

표면 강화처리 레일의 마모 및 피로 특성

장세기^{a*}, 편영식^b

Wear and Fatigue Properties of Surface-Hardened Rail Material

Seky Chang^{a*}, Young-Sik Pyun^b^a Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 16105 Korea^b School of Mechanical and ICT Convergence Engineering, Sunmoon University,
70, Sunmoon-ro, 221beon-gil, Tangjeong-myeon, Asan, Chungnam-do, 31460, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

| | | | |
|----------|----|---------|------|
| Received | 22 | August | 2016 |
| Revised | 6 | October | 2016 |
| Accepted | 14 | October | 2016 |

Keywords:

Normal rail
Heat treated rail
UNSM
Wear
Rolling contact fatigue

ABSTRACT

Railway tracks are repeatedly overstressed and damaged owing to increase in passing tonnage and numerous contact cycles between wheels of train and rails. In order to ensure safe train operation, heat-treated rails are used in addition to regular inspection and maintenance of these rails. Normal rails were treated using ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) to strengthen the surface of rails. A few changes in surface properties were detected with respect to hardness and compressive residual stress after UNSM treatment. Wear and rolling contact fatigue tests were performed using rails whose surfaces were hardened by UNSM and heat-treated rails. The amount of wear and fatigue life cycles were measured to estimate the effect of UNSM on the rail material. The material of the surface-hardened rail showed improved wear and rolling contact fatigue properties.

1. 서론

레일과 차륜이 접촉을 하면 레일 위에서 차륜의 진동 및 슬립이 일어나며 마찰 마모가 진행된다. 레일의 마모는 소재, 레일/차륜의 표면상태, 레일의 형상, 곡선궤도 반경, 경사도, 열차속도 및 유지 보수 관리 등에 의해 영향을 받는다. 레일이 일단 손상을 받으면 균열이 크게 성장하기 전에 보수되어야 한다. 손상된 레일 표면은 열차의 차륜과 자주 접촉하면서 차륜 상태를 더욱 열악하게 만든다. 철도의 곡선구간에서는 레일의 게이지 코너가 차륜 프린지와 밀착이 되고 이는 직선구간에서보다 심한 피로와 마모를 야기시킨다. 안전한 철도 운행을 위해서 레일의 손상과 유지보수 및 차륜에 관한 많은 연구가 있었다¹⁻⁷⁾.

열악한 환경에서 사용되는 레일의 표면을 강화시키기 위해서 레일 헤드를 종종 열처리하여 사용한다. 내마모성이 우수한 고탄소강 레일은 내마모성을 더욱 향상시키기 위해서 레일의 헤드에 담금질 및 템퍼링 등의 열처리를 한다. 열처리의 방법에는 퀸치 템퍼(quench temper)와 슬랙 퀸치(slack quench)가 있는데 전자는 레일 강을 800°C 전후에 가열한 후, 물 또는 기름 속에 넣어 급랭하여, 오스테나이트(austenite)의 강 조직을 솔바이트(sorbite)로 변형시켜 견고하며 마모에 강한 조직을 얻는 방법이고, 후자는 레일 강을 가열 한 후에 공기 중에서 서서히 냉각시켜 미세한 페라이트(ferrite) 조직을 얻는 방법인데 이는 솔바이트와 마찬가지로 견고하며 마모에 강한 조직이다. 이들을 담금질 레일이라고도 하는데 담금질에는 가스 화염 가열법과 고주파 가열법이 있다. 대도시 열

* Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5381

Fax: +82-31-460-5021

E-mail address: seky@krii.re.kr (Seky Chang).

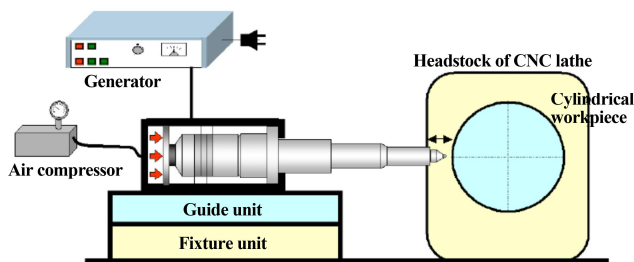
차 구간 등 열차 횡수가 많고 곡선 구간의 바깥쪽에 위치한 레일은 편마모로 인해 갱환주기가 잦아 이와 같은 열처리 레일을 사용한다. 레일 재질은 강도, 내마모성, 내식성 등을 고려하여 강설계가 되었으며 높은 인성과 우수한 내피로성, 용접이 가능한 특성을 지니고 있다^[8-10].

