

서브제로 온도 및 시간이 다른 STS316L의 탄성파 특성

Elastic Wave Properties of STS316L with Different Subzero Temperature and Time

이금화¹, 구경희¹, 탁영준², 권영국², 신기항², 남기우^{1,2*}

Gum-Hwa Lee¹, Kyoung-Hee Gu¹, Young-Joon Tak²,

Yung-Kug Kwon², Ki-Hang Shin², Ki-Woo Nam^{1,2*}

〈Abstract〉

In this study, STS316L rolled at five rolling degrees were treated with two types of subzero temperatures for 10, 30, and 60 minutes, respectively, and the dominant frequencies of elastic waves was investigated. The dominant frequency was higher as the subzero temperature was lower and the subzero treatment time was longer at each rolling degree. On the other hand, the dominant frequency was higher as the elongation decreased. In the time-frequency analysis for subzero temperature and time of the specimen with a rolling degree of 33%, the dominant frequency was higher at a subzero temperature of -196°C than -50°C regardless of subzero treatment time.

Keywords : STS316L, Dominant Frequency, Elastic Wave, Rolling Degree, Subzero Temperature and Time

1 부경대학교 마린융합디자인공학과 대학원생

1 Graduate Student, Dept. of Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University

2 부경대학교 재료공학과 대학원생

2 Graduate Student, Department of Materials Science and Engineering, Pukyong National University

1,2* 정희원, 교신저자, 부경대학교 재료공학과, 마린융합디자인공학과 교수

1,2* Professor, Dept. of Materials Science and Engineering & Dept. of Marine Design Convergence Engineering, Pukyong National University

E-mail: namkw@pknu.ac.kr

1. 서론

구조물은 설계 수명을 초과하여 사용하는 경우가 많아지고 있다. 이러한 노화 구조물은 부식 및 피로로 인하여 내부 손상이 발생할 가능성이 많다. 구조물의 부식은 사용하는 환경에 따라서 부식 속도가 다를 수 있다. 피로는 응력 집중부에서 균열 발생 및 전파하며, 부식 환경은 악화시킨다. 구조물의 손상은 감지하지 못할 경우, 인적 및 물적으로 막대한 비용이 발생할 수 있다. 부식과 피로로 인한 구조물의 지속적인 검사 및 유지 보수는 안전하고 효율적인 수명 연장의 핵심 요소이다.

한편 강 구조물은 열화, 온도 변화 및 외력으로 균열 발생 또는 소성 변형으로 재료 내부에서 탄성파가 발생한다[1-3]. 탄성파는 사용 하중을 받는 구조물의 손상을 모니터링하기 위하여 적용되는 비파괴방법이다. 많은 연구는 다양한 매개변수와 재료 손상과의 관계를 수행하였다[4,5]. 탄성파는 항복의 시작을 감지하고, 균열에 대한 응력확대계수와 관련이 있는 것으로 알려졌다[6-8].

최근 FFT(Fast Fourier Transform) matlab을 활용하여 탄성파의 탁월주파수를 결정하는 연구가 수행되고 있다[9,10]. 탁월주파수는 가장 많이 반복되는 진동 진폭이 최대인 신호의 주파수이다. 따라서 이러한 탁월주파수는 재료의 기계적 특성에 따라서 다르게 나타나므로, 특성의 파악은 구조물의 보수유지에 매우 유익할 것으로 판단되어, 다양한 재료 및 조건에 따르는 탄성파의 탁월주파수를 연구하였다[11-17].

스테인리스강은 퀘칭 냉각속도에 따라서 잔류 오스테나이트 양이 달라지고,[18-20] 경도 저하, 치수 불안정 및 연마균열 등의 문제점이 나타난다. 이 문제를 해결하기 위하여 서브제로처리(subzero treatment)하면, 마르텐사이트로 변태하여, 경도가 상승하여 내마모성이 향상된다[21-24].

그러나 서브제로 처리한 STS316L의 유지 보수의 측면에서 파괴에 따르는 탄성파 특성을 연구한 것은 없다.

본 연구는 5가지의 압연율(0, 16, 33, 50, 66 및 80%)로 압연한 오스테나이트계 STS316L을 -50°C 및 -196°C 서브제로 온도에서 각각 10분, 30분 및 60분 서브제로 처리하였다. 기계적특성은 서브제로 처리한 스테인리스강을 사용하여, 인장강도, 연신율, 로크웰경도를 측정하였다. 또한 인장시험에서 발생하는 탄성파를 검출하여 시간-주파수 해석으로 탁월주파수를 조사하였다.

