

Ni/Mo 합금분말(FLC-4608)의 소결경화 공정에서 유한요소법을 이용한 마르텐사이트 분율의 예측

박효욱^a · 주수현^b · 이언식^c · 권기혁^c · 김형섭^{a,b,*}

^a포항공과대학교, 신소재공학과, ^b포항공과대학교, 항공재료연구센터,
^c포항산업과학연구원, 재료공정연구소

Prediction of Martensite Fraction in the Sintering Hardening Process of Ni/Mo Alloy Powder (FLC-4608) Using the Finite Element Method

Hyo Wook Park^a, Soo-Hyun Joo^b, Eon Sik Lee^c, Ki Hyuk Kwon^c, and Hyong Seop Kim^{a,b,*}

^aDepartment of Materials Science and Engineering, POSTECH (Pohang University of Science and Technology), Pohang 790-784, Korea

^bCenter for Advanced Aerospace Materials, POSTECH (Pohang University of Science and Technology), Pohang 790-784, Korea

^cMaterials Research Division, RIST, Pohang 790-784, Korea

(Received February 21, 2015; Revised February 24, 2015; Accepted February 25, 2015)

Abstract In recent years, industrial demands for superior mechanical properties of powder metallurgy steel components with low cost are rapidly growing. Sinter hardening that combines sintering and heat treatment in continuous one step is cost-effective. The cooling rate during the sinter hardening process dominates material microstructures, which finally determine the mechanical properties of the parts. This research establishes a numerical model of the relation between various cooling rates and microstructures in a sinter hardenable material. The evolution of a martensitic phase in the treated microstructure during end quench tests using various cooling media of water, oil, and air is predicted from the cooling rate, which is influenced by cooling conditions, using the finite element method simulations. The effects of the cooling condition on the microstructure of the sinter hardening material are found. The obtained limiting size of the sinter hardening part is helpful to design complicate shaped components.

Keywords: Sinter hardening, Finite element method, End quench test, Hardenability

1. 서 론

분말야금은 금속 분말을 사용하여 성형공정을 거치고 소결을 통해 다양한 부품을 만드는 기술로 복잡한 형상의 부품 등을 대량으로 생산 가능하며 노동력, 재료 및 에너지의 소비를 낮추어 절약할 수 있는 경제적인 생산방법이다[1-2]. 이러한 분말야금법의 장점 때문에 일반적인 소결 공정으로 생성되는 부품은 최근 자동차, 전자 및 기계 부품의 제조에 폭넓게 적용되고 있지만, 주조 및 단조로 제조된 부품에 비하여 내부의 기공 등에 의해 상대적으로

강도가 낮다. 그래서 더 우수한 강도가 필요한 부품을 제조하기 위해서는 소결된 부품의 미세조직인 페라이트 및 펄라이트 조직을 고온으로 승온 후 급랭을 통해 마르텐사이트 조직으로 개질시켜 강도를 증가시킨다. 일반적인 소결공정에서는 소결 후 소결로의 냉각부에서 서냉을 하여 온도 변화가 천천히 일어나게 되어 마르텐사이트가 생성되지 않지만, 소결경화 (sinter hardening) 공정은 소결을 마치고 냉각부에서 급랭을 통해 재료에 급격한 온도변화를 주게 되어 미세조직을 마르텐사이트로 만들어 마르텐사이트 생성을 위한 소결 후 열처리 공정을 생략할 수 있

*Corresponding Author: Hyong Seop Kim, TEL: +82-54-279-2150, FAX: +82-54-279-2399, E-mail: hskim@postech.ac.kr

으므로 공정단축으로 인한 비용절감을 이룰 수 있는 이점이 있다[3].

소결경화 공정에서 마르텐사이트의 분율을 증가시켜 부품을 강화시키기 위해서는 크게 두 가지 방법이 있다. 첫 번째로는 합금원소를 첨가하여 분말의 경화능을 향상시키는 것인데, 합금분말의 경우는 합금원소가 분말내부에 고루 분포되어 확산접합 분말에 비하여 높은 경화능을 가지고 있지만 높은 강도 때문에 성형성은 떨어지게 된다. 다른 하나는 냉각속도를 빠르게 하여 낮은 경화능을 가지는 분말을 소결경화 공정에 사용하여도 마르텐사이트 조직을 형성시키는 것이다[4-10].

