

Development of a simulation-based induction heating process for local thickening upsetting forming of drive shaft

Min Ji Ham, Yeonghwan Song and In Yong Moon[†]

Korea Institute of Industrial Technology, Gangneung 25440, Korea

(Received October 31, 2024)

(Revised November 14, 2024)

(Accepted November 20, 2024)

Abstract In this study, a simulation model was developed for the induction heating process in the upsetting forming of drive shafts for electric hydrogen vehicles. The local thickening of the drive shaft through upsetting is performed immediately after heating the shaft's end via induction heating, and an appropriate temperature distribution at this stage is crucial for ensuring the integrity of the drive shaft. Therefore, an analysis was conducted to investigate the effects of coil design on the heating characteristics using the induction heating simulation. The results revealed that two key variables—coil length and coil pitch—had significant effects on both the heating characteristics and the final shape of the material after upsetting. Based on the simulation results, the optimal coil design for induction heating was proposed, confirming that the desired variable cross-sectional drive shaft could be manufactured successfully.

Key words Induction heating, Simulation, Drive shaft, Upsetting, Thickening

드라이브 샤프트의 국부후육화 업세팅 성형을 위한 시뮬레이션 기반 유도가열 공정 개발

함민지, 송영환, 문인용[†]

한국생산기술연구원, 강릉, 25440

(2024년 10월 31일 접수)

(2024년 11월 14일 심사완료)

(2024년 11월 20일 게재확정)

요약 본 연구에서는 전기수소차용 드라이브 샤프트의 제조를 위한 업세팅 성형 공정에서의 유도가열 공정에 대한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 드라이브 샤프트의 국부후육화 업세팅은 유도가열을 통해 샤프트의 끝단을 가열한 직후 진행되며, 이때의 적절한 온도 분포는 드라이브 샤프트 건전성 확보에 필수적이다. 따라서 유도가열 시뮬레이션을 통해 코일의 형태가 가열 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 결과 코일 길이, 코일 피치의 2개 변수가 가열 특성에 큰 영향을 미치고 동시에 업세팅 이후 소재의 형상에도 큰 영향을 준다는 것을 확인하였다. 해석 결과를 바탕으로 최적의 유도가열 코일 형상을 제안하였으며, 이를 통해 원하는 형상의 가변 단면 드라이브 샤프트 제조가 가능함을 확인하였다.

1. 서론

최근 전기수소차와 같은 친환경 차량의 수요가 급증하면서 경량화 및 고성능을 동시에 만족시킬 수 있는 부품 제조 기술의 중요성이 높아지고 있다. 특히, 드라이브 샤프트와 같은 차량 구동 부품은 높은 강도와 내구성을 요구하면서도 경량화를 달성하기 위해 다양한 제조 기술이

적용되고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 도입된 대표적인 기술 중 하나가 유도가열이 적용된 업세팅 공정이다[1-6].

유도가열 공정은 코일 소재에 전류를 흐르게 하여 자기장을 유도하고, 이로 인해 금속 소재 내부에서 발생하는 와류 전류에 의해 소재를 빠르고 균일하게 가열하는 방식이다. 이 공정은 비접촉 방식으로 빠른 가열 속도를 제공하며, 에너지 효율이 높고, 특정 부위를 선택적으로 가열할 수 있는 장점이 있다[7-9]. 특히 드라이브 샤프트와 같은 부품의 제조에서는 소재의 특정 부위를 국부적