본 연구는 레일 헤드를 강화시키기 위해서 사용되는 열처리에 의한 효과와 UNSM에 의한 효과를 비교하여 레일의 수명을 연장하고 유지보수 간격을 연장시키는데 기여하고자 한다. UNSM은 ultrasonic nanocrystal surface modification의 약자이며 초음파 진동을 이용하여 금속의 표면을 일정한 압력으로 20~40 kHz의 속도로 타격을 하면서 금속의 표면을 개질시키는 기술이다. 레일 소재의 표면층에서 결정립의 크기를 미세화 시키고 압축잔류응력을 유발하여서 표면경도 및 내마모성을 높이는데 효과적이다^[11].

UNSM 장치는 텅스텐카바이드 볼과 금속의 표면을 물리적으로 접촉시켜 미세한 변형을 발생시키면서 금속의 표면을 강화시킨다. 텅스텐카바이드 볼은 직경이 1~5 mm이며 초음파 장치에 부착되어 있는데, 이는 mm² 당 10만 회까지 금속의 표면을 타격할 수 있다. 이런 과정에서 금속의 표면에 미세한 변형이 유발되고 압축잔류응력이 발생하며 결정립은 매우 미세해지면서 표면경도를 높게 된다. Fig. 1은 UNSM 장치 개략도 및 시편 위에서 작동하고 있는 모습을 보여준다^[12-15].

2. 레일 소재 및 표면층 특성

중량(重量) 기차 및 고속 라인에서 주로 사용되고 있는 실제 레일을 제작사로부터 입수하였으며 그들 중 일부는 보통레일이고 나머



(a) Schematic layout of the device



(b) UNSM device working on the specimen

Fig. 1 UNSM device[ref]

지는 열처리레일이다. 레일소재는 중량비로 0.68~0.80%의 탄소를 공통으로 함유하였고 보통레일의 경우 0.15~0.58%의 규소, 0.70~1.20%의 망간, 열처리레일은 0.72~0.82%의 규소, 0.80~1.20%의 망간을 각각 함유하였다. 열처리레일은 레일 제조공장에서 생산되어 열처리까지 완료된 제품을 활용하였는데 앞서 설명된 고주파 가열 및 퀀치 템퍼 방법에 의해서 열처리되었고 철도운영 현장에 투입되고 있다.

Fig. 2는 (a) 레일로부터 절단된 레일 헤드 및 (b) 디스크 형태로 가공된 최종 시편 형상을 보여주는데 레일 헤드에서 원기둥 형태로 가공 절단된 레일 소재는 최종적으로 직경 50 mm, 두께 8 mm의 디스크 형태로 만들어졌다. 시편의 표면은 Table 1의 작업조건으로 UNSM장치에 의해 처리되었고, Fig. 2(b)의 사진에서 링 형태로 다소 진한 색상을 나타내고 있다. 이는 UNSM에 의해서 표면 거칠기에 변화가 생겼기 때문이다.

가공된 레일 소재의 표면은 UNSM처리에 의해서 일정한 크기를 한 딩플들이 규칙적인 배열을 하게 되며^[16] 따라서 빛의 반사가 UNSM 처리 이전과는 달라지고 사진에서 색상이 다르게 나타난다. 이러한 미세 딩플들은 금속표면에 압축 소성변형을 일으키면서 표면을 강화시키는 효과를 가져오고 표면층의 마찰계수를 낮춰 주면서 마찰 마모에 의한 손상을 줄이기도 한다^[17,18].