지금까지는 소결강화 공정에서 충분한 마르텐사이트를 생성하여 제품에 필요한 강도를 만족시키는 냉각속도를 찾기 위해서는 실험을 통해서 밖에 가능하지 못하였으나, 본 연구에서는 냉각속도와 마르텐사이트 분율의 관계를 모델링하고 유한요소해석 시뮬레이션에 적용해 소결강화 공정에서 부품의 미세조직의 분율을 예측하고자 한다. 분말의 경화능 시험의 전산모사를 통해 냉각조건에 따른 냉각속도를 계산하였으며 냉각속도에 따른 마르텐사이트 분율에 대한 예측을 하였고 그 결과 소결강화 공정이 적용 필요한 냉각속도 및 가능한 부품의 크기를 확인하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서 소결경화에 사용되는 분말 Höganäs 사의 FLC-4608 분말의 냉각속도에 따른 마르텐사이트의 분율에 대한 유한요소해석에는 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-2D 9.0을 이용하여 진행하였다. FLC-4608을 냉각속도를 차이에 따른 마르텐사이트의 분율을 측정된 문헌[4]의 실험 결과를 모델링하여 유한요소해석을 시행하였다.

FLC-4608은 Fe 분말에 Ni과 Mo의 합금분말로 이루어져 있으며 Cu와 graphite 분말이 혼합된 분말로 조성은 표 1과 같다. FLC-4608 분말에 0.7 wt% C를 첨가한 분말을 압분 밀도가 7.0 g/cm³ 되도록 압분한 후 소결온도 1120°C, 소결분위기 90% N₂/10% H₂, 25 분동안 Dilatometer에서 소결하고 냉각속도를 0.25°C/s에서 10°C/s까지 조절하여 냉각하였다. 냉각속도는 800°C에서 300°C까지의 평균 냉각속도를 통해 구하였다.

냉각 시뮬레이션에서 마르텐사이트 생성량 예측을 위해

Table 1. Composition (wt%) of FLC-4608

	Ni*	Mo*	Fe	Cu	C
FLC-4608	0.9	0.55	Balance	2	0.8

*Prealloyed

서 냉각속도의 로그값과 마르텐사이트 분율을 수식 (1)과 같이 선형 관계식으로 모델링하여 유저 서브루틴으로 유한요소해석에 적용하였다.

$$F = A \times \log CR + B \quad (1)$$

여기서, F는 마르텐사이트 분율, CR은 냉각속도를 나타내고 A, B는 상수이다. A는 0.6739를 가지고 B는 0.6913의 값을 가지게 된다. 그림 1은 실험결과와 모델을 나타낸 그래프이다. 서브루틴을 통하여 요소에 800°C까지 냉각된 시간과 300°C까지 냉각된 시간으로 평균 냉각속도를 계산

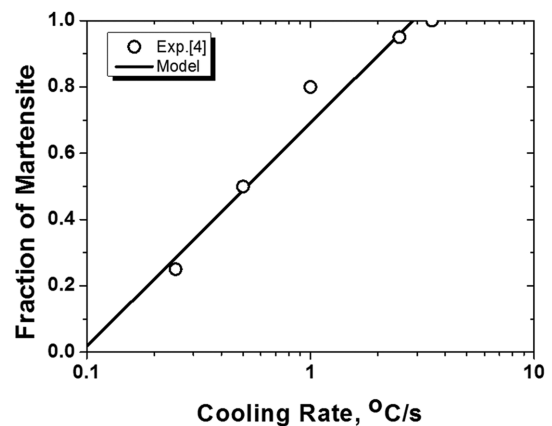


Fig. 1. Effect of cooling rate on the microstructure of FLC-4608.

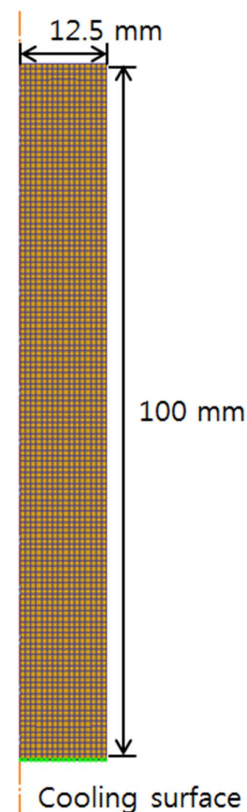


Fig. 2. FEM simulation condition.

