

레이저피닝을 이용한 스테인리스강의 표면 경도 강화

임현택, 이명화, 김필규, 박종복, 정성호

광주과학기술원 기전공학과

Enhancement of Surface Hardness of Stainless Steel by Laser Peening

H. T. Lim, M. H. Lee, P. K. Kim, J. B. Park and S. H. Jeong

Department of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology

Abstract

Experimental results for the laser shock peening of stainless steels, duplex stainless steel and STS304, for the enhancement of surface hardness are reported. A high power Nd:YAG laser (532 nm, 2nd harmonics) was used to irradiate the workpiece in water at the irradiances of 5, 10, 15 GW/cm². The surface of a workpiece was covered with Fe or Al foil for protection of the original surface and reduction of laser reflection. The laser pulse densities were varied from 25 pulse/mm² to 75 pulse/mm². In the case of the STS304, the surface hardness increased with increasing pulse density and the maximum increase of about 29% was achieved using Fe foil at 10 GW/cm² and 75 pulse/mm² conditions. The maximum increase in surface hardness of duplex stainless steel was about 8% at 10 GW/cm² and 75 pulse/mm² with also Fe foil. In the case of the Al foil, less increase of surface hardness was obtained, possibly due to the thermal expansion effect.

Key Words: Laser shock peening, Residual stress, Surface hardness, Corrosion resistance

1. 서론

듀플렉스강(Industeel, Cr : 22.64%, Ni : 5.48%, C : 0.02%, Mn : 1.89%, P : 0.03%, Si : 0.28%, Mo : 3.07%, N : 0.19% and balance Fe) 및 스테인리스강304(STS304-DK corporation, Cr : 20%, Ni : 10.5%, C : 0.08%, Si : 1%, Mn : 2%, P : 0.05%, S : 0.03%, balance Fe)은 우수한 기계적 성질을 기반으로 여러 산업 분야에서 사용되고 있는데, 특히 이들 재료는 높은 내마모성과 내부식성으로 인해 원자력 분야와 항공, 자동차 부품 등에 널리 활용되어지고 있다. 그러나 최근 개발되고 있는 해수담수화용 대용량 펌프와 같이 고온 고압 하에서 작동되는 장비의 경우 효율 및 내구성 향상을 위해 기존의 듀플렉스강이나 STS304보다 더욱 기계적 성질이 우수한 재료들이 요구되어진다. 이에 따라 듀플렉스강이나 STS304의 기계적 성질을 향상시킴으로써 효율 및 내구성을 향상시키려는 연구들이 이루어지고 있다. 기존 레이저 열처리의 경우, 고온에서 저온으로 급속한 온도 변화를 통해,

금속의 상변화를 일으킴으로서 표면을 경화시키는 방식으로 스테인리스 강 계열의 경우, 상변화가 -350°C에서부터 이루어져, 현실적으로 레이저 열처리를 이용한 표면 경화는 불가능하다고 볼 수 있다. 금속의 표면경도를 향상시키는 기술로 잘 알려져 있는 샷 피닝(shot peening)은 금속이나 세라믹 등의 구슬을 고속으로 시편의 표면에 충돌시킴으로서, 시편의 잔류압축응력을 증가시키고 이에 따라 내마모성 등이 증가되도록 한다.¹ 그러나 이 기술의 경우 표면의 기계적 성질을 균일하게 증가시키기가 어려우며, 잔류압축응력이 증가되는 영역의 깊이가 250 μm 이하로 낮다.² 또한 시편이 상대적으로 무른 금속의 경우는 그 표면이 거칠어지게 되는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 줄이기 위한 방법으로 1960년대 초반 레이저피닝 기술이 개발된 이래 많은 연구가 수행되어 졌다. 재료 측면에서는 알루미늄부터³ 알루미늄 합금,⁴ STS304,⁵ STS316L⁶ 등 스테인리스강계열의 재료에 까지 다양한 재료에 대하여 레이저피닝이 수행되었으며 그 결과로 재료 내부의 잔류압축응력이 증가되어 피로강도가

