

轧制差厚板方盒形件起皱缺陷研究

张华伟<sup>1</sup>, 吴佳璐<sup>1</sup>, 刘相华<sup>2</sup>, 王新刚<sup>1</sup>  
(1. 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东北大学 研究院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 通过数值仿真与冲压实验研究了差厚板方盒形件的起皱缺陷,分析了差厚板方盒形件起皱缺陷的发生机理,讨论了压边力对差厚板起皱缺陷的影响. 研究表明:差厚板方盒形件最容易发生起皱的部位是薄板侧的法兰直边区以及过渡区法兰部位,当厚板侧压边力过小时,厚侧法兰直边部分也有可能产生褶皱;在保证零件不产生破裂和较大的厚度过渡区位移的前提下,采用较大的压边力对于提高差厚板的抗皱性是非常有利的;而恒定的压边力类型对于抑制差厚板起皱是最为理想的.

**关 键 词:** 轧制差厚板;方盒形件;起皱缺陷;厚度应变;压边力

**中图分类号:** TG 386      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2016)11-1554-05

Study on Wrinkle Defect in Square Box of Tailor Rolled Blank

ZHANG Hua-wei<sup>1</sup>, WU Jia-lu<sup>1</sup>, LIU Xiang-hua<sup>2</sup>, WANG Xin-gang<sup>1</sup>  
(1. School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;  
2. Research Academy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Hua-wei, E-mail: zhanghw@neuq.edu.cn)

**Abstract:** The wrinkle defect in the square box of tailor rolled blank (TRB) was studied by numerical simulation and stamping experiment. The mechanism of producing such wrinkle defect in TRB square box was analyzed and the effect of the binder force on the wrinkle defect was discussed. The results indicate that the spots inclined to form the wrinkle in the TRB square box are the straight flange on the thinner side and the flange in the thickness transition zone. When the binder force on the thicker side is not great enough, the wrinkle could also form at the straight flange on the thicker side. Under the conditions of no crack and the large movement in the thickness transition zone, the larger binder force can help to improve the wrinkle resistance of TRB and when the binder force is constant the restriction of the wrinkle of TRB is the best.

**Key words:** tailor rolled blank (TRB); square box; wrinkle defect; thickness strain; binder force

轧制差厚板 (tailor rolled blank, TRB) 是一种基于新材料加工技术的结构轻量化板材<sup>[1-2]</sup>,它在机械性能、减重效果、表面质量、成本控制等方面展示出了巨大的潜力和诱人的前景<sup>[3-5]</sup>.

起皱是影响差厚板成形性能的主要缺陷之一. 差厚板由于板料厚度存在变化,板料的性能也不均一,其变形过程更加复杂,研究差厚板起皱缺陷的发生机理及其影响因素对于提高差厚板的成形性能是十分必要的,具有非常好的实际意义. 目前,已有学者进行了差厚板成形性能的研究<sup>[6-9]</sup>,

但还未见有涉及差厚板起皱缺陷的研究. 基于此背景,本文综合采用数值模拟技术与冲压实验手段研究差厚板的起皱缺陷. 以方盒形件为例,探讨差厚板起皱缺陷的发生机理,并对压边力值和压边力类型对差厚板零件起皱的影响进行分析,研究成果可以为差厚板类盒形件的制造提供技术参考.

1 数值模拟与冲压实验

1.1 应力应变场的构造

应用 Lagrange 多项式插值法,以板料厚度为

插值变量,对通过拉伸试验所获得的等厚基板的力学性能参数进行插值,获得图 1 中的差厚板应力应变场<sup>[10]</sup>. 数值模拟过程中所需的薄、厚两种等厚板以及过渡区的材料性能参数,均可通过图 1 获取.