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험편

재료는 열간 압연한 오스테나이트계 STS316L로, 화학 조성을 Table 1에 나타낸다. STS316L은 $1,200^{\circ}\text{C}$ 로 가열 후에 강판으로 만들고, $1,050^{\circ}\text{C}$ 진공로에서 30분 열처리하고, 급랭하는 용체화 처리로 오스테나이트 상을 만들었다. 그리고 STS316L은 상온에서 압연율 0~80%로 두께 2mm 판재를 얻었다. 0~80% 압연 재료는 서브제로 온도 -50°C 및 -196°C 에서 각각 10, 30, 60분간 서브제로 처리하였다.

2.2 실험방법

시험편의 탄성파는 만능 인장시험기를 사용하여 크로스헤드 2mm/min로 인장하였다.

Table 1 Chemical composition of STS316L (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe
0.016	0.6	1.04	0.03	0.002	10.26	16.51	2.03	Bal.

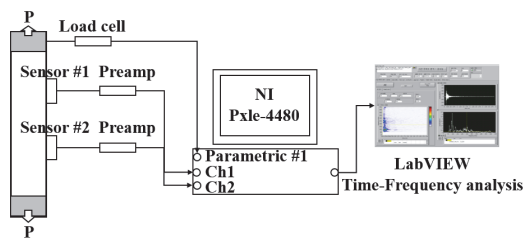


Fig. 1 Flow chart of elastic wave analysis

탄성파 검출 장비는 PXIE-4480으로, 500kHz 대역폭으로 동시에 샘플링된 아날로그를 입력할 수 있다. 탄성파는 28dB 전치증폭기로 증폭하였고, 1MHz 광대역 센서를 사용하였다. 탄성파는 인장 시험편의 중앙에서 대칭 거리에 부착한 2개의 센서에서 검출하였다. 검출한 탄성파는 램뷰를 활용하여, 시간-주파수 분석하였다. 이때 시간-주파수 분석은 웨이블릿을 사용하였다. Fig. 1은 탄성파 검출 및 분석 흐름도이다.

3. 결과 및 고찰

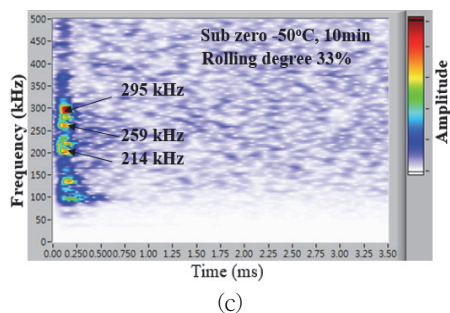
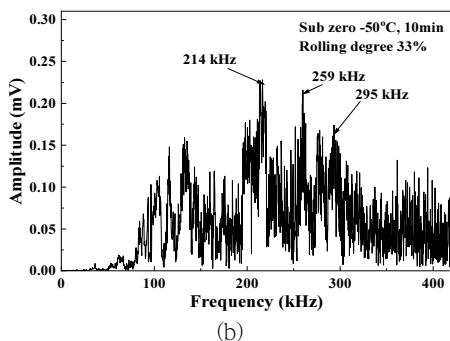
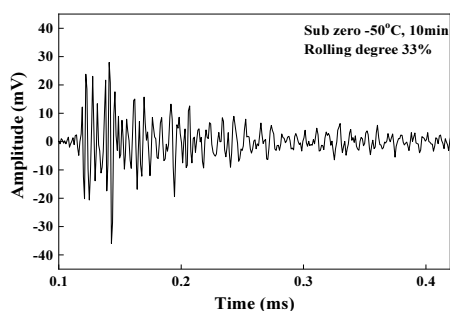


Fig. 2 Frequency characteristic obtained from elastic wave of rolling degree 33% specimen treated at -50°C during 10 minute. (a) Waveform of elastic wave, (b) Frequency and (c) Time-frequency by WT

Fig. 2는 대표적으로 서브제로 -50°C에서 10분간 처리한 압연율 33% 시험편의 인장시험에서 얻어진 파형, 주파수 스펙트럼 및 웨이블릿 해석 결과를 대표적으로 나타낸다. 각 그림에서 (a) 탄성파의 파형, (b) 주파수, (c) 웨이블릿에 의한 시간-주파수를 나타낸다.