향상되는 것이 확인 되었으며,⁷ 재료의 경도 또한 같은 원리로 증가되는 것이 보고되었고⁸ 이때 경도의 증가와 함께 내부식성도 증가하게 되는 것으로 알려져 있다.⁹ 레이저피닝은 Fig. 1(a)와 같이 고출력의 레이저 펄스를 물속에 잠긴 시편에 조사할 때 시편표면에 발생하는 플라즈마의 확산을 물이 막아줌으로 인해 시편 방향으로 강력한 충격파(shock wave)가 발생되고 이에 의해 시편 표면에 잔류압축응력을 발생시키는 원리를 이용한다. 레이저피닝의 경우 잔류응력이 발생하는 영역의 깊이가 약 1 mm 정도로 일반적인 샷 피닝에 비해 4배 이상의 깊이를 가지며, 시편의 표면에 손상을 거의 일으키지 않는 장점이 있다.

레이저피닝에는 여러 가지 실험변수가 존재하는데, 피닝결과에 가장 영향력이 큰 변수 중 하나가 레이저 에너지 밀도이다. 레이저 에너지 밀도는 재료 표면에 발생하는 플라즈마의 압력과 직접적인 관계가 있고 피닝을 수행할 재료에 따라 최적의 레이저 에너지 밀도를 실험적으로 구해야 한다.¹⁰ 레이저 빔의 중첩도 또한 중요한 변수로서 금속표면에 단일 레이저펄스를 조사하는 경우보다 복수의 레이저펄스를 조사함으로써 경화효과를 극대화시킬 수 있다.¹¹ 또한 높은 플라즈마 압력에 의한 피닝효과를 내기 위해서는 레이저 에너지를 플라즈마로 최대한 변환 시켜주어 플라즈마 압력을 증가시켜주면서도 표면손상을 방지할 수 있는 코팅을 사용하는 것이 효과적이는데 이를 위해 알루미늄 박판(foil)이나⁶ 검정페인트⁴ 등이 사용되고 있다.

본 연구에서는 해수담수화용 펌프에 사용되는 질 부품들의 기계적 성질을 향상시키고자, 듀플렉스강과 STS304에 기본적인 레이저피닝을 수행하였으며, 다양한 에너지밀도와 코팅 등의 변수들에 따른 피닝효과의 차이를 실험적으로 확인하였다. STS304의 경우 이미 많은 연구결과가 보고된데 반해, 듀플렉스강의 경우 본 연구에서 최초로 레이저피닝이 수행되었으며, 이에 따라 해수담수화용 펌프의 부품뿐만 아니라, 펌프 본체, 터빈 공구 등 향후 재료 내부의 연성 및 인성을 유지하면서 고경도의 표면이 요구되는 부품을 제작하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1(b)는 본 실험에 이용된 레이저피닝 시스템의 개략도를 나타낸다. 실험용 레이저로는 2차

고주파 Nd : YAG 레이저(Continuum, Powerlite Precision II; wavelength = 532 nm, pulse duration = 8 ns, maximum pulse energy = 1.5 J)가 사용되었다. 레이저 빔은 초점길이 400 mm를 갖는 렌즈를 사용하여 표면에 조사되었으며, 레이저 빔의 크기를 조절하는 방식으로 레이저 에너지 밀도를 조절하여 5, 10, 15 GW/cm²의 세가지 조건에서 실험이 수행되었다. 피닝 시편은 5 mm두께의 듀플렉스강과 STS304이며, 50 × 50 mm²의 크기로 절단 후 실험에 이용되었다. 실험은 시편의 중심영역에서 수행되었으며 X - Y모터 구동형 정밀이송장치를 통해 시편을 이송하면서 10 × 10 mm²의 크기에 레이저 빔이 조사되도록 하였다.