[†]Corresponding author
E-mail: mooniy085@kitech.re.kr

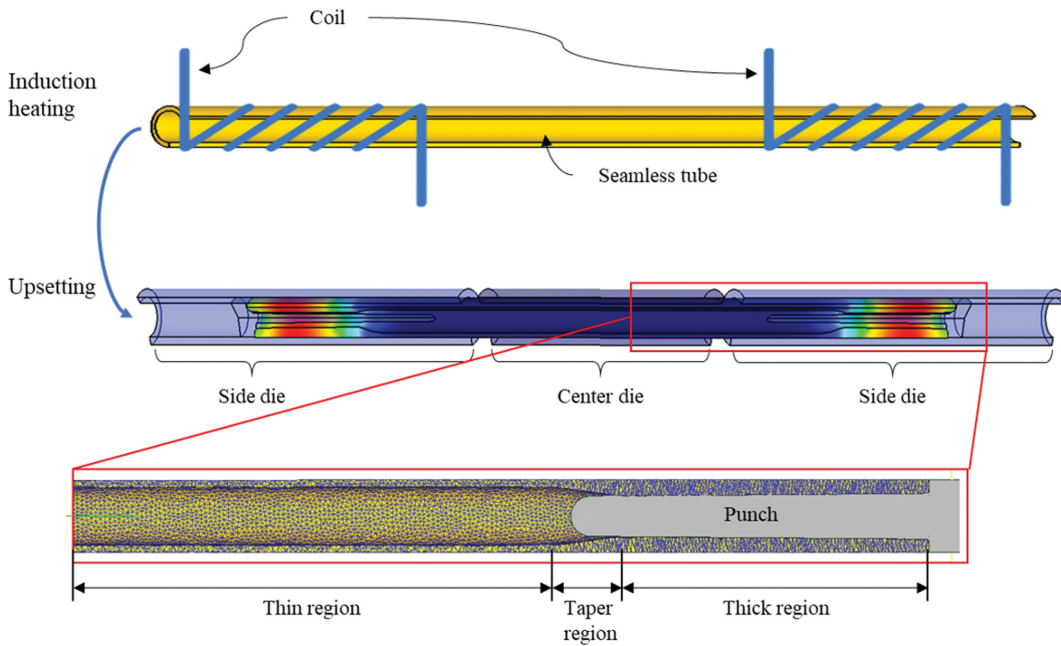


Fig. 1. Schematic of induction heating and upsetting process to fabricating local thickened drive shaft.

으로 가열하여, 필요한 부위만을 두껍게 만드는 국부 후 육화 공정에 유용하게 적용될 수 있다[10].

본 연구에서는 드라이브 샤프트 제조 공정 중 업세팅 성형에 필요한 유도가열 과정에 주목하였다. 드라이브 샤프트의 국부 후육화를 위해 유도가열은 필수적인 공정으로, 이때 가열된 소재의 온도 수준 및 분포는 최종 형상에 큰 영향을 미친다. 특히, 가열이 불균일하게 이루어질 경우 성형 후 부품의 균질성이 떨어져 성능 저하나 파손 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서, 유도가열 공정의 정확한 해석과 최적화가 필수적이다.

본 연구에서는 유도가열 공정에서 코일의 설계가 가열 특성에 미치는 영향을 시뮬레이션을 기반으로 분석하고, 드라이브 샤프트 제조에 적합한 최적의 코일 설계를 제안하고자 하였다. 그 결과, 유도가열 코일의 2가지 설계변수인 코일 길이 및 코일 피치가 소재 온도 분포 및 업세팅 후 최종 제품의 형상에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 각 변수 별 영향 분석 결과를 바탕으로 최적의 유도가열 코일 형상을 제안하였으며, 이를 바탕으로 양품의 가변 단면 드라이브 샤프트 제조가 가능함을 확인하였다.

2. 연구 방법

고강도 보론강(15B36M) 재질의 드라이브 샤프트의 국부후육화 공정 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 그림과 같이 후육화 진행 부분인 심리스 튜브의 양 끝단 부위를 유도가열을 통해 1,300°C 이상으로 가열하게 되며 이후 업세팅 금형으로 이송 후 후육화를 진행하게 된다.

여기서, 유도 가열 조건으로는 전류 주파수 500 Hz, 전류 밀도 35 Amps/mm²으로 설정하였으며, 이는 선행 연구를 통해 얻은 최적 공정조건이다. 유도가열 이후, 업세팅 금형으로의 이송시간은 대략 5초 정도가 소요되며, 공기 중 냉각 후 1,300°C 수준으로 가열된 소재는 약 1,100°C로 냉각됨을 선행 연구를 통해 확인하였다. 업세팅 공정 전 초기 소재는 균일한 두께를 갖는 튜브 형태이지만 업세팅을 통해 후육화가 진행된 후에는 얇은 구간(thin region), 테이퍼 구간(taper region) 및 두꺼운 구간(thick region)으로 이루어진 가변 단면 튜브 형상으로 성형됨을 알 수 있다. 이러한 형상의 드라이브 샤프트 제조 시 두꺼운 구간의 길이 및 테이퍼 구간의 균일한 형태가 양품의 드라이브 샤프트로 판별하는 중요한 요소 중 하나이다. 따라서 본 연구에서는 위 두가지 항목에 대한 평가를 통해 최적의 유도가열 코일 설계를 수행하였다.