Fig. 3은 서브제로 처리한 시험편의 압연율과 탁월주파수의 관계를 나타낸다. 그림에는 표준편차(I)도 나타내었다. 탁월주파수는 각 압연율에서 서브제로 온도가 낮고, 서브제로 처리시간이 길수록 높게 나타났다. 각 서브제로 온도에 대하여 살

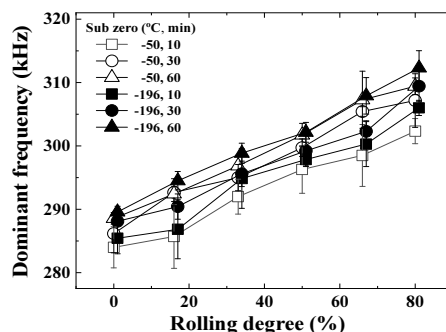


Fig. 3 Relationship between rolling degree and dominant frequency of subzero treated specimen

펴보면, -196°C 가 -50°C 보다 약간 높게 나타났다. 또한 각 서브제로 온도에서 시간이 증가하면 높게 나타났다.

Fig. 4는 서브제로 처리한 시험편의 인장강도와 탁월주파수의 관계를 나타낸다. 탁월주파수는 인장강도의 증가에 따라서 증가하여, 비례관계를 나타내었다. 인장강도는 동일 서브제로 온도에서 처리시간이 길수록 높게 나타났으며, 탁월주파수도 인장강도의 증가와 비슷하게 증가하였다. 인장강도는 압연율 0%에서 16%까지는 약간 증가하였으나, 탁월주파수는 인장강도 증가보다 높은 증가를 나타내었다. 그러나 압연율 33%의 인장강도는 0%보다 약 43% 증가하였으나, 탁월주파수의 증가폭은 작았다. 인장강도가 증가한 것은 압연 때문에 오

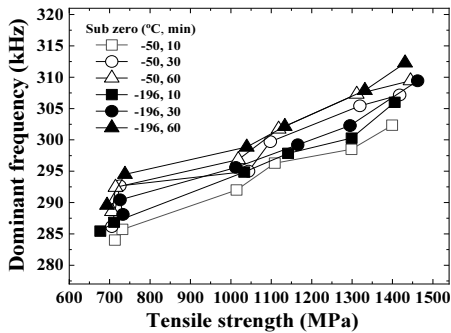


Fig. 4 Relationship between tensile strength and dominant frequency of subzero treated specimen

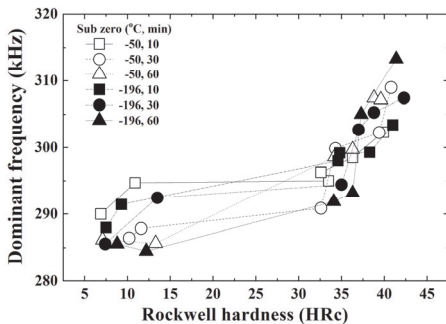


Fig. 5 Relationship between Rockwell hardness and dominant frequency of subzero treated specimen

스테나이트가 마르텐사이트로 많이 변태하였기 때문이다. 그러나 탁월주파수의 증가는 마르텐사이트 변태량과 관계있는 것으로 판단된다. 인장강도는 압연율 50%에서 약간 증가하였지만, 66% 및 80% 순으로 증가량이 많았다. 인장강도는 같은 서브제로 온도에서 시간이 길어짐에 따라서 증가하였고, 탁월주파수도 높게 나타났다. 이처럼 탁월주파수는 압연량이 증가하고, 서브제로 온도가 낮고, 서브제로 시간이 길수록 높게 나타났다.