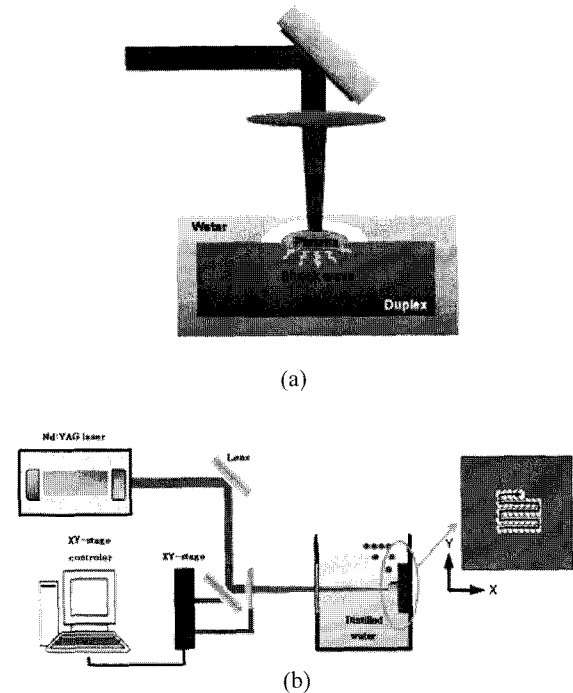


Fig. 1 Schematic diagram of the (a) principle and (b) experimental setup of laser shock peening.

레이저 빔의 중첩도는 X - Y모터의 스캔속도를 조절하는 방식으로 정해지는데 빔의 반복율 (repetition rate)을 X 방향의 속도와 Y 방향 이송거리의 곱으로 나누어 주면 단위면적당 조사되는 레이저 펄스의 개수를 구할 수 있다. 펄스 수 계산을 위한 대략적인 그림은 Fig. 2에 나타나 있으며, STS304의 경우 중첩도의 영향을 확인하기 위해 25, 50, 75 pulse/mm²의 세가지 경우에 대해 실험이 수행되었고, 듀플렉스강의 경우 STS304의 결과를 토대로 75 pulse/mm²에서만 실험이 수행되었다.

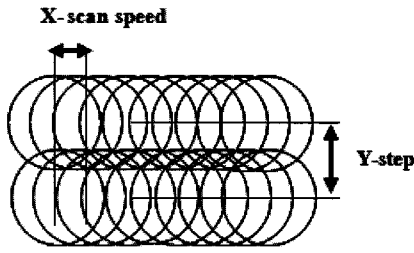


Fig. 2 Schematic diagram representing the scanning of laser beam over the sample surface.

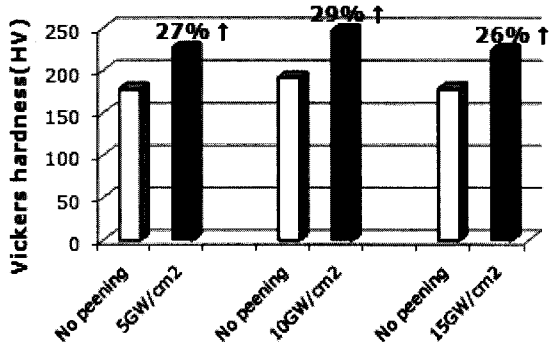


Fig. 3 Effects of laser energy density on the vickers hardness of STS304.

또한, 본 연구에서는 레이저피닝 시에 표면 보호를 위하여 Al 박판과 Fe 박판을 사용하였다. Al 박판과 Fe 박판은 Goodfellow사의 순도 99.5%의 제품을 사용하였으며 두께는 50 마이크로미터에 피닝이 수행될 10 × 10 mm²의 영역을 충분히 커버하기 위해서 20 × 20 mm²로 부착되었다. Al 박판의 경우 박판 부착 시에 시편과 박판 사이에 유격을 줄이기 위해 진공용 그리스(grease)가 사용되었으나, 이 경우 Al 박판에 데미지가 발생하여 Fe 박판의 경우 박판과 시편사이에 진공용 그리스 사용 없이 접착테이프를 활용하여 고정만 시켜준 후 피닝을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 레이저 에너지 밀도와 레이저 빔 중첩도의 영향

모든 실험에서 각 시편에 대해 피닝 실험 시작 전에 레이저가 조사될 영역 내에서 총 6개의 지점에 대해 비커스 경도를 측정 하였으며, 피닝 실험 완료 후 경도가 측정된 지점에서 50 마이크로미터 떨어진 지점의 경도를 측정함으로써 동일한 지점의 피닝에 의한 경도 변화를 측정한다고 가정하였다. Fig. 3은 레이저 에너지 밀도에 따른 STS304

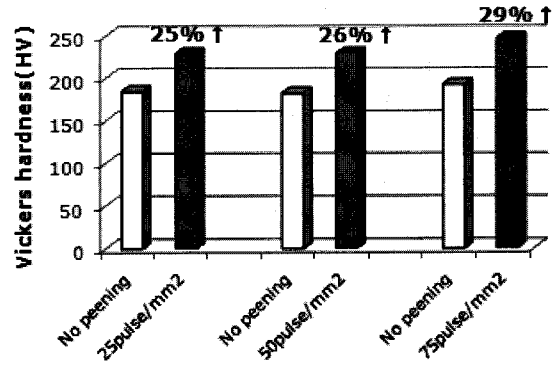


Fig. 4 Effects of laser pulse density on the vickers hardness of STS304.