Table 2. Average heat transfer coefficients in various cooling media

	Water	Oil	Air
h, W/m ² K	10	2	0.3

하고 수식 (1)을 이용해서 마르텐사이트 분율을 구하였다. 그림 2는 유한요소해석에 해석에 이용한 시편과 냉각표면을 나타낸 그림이다. 경화능 시험인 Jominy 시험과 유사한 조건으로 유한요소해석을 수행하였으며 Jominy 시험에서 냉매로 사용되는 냉각수를 이용한 수랭 조건뿐만 아니라 냉매를 다르게 하여 유랭과 공랭 조건에서 냉각 속도의 변화와 함께 마르텐사이트 조직의 생성량을 전산모사를 통해 예측해 보았다. 실제 3차원 형상의 봉상의 시편을 유한요소해석을 하게 되면 시간이 오래 걸리기 때문에, 축대칭 조건으로 해석하였다. 직경 25 mm, 높이 100 mm의 형상을 가지는 봉상 시편에 2000개의 요소수로 설정하여 1120°C의 시편에서 한쪽 면의 온도를 20°C로 냉각표면으로 지정하여 완전히 냉각될 때까지 해석을 시행하였다. 시편의 열전도도 (Heat Conductivity)는 16.7 W/mK, 열용량 (Heat Capacity)은 3.96 J/m³K이며 냉매에 따른 열전달계수 (Heat Transfer Coefficient) 값은 표 2와 같다. 또한 유한요소해석을 통하여 실제 소결경화 공정에서 많이 사용되는 공랭에서의 소결경화 가능한 두께를 구하기 위하여, 추가로 10 mm, 20 mm, 50 mm 높이의 봉상 시편을 유한요소해석 시행하여 두께에 따른 마르텐사이트 분율을 확인해보았다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 FLC-4608을 수랭, 유랭, 공랭 조건으로 냉각능 시험 시 유한요소해석 결과인 냉각 시간이 15분이 되었을 순간의 온도 분포를 보여주고 있다. 그림 4는 냉각 시간이 15분이 되었을 순간의 시편 중심축의 냉각표면부터 반대쪽 표면까지의 온도 분포 그래프이다. 냉각표면에서 내부 열에너지가 외부로 나가게 되어 온도가 떨어지게 된다. 이때 열전달계수에 따라서 외부로 나가는 열 에너지가 달라지게 되고 값이 높을수록 가지는 많은 에너지가 빠져나가고 온도가 낮아지게 된다. 시편표면에서 온도가 내려간 후 시편 내부에서 열 전도가 일어나서 냉각표면 방향으로 열에너지가 전달되어 냉각표면 반대쪽까지 온도가 내려가게 된다. 동일한 열전도도에서 온도차이가 클수록 열 에너지의 전도가 증가하게 되므로 재료의 시편표면의 온도가 낮을수록 내부에 열전도가 빠르게 되어 반대쪽의 온도 역시 빠르게 냉각된다. 따라서, 그림 4와 같이 열전달계수 값이 높은 수랭, 유랭, 공랭 순서대로 냉각표면

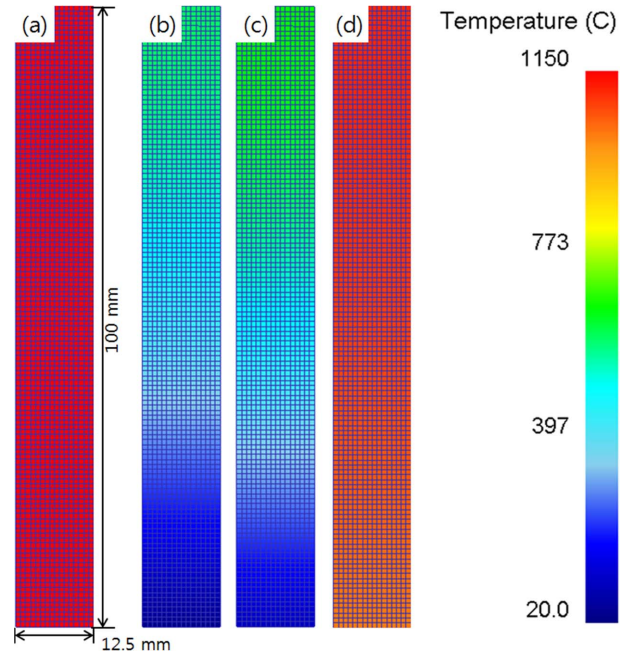


Fig. 3. Temperature distributions of (a) initial, (b) water, (c) oil, and (d) air cooling conditions after 15 minutes.