Fig. 5는 서브제로 처리한 시험편의 로크웰경도와 탁월주파수의 관계를 나타낸다. 탁월주파수는 인장강도와 같이 로크웰경도가 증가함에 따라서 높게 나타났다. 로크웰경도는 인장강도와 마찬가지로 압연율 0%에서 16%까지 약간 증가하였으나, 압연율 33%의 로크웰경도는 매우 증가하였다. 그러나 탁월주파수는 경도의 증가만큼 높지 않았다. 반면 압연율 50%, 66% 및 80%의 로크웰경도는 압연율보다 로크웰경도의 증가는 적지만, 탁월주파수는 높게 나타났다. 이와 같은 로크웰경도와 탁월주파수의 증가는 마르텐사이트 변태량과 관계있는 것으로 판단된다. 그러나 서브제로 온도 및 시간에 대한 탁월주파수는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 서브제로 처리한 시험편의 연신율과 탁월주파수의 관계를 나타낸다. 탁월주파수는 연신율이 감소함에 따라서 높게 나타났다. 연신율은

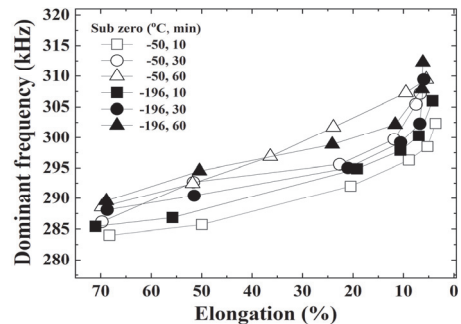
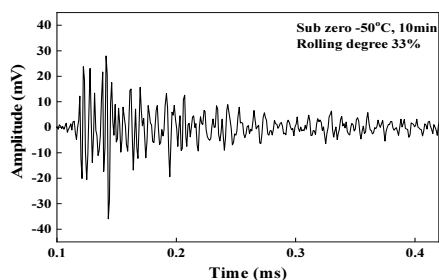


Fig. 6 Relationship between elongation and dominant frequency of subzero treated specimen

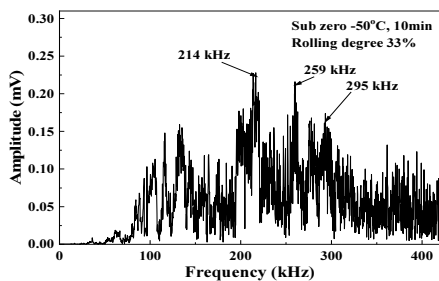
압연율이 증가함에 따라서 감소하고, 인장강도 및 로크웰경도는 증가하였다. 연신율이 감소하는 것은 마르텐사이트가 증가하는 것이고, 이에 비례하여 탁월주파수는 높게 나타났다. 탁월주파수는 연신율이 감소함에 따라서 약 10%까지는 직선적으로 증가하지만, 10% 이하의 연신율에서는 약간 증가하는 탁월주파수를 나타내었다. 한편 서브제로 온도 -50°C 와 -196°C 의 탁월주파수는 비슷한

대역을 나타내었으나, 각 서브제로 온도에서 시간이 증가함에 따라서 약간 높은 주파수를 나타내었다. 연신율과 탁월주파수의 관계는 서브제로 -50°C 시간의 주파수 대역이 -196°C 보다 증가폭이 크게 나타났다.

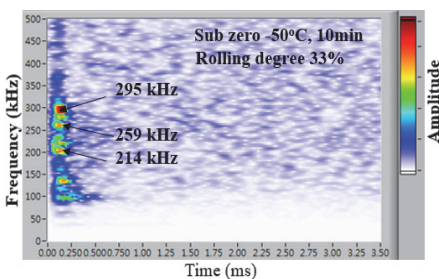
Figs. 7과 8은 각각 압연율 33% 시험편을 서브제로 -50°C 및 -196°C 에서 10분 처리하여, 인장 시험에서 얻어진 파형, 주파수 스펙트럼 및 웨이



(a)

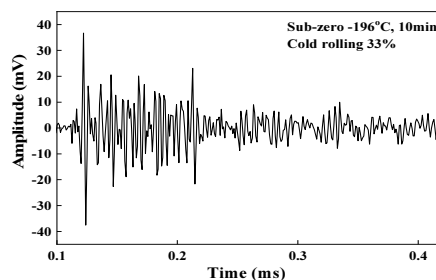


(b)

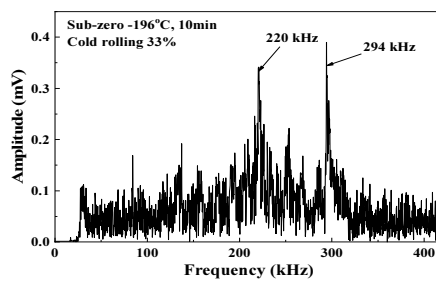


(c)

