

1.9wt%C 초고탄소 워크롤 단조 공정 : Part II – 기공압착 및 확산접합

강성훈[#] · 임형철¹ · 이호원¹

Forging of 1.9wt%C Ultrahigh Carbon Workroll : Part II – Void Closure and Diffusion Bonding

S. H. Kang, H. C. Lim, H. Lee

(Received July 30, 2013 / Revised October 31, 2013 / Accepted November 4, 2013)

Abstract

In the previous work, a new forging process design, which included incremental upsetting, diffusion bonding and cogging, was suggested as a method to manufacture 1.9wt%C ultrahigh carbon workrolls. The previous study showed that incremental upsetting and diffusion bonding are effective in closing voids and healing of the closed void. In addition, compression tests of the 1.9wt%C ultrahigh carbon steel revealed that new microvoids form within the blocky cementite at temperatures of less than 900°C and that local melting can occur at temperatures over 1120°C. Thus, the forging temperature should be controlled between 900 and 1120°C. Based on these results, incremental upsetting and diffusion bonding were used to check whether they are effective in closing and healing voids in a 1.9wt%C ultrahigh carbon steel. The incremental upsetting and diffusion bonding were performed using sub-sized specimens of 1.9wt%C ultrahigh carbon steel. The specimen was deformed only in the radial direction during the incremental upsetting until the reduction ratio reached about 45~50%. After deformation the specimens were kept at 1100°C for the 1 hour in order to obtain a high bonding strength for the closed void. Finally, microstructural observations and tensile tests were conducted to investigate void closure behavior and bonding strength.

Key Words : Incremental Upsetting, Diffusion Bonding, Forged Workroll, Void Closure, 1.9wt%C Ultrahigh Carbon Steel

1. 서론

금속 압연용 워크롤, 로터 샤프트(rotor shaft)와 같은 대형 제품은 대부분 업세팅(upsetting)과 코깅(cogging) 공정과 같은 자유단조를 통해 제조된다. 이때 사용되는 잉고트의 주조과정에서 기공과 같은 결함이 발생한다. 이러한 결함으로 인해 기계적 특성이 저하되며 작동 중 갑작스런 파단의 원인이 되기도 한다. 따라서 잉고트 주조 시 발생하는 내부의 기공은 단조공정을 통해 제거되어야만 한다. 이러한 문제점을 해결하고자 많은 연구자들은 제품형상 및

특성에 맞는 단조 공정을 제시하였고, 효율적인 기공압착을 위한 연구를 수행해왔다[1~4]. 더불어 기공압착 및 접합거동과 잉고트/앤빌의 형상/크기, 기공크기, 정수압 응력, 유효 변형률 등과의 관계에 대해 연구해왔다[5~12].

본 연구에서는 건전한 단조재 워크롤을 제조하기 위해서 이전 연구[1, 2]에서 제시한 신공정안을 1.9wt%C 초고탄소강에 적용하고자 한다. 또한 이전 연구[3]에서 도출된 1.9wt%C 초고탄소강의 압축시험 및 유한요소 해석결과를 바탕으로, 점진 업세팅 및 확산접합 공정에서의 기공압착, 접합 강도 및 미세

1. 재료연구소 변형제어연구실

Corresponding Author : Korea Institute of Material Science, E-mail: kangsh@kims.re.kr

조직 분석을 통해서 제시된 단조 공정 안의 유효성을 재검증하고자 한다.

2. 기공의 압착 거동 해석

점진 업세팅에서 1.5wt% C 초고탄소강 소재의 기공 압착 거동에 관한 연구는 참고문헌에 제시한 바 있다[1, 2]. 본 연구는 1.9wt% C 초고탄소강 소재를 적용하였을 때 점진 업세팅과 확산접합 공정의 유효성을 재검증하기 위한 것으로, 이에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

본 연구에 사용된 잉고트의 형상은 Fig. 1에 나타내었으며, 내부에는 직경이 50mm이고 잉고트 길이의 약 50% 길이를 갖는 원통형 기공이 존재한다. Fig. 2는 이전 연구에서 제시한 새로운 공정안으로 1차 점진 업세팅, 확산접합, 2차 점진 업세팅 및 코깅으로 구성되어 있다. 일반적으로 대형 잉고트의 단조 시 단조비를 증가시키기 위하여 업세팅을 실시한 후 코깅 공정을 실시한다. 하지만 본 연구에서 사용된 잉고트의 고경비(길이/직경)는 1.24로 직경대비 길이가 작기 때문에 업세팅 공정은 하지 않고 오직 코깅 공정을 적용하여 워크를 제조를 수행하였다.