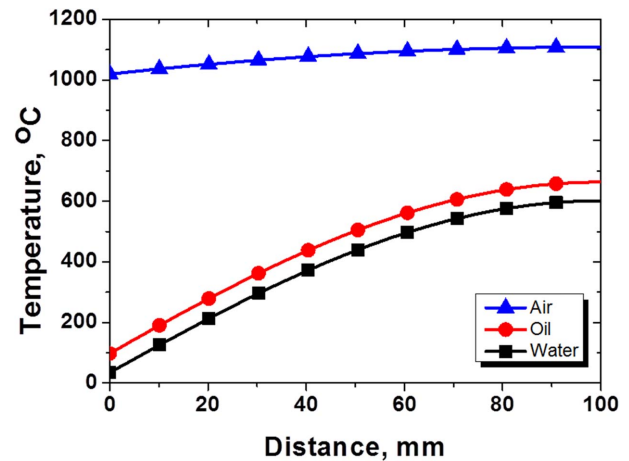


Fig. 4. Temperature at various cooling conditions after 15 minutes.

의 온도가 낮으며, 이로 인하여 온도차이가 커지므로 냉각표면 반대쪽 온도 역시 같은 경향을 가진다.

그림 5는 각각의 냉각 조건에서 온도의 최저점 (냉각표면)과 최고점 (냉각표면 반대쪽)에서 시간에 따라 온도가 어떻게 변하는지를 나타낸 그래프이다. 수랭 및 유랭에서는 냉각초기에 냉각표면에서 급격히 온도가 내려가 수랭에서는 2.7 초 유랭에서는 67 초만에 300°C 이하까지 냉각됨을 확인할 수 있으며 반면 공랭은 30분까지 걸리는 것을 확인할 수 있다. 냉각표면 반대쪽은 열이 전도되는 시간이 걸리므로 수랭의 경우도 3분이 지나서야 온도가 떨어지기 시작함을 알 수 있으며, 이는 냉각조건뿐만 아니라 냉각표면에서 거리 역시 냉각속도에 영향을 주는 것을 보

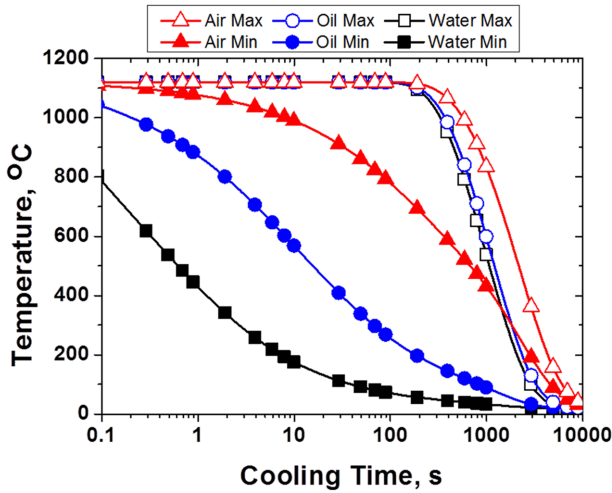


Fig. 5. Cooling curves at various cooling conditions.

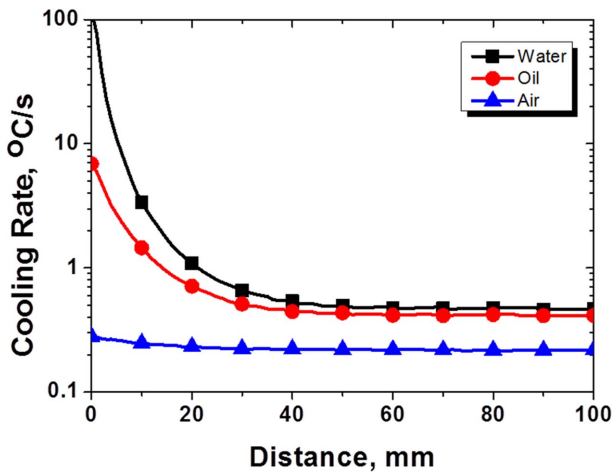


Fig. 6. Cooling rates at various cooling conditions.

