

异种钢气体金属电弧焊工艺参数优化

Fasil Kebede Tesfaye

埃塞俄比亚 铁皮 伊鲁巴柏 米赞铁皮大学机械工程系

摘要: 焊接是一种通过聚结连接相似和不同金属的方法。GMAW 是一种广泛用于制造的半机械化、全机械化或自动化工艺。GMAW 有望进一步发展, 以实现更好的电弧控制、焊道轮廓控制、沉积控制和更高的生产率。本研究的目的是提高由符合 ASTM/UNS S32205 的双相不锈钢 (DSS) 和符合 ASTM A242 的腐蚀钢 CORTEN-A 制成的异种钢-金属接头的焊接工艺变量。这种异种金属接头可用于运输部门, 尤其是铁路车辆的制造。采用气体保护焊 (GMAW) 工艺, 以 CO₂ 为保护气体, 309L 级药芯焊丝为填充材料, 研究了两个 2mm 厚板材之间的方形对接接头。L9 田口阵列用于优化所得焊缝的拉伸强度, 这是所需的质量特征。GMAW 工艺参数如电压、送丝速度和焊接速度在三个水平上进行了优化。使用方差分析, 研究了各因素的影响。发现存在理想的参数集, 并且电压是最关键的因素。进行了确认测试以验证结果, 并附上了一张图和表格。

关键词: CORTEN 钢; 异种焊接; 双相不锈钢; GMAW 工艺; 优化

Parameter Optimization of Gas Metal Arc Welding Process for Welding Dissimilar Steels

Fasil Kebede Tesfaye

Department of Mechanical Engineering, Mizan Tepi University, Teppii Illubabur, Ethiopia

Abstract: Welding is a method of joining similar and dissimilar metals through the use of coalescence. GMAW is a semimechanized, fully-mechanized, or automatic process that is widely used in fabrication. GMAW is expected to evolve further to allow for better arc control, bead contour control, deposition control, and higher productivity. The goal of this study is to enhance welding process variables for dissimilar steel metal joints made of duplex stainless steel (DSS) to ASTM/UNS S32205 and erosional steel CORTEN-A to ASTM A242. Such a dissimilar metal joint finds use in the transportation sector, particularly in the construction of rail cars. The square butt joint between two 2 mm-thick sheets was investigated using the gas metal arc welding (GMAW) process with CO₂ as the shielding gas and flux-cored wire of grade 309L as the filler material. The L9 Taguchi array was used to optimize the tensile strength of the resulting weld joint, which was the desired quality characteristic. GMAW process parameters such as voltage, wire feed rate, and welding speed are optimized at three levels. Using ANOVA, the effects of each factor have been studied. It was found that the ideal set of parameters exists and that the voltage is the most crucial factor. A confirmation test was performed to validate the results, and it was accompanied by a figure and tables.

Keywords: CORTEN steel; Dissimilar welding; Duplex stainless steel; GMAW process; Optimization

1. 引言

双相不锈钢具有高强度重量比、易于成形、良好焊接性等优点, 目前正在考虑用于轨道客车制造^[1]。DSS 由于其吸引人的审美和上述其他品质, 在轨道车辆的侧壁、端壁和车顶组件中得到了广泛的应用。CORTEN 钢以其耐大气腐蚀的财产而闻名, 广泛用于制造有轨电车的底架和地板侧组件。因此, 这些异种钢的连接在轨道客车制造中有着广泛的应用。此外, 在制造、建造先进设备和机械方面, 连接异种金属也是不可或缺的。熔焊是连接异种钢的一种广泛使用的方法。优化此类熔焊接头的焊接参数将有助于实现无缺陷的良好焊接接头^[1,2]。

由于此类接头广泛使用, 本研究在产品的安全、质量和生命周期改进方面具有重要意义。

GMAW 作为一种半机械化、全机械化或自动化工艺, 广泛应用于制造活动中。预计 GMAW 将继续发展, 以实现更好的电弧控制、更好的焊道轮廓控制、更好地沉积控制和更高的生产率。GMAW 工艺将保持其主导地位, 最新研究支持这些工艺的应用和进一步发展^[2]。

异种金属之间的成功焊接应与所连接的两种金属中较弱的金属一样强, 即具有足够的抗拉强度和延展性, 从而使接头不会在焊接中失效。在拉伸试验中显示出比母材更高的电阻, 在弯曲试验中表现出良好的性能, 这