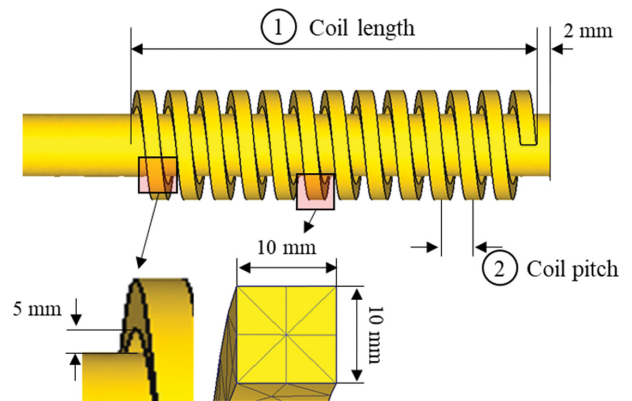


Fig. 2. Design of induction coil.

Table 1
Design parameters of induction coil

Parameter	Value [mm]
Coil length	400, 410, 420, 430
Coil pitch	11, 20, 30

Figure 2는 유도가열 공정에서의 코일 설계와 코일과 소재 간의 상대적 위치를 나타내고 있다. 코일의 단면적은 10×10 mm로 설계하였으며, 코일과 소재 간의 간격은 5 mm로 설정하였다. 코일은 심리스 튜브 끝단에서 안쪽으로 2 mm 떨어지게 위치시켰다. 코일 길이와 피치는 설계변수로 설정하여 이에 따른 가열 특성을 상용 해석 프로그램인 DEFORM 3D 소프트웨어를 통해 분석하고자 하였으며, 각 설계변수 별 값을 Table 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 코일 길이에 따른 성형 특성 분석

Figure 3은 코일의 길이에 따른 업세팅 공정에서의 성형 하중의 변화를 나타내고 있다. 전반적으로 코일의 길

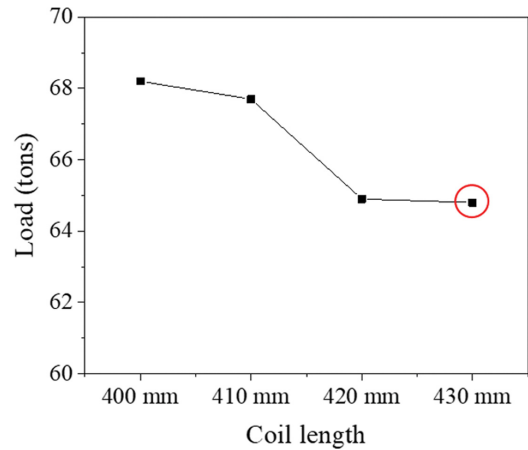


Fig. 3. Upsetting load according to induction coil length.

이가 길어 짐에 따라 하중이 낮아지는 것을 알 수 있으며, 코일 길이가 410 mm에서 420 mm로 증가하는 구간에서 하중이 급격하게 저감 한다는 결과를 얻을 수 있었다. 최대 하중은 코일 길이 400 mm에서 68 ton, 최소 하중은 430 mm에서 65 ton으로 계산되었다. 이러한 코일 길이에 따른 하중의 차이 원인을 분석하기 위해 유도가열, 공기 중 냉각 및 업세팅 단계별 소재 온도 분포 시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