Fig. 3은 코깅 공정이 적용되는 동안 기공의 크기와 형상의 변화를 나타낸 그래프이다. 코깅 공정은 잉고트를 90°, 45°, 22.5°로 반복적으로 회전시키기 때문에 2.7S의 단조비에도 기공이 압착되지 않는다. Fig. 4는 점진 업세팅 시 기공 압착거동을 나타낸 것으로, 잉고트를 회전시키지 않고 반경 방향으로 반복적인 변형을 부여하기 때문에 40~45%의 압하율에서 기공이 완전히 닫힌다.

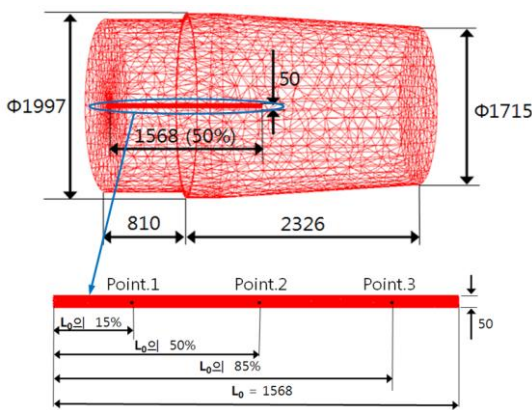


Fig. 1 Ingot model with artificially-made cylindrical void (unit in mm)[1, 2]

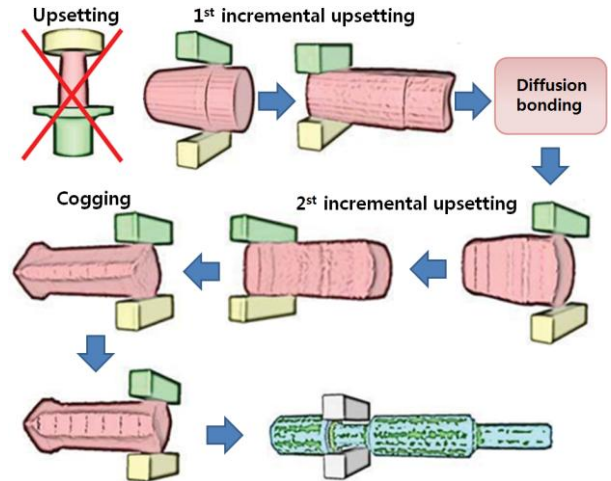


Fig. 2 Proposed forging process composed of the incremental upsetting, diffusion bonding and cogging[1, 2]

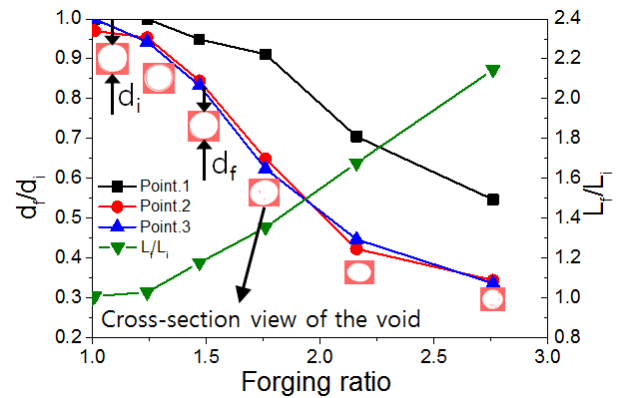


Fig. 3 Void size vs. forging ratio curves at pints 1, 2 and 3 during conventional cogging[1, 2]

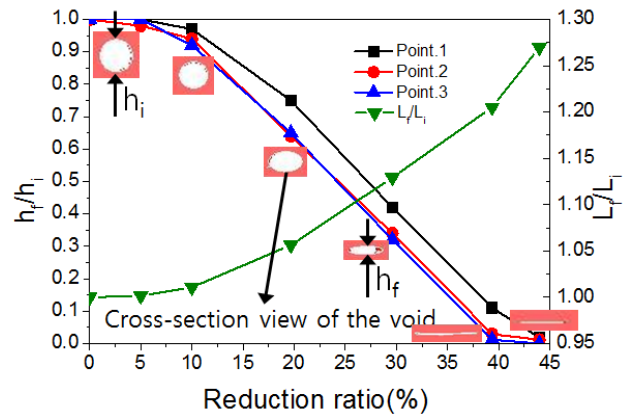


Fig. 4 Void size vs. reduction ratio curves at pints 1, 2 and 3 during incremental upsetting[1, 2]