Table 2는 본 실험에 사용된 레일의 기계적 성질 요구 값을 보여준다. 인장응력은 880 N/mm² 이상, 연신률은 10% 이상이고 표면경도는 260~300 HB 범위에 들어야 한다.

레일 시편에 대한 표면경도, 표면조도 및 표면층의 압축잔류응력



(a) Rail head part (b) Test specimen

Fig. 2 Rail head and test specimen

Table 1 UNSM treatment parameters

| Static load | Amplitude | Feed rate | Speed | Ball size (diameter) |
|-------------|-----------|-----------|--------|----------------------|
| 60 N | 30 μm | 0.07 mm | 20 rpm | 2.38 mm |

Table 2 Required mechanical properties of normal rail

| Rail type | Tensile strength (N/mm ²) | Elongation (%) | Surface hardness (HB) |
|--------------------|---------------------------------------|----------------|-----------------------|
| Normal rail 60 kgK | 880 ≤ | 10 ≤ | 260~300 |

이 측정되었고 결과는 Table 3에 보인다. 표면경도 측정은 브리넬 (brinell) 경도기를 사용하였고 표면조도는 이차원 조도계를 사용하여 측정하였다. Table 3에 표기된 표면조도는 평균 조도 값이며 이차원 평면에서 임의로 세 위치를 선정하여 측정하였고 이를 산술 평균하여 얻어진 값이다. 압축잔류응력은 시편의 표면층에서 측정되었고 잔류응력 측정장치(proto portable residual stress measurement system)를 사용하여 측정하였다.

보통레일의 표면강화 처리 이후 경도 값은 약 23.7% 증가하였고 압축잔류응력은 105.9% 증가하였다. 열처리레일의 경도 값은 표면강화 처리한 보통레일의 경도 값에 약간 못 미치게 나타났다. 표면조도는 레일 시편을 절단 및 가공하는 과정에서 영향을 받을 수 있는데 다만 표면강화 처리를 한 이후에는 균일한 형태의 딥플들이 일정하게 배열되면서 표면층에 미세한 소성변형을 유발시킨다.

그러한 결과로 레일 소재의 표면층에서 금속조직이 압축응력 상태에 놓이게 되고 표면강화 처리 이후 압축잔류응력이 크게 증가한 것을 확인할 수 있다. 열처리레일 소재의 압축잔류응력은 표면강화 처리된 보통레일에 비해서 매우 낮게 측정되었고 이는 열처리레일 표면에 응력에 의한 추가의 변형을 가하지 않았기 때문이다.

3. 레일 소재의 마모시험

레일 소재의 마모시험은 시편 표면에 별도의 윤활계를 적용하지 않고 실온에서 자연 건조된 상태의 조건에서 디스크 위에 한 개의 고정된 세라믹 볼을 세팅한 후에 ASTM G99에 따라 실시하였다. 마모시험 전후의 시편 무게를 측정하여 마모량을 산출하였는데 무게측정에 사용된 저울(Acculab ALC-310.3)은 ± 0.0001 g의 정밀도를 갖추고 있다.

Fig. 3은 본 실험에 사용된 마찰 마모시험기의 개략적인 구조를 보여주고 있다. 본 장치는 고정된 볼을 구름 상태의 볼(rolling ball)로 교체하면 구름접촉피로(rolling contact fatigue, RCF)를 시험할 수 있도록 설계되었다. 또한 적용된 힘과 횡방향의 힘에 대한 측정 계산 값으로부터 마찰계수를 구할 수도 있다.

Fig. 4에 보이는 마모시험 그래프는 보통레일과 열처리레일의

내마모 특성을 비교한 결과인데 보통레일만 표면강화 처리가 되었고 열처리레일은 처리되지 않았다. 마모시험은 2.0 GPa의 접촉응력과 500 rpm의 회전속도를 유지한 상태에서 마모시험 유지 시간을 세 단계로 변경하면서 실시하였다. 60분 마모시험을 진행시킨 이후 측정된 마모량의 변화는 비슷한 값을 보여주고 있다. 열처리레일은 표면강화 처리를 하지 않았음에도 표면강화 처리된 보통레일과 비슷한 마모량을 나타내며 우수한 내마모 특성을 보여주고 있다.