그림과 같이 코일 길이가 길어질수록 가열 부위 또한

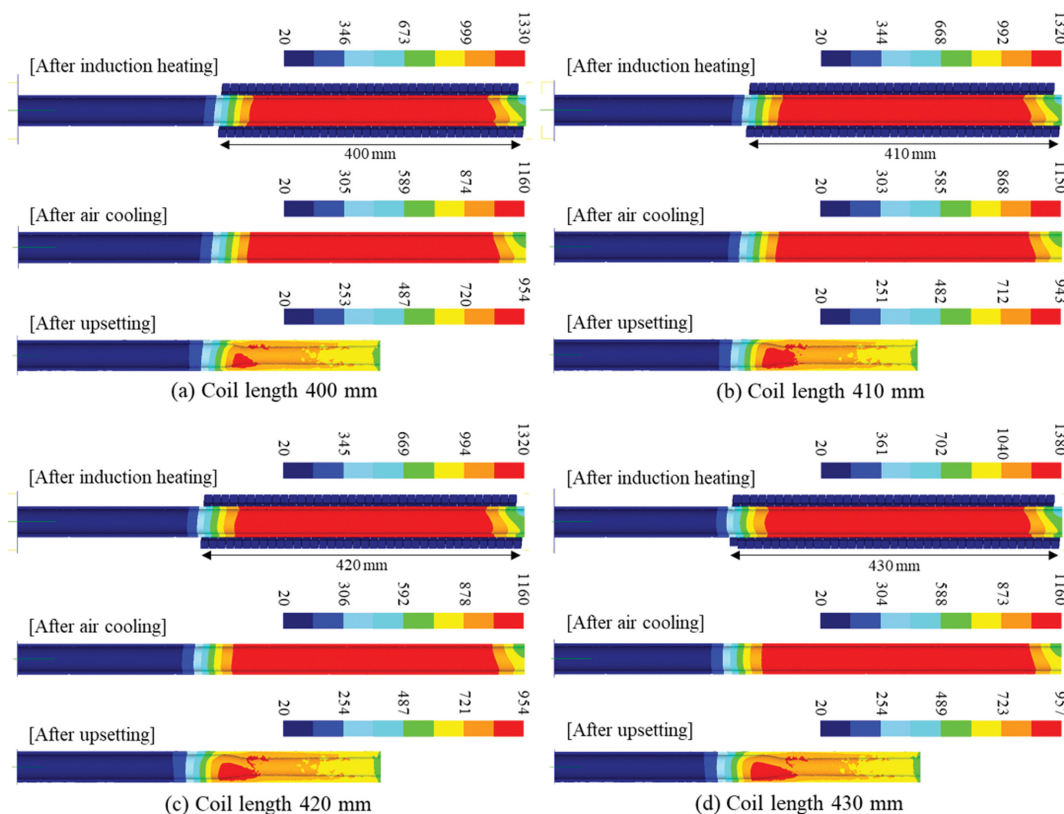


Fig. 4. Temperature distribution during induction heating, air cooling, and upsetting at the coil length of (a) 400 mm, (b) 410 mm, (c) 420 mm, and (d) 430 mm.

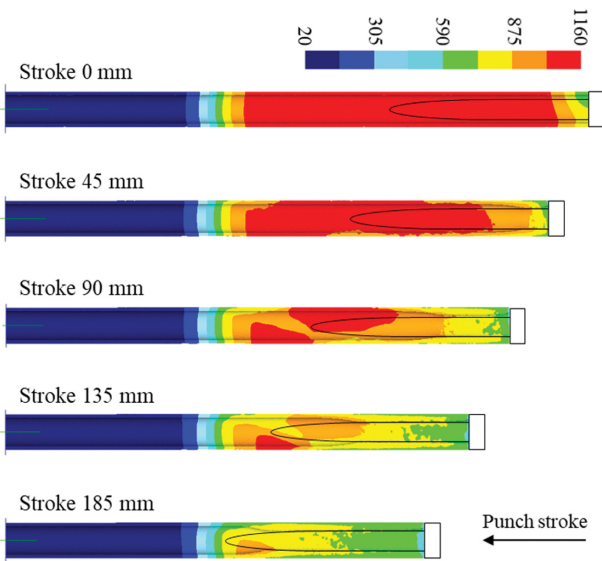


Fig. 5. Temperature distribution during upsetting process according to punch stroke.