3. 기공 압착 및 접합

참고문헌[3]에 의하면, 소재 온도가 1130°C 이상으로 상승하면 국부용융이 발생하며, 900°C 이하에서는 표면 크랙 및 시멘타이트 내부에 미세 기공이 발생할 가능성이 크므로, 공정 중의 단조온도는 반드시 900~1120°C에서 제어되어야 하며 잉고트의 가열온도는 1080°C가 바람직하다고 제안되었다.

본 연구에서는 상기의 단조 온도 조건에서 점진 업세팅과 확산접합을 1.9wt%C 초고탄소강에 적용하였다. 내부에 직경 2mm의 기공이 가공된 축소모델을 적용하여 압하율 45~50 %까지 점진 업세팅을 실시하였고 이후 확산접합을 실시하였다. 가시적으로 기공의 압착 여부를 확인하기 위하여 확산접합 이후 미세조직을 분석하였으며, 접합 강도를 분석하기 위한 인장 시험을 수행하였다.

Fig. 5는 초기온도 1080°C에서 점진 업세팅을 실시한 후 축소시편의 변형 사진이다. 점진 업세팅 완료 후 1100°C에서 1시간동안 확산접합을 실시하고, Fig. 6과 같이 미세조직 관찰과 인장 시험을 위한 시편을 채취하였다. 인장 시편은 기공이 있는 부위와 없는 부위에서 각각 채취하였고, 인장 시편들 사이에서 조직관찰용 시편을 채취하였다.

1.9wt%C와 1.5wt%C 초고탄소강의 점진 업세팅 및 확산접합(1100°C, 1 hr) 후의 미세조직을 Fig. 7에 비교하였다. 1.9wt%C와 1.5wt%C 초고탄소강 모두에서 초기의 원형 기공이 압착되어 접합 계면의 형태를 보인다. 특이한 점은 1.9wt%C 초고탄소강의 기공압착 및 접합 계면은 1.5wt%C 초고탄소강과는 다른 형태를 보인다. 즉, 1.5wt%C 초고탄소강의 접합 계면두께에 비해 1.9wt%C 초고탄소강의 접합 계면이 더 두껍다.

1.5wt%C 및 1.9wt%C 초고탄소강의 접합 계면의 두께를 측정하여 그 평균값을 Fig. 8에 나타내었다. 1.5wt%C 및 1.9wt%C 초고탄소강의 접합 계면 두께의 평균값은 각각 0.78 μ m, 42.30 μ m로, 1.9wt%C 초고탄소강의 접합계면 두께가 1.5wt%C 초고탄소강 접합계면보다 약 54배 두껍다. 또한, 1.9wt%C 초고탄소강의 압착계면 내부에는 미세기공이 존재하지 않으며, 다수의 망형 또는 균집형 시멘타이트가 존재한다.

압착된 계면이 확산접합을 통하여 접합되었는지를 판단하기 위하여 인장 시험을 실시하였다. 인장

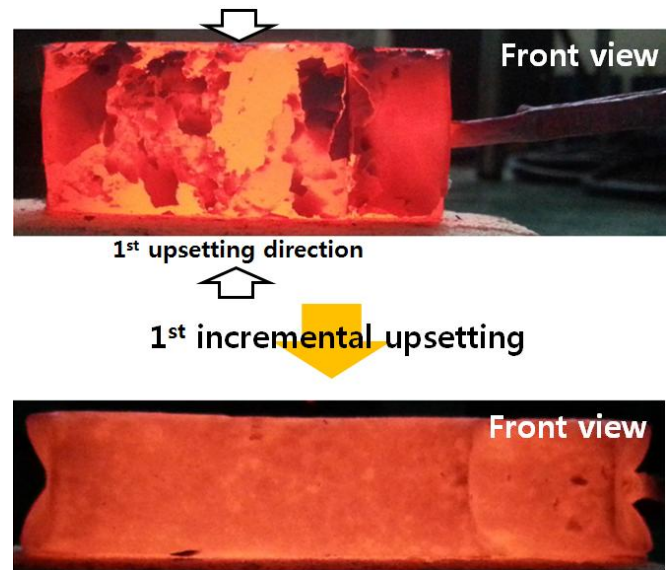


Fig. 5 Incremental upsetting test using downsized specimen with artificially-made cylindrical void of ϕ 2 mm