의 비커스경도 변화를 나타내주고 있다. 보호 층은 Fe 박판을 사용하였고, 레이저 펄스 밀도는 75 pulse/mm²으로 일정하게 고정되었다. 5 GW/cm²의 경우 피닝 이전에 178에서 227로 비커스 경도가 27%정도로 증가하였고, 10 GW/cm²의 경우 192에서 247로 약 29%, 15 GW/cm²의 경우는 178에서 224로 26%가 상승하였다. 이 실험을 통해 최적의 레이저 에너지 밀도는 10 GW/cm²부근에 존재한다는 것을 예측할 수 있다. 최적의 레이저 에너지 밀도는 2 - 2.5 Hugoniot Elastic Limit(HEL) 내에 존재하게 되는데 STS304의 경우, 10 GW/cm²가 이 범위 내에 존재하는 것으로 보인다.¹⁰ Fig. 4는 레이저 펄스 밀도에 따른 STS304의 비커스 경도 변화를 보여주고 있다. 25 pulse/mm²의 경우, 184에서 229로 약 25%의 비커스경도 상승이 이루어졌으며, 50 pulse/mm²의 경우, 182에서 229로 26%, 75 pulse/mm²의 경우 192에서 247로 29% 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 위 실험을 통해 펄스 밀도를 증가시키에 따라 경도의 증가량 또한 증가한다는 것을 알 수 있고, 이 결과를 이용하여 듀플렉스강 실험의 경우 레이저 펄스 밀도를 75 pulse/mm²으로 고정시켰다. 또한 펄스 밀도를 75 pulse/mm²으로 고정시킨 상태에서 5, 10, 15 GW/cm² 조건에서 레이저피닝을 실시한 시편의 표면 경화 깊이를 측정하였는데, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 5 GW/cm²의 경우 초기 경도 값이 178로 깊이 방향으로 1.2 mm까지 초기 경도 값보다 높은 경도 값이 측정되었으며, 10 GW/cm²와 15 GW/cm²의 경우도 같은 방식으로, 10 GW/cm²의 경우 1.2 mm, 15 GW/cm²의 경우 0.4 mm의 경화 깊이를 가짐을 확인하였으며 이를 통해 경화층이 대략 약 1 mm 이내에서 형성되는 것을 알 수 있었다.

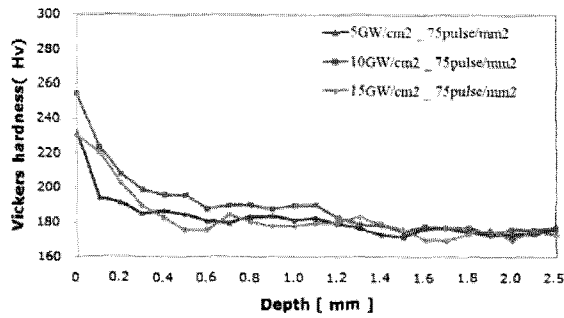


Fig. 5 Measured vickers hardness along the depth of laser-peened STS304.

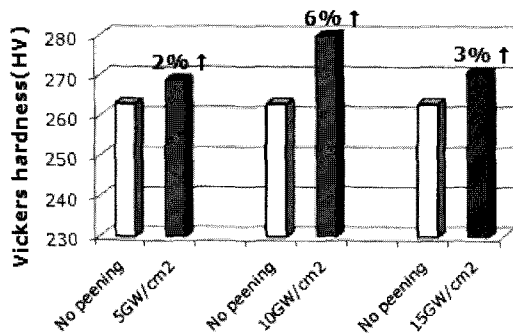


Fig. 6 Effects of laser energy density on the vickers hardness of Duplex stainless steel (Al foil coating).