길어지는 것을 알 수 있으며, 모든 조건에서 5초 간의 공기 중 냉각 후 소재의 최대 온도가 분포하는 구간(빨간색 구간)의 온도는 약 1,155°C 수준으로 계산되었다. 코일 길이의 증가에 따라 업세팅 하중이 저감되는 이유는 업세팅 공정 직후의 온도 분포를 통해 분석할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 코일 길이 400 mm의 경우, 테이퍼 구간의 최대 온도 954°C를 나타내는 빨간색 구간이 상대적으로 적게 분포하고 있다. 반면, 코일 길이 430 mm에서의 테이퍼 구간의 최대 온도는 957°C이며 해당 온도의 분포가 더 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 테이퍼 부위는 업세팅 공정에서 마지막으로 형성되는 부위이다. 따라서 코일 길이가 길어질수록 테이퍼 부위의 온도가 더 높고 넓게 유지된다는 것이 성형 하중의 저감 원인이라 판단된다.

업세팅 공정 중 소재 온도분포의 변화를 더욱 면밀히 분석하기 위해 스트로크 별 소재 온도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 성형이 진행됨에 따라 punch에 의해 가압되는 부위를 중심으로 온도 저하가 발생됨이 확인되었다. 이는 업세팅이 진행됨에 따라 튜브의 오른쪽 끝단을 시작으로 후육화가 진행되며, punch와 소재 간의 강한 접촉으로 인해 열전달의 활발하게 이루어지기 때문이라 판단된다. 성형 완료 시점인 스트로크 185 mm를 기준으로 후육부(thick region)는 875°C 이하의 온도분포를 보이며, 테이퍼부(taper region)에서 950°C 수준의 비교적 높은 온도를 유지함이 확인되었다.

3.2. 코일 피치에 따른 성형 특성 분석

유도가열 코일의 2번째 설계 변수인 코일 피치에 따른

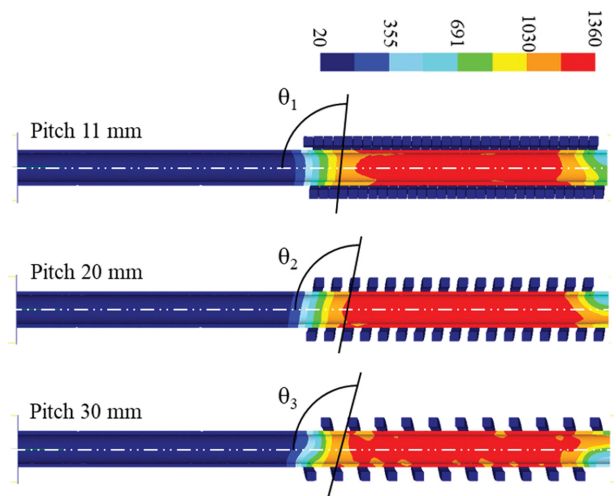


Fig. 6. Temperature distribution with respect to the coil pitches.

가열 후 온도분포 시뮬레이션 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 코일 길이가 가열 범위에 큰 영향을 준다는 결과와 달리, 코일 피치는 가열 부위의 축대칭성에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다. 그림에 나타낸 소재의 단면에서 확인할 수 있듯이, 코일의 피치가 증가함에 따라 온도 분포 선의 기울기 또한 증가하는 경향이 확인되었다. 이는 코일의 피치가 증가됨에 따라 단면상 보이는 코일의 기울기 또한 증가하게 되며, 이에 따른 자기력선의 강도 차이가 가열 성능에 영향을 주기 때문이라 판단된다. 이러한 온도 분포의 축대칭성 저하는 업세팅 공정 후의 테이퍼 부 형상에 큰 영향 주는 것을 Fig. 7을 통해 확인할 수 있다. 후육부에서 테이퍼부가 시작되는 위치를 단면을 기준으로 상, 하 포인트를 비교하였을 때, 코일 피치가 증가될 수록 비대칭성 또한 증가한다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 온도가 높을수록 소재가 더욱 원활하게 성형되는 특성에 의해 온도 분포의 비대

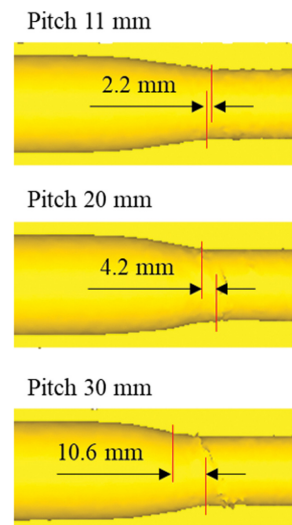


Fig. 7. Shapes of taper region with respect to the coil pitches.