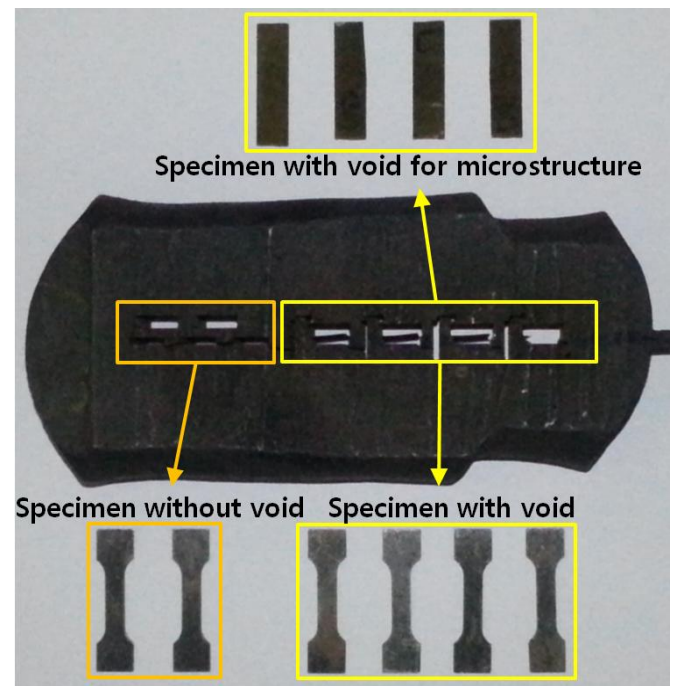


Fig. 6 Preparation of specimen for tensile test and microstructural observation after incremental upsetting and diffusion bonding

시험 시 하중과 변형률은 Fig. 9와 같이 로드셀과 ARAMIS를 이용하여 실시간으로 측정하였다. 하중은 공칭응력으로 변환하였으며, 파단 시의 응력과