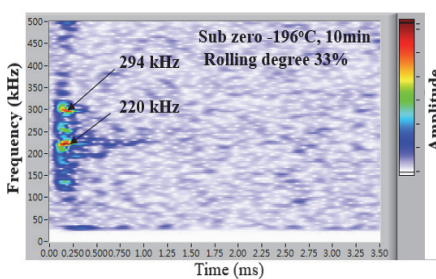
Fig. 7 Frequency characteristic obtained from elastic wave of rolling degree 33% specimen treated for at -50°C during 10 minute. (a) Waveform of elastic wave, (b) Frequency and (c) Time-frequency by WT



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Frequency characteristic obtained from elastic wave of rolling degree 33% specimen treated for at -196°C during 10 minute. (a) Waveform of elastic wave, (b) Frequency and (c) Time-frequency by WT

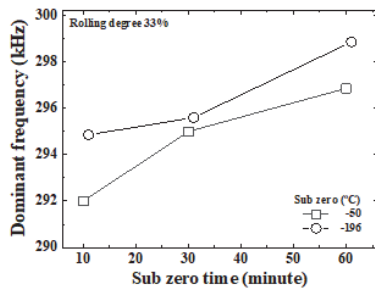


Fig. 9 Relationship between dominant frequency and sub zero time of sub zero treated specimen with rolling degree 33%

블릿 해석 결과를 나타낸다. 각 그림에서 (a) 탄성파의 파형, (b) 주파수, (c) 웨이블릿에 의한 시간-주파수를 나타낸다.

Fig. 9는 압연율 33% 시험편의 서브제로 온도 및 시간에 대한 시간-주파수 해석에서 얻어진 탁월주파수 특성을 나타내었다. 탁월주파수는 서브제로 온도 -196°C 가 서브제로 처리시간과 관계없이 -50°C 보다 높은 대역을 나타내었다. 이러한 경향은 압연율이 다른 시험편에서도 비슷하게 나타났다.

4. 결론

본 연구는 5가지의 압연율(0, 16, 33, 50, 66 및 80%)로 압연한 STS316L을 2종류의 서브제로 온도(-50°C , -196°C)에서 각각 10분, 30분 및 60분 서브제로 처리하여, 인장에서 발생하는 탄성파의 탁월주파수를 조사하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 탁월주파수는 각 압연율에서 서브제로 온도가 낮고, 서브제로 처리시간이 길수록 높았고, 인장강도 및 로크웰경도의 증가에 따라서 높게 나타났다. 반면 탁월주파수는 연신율의 감소에 따라서 높게 나타났다.

- (2) 압연율 33% 시험편의 서브제로 온도 및 시간에 대한 시간-주파수 해석에서 탁월주파수는 서브제로 온도 -196°C 가 서브제로 처리 시간과 관계없이 -50°C 보다 높게 나타났다.

참고문헌

- [1] T. H. Ju, J. D. Achenbach, L. J. Jacobs, J. Qu, "Nondestructive evaluation of thermal aging of adhesive joints by using a nonlinear wave mixing technique", *NDT & E International*, vol.103, pp. 62-67, (2019).
- [2] E. B. Zaretsky, G. I. Kanel, "Tantalum and vanadium response to shock-wave loading at normal and elevated temperatures. Non-monotonous decay of the elastic wave in vanadium", *Journal of Applied Physics*, vol. 115, 243502, (2014).
- [3] J. Skoczylas, M. Klonica, S. Samborski, "A study on the FRP composite's matrix damage resistance by means of elastic wave propagation analysis, *Composite Structures*", vol. 297, 115935, (2002).
- [4] F. J. Rescalvo, C. Abarkane, E. Suarez, A. Gallego, "Acoustic Emission analysis during bending tests of timber beams reinforced with carbon fiber composite", *Journal of Acoustic Emission*, vol. 35, pp. s41s48, (2018).
- [5] C. K. Mukhopadhyay, T. K. Haneef, S. K. Gupta, V. Bhasin, S. Vishnuvardhan, G. Raghava, P. Gandhi, "Use of Acoustic Emission for Studying Ratcheting Behavior of 304LN Stainless Steel Elbows", *Journal of Acoustic Emission*, vol. 36, pp. 9-29, (2019).
- [6] P. H. Wen, M. H. Aliabadi, D. P. Rooke, "The influence of elastic waves on dynamic stress intensity factors (three-dimensional problems)", *Archive of Applied Mechanics*, vol. 66, pp. 385-394, (1996).
- [7] L. B. Freund, "The stress intensity factor due