表明了接头的可靠性^[3]。

本研究采用田口正交阵列技术,以获得质量特性越高越好的工艺参数的最佳值。田口提出的实验设计涉及使用正交阵列来组织影响过程的参数以及它们应该变化的水平。田口方法测试成对的组合,而不是像阶乘设计那样测试所有可能的组合。这允许收集必要的数,以确定哪些因素对产品质量影响最大,实验量最少,从而节省时间和资源^[4-8]。

本项目工作的目标是研究和优化双相不锈钢和耐候钢异种焊接的工艺参数,以使用 GMAW 工艺达到 CORTEN-A 级,从而获得良好的焊接接头。采用正交阵列、信噪比(S/N)和方差分析(ANOVA)来获得参数的最佳值。

2. 材料和方法

2.1 实验设置

本实验研究了 2mm 厚母材的方形对接焊缝。使用 KEMPII(芬兰)制造的 300Amps 容量的 GMAW 电源(带有机械化焊炬移动)制作焊接接头。机械化焊炬移动确保了对焊接速度的精确控制。在 GMAW 电源处设置电压和送丝速度, GMAW 电源可将这些值设置为小数点后一位的精度。适用于该异种焊接的规格 AWS5.22 E309L T1-1 中直径为 1.2mm 的药芯焊丝用作填充材料, CO₂ 作为保护气体。焊接是在向下的位置进行的。气体流速为 15LPM, 伸出 20mm, 根部间隙为 1-1.1mm。

2.2. 材料

使用原子发射分光光度法对 DSS 和 CORTON 钢样品的化学成分进行了研究。获得的样品的化学成分如下表 1 所示。

| Element Present → | C | Mn | Si | S | P | Cu | Cr | Ni | V | Mo | Nb | N |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|------|
| ASTM-A 242 | 0.066 | 0.343 | 0.463 | 0.005 | 0.076 | 0.403 | 0.424 | 0.298 | <0.001 | <0.001 | 0.0007 | - |
| ASTM-S 32205 | 0.026 | 1.570 | 0.676 | 0.001 | 0.017 | 0.158 | 22.56 | 5.59 | - | 2.9 | 0.015 | 0.16 |

表 1. ASTM-A 242 和 ASTM-S 32205 样品的化学成分。

2.3. 焊接试件的制备

焊接接头的抗拉强度和延展性可通过使用通用试验机分别根据 ISO 4136:2001 和 ISO 5173:2009 对从试样中抽取的标准试样进行拉伸试验和弯曲试验来测量。对于拉伸试验下的异种焊缝,预计分离仅发生在两种母材中较弱的一种,而不会发生在焊缝上。弯曲试验可确定试样在给定半径范围内的延性行为,并可深入了解材料的弹性模量和弯曲强度。根据 ISO 9015-1 和 9015-2 标准,使用维氏硬度试验测量焊接接头不同区域的硬度。维氏硬度试验用于找出与材料强度相关的材料硬度^[9-10]。

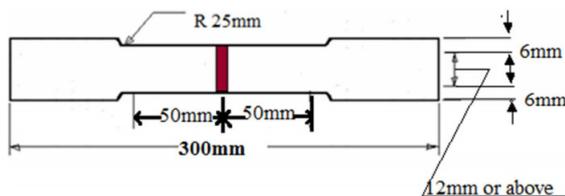


图 1. 横向拉伸试验用试样。

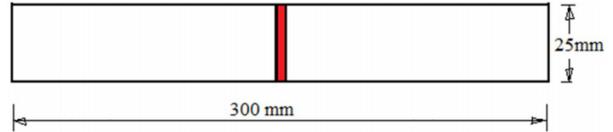


图 2. 弯曲试验用试样。

根据拉伸和弯曲试验要求(分别如图 1 和图 2 所示),最终确定了测试这些机械强度财产所需的焊接试件样品尺寸。相应地,准备了尺寸为 80mm 宽、300mm 长、2mm 厚的焊盘,焊盘带有引弧板和引弧板。