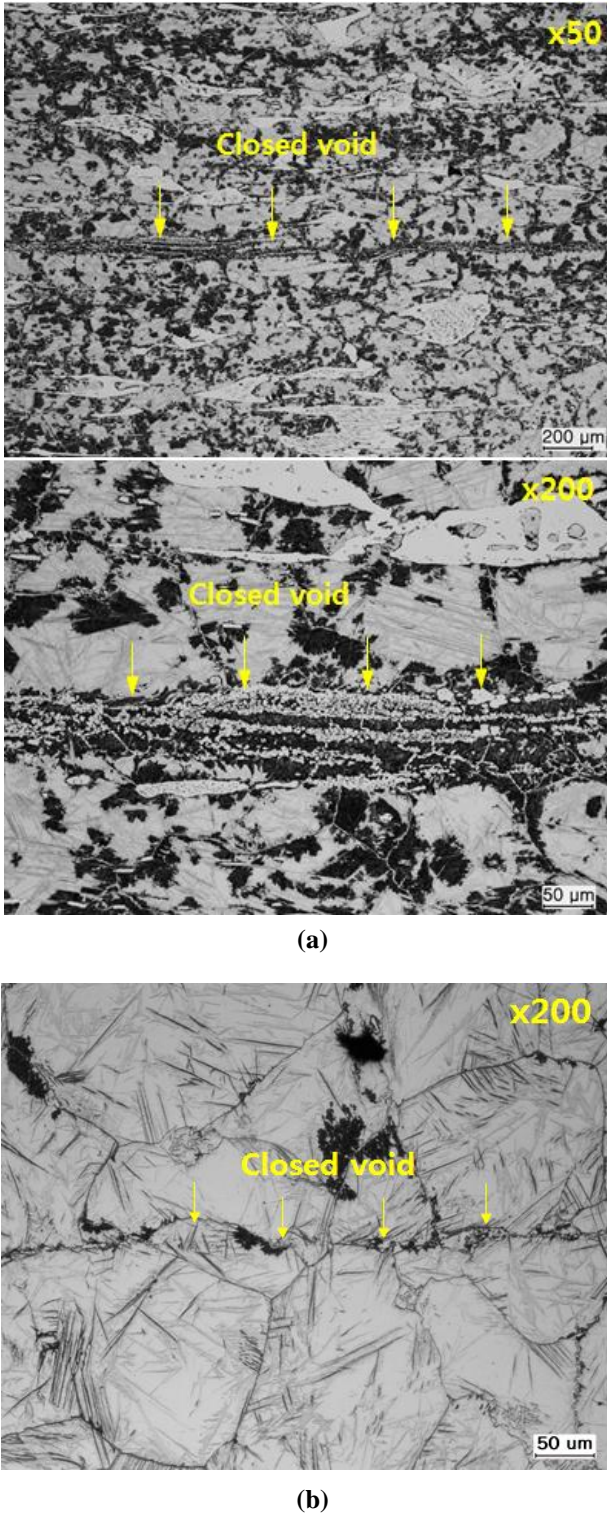


Fig. 7 Microstructural observation along the closed and bonded void after incremental upsetting at 1080 °C and diffusion bonding at 1100°C for 1 hour: (a) 1.9wt%C and (b) 1.5wt%C ultra-high carbon steel

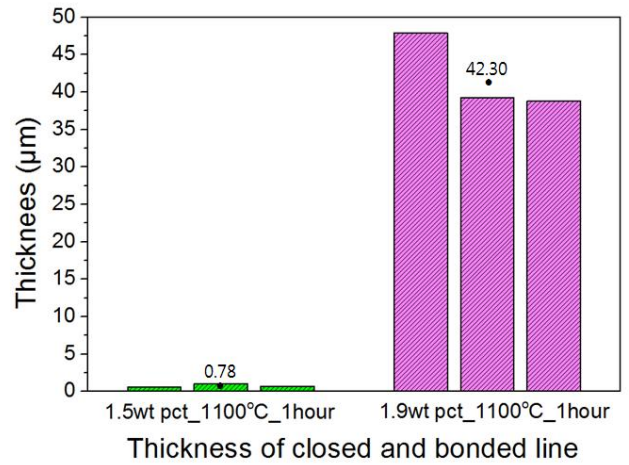


Fig. 8 Thickness of closed and bonded void of 1.5wt%C and 1.9wt%C ultra-high carbon steel after incremental upsetting and diffusion bonding

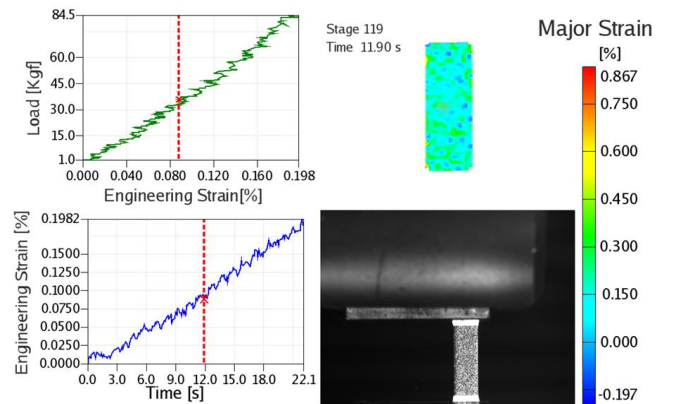


Fig. 9 Measurement of tensile load and engineering strain by ARAMIS

변형률을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10 (a)는 기공이 없는 부분과 기공이 있는 부분에서의 파단 강도 및 파단 변형률이다. 기공이 없는 부분에서의 파단 강도와 파단 변형률은 각각 220.80MPa, 0.15%이고, 기공이 있는 부분에서의 파단 강도와 파단 변형률의 평균값은 각각 210MPa, 0.16%이다. 기공이 없는 시편과 기공이 있는 시편에서의 파단 강도와 파단 변형률은 비슷한 값을 갖는다. 따라서 점진 업세팅 이후 1100°C에서 1시간이상 확산접합을 실시하면, 점진 업세팅을 통하여 압착된 계면이 강하게 접합되었다고 판단할 수 있으며, 이는 1.5wt%C 초고탄소강의 확산접합 특성과 동일하다. Fig. 10 (b)는 1.5 wt%C 초고탄소강의 접합 계면에서 파단 강도 및 파단 변