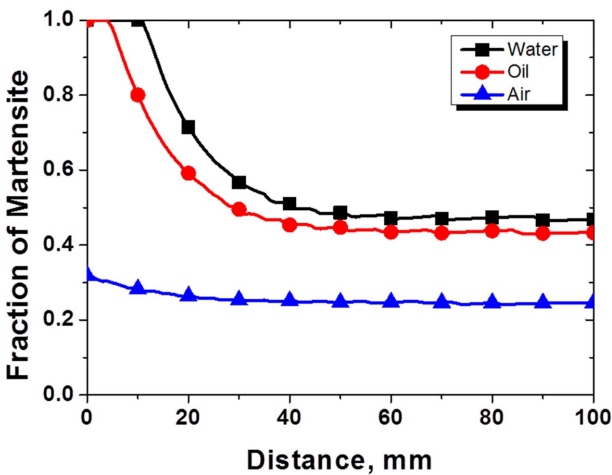


Fig. 7. Fractions of martensite phase at various cooling conditions.

여준다.

그림 6은 냉각 조건에 따른 냉각속도를 나타낸다. 냉각부 표면부의 냉각속도가 가장 빠르며 반대쪽으로 갈수록

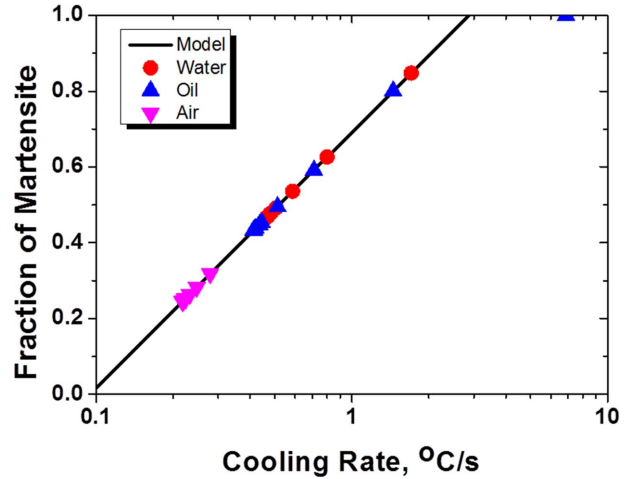


Fig. 8. Comparison of the effect of cooling rate on the microstructure of FLC-4608 model and simulation.

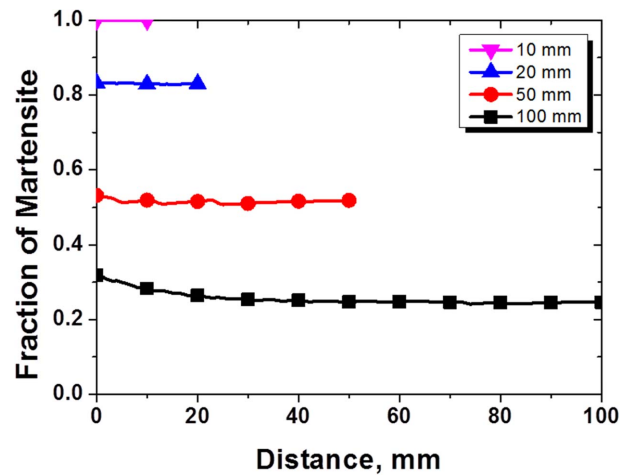


Fig. 9. Effect of thickness on the fraction of martensite.

느려짐을 알 수 있으며 수랭, 유랭은 냉각속도 차이가 큰 반면 공랭은 차이가 적음을 보인다. 그림 7은 냉각 조건에 의한 마르텐사이트 분율 차이를 나타낸다. 냉각부에서 멀어질수록 냉각속도는 떨어지므로 마르텐사이트 분율이 감소함을 알 수 있다. 마르텐사이트 분율이 1인 부분의 깊이는 수랭은 10 mm, 유랭은 4 mm로 나타났으며 공랭은 냉각속도가 느려 마르텐사이트 분율이 0.32 정도만 생성되며 냉각속도 차이가 적어서 비교적 균일한 분율을 보인다. 그림 8은 모델링 그래프와 각각의 냉각조건에서 냉각속도와 분율사이의 관계를 표시하였다. 경화능 시험을 유한요소 해석을 통하여 급랭시 온도변화에 대한 결과 모델링 Fitting 식을 잘 따르는 것을 확인하였다. 따라서, 위 유한요소해석을 통하여 냉각속도에 따른 마르텐사이트 분율 계산을 가능함을 확인할 수 있었으며, 다른 시편형상 또는 다른 냉매 등 다양한 조건에서 분율 예측 계산을 할 수 있음을 알 수 있다.

