층성형기술개발 및 기업지원사업”과제에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

1. Qiao, H., “A Systematic Computer-aided Approach to Cooling System Optimal Design in Plastic Injection Molding”, International Journal of Mechanical Sciences 48, pp. 430-439, 2006.
2. Park, S. J. and Kwon, T. H., “Optimal Cooling System Design for the Injection Molding Process,” Polymer Engineering and Science, Vol. 38, pp. 1450-1462, 1998.
3. Altan, T., Lilly, B. and Yen, Y. C., “Manufacturing of Dies and Molds,” CIRP Annals, Vol. 50, Issue 2, pp. 404-422, 2001.
4. Ahn, D. G., “Direct Metal Additive Manufacturing Process and Their Sustainable Applications for Green Technology : A Review,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol. 3, No. 4, pp. 381-395, 2016.
5. Chen, L., He, Y., Yang, Y., Niu, S. and Ren, H., “The Research Status and Development Trend of Additive Manufacturing Technology,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 3651-3660, 2017.
6. Sachs, E., Wylonis, E., Allen, S., Cima, M. and Guo, H., “Production of Injection Molding Tooling with Conformal Cooling Channels using the Three Dimensional Printing Process,” Polymer Engineering and Science, Vol. 40, No. 5, pp. 1232-1247, 2000.
7. Jahan, S. A. and El-Mounayri, H., “Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding,” Procedia Manufacturing, Vol. 5, pp. 888-900, 2016.
8. Park, H. S. and Dang, X. P., “Development of a Smart Plastic Injection Mold with Conformal Cooling Channels,” Procedia Manufacturing 10, pp. 48-59, 2017.
9. Ahn, D. G., Park, S. H. and Kim, H. S., “Manufacturing of an Injection Mould with Rapid and Uniform Cooling Characteristics for the Fan Parts using a DMT Process,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 11, No. 6, pp. 915-924, 2010.
10. Kim, W. S., Hong, M. P., Park, J. S., Lee, Y. S. and Cha, K. J., “Case Studies on Applications of Conformal Cooling Channel Based on DMT Technology,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, pp. 9-14, 2015.
11. Hong, M. P., Kim, W. S., Sung, J. H., Kim, D. H., Bae, K. M. and Kim, Y. S., “High-performance Eco-friendly Trimming Die Manufacturing using Heterogeneous Material Additive Manufacturing Technologies,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-green Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 133-142, 2018.
12. Available on http://www.tokkin.com/materials/stainless_steel/martensite.