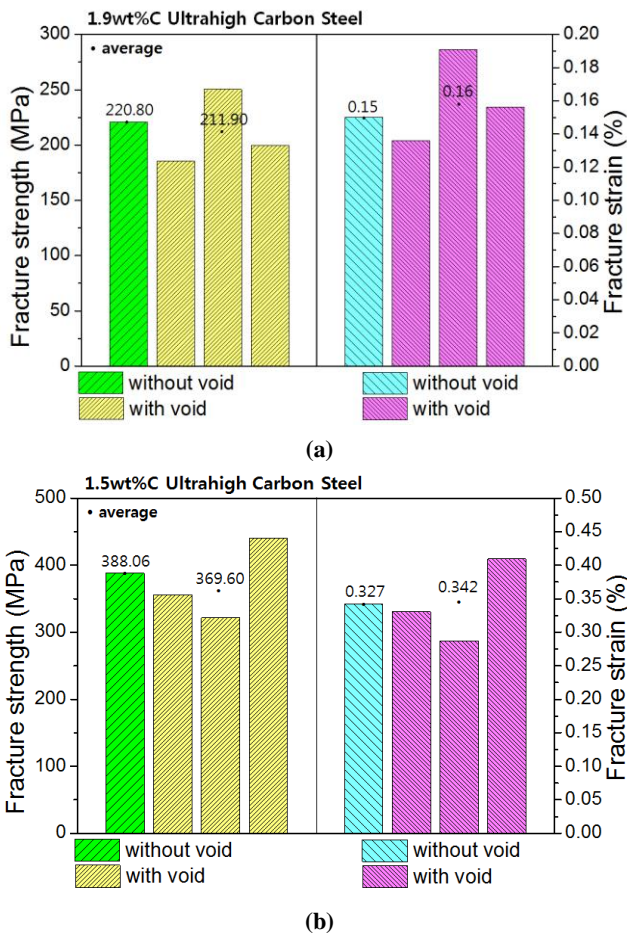


Fig.10 Strength and strain at fracture obtained from tensile test: (a) 1.9wt%C and (b) 1.5wt%C ultrahigh carbon steel

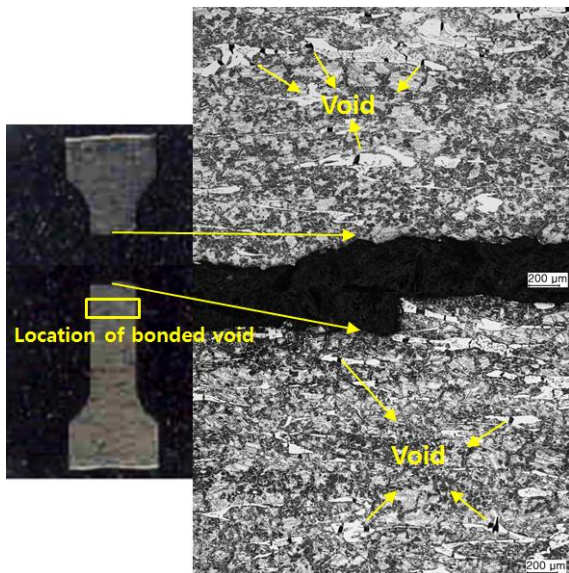


Fig.11 Microstructural observation after tensile test

형률을 나타낸다. 1.9wt%C와 1.5wt%C 초고탄소강의 인장 시험 결과를 비교해 볼 때, 1.9wt%C 초고탄소강의 파단 강도가 40%, 파단 변형률이 33% 낮게 측정되었다.

이러한 현상의 원인을 살펴보기 위해 Fig. 11과 같이 인장 시험 후 시편의 파단부에서의 미세조직을 분석하였다. 파단은 기공 압착 및 접합부가 아닌 곳에서 발생하였다. 미세조직을 보면 앞서 수행한 압축 시험 결과와 비슷하게 파단면 주위에서 시멘타이트 내부에 많은 기공들이 관찰되었다. 실제로 1.9wt%C 초고탄소강은 1.5wt%C에 비해 900°C 이하에서는 시멘타이트 석출량이 많고 취성의 시멘타이트가 깨지면서 많은 미세기공이 형성된다. 이로 인해 적정 단조온도 범위로 제어된 시편의 중심부(기공압착 및 접합부)보다 표면의 온도가 낮으므로 시멘타이트가 깨지면서 많은 미세 기공이 형성되었다고 판단된다. 이로 인해 기공접합부가 아닌 곳에서 파단이 발생하였으며, 동시에 파단 강도 및 파단 변형률도 낮게 측정되었다.