3. 结果和讨论

3.1 田口正交阵列的设计

当存在中间数量的变量(3 到 50 个)、变量之间的交互很少以及只有少数变量有显著贡献时,最好使用田口方法。数组由参数(变量)的数量和级别(状态)的数量选择。正交阵列法的优点是:(a)结论在控制因素及其设置所覆盖的整个区域内有效;(b)实验工作量大幅度节省;(c)分析简单。

3.2. 研究过程参数的选择

EN ISO 15609-1:2004 (E) 标准规定了影响焊缝质量的工艺参数。基于这一点和现场专家的意见, GMAW 工艺的优化需要考虑的可变参数是焊接电流、电弧电压、送丝速度和行进速度^[10-12]。GMAW 工艺具有恒定电压特性,其中焊接电流由送丝速度决定。因此,选择电弧电压、送丝速度和行进速度作为本研究的优化工艺参数。

3.3. 基于田口正交阵列的实验

如上所述,本研究要优化的工艺参数是电压[V]、送丝速度[F]和焊接速度[S]。选择横向拉伸强度作为性能测量的质量特征。焊缝强度可通过横向拉伸试验确定。

在异种试样的试焊过程中, CORTEN-A 材料发生了延性破坏,但超出了焊缝和热影响区,这表明焊缝金属比两种母材中较弱的金属更为坚固。经过多次筛选试验后得出的上述接头采用以下工艺参数,即电压[V]=25V,送丝速度[F]=5.2 米/分钟,相应电流为 102 安培,焊接速度[S]=60 米/小时。

本优化研究选择了三个焊接参数(V、F和S)的设计矩阵,每个参数在三个水平上,以获得具有最高可能抗拉强度值的焊接接头。上述表 2 列出了这些工艺参数(因素)的三个级别。用这三个参数进行实验,每个参数具有 3 个级别,将需要一个具有 27 种可能性的全阶乘数组。但使用田口正交阵列法,可以用 9 个实验而不是 27 个可能性来分析。正交阵列的自由度应大于或至少等于所有工艺参数的自由度。不考虑参数之间的相互作用^[13-15]。所有工艺参数的总自由度为 8。因此,选择了具有 8 个自由度的 L9[3x3] 正交阵列。

| Process Parameters | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
|--------------------|---------|---------|---------|
| Voltage [V] | 23.0 | 25.0 | 27.0 |
| Wire Feed rate [F] | 4.8 | 5.2 | 5.7 |
| Welding speed [S] | 55.0 | 60.0 | 65.0 |

表 2. 实验过程参数及其水平。

3.4 用于研究的正交阵列

9 个实验中的每一个都是用预先指定的电压、焊丝速度和焊接速度的组合进行的，如下表 3 所示。表 4 显示了所使用的实际值，表 5 显示了实验结果。

| Exp. No | Voltage (V) | Wire feed rate (Meter/Min) | Weld speed (Meter/hr) |
|---------|-------------|----------------------------|-----------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 3 |
| 4 | 2 | 1 | 2 |
| 5 | 2 | 2 | 3 |
| 6 | 2 | 3 | 1 |
| 7 | 3 | 1 | 3 |
| 8 | 3 | 2 | 1 |
| 9 | 3 | 3 | 2 |

表 3. 使用正交阵列。

| Exp. No | Voltage (V) | Wire feed rate (F) (Meter/Min) | Weld speed (S) (meter/hr) |
|---------|-------------|--------------------------------|---------------------------|
| 1 | 23 | 4.8 | 55 |
| 2 | 23 | 5.2 | 60 |
| 3 | 23 | 5.7 | 65 |
| 4 | 25 | 4.8 | 60 |
| 5 | 25 | 5.2 | 65 |
| 6 | 25 | 5.7 | 55 |
| 7 | 27 | 4.8 | 65 |
| 8 | 27 | 5.2 | 55 |
| 9 | 27 | 5.7 | 60 |

表 4.L9 数组，参数值用于实验。

| Exp. No. | UTS (MPa) | Location of Failure | Result of Face bend test | Result of Root bend test |
|----------|-----------|---------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 494.32 | HAZ CS | Satisfactory | Satisfactory |
| 2 | 505.01 | Parent metal CS | Satisfactory | Satisfactory |
| 3 | 492.56 | Parent metal CS | Satisfactory | Satisfactory |
| 4 | 510.01 | Parent metal CS | Satisfactory | Satisfactory |
| 5 | 535.45 | Parent metal CS | Satisfactory | Failed at HAZ CS |
| 6 | 555.25 | Parent metal CS | Satisfactory | Satisfactory |
| 7 | 453.32 | HAZ CS | Failed | Satisfactory |
| 8 | 488.66 | Fusion line & HAZ | Cavity opened | Cavity opened |
| 9 | 471.70 | HAZ CS | Satisfactory | Failed HAZ CS |