마모시험이 120분 진행된 이후에 표면강화 처리된 보통레일과 열처리레일의 마모량은 차이를 보이기 시작했고 180분 동안 마모시험이 진행된 이후에는 열처리레일의 마모량이 표면강화 처리된 보통레일보다 약 4% 정도 더 높게 나타났다.

Fig. 5는 마모시험 시간을 120분, 회전속도를 500 rpm으로 유지한 상태에서 접촉응력을 변화시키면서 마모량 변화를 측정된 결과이다. 마모시험의 접촉응력은 1.5 GPa, 2.0 GPa 및 2.5 GPa 세 종류로 구분하였다. 가장 낮은 1.5 GPa 접촉응력에서의 마모

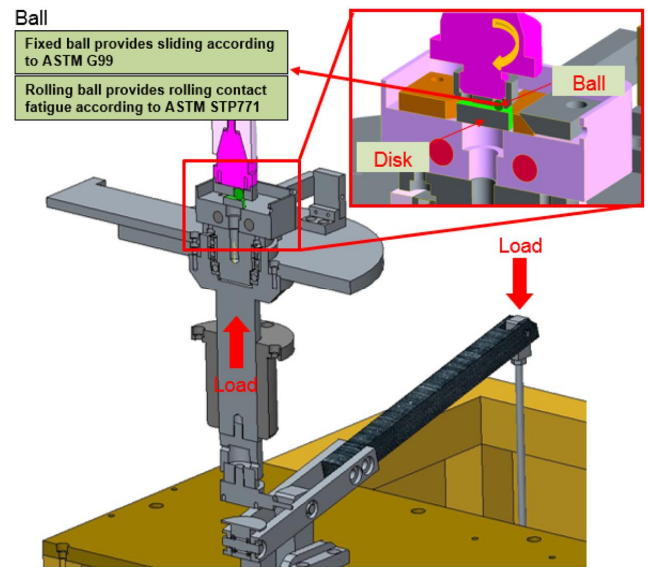


Fig. 3 Schematic view of a ball-on-disk friction and RCF tester

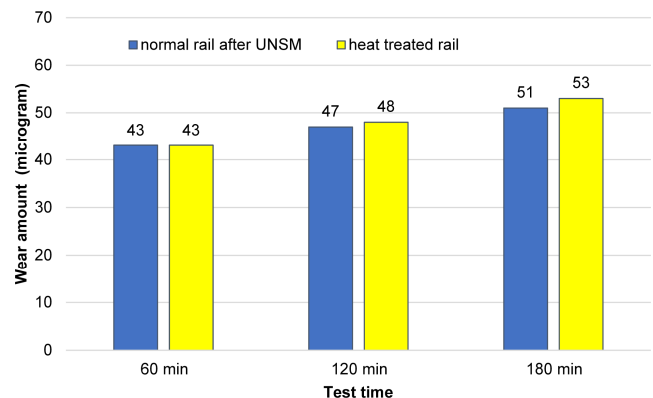


Fig. 4 Wear amount of the rail materials with time

Table 3 Surface properties and residual stress of the specimens

| Test Items | Normal rail | | Heat treated rail |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Before treatment | After treatment | Before treatment |
| Surface hardness | HB 291 | HB 360 | HB 353 |
| Surface roughness | 0.147 μm | 0.133 μm | 0.142 μm |
| Compressive Residual stress | 303 MPa | 624 MPa | 211 MPa |