그림 9는 공랭 조건에서 시편의 두께에 따른 냉각속도와 마르텐사이트 분율을 나타내었다. 공랭은 냉각표면과 반대편의 냉각속도차이가 크지 않으며 두께가 얇을수록 더욱 균일한 냉각속도를 가지게 된다. 두께가 두꺼울수록 내부의 열에너지를 많이 가지게 되고 따라서 냉각속도가 떨어지게 되며 마르텐사이트 형성이 되지 않게 된다. 얇은 시편일수록 냉각속도가 증가하게 되며 많은 마르텐사이트가 생성되어 10 mm 시편의 경우 100% 마르텐사이트 분율을 가지는 것을 확인할 수 있다. 유한요소해석은 봉상으로 하였으나 시편의 냉각조건을 한쪽 표면전체를 냉각시키고 다른 면에서 빠져나가는 열이 없으므로 이는 좌우로 무한한 판에서의 결과와 동일하게 나타난다. 그러므로, 10 mm 두께의 부품은 어떤 형상이더라도 100% 마르텐사이트 분율을 가진 부품을 공랭을 통하여 제조 할 수 있음을 보여 준다.

4. 결 론

본 연구에서는 FLC-4608 합금분말의 소결경화 공정에서 냉각속도와 마르텐사이트 조직 생성량에 관한 관계식을 모델링하고 유한요소해석에 적용시켜 다양한 냉각조건에서의 경화능 시험 전산모사를 통해 냉각속도의 변화에 따른 마르텐사이트 분율의 차이를 확인해 보았다. 수랭 > 유랭 > 공랭 순서로 빠르게 냉각되며 마르텐사이트 역시 많이 생성되며 100 mm 강화능 시편으로 전산모사 결과 100% 마르텐사이트가 생성되는 두께는 수랭에서 10 mm, 유랭에서 4 mm로 나타났으며 공랭에서는 30% 정도의 마르텐사이트가 생성됨을 계산하였다. 유한요소해석을 통하여 공랭 공정에서 두께에 따른 냉각조건 변화 및 마르텐사이트 분율을 전산모사를 통해 계산하였으며 이를 바

탕으로 공랭조건에서 10 mm 이하의 시편에서는 100% 마르텐사이트가 생성됨을 확인하였다. 이러한 결과로 유한요소 해석을 통해 소결경화 부품의 크기의 한계를 예측할 수 있었다. 이를 소결경화 부품 설계에 도입하면 복잡한 제품 형상 및 냉각조건에서 마르텐사이트 형성을 예측하여 더욱 정밀한 부품 설계를 할 수 있을 것이다.

References

- [1] H. S. Kim and D. N. Lee: Korean J. Met. Mater., **30** (1992) 37 (*Korean*).
- [2] R. M. German: Powder Metallurgy of iron and Steel, John Wiley, New York (1998) 128.
- [3] W. B. James: Proceedings of International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Metal Powder Industries Federation, Las Vegas (1998) 1.
- [4] M. Schmidt, P. Thorne, U. Engstrm, J. Gabler, T. J. Jesberger and S. Feldbauer: World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Particulate Materials, MPIF, Las Vegas (2004) 89.
- [5] M. L. Marucci, G. Fillari, P. King and K. S. Narasimhan: PM2004 World Congress, Vienna (2004).
- [6] B. Lindsley and W. B. James: Euro PM, Prague (2005) 275.
- [7] B. Lindsley, G. Fillari and T. Murphy: Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials by C. Ruas and T. A. Tomlin, Metal Powder Industries Federation, Princeton (2005) 10.
- [8] S. Hatami, A. Malakizadi, L. Nyborg and D. Wallin: J. Mater. Process. Tech., **210** (2010) 1180.
- [9] K. S. Moghaddarn, M. Ghambari, H. Farhangi and N. Solirnanjad: J. Iron Steel Res. Int., **19** (2012) 43.
- [10] I. Mutlu and E. Oktay: Mater. Des., **44** (2013) 274.