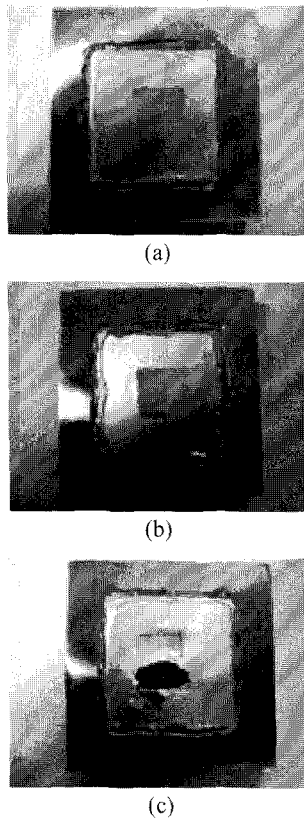


Fig. 7 Damages of the Al protective layers at the laser energy densities of (a) 5 GW/cm², (b) 10 GW/cm² and (c) 15 GW/cm².

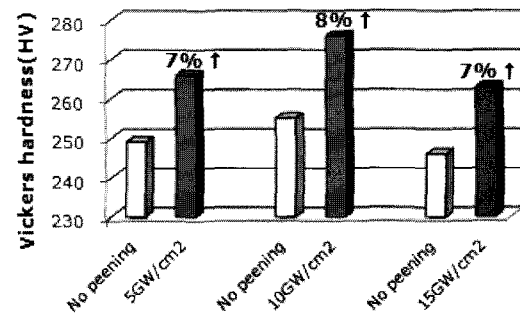


Fig. 8 Effects of laser energy density on the vickers hardness of Duplex stainless steel (Fe foil coating).

3.2 보호층 종류의 영향

듀플렉스강의 경우도 STS304와 동일하게 5, 10, 15 GW/cm²의 세가지 레이저 에너지 밀도에 대하여 피닝이 수행되었다. 서론에서 설명하였듯이 레이저 피닝의 경우, 사용되어지는 보호층의 종류에 영향을 받게 된다. Fig. 6은 보호층으로 Al 박판을 사용하였으며, 5 GW/cm²의 경우 263에서 269로 비커스 경도가 2% 증가, 10 GW/cm²의 경우 263에서 280로 6%, 15 GW/cm²의 경우 263에서 271로 3% 증가가 이루어 졌다. 이때 레이저피닝 시, Al 박판의 손상이 Fig. 7에서와 같이 상당히 크게 발생하였는데, 이는 Al 박판의 열 변형이나, 혹은 박판과 시편의 유격을 줄이기 위해 사용된 진공용 그리스의 영향에 의한 것으로 예측된다. 이와 같이 보호층으로 사용하는 Al 박판이 손상될 경우, 직접적으로 시편에 가해지는 충격파의 압력이 줄어들게 되어 경도 증가량도 줄어들 수 있을 것으로 판단되어, Fe 박판의 경우 진공용 그리스를 사용하는 대신 레이저가 직접 조사되지 않는 영역에 접착용 테이프를 사용하여 박판을 시편에 부착시켰다. Fig. 8은 보호층으로 Fe 박판을 사용하였을 경우에 대한 결과로 5 GW/cm²의 경우 246에서 266으로 비커스 경도가 7% 가량 상승하였으며, 10 GW/cm²의 경우 255에서 276으로 8%, 15 GW/cm²의 경우 246에서 263으로 7%가 상승하였다. Fe 박판의 경우 Al 박판에서와 같은 박판의 손상이 일어나지 않았으며, 그 결과로 Al 박판 사용 시에 비하여 비교적 높은 경도증가를 측정할 수 있었던 것으로 추정된다. 위의 결과를 통해 듀플렉스강 또한 STS304와 마찬가지로 미세하게나마 10 GW/cm² 주변에서 최대의 경도상승 효과를 얻을 수 있음을 확인하였으며, 반면 STS304에 비해 경도 증가량이 상대적으로 작은 것을 확인할 수 있었는데, 이는 듀플렉스강 자체가 STS304와