칭성이 소재 성형의 비대칭성으로 이어지기 때문이라 생각할 수 있다. 따라서, 설계 및 제작이 가능한 범위에서 코일 피치를 최소화함으로써 양품의 드라이브 샤프트를 제조할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 드라이브 샤프트 제조에 사용되는 유도 가열 공정의 최적화를 목표로, 코일 길이와 피치가 가열 특성 및 최종 성형 품질에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 코일 길이가 길어질수록 소재의 가열 범위가 넓어지고, 성형 하중이 감소하는 경향을 확인하였다. 특히 코일 길이가 420 mm일 때 하중이 급격하게 감소하는 현상을 관찰하였으며, 이는 높은 온도가 넓은 범위에 분포하면서 성형 저항이 줄어들기 때문임을 확인하였다. 코일 피치의 경우, 피치가 증가함에 따라 가열된 소재의 축대칭성이 저하됨을 확인하였다. 이는 자기력선의 강도 불균일에 의해 가열 성능이 비대칭적으로 나타난 결과라 판단되며, 비대칭적 가열은 테이퍼 부위의 성형 비대칭성으로 이어질 수 있어, 제조 품질에 부정적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 결론적으로 최적의 코일 설계를 위해서는 테이퍼 부위를 포함한 영역을 가열할 수 있도록 코일 길이를 선정함과 동시에, 코일 피치를 최소화하는 것이 가장 효율적인 설계임을 제안하였다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 소재부품패키지형기술개발(과제번호 KM240309)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

- [1] L.R. Egan and E.P. Furlani, "A computer simulation of an induction heating system", IEEE T. Magn. 27 (1991) 4343.
- [2] K. Sadeghipour, J.A. Dopkin and K. Li, "A computer aided finite element/experimental analysis of induction heating process of steel", Computers in Industry 28 (1996) 195.
- [3] N. Di Luozzo, M. Fontana and B. Arcondo, "Modelling of induction heating of carbon steel tubes: Mathematical analysis, numerical simulation and validation", J. Alloys. Compd. 536 (2021) S564.
- [4] O. Lucia, P. Maussion, E.J. Dede and J.M. Burdío, "Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges", IEEE T. Ind. Electron. 61 (2013) 2509.
- [5] M. Kranjc, A. Zupanic, D. Miklavcic and T. Jarm, "Numerical analysis and thermographic investigation of induction heating", Int. J. Heat Mass Transf. 53 (2010) 3585.
- [6] Y. Favennec, V. Labbé and F. Bay, "Induction heating processes optimization a general optimal control approach", J. Comput. Phys. 187 (2003) 68.
- [7] G. Aiello, S. Alfonzetti, S.A. Rizzo and N. Salerno, "Optimization of the shape of an induction heating device in the presence of skin effect in the coils", COMPEL - Int. J. Comput. Math. Electr. Electron. Eng. 39 (2020) 525.
- [8] F. Li, X.K. Li, T.X. Zhu, Q.Z. Zhao and Y.M.K. Rong, "Modeling and simulation of induction heating with magnetic flux concentrator", Appl. Mech. Mater. 268 (2013) 983.
- [9] B.J. Yang, A. Hattiangadi, W.Z. Li, G.F. Zhou and T.E. McGreevy, "Simulation of steel microstructure evolution during induction heating", Mater. Sci. Eng. : A 527 (2010) 2978.
- [10] S. Park, D.W. Kim, J.H. Kim, S.Y. Lee, D. Kwon and H.N. Han, "A finite element simulation for induction heat treatment of automotive drive shaft", ISIJ International 60 (2020) 1333.