表 5. 使用正交阵列的拉伸和弯曲试验结果。

3.5. 损失函数和信噪比

如上所述，焊缝强度属于质量特性越高越好的特性。信噪比 (S/N) 是期望输出的对数函数，用作优化的目标函数，有助于数据分析和最佳结果的预测。根据 TAGUCHI 方法，S/N 比的通用表达式为

$$n = -10 \log_{10} (C_i) \quad (1)$$

其中 C_i 是测量数据的倒数平方和的平均值。

信噪比、其总平均值、与平均值的偏差和偏差平方等列于下表 6。

| Exp. No | [V] | [F] | [S] | Meas-ured Data [UTS] | mean of square of reciprocal (C _i) | S/N Ratio [dB] | overall mean value for S/N [dB] | Square of S/N | Deviation of S/N from mean (D) | square of deviation S/N to mean |
|---------|-----|-----|-----|----------------------|--|----------------|---------------------------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 23 | 4.8 | 55 | 494.32 | 0.0000409 | 53.88 | 2903.07 | -0.097 | 0.009 | |
| 2 | 23 | 5.2 | 60 | 505.01 | 0.0000392 | 54.06 | 2923.13 | 0.089 | 0.008 | |
| 3 | 23 | 5.7 | 65 | 492.56 | 0.0000412 | 53.84 | 2899.73 | -0.128 | 0.016 | |
| 4 | 25 | 4.8 | 60 | 510.01 | 0.0000384 | 54.15 | 2932.39 | 0.175 | 0.030 | |
| 5 | 25 | 5.2 | 65 | 535.45 | 0.0000349 | 54.57 | 2978.36 | 0.597 | 0.357 | |
| 6 | 25 | 5.7 | 55 | 555.25 | 0.0000324 | 54.89 | 3012.88 | 0.913 | 0.833 | |
| 7 | 27 | 4.8 | 65 | 453.32 | 0.0000487 | 53.12 | 2822.59 | -0.849 | 0.721 | |
| 8 | 27 | 5.2 | 55 | 488.66 | 0.0000475 | 53.23 | 2833.41 | -0.197 | 0.039 | |
| 9 | 27 | 5.7 | 60 | 471.70 | 0.0000449 | 53.47 | 2859.39 | -0.503 | 0.253 | |
| | | | | Total | | 485.24 | | | | 2.267 |

表 6.L9 矩阵阵列表。

3.6. 因素影响

因子水平的影响被定义为它与总体平均值的偏差。使用下表 7 中可用的 S/N 比数据，计算三个因素的每个水平的平均值。这些平均值见下表 7。它们是每个因素的单独影响，通常称为主要影响，如下图 3 所示。

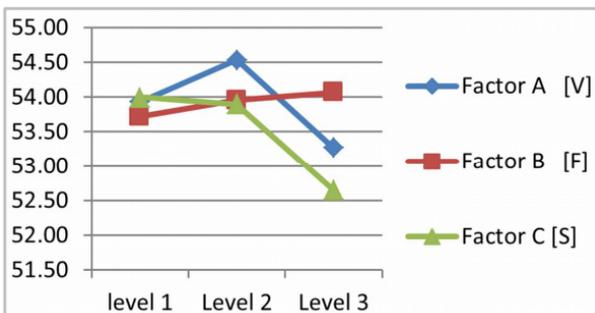


图 3.S/N 比图。

| Factor | level 1 | Level 2 | Level 3 |
|--------------|---------|---------|---------|
| Factor A [V] | 53.932 | 54.540 | 53.270 |
| Factor B [A] | 53.720 | 53.960 | 54.070 |
| Factor C [S] | 54.000 | 53.897 | 52.650 |