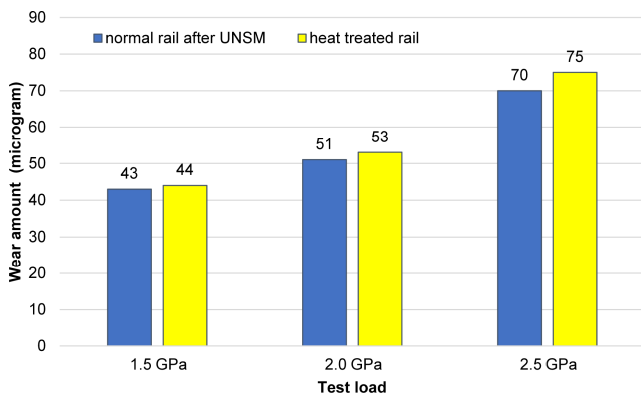


Fig. 5 Wear amount of the rail materials with contact stress

시험 결과, 열처리레일은 표면강화 처리한 보통레일의 마모량보다 약 2% 높게 나타났고 2.0 GPa 접촉응력에서 시험한 결과는 약 4%의 차이를 보이며 열처리레일의 마모량이 높게 나타났다. 시험에 사용된 접촉응력들 중에서 가장 높은 2.5 GPa에서는 열처리레일의 마모량이 표면강화 처리된 보통레일보다 약 7% 정도 높게 측정되었다.

시험의 마모량은 주로 접촉면적에 의해 많은 영향을 받지만 위의 마모시험 결과에서 보다시피 마모시간 및 접촉응력들도 마모량의 차이에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 레일의 주된 파손원인들 중 하나로 추정되는 열차의 하중 변화에 따라 마모량이 변하는 것은 마모시험의 접촉면에서 이탈되는 금속입자들의 양이 하중의 증가와 함께 증가하는 것으로 볼 수 있다^[19]. 따라서, 레일과 차륜의 접촉부에 작용하는 응력의 증가는 구름접촉피로에 의한 파손에 직접적인 영향을 미칠 수가 있다.

레일의 열처리 효과는 내마모 특성을 향상시키는데 도움이 되지만 보통레일보다 다소 높은 마찰계수를 나타내고 UNSM 처리 이후에는 마찰계수가 감소되는 것으로 보고되고 있다^[19]. 열처리레일은 마모가 심한 구간에서 보통레일을 대체하여 사용함으로써 우수한 내구성 효과를 보기 위해 제작된다. 그러나 UNSM 처리된 보통레일보다 마모량이 크게 나타나는 것은 마찰계수의 차이에 의한 영향일 가능성이 있다

4. 레일 소재의 구름접촉 피로시험

Table 4는 레일 소재에 대한 구름접촉 피로시험조건을 보여주며 시험장치는 Fig. 3에 보이는 장치에서 고정된 볼을 구름상태의 볼(rolling ball)로 교체한 후 시험하였다. 피로시험의 접촉응력은 2.5 GPa 및 3.0 GPa로 설정하여 시험하였다. 구름접촉피로에 의한 균열의 발생 및 성장에 의한 파손과정은 열차의 차륜과 레일이 빈번하게 접촉하고 높은 하중이 걸리는 환경에서 마모와 함께 동반되는 철도의 대표적인 결함 형태이다.

Table 4 Test conditions for rolling contact fatigue

| Contact stress | Check time | Speed |
|----------------|------------|---------|
| 2.5 GPa/ball | 24 h | 500 rpm |
| 3.0 GPa/ball | 24 h | 500 rpm |

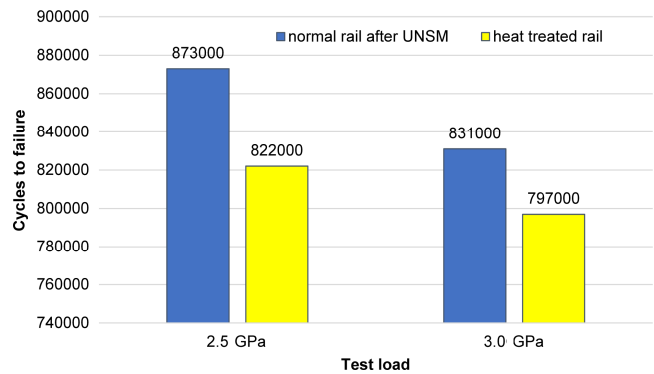


Fig. 6 Rolling contact fatigue of the rail materials with contact stress

Fig. 6에서 보면, 2.5 GPa의 시험조건에서 표면강화 처리가 된 보통레일의 피로수명은 873,000 사이클로 측정되어 822,000 사이클로 측정된 열처리레일보다 피로수명이 약 6.2% 향상되었다. 3.0 GPa의 시험조건에서는 표면강화 처리된 보통레일의 수명이 열처리레일의 피로수명에 비해서 약 4.3% 향상되었다.