2차 점진 업세팅은 코킹 공정을 원활하게 적용할 수 있도록 소재의 단면형상을 정사각형에 가깝게 변형시키는 공정으로, 1차 점진 업세팅 및 확산접합을 실시한 이후, 소재를 90°회전시켜 수행한다. 이때, 2차 점진 업세팅의 방향은 1차 점진 업세팅 및 확산접합을 통하여 압착 및 접합된 계면에 평행한 방향으로 접합된 기공이 다시 열릴 가능성이 있다. 이를 확인하기 위한 2차 점진 업세팅 시험을 Fig. 12와 같이 수행하였다. 2차 점진 업세팅 이후 접합 계면의 미세조직을 Fig. 13에 나타내었다. 1차 점진 업세팅 및 확산접합을 통해 압착 및 접합된 계면이 2차 점진 업세팅 공정 이후에도 열리지 않고 닫혀 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 1차 점진 업세팅을 통해 압착된 기공은 1100°C에서 1시간 동안 확산접합을 부여하면 강하게 접합되어 2차 점진 업세팅을 수행하여도 다시 열리지 않고, 더 나아가 코킹 공정을 실시하여도 내부의 접합 계면은 다시 열리지 않고 강하게 접합된다.

4. 결론

본 연구에서는 1.9wt%C 초고탄소강의 기공압착 및 접합을 위하여 점진 업세팅, 확산접합 및 코킹으로 구성된 새로운 공정의 유효성을 판단하기 위해

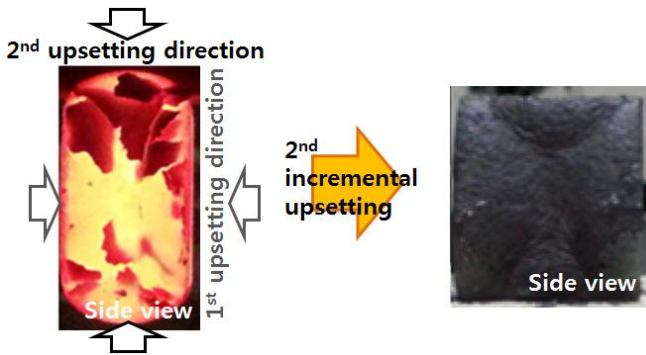


Fig.12 2nd incremental upsetting test using deformed specimen after 1st incremental upsetting and diffusion bonding

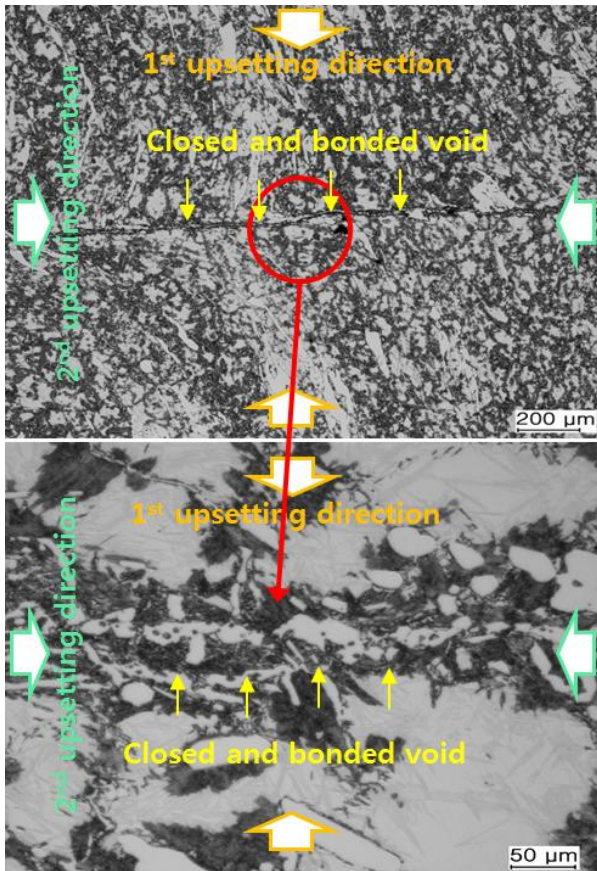


Fig.13 Microstructural observation along the closed and bonded void after 2nd incremental upsetting

서 재검증 시험을 수행하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 1.9wt%C 초고탄소강에 점진 업세팅 및 확산접합을 적용한 이후 미세조직 관찰 및 인장시험을 수행한 결과, 압하율 45~50%까지 점진 업세팅을 실시

하고 이후 1100°C에서 1시간동안 확산접합을 실시하면 초기의 원통형 기공이 완전히 압착 및 접합된다.