表 7. 三个因素的平均值。

3.7. 差异分析

不同因素在不同程度上影响本研究中的质量特性，即抗拉强度。上述表 6 (L9 矩阵阵列表) 列出了因素影响的相对大小。通过方差分解 (通常称为方差分析 (ANOVA))，可以更好地感受不同因素的相对影响，如下表 8 所示。

3.8. 确认测试



图 4. 拉伸试样。

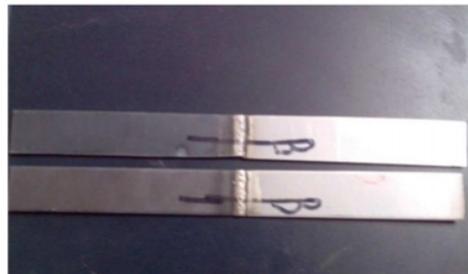


图 5. 弯曲试验用试样。



图 6. 试样显示 CS 侧远离焊缝和 HAZ 的故障。



图 7. 显示符合要求的焊接财产的试样。

现在进行测试,以使用最佳水平的焊接工艺参数(例如,水平 2 的焊接电压、水平 3 的焊丝进给速度和水平 1 的焊接速度)来验证特性质量的改善。所得 UTS 值约为 555N/mm²。因此,最佳输入决定了焊缝的更大抗拉强度。根部和弯曲试验还表明,焊缝处不会发生故障。

| factor | Level 1 | Level 2 | Level 3 | degree of freedom | sum of squares | Mean Square= Sum of squares/degree of freedom | % contribution |
|--------------|---------|---------|---------|-------------------|----------------|---|----------------|
| Factor A [V] | 53.93 | 54.54 | 53.27 | 2 | 1.752 | 0.876 | 77.3 |
| Factor B [A] | 53.72 | 53.96 | 54.07 | 2 | 0.305 | 0.152 | 13.4 |
| Factor C [S] | 54.00 | 53.89 | 52.65 | 2 | 0.195 | 0.097 | 8.6 |
| Error | | | | 2 | 0.015 | | 0.7 |
| TOTAL | | | | 8 | 2.267 | | 100.0 |

表 8. 方差分析表。

3.9 硬度测量

使用 10kg 载荷的维氏硬度试验机对上述接头进行的硬度测量给出了如图 8 所示的值。观察到硬度值与破坏模式一致,表明拉伸载荷下的韧性破坏发生在最小硬度区域。

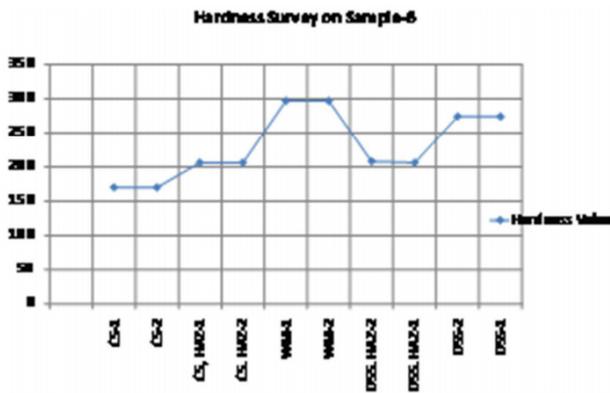


图 8. 不同区域的硬度分布。

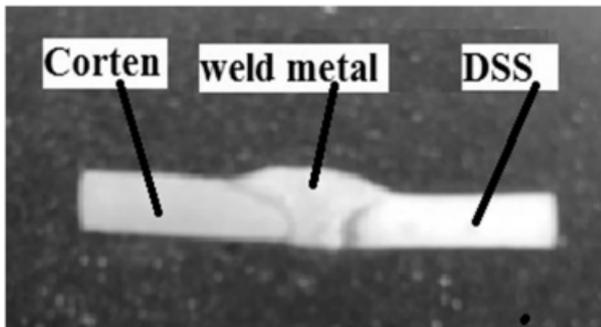


图 9. 焊缝宏观图。

4. 结论

本研究使用田口的实验设计来优化异种钢气体保护焊的参数。对于抗拉强度的响应变量,该过程应用了一组特定的可控参数电压、焊接速度和送丝速度。本研究采用 L9 正交阵列、S/N 比和方差分析。研究人员发现,控制变量对响应变量有不同的影响。主要发现是基于我研究的实验结果,我得出了以下结论:

1) 得出了 DSS-2205 和 Corten 钢 2mm 厚钢板异种金属接头的最佳焊接参数。使用直径为 1.2mm 的 309L 级焊丝药芯焊丝和机械化焊炬,在 2mm 厚的 DSS 2205 和 CORTEN-a 钢板之间使用 CO₂ 作为保护气体进行方形

对接,以获得良好的异种金属接头,GMAW 工艺参数的最佳值为:电压 =25V,焊丝进给 =5.7 米 / 分钟,焊接速度 =55 米 / 小时。

2) 当对具有最佳焊接参数的拉伸强度试验样品进行测试时,两种母材中较弱的一种(即 Corten-A 钢)失效,这种失效发生在远离焊缝和 HAZ 的地方。在弯曲试验期间,焊缝处也没有出现故障。因此,获得的焊接接头牢固可靠。

参考文献

[1] Piotr Gotkowski et al. "Duplex Steel Welding in Construction of Railway Vehicles", Welding International-2013, selected from Biletyn Instytutu Spawalnictwa 2011 (5), pp 43-47, 2013.

[2] Kah. P and Martikainen. J, "Current Trends In Welding Processes And Materials: Improve In Effectiveness", Rev. Adv. Mater. Sci. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, pp 189-200, 2012.

[3] Bravo Ivan Mendoza et al. "Dissimilar Welding of Super Duplex Stainless Steel/HSLA Steel for Offshore Applications Joined by GTAW" Scientific Research, published online July 2010 (<http://www.SciRP.org/journal/eng>), pp-520-528, 2010.

[4] Anoop. C. A, Pawan Kumar, 'Application of Taguchi Methods and ANOVA in GTAW Process Parameters Optimization for Aluminium Alloy 7039', International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume 2, Issue 11, pp-54-58, 2013.

[5] Lenin N., et al. "Process Parameter Optimization in ARC Welding of Dissimilar Metals", Thammasat International Journal of Science and Technology. Vol. 15, No. 3, pp 1-7, 2010.

[6] Taban. E, et al. "Evaluation of Dissimilar Welds between Ferritic Stainless Steel Modified 12% Cr and Carbon Steel S355", Welding Research Journal of American Welding Society, pp 291S-297S, 2008.

[7] Elin M. Westin (2010), 'Microstructure and properties of welds in the lean duplex stainless steel LDX 2101', Scientific thesis for the degree of Doctorate of Engineering Royal Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering, ISBN 978-91-7415-801-4, SE-100 44 Stockholm, Sweden, pp 10-59, 2010.

[8] S. P. Tewari et al. "Effect of Welding Parameters On The Weldability of Material", International Journal of Engineering Science and Technology Vol. 2 (4), pp 512-516, 2010.

[9] S. V. Sapakal and M. T. Telsang, "Parametric Optimization Of MIG Welding Using Taguchi Design Method", International Journal of Advanced Engineering

Research and Studies, Vol. 1 (4), pp. 28–30, July– September 2012.

[10] Suban M., Tusek J. “Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used” , Journal of Mater. Process. Technol, pp 119–185–192, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00940-2, (2001).

[11] Pal S, Malviya S, Pal SK, et al. “Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method” , Int J Adv Manuf Technol, 44, pp 1250–1260, doi: 10.1007/s00170-009-1931-0, (2009).

[12] Weglski. M. St, et al. “Effect of welding current on metal transfer in GMAW” , International Science Journal of World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, Volume 33, Issue 1 pp 49–56, (2008).

[13] J. Labanowski, et al. “Mechanical properties and corrosion resistance of dissimilar stainless steel welds” , Journal of Archives of Materials Science and Engineering, Volume 28, Issue 1, pp 27–33, (2007).

[14] Cui N, Chen S, Xu T, Sun W, Lv B, Zhang S, Niu H, Kong F. The Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Resistance of a Novel Extruded Titanium Alloy. Metals. 2022; 12 (10): 1564. <https://doi.org/10.3390/met12101564>

[15] Na Gong, Hui-Bin Wu, Zhi-Chen Yu, Gang Niu and Da Zhang, “Studying Mechanical Properties and Micro Deformation of Ultrafine-Grained Structures in Austenitic Stainless Steel” , Journal of Metals, doi: 10.3390/met7060188.