보통레일은 열처리레일에 비해서 경도 및 내마모성 등이 떨어지는데 UNSM에 의한 표면강화 처리에 의해서 이러한 특성들이 크게 향상된다. Cherif 등^[20]의 보고에 의하면 UNSM 처리과정을 거치면서 금속 시험편의 표면층에 심한 소성변형이 발생하고 결정립 크기가 수십 나노미터로 작아지는데 결정립의 크기가 작아지면서 홀 페치 강화 효과(hall petch relation effect)에 의해 강도 증가 효과를 가져오고 표면층의 금속조직은 압축응력상태에 놓이면서 조밀한 상태가 된다. 내마모성 및 피로 특성의 향상은 표면경도 및 표면층 압축잔류응력의 증가에 기인하는 것임을 알 수 있다.

열처리레일은 보통레일보다 내구성이 우수하여 가혹한 열차 운행 환경에서도 레일의 건전한 상태를 유지시키고 차륜의 손상을 줄일 수 있는 효과를 가져온다. 본 연구를 통하여 보통레일을 UNSM 장치에 의해서 표면을 강화처리하면 열처리레일과 비교하여 동등하거나 또는 그 이상의 내구성을 가질 수 있음을 확인하였다. 열처리레일은 레일을 현장에 설치하기 전에 열처리과정을 완료하여야 한다. 반면에 UNSM에 의한 레일의 표면강화 처리는 현장에서도 작업이 가능하다. 이미 사용 중인 레일의 일부 구간에 대한 내구성 개선이 필요한 경우, UNSM 장치를 사용하면 레일을 교체하지 않고도 열처리레일 동등 이상의 작업효과를 볼 수가 있다.

5. 결론

가혹한 조건에서 레일의 내구성을 향상시키기 위해 사용되는 열처리레일과 UNSM에 의해 표면강화 처리된 보통레일의 마모 및 구름접촉피로 특성을 비교하였다. 열처리레일의 표면경도는 보통레일보다는 높았으나 표면강화 처리된 보통레일에는 약간 못 미치게 측정되었다. 표면층의 압축잔류응력은 표면강화 처리된 보통레일이 열처리레일보다 매우 높게 측정되었다.

마모시험의 유지 시간을 증가시키면서 내마모 특성을 비교하였을 때, 열처리레일의 내마모 특성은 UNSM에 의해서 표면강화 처리된 보통레일보다 약간 떨어졌지만 차이는 4% 수준으로 나타났다. 접촉응력을 변화시키면서 내마모 특성을 비교하였을 때도 열처리레일은 표면강화 처리된 레일보다 전반적으로 뒤떨어지게 나타났다. 두 종류의 접촉응력 조건에서 실시한 구름접촉피로 시험결과는 UNSM에 의해 표면강화 처리된 레일이 열처리레일보다 약 4~6% 우수한 피로수명을 보였다.