(2) 1.9wt%C 초고탄소강과 1.5wt%C 초고탄소강의 접합 계면을 비교했을 때 1.9wt%C 초고탄소강의 접합 계면이 더 두꺼운 형상이다.

(3) 900°C이하의 온도에서 단조 공정이 수행되는 동안 시멘타이트 내부에 기공이 형성된다. 또한 1.9wt%C 초고탄소강은 1.5wt%C 초고탄소강에 비해 시멘타이트 석출량이 많기 때문에, 단조 온도가 낮을 경우 시멘타이트가 깨지면서 소재 내부에 생성되는 기공이 많다. 따라서 파단 강도 및 파단 변형률이 낮게 측정되었다. 이를 보완하기 위하여 보다 정확한 단조 온도 범위(900~1120°C) 내에서 공정이 수행되어야 한다.

(4) 1차 점진 업세팅 및 확산접합을 실시한 이후 2차 점진 업세팅을 적용하였을 때, 내부의 압착 및 접합된 계면은 다시 열릴 가능성이 있다. 하지만 1100°C에서 1시간 동안 확산접합을 실시한 결과 2차 점진 업세팅을 부여하여도 내부의 접합 계면은 다시 열리지 않는다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 부품소재공동기술개발사업(과제명: 금속압연용 주조재 및 단조재 워크롤)의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] S. H. Kang, H. C. Lim, H. Lee, Y. S. Lee, 2013, Efficient Process Design for Closure and Healing of Voids in Open Die Forging of Superhigh C-Steel Shaft, The 11th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, AIP Conf. Proc., Vol. 1532, pp. 733~740.

[2] H. C. Lim, H. Lee, B. M. Kim, S. H. Kang, 2013, Process Design for Manufacturing 1.5wt%C Ultra-high Carbon Workroll: Void Closure Behavior and Bonding Strength, Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 5, pp. 269~274.

[3] H. C. Lim, H. Lee, B. M. Kim, S. H. Kang, 2013, Forging of 1.9wt%C Ultrahigh Carbon Workroll: Part I-Analysis on Void Formation and Microstructure,

- Trans. Mater. Process., Vol. 22, No. 8, pp. 456~462.
- [4] Y. D. Kim, J. R. Cho, W. B. Bae, 2010, Development of Forging Process Design to Close Internal Void, J. Mater. Process. Technol., Vol. 210, No. 3, pp. 415~422.
- [5] Steve P. Dudra, Y. T. Im, 1990, Analysis of Void Closure in Open-die Forging, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 30, No. 1, pp. 65~75.
- [6] Y. S. Lee, S. U. Lee, C. J. Van Tyne, B. D. Joo, Y. H. Moon, 2011, Internal Void Closure during the Forging of Large Cast Ingot using a Simulation Approach, J. Mater. Process. Technol., Vol. 211, No. 6, pp. 1136~1145.
- [7] C. Y. Park, D. Y. Yang, 1996, A Study of Void Crushing in Large Forgings I: Bonding Mechanism and Estimation Model for Bonding Efficiency, J. Mater. Process. Technol., Vol. 57, No. 1-2, pp. 129~140.
- [8] E. J. Kwak, G. P. Kang, K. Lee, 2012, A Study of Multiple Scale FEM Modeling for Prediction of Inner Void Closing Behavior in Open Die Forging Process, Trans. Mater. Process., Vol. 21, No. 5, pp. 319~323.
- [9] I. J. Choi, H. J. Choi, D. J. Yoon, G. A. Lee, S. J. Lim, 2011, Evaluation methods for Void Closing Behavior in Large Ingot, Trans. Mater. Process., Vol. 20, No. 5, pp. 339~343.
- [10] I. J. Choi, H. J. Choi, D. W. Kim, S. Choi, S. J. Lim, 2010, Void Closing Conditions of Large Ingot by Path Schedules, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 8, pp. 480~485.
- [11] M. C. Song, I. K. Kwon, Y. G. Park, 2007, A Study on the Parameters Determining the Void Crushing Ratio in the Cogging Process of Large Forged Products, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 7, pp. 502~508.
- [12] S. H. Kang, S. W. Kim, Y. S. Lee, 2010, Application of Modified Hydrostatic Stress Model to Internal Void Crushing in Forging of Large-scale Ingot, Steel Res. Int., Vol. 81, pp. 314~317.