- to normal impact loading of the faces of a crack“, *International Journal of Engineering Science*, vol. 12, pp. 179-189, (1974).
- [8] Z. Chuanzeng, C. Xinshuang, L. Zongrong, “Interaction of elastic waves with a periodic array of collinear inplane cracks“, *Acta Mechanica Sinica*, vol. 8, pp. 328-335, (1992).
- [9] O. D. Mohammed, M. Rantatalo, “Dynamic response and time-frequency analysis for gear tooth crack detection“, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 66-67, pp. 612-624, (2016).
- [10] Y. Chen, H. Li, L. Hou, X. Bu, “Feature extraction using dominant frequency bands and time-frequency image analysis for chatter detection in milling“, *Precision Engineering*, vol. 56, pp. 235-245, (2019).
- [11] K. W. Nam, A. Mal, “Characteristics of elastic waves generated by crack initiation in aluminum alloys under fatigue loading“, *Journal of Materials Research*, vol. 16, pp. 1745-1751, (2001).
- [12] J. W. Kim, S. H. Ahn, S. Y. Lee, K. W. Nam, J. Y. Do, “Wavelet Analysis of Elastic Wave for Wall Thinned High-Pressure Service Pipes“, *Journal of the Korean Institute of Gas*, vol. 9 pp.1-8, (2005).
- [13] H. S. Kim, M. K. Kim, J. W. Kim, S. H. Ahn, K. W. Nam, “Strength of Crack Healed-Specimen and Elastic Wave Characteristics of Al₂O₃/SiC Composite Ceramics“, *Transactions of the KSME A*, vol. 31, pp. 425-431, (2007).
- [14] K. W. Nam, B. K. Ahn, S. C. Lee, “Acoustic Emission of Heat Treated Compacted Graphite Iron under 873~1173 K“, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 33, pp. 415-421, (2013).
- [15] K. W. Nam, H. Jeon, K. S. Lee, Y. J. Tak, “Elastic Wave Properties of STS202 depending on Rolling Temperature and Rolling Degree“, *Journal of Power System Engineering*, vol. 25, pp. 15-22, (2021).
- [16] S. G. Lee, B. C. Choi, K. W. Nam, “Elastic Wave Characteristics of Incoloy 825 with Different Solution Treatment Temperature and Aging Time“, *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, vol. 24, pp. 261-269, (2021).
- [17] Y. J. Tak, K. H. Gu, G. H. Lee, K. W. Nam, “Elastic Wave Properties of STS316L with Different Rolling Temperature“, *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, vol. 25, pp. 325-331, (2022).
- [18] N. R. V. Bangaru, A. K. Sachdev, “Influence of cooling rate on the microstructure and retained austenite in an intercritically annealed vanadium containing HSLA steel“, *Metallurgical Transactions A*, vol. 13, pp. 1899-1906, (1982).
- [19] A. Ning, R. Gao, S. Yue, H. Guo, L. Li, “Effects of cooling rate on the mechanical properties and precipitation behavior of carbides in H13 steel during quenching process“, *Materials Research Express*, vol. 8, Paper No. 016503, (2021).
- [20] H. G. Nanesa, M. Jahazi, “Alternative phase transformation path in cryogenically treated AISI D2 tool steel“, *Materials Science and Engineering A*, vol. 634, pp. 32-36, (2015).
- [21] J. Sobotova, P. Jurci, I. Dlouhy, “The effect of subzero treatment on microstructure, fracture toughness, and wear resistance of Vanadis 6 tool steel“, *Materials Science and Engineering A*, vol. 652, pp. 192-204, (2016).
- [22] R. F. Barron, “Cryogenic treatment of metals to improve wear resistance“, *Cryogenics*, vol. 22, pp. 409-413, (1982).
- [23] R. F. Barron, C. R. Mulhern, “Cryogenic Treatment of AISI-T8 and C1045 Steels“, In: Clark A.F., Reed R.P. (eds) *Advances in Cryogenic Engineering Materials*. Springer, Boston, MA, (1980).
- [24] Y. H. Hong, K. Song, “Effect of Cryogenic Treatment on Wear Resistance of STD 11 Steel“, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, vol. 16, pp. 134-140, (2003).