보통레일은 열처리레일에 비해서 표면경도를 비롯하여 내마모성, 내피로 특성이 뒤떨어지지만 UNSM에 의해서 표면강화 처리가 된 이후에는 열처리레일과 동등 이상의 특성을 지닐 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Donzella, G., Mazz, A., Petrogalli, C., 2009, Competition between Wear and Rolling Contact Fatigue at the Wheel-Rail Interface: Some Experimental Evidence on Rail Steel, *Journal of Rail and Rapid Transit*, 223:1 31-44.
- [2] Wang, W. J., Liu, T. F., Wang, H. Y., Liu, Q. Y., Zhu, M. H., Jin, X. S., 2014, Influence of Friction Modifiers on Improving Adhesion and Surface Damage of Wheel/Rail under Low Adhesion Conditions, *Tribology International*, 75 16-23.
- [3] Ryu, S. H., Kim, S. S., Kim, D. S., Kim, S. Y., Hong, J. H., 2014, Verification of Running Safety Evaluation Method for High-speed Railway, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 23:3 310-317.
- [4] Guo, H.-M., Wang, Q., Wang, W.-J., Guo, J., Liu, Q.-Y., Zhu, M.-H., 2015, Investigation on Wear and Damage Performance of Laser Cladding Co-based Alloy on Single Wheel or Rail Material, *Wear*, 328 329-337.
- [5] Cho, J. U., Han, M. S., 2012, Structural Analysis on the Wheel of Railway Vehicle, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* 21:3 451-458.
- [6] Zhi, S., Li, J., Zarembski, A. M., 2015, Grinding Motor Energy Saving Method based on Material Removal Model in Rail Grinding Processes, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2:1 21-30.
- [7] Rajanna, S., Shivanand, H. K., Deep, B. A., 2009, Improvement in Mechanical Behavior of Expulsion with Heat Treated Thermite Welded Rail Steel, *Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 60 558-562.
- [8] Cannon, D. F., Edel, K.-O., Grassie, S. L., Sawley, K., 2003, Rail defects: an overview Fatigue and Fracture of Engineering ,*Materials and Structures*, 26 865-886.
- [9] Ueda, M., Uchino, K., Kobayashi, A., 2002, Effects of carbon content on wear property in pearlitic steels, *Wear*, 253 107-113.
- [10] Satoh, Y., Tatsumi, M., Kasiwaya, K., Ueda, M., Yokoyama, H., 1999, Development of Anti-Darkspot Bainitic Steel, *Rail Quarterly Report of RTRI*, 40:2 86-91.
- [11] Cho, I. H., Song, G. H., Kim, C. S., Nobuhide, A., Combs, A., Park, J., Suh, C. M., Park, J. H., Pyoun, Y. S., 2005, Nano structured surface modification of tool steel and its beneficial effects in mechanical properties, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19 2151 -2156.
- [12] Amanov, A., Cho, I.-S., Kim, D.-E., Pyun, Y.-S., 2012, Fretting Wear and Friction Reduction of Cp Titanium and Ti-6Al-4V Alloy by Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification, *Surface and Coatings Technology*, 207 135-142.
- [13] Amanov, A., Penkov, O. V., Pyun, Y. S., Kim, D.-E., 2012, Effects of Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification on the Tribological Properties of AZ91D Magnesium Alloy, *Tribology International*, 54 106-113.
- [14] Suh, C.-M., Song, G.-H., Suh, M.-S., Pyoun, Y.-S., 2007, Fatigue and Mechanical Characteristics of Nano-Structured Tool Steel by Ultrasonic Cold Forging Technology, *Materials Science and Engineering: A*, 443:1 101-106.
- [15] Amanov, A., Cho, I., Pyoun, Y., Lee, C., Park, I., 2012, Micro-Dimpled Surface by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification and Its Tribological Effects, *Wear*, 286-287 136-144.
- [16] Gill, A., Telang, A., Mannava, S.R., Qian, D., Pyoun, Y.S., Soyama, H., Vasudevan, V.K., 2013, Comparison of mechanisms of advanced

- mechanical surfacetreatments in nickel-based superalloy, *Materials Science & Engineering A*, 576 346-355.
- [17] Amanov, A., Pyoun, Y. S., Zhang B., Park, J. H., Nohava, J., 2011, Preliminary study of the effect of micro-scale dimple size on friction and wear under oil-lubricated sliding contact, *Tribology online*, 6:7 284-290.
- [18] Amanov, A., Pyoun, Y.S., Cho, I.S., Lee, C.S., Park, I. G., 2011. The Evaluation of the Micro-tracks and Micro-dimples on the Tribological Characteristics of Thrust Ball Bearings, *Journ. of Nanosci. and Nanotechn.*, 11:1 701-705.
- [19] Chang, S., Pyun, Y. S., 2015, Wear and Chattering Characteristics of Rail Materials by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16:11 1-8.
- [20] Cherif, A., Pyoun, Y., Scholtes, B., 2010, Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on Residual Stress State and Fatigue Strength of AISI 304, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19 282-286.