비교하였을 때 약 1.4 배 정도 큰 경도값을 가지고 있고, 동적 항복강도도 상대적으로 커서, 즉 플라스틱 변형량과 직접적으로 관계되는 HEL 값이 높아, 그만큼 시편에 압축잔류응력을 만들어내기가 어렵기 때문인 것으로 보인다.¹⁰

4. 결론

본 논문에서는 해수담수화용 펌프의 부품으로 사용되어지고 있는 듀플렉스강과 STS304의 표면경도를 향상시키기 위한 레이저피닝 실험 결과를 보고하였다. STS304의 경우 비커스 경도가 최대 29%까지 향상되었으며, 듀플렉스강의 경우 최대 8% 향상되었다. 레이저피닝의 효과를 극대화시키기 위해서 STS304와 듀플렉스강의 경우, 레이저 에너지 밀도는 10 GW/cm² 부근에서 레이저 펄스 밀도는 25 pulse/mm²에서 75 pulse/mm² 범위내에서 펄스 밀도가 높을수록 표면경도가 상승하는 것이 확인되었고, 최대 경도깊이는 약 1.2 mm로 샷 피닝에 비해 큰 경도깊이를 갖는 것이 확인되었다. 보호층으로는 Fe와 Al 박판이 사용되었으며, Al 박판의 경우 열변형이나 진공용 그리스의 영향에 의해 Fe 박판에 비해 낮은 경도효과를 나타냈다. 현재까지 수행된 실험 결과들은 매우 다양한 실험 변수 중 가장 기초적이며 간단한 변수들에 대한 실험결과들로서 더욱 다양한 보호층, 세밀한 에너지 밀도, 펄스 밀도에서 추가적인 실험이 수행되고 최적화가 이루어진다면 현재의 결과들보다 더욱 높은 경도 증가가 이루어질 것으로 기대된다.

참고문헌

- 1) Khabou M. T., Castex. L. and Inglebert G., "The effect of material behaviour law on the theoretical shock peening results," *European Journal Mechanics A/Solids*, 9, 537-49, 1990.
- 2) Clauer A. H., "Laser shock peening for fatigue resistance," *Proceedings of Surface Performance of Titanium*, Gregory J. K., Rack H. J. and Eylon D. (eds), TMS, Warrendale, PA. The Metal Society of AIME, 217-30, 1996.
- 3) Griffin R. D., Justus B. L., Campillo A. J. and Goldberg L. S., "Interferometric studies of the pressure of a confined laser-heated plasm," *Journal of Applied Physics* 59, 1968-71, 1986.
- 4) Clauer A. H. and Fairand B. P., "Interaction of laser-induced stress waves with metals," *ASM Conference Applications of Laser in Material Processing*, Washington DC, ASM International, Material Park, OH44073-0002,1-22, 1979.
- 5) Sano Y., Mukai N., Okazaki K. and Obata M., "Residual stress improvement in metal surface by underwater laser irradiation," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 121, 432-6, 1997.
- 6) Peyre P., Berthe L., Scherpereel X. and Fabbro R., "Laser-shock processing of aluminium-coated 55C1 steel in water-confinement regime, characterization and application to high-cycle fatigue behaviour," *Materials Science*, 33, 1421-9, 1998.
- 7) Clauer A. H., Walters C. T. and Ford S. C., "The effects of laser shock processing on the fatigue properties of 2024-T3 aluminum," *Lasers in Materials Processing*, Metzbowser E. A. (ed), American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 7-22, 1983.
- 8) Peyre P., Scherpereel X., Berthe L., Carboni C., Fabbro R., Beranger G. and Lemaitre C., "Surface modifications induced in 316L steel by laser peening and shot-peening - influence on pitting corrosion resistance," *Materials Science and Engineering*, A280, 297-302, 2000.
- 9) Reitz W., "Laser shock peening solves many performance issues," *Surface Engineering*, 18, 1, 2002.
- 10) Peyre P., Fabbro R., Merrien P. and Lieurade H. P., "Laser shock processing of aluminium alloys: application to high cycle fatigue behaviour," *Materials Science and Engineering*, A210, 102-13, 1996.
- 11) Chu J. P., Rigsbee J. M., Banas G., Lawrence JR. F. V. and Elsayed-ali H. E., "Effects of laser-shock processing on the microstructure and surface mechanical properties of Hadfield manganese steel," *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26A, 1507-17, 1995.