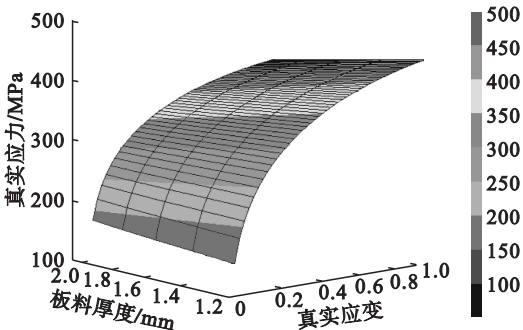


图 1 TRB 应力应变场  
Fig. 1 Stress-strain field of TRB

1.2 数值模拟参数

图 2 为轧制差厚板方盒形件冲压仿真几何模型,其中凸模、凹模及压边圈均定义为刚性体,差厚板则定义为变形体,其过渡区部分被离散为多个不同厚度板料的组合,材料参数由 TRB 应力应变场赋值. 板料选取遵循三参数 Barlat 屈服准则以及密指数硬化曲线的材料模型,板料网格划分采用符合 BT 壳理论的四边形网格单元,网格尺寸 2.5 mm × 2.5 mm,网格数量 3 600,节点数量 3 660. 模具间隙为 1.1 倍板料厚度,模具与板料的摩擦系数为 0.3. 最后,采用 LS - DYNA 求解器中的动力显式算法进行求解计算,并设置板料网格在数值模拟过程中能够进行自适应划分.

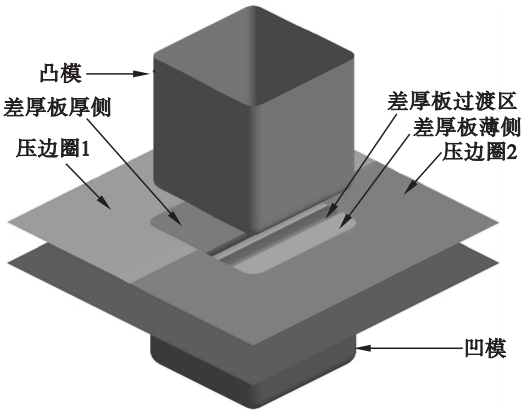


图 2 冲压仿真模型  
Fig. 2 Stamping simulation model

1.3 实验条件

轧制差厚板方盒形件的冲压模型如图 3 所示,而图 4 为实验所用的差厚板冲压模具.

凹模尺寸为 80 mm × 80 mm,凹模圆角半径

为 6 mm. 凸模加工为阶梯形状以保证模具间隙为 1.1 倍的板料厚度,凸模圆角半径分别为薄板侧 6.3 mm、厚板侧 5.2 mm. 采用分块形式的压边圈对板料的薄厚两侧加载不同大小的压边载荷,并采用与差厚板几何形状相适应的阶梯状模具间隙调整板来补偿差厚板的压边间隙. 板料选用东北大学生产的牌号为 SPHC 的 1.2/2.0 mm 轧制差厚板,其化学成分如表 1 所示.

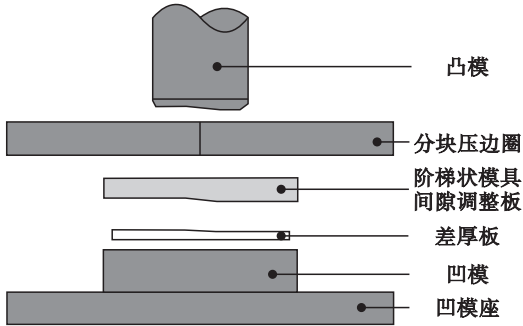


图 3 冲压模型示意图  
Fig. 3 Sketch map of stamping model



图 4 冲压模具实物图  
Fig. 4 Actual picture of stamping die

表 1 差厚板的化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of TRB (mass fraction)				
				%
C	Si	Mn	S	P
0.083	0.041	0.316	0.012	0.017

2 结果与讨论

2.1 起皱缺陷的发生机理

起皱是指在原为光滑的板料表面上出现褶皱的现象. 在冲压成形过程中,板料由于沿厚度方向上的尺寸相对较小而处于不稳定状态,当切向压应力使板厚方向达到失稳极限时,板料便发生起皱现象.

对于等厚板方盒形件,起皱现象通常发生在

法兰区.这是由于板料在成形过程中切向受压、径向受拉,法兰随着板料被拉入凹模而收缩变小,切向压应力的增大导致法兰失稳起皱<sup>[11]</sup>.采用压边圈可以限制板料沿厚度方向上的变形,降低发生起皱缺陷的可能性.

对于轧制差厚板方盒形件,通常也是在法兰区起皱,但是起皱的机理有所不同.相对于厚板侧,薄板侧与压边圈之间的间隙更大,压边效果较差,薄板侧法兰部分的厚向应变没有得到足够限制,进而发生起皱.针对此问题,可以采用阶梯状模具间隙调整板来减小薄板侧与压边圈之间的间隙,并采用分块压边圈为差厚板不同板厚侧提供不同的压边力,从而抑制整块差厚板,尤其是薄板侧的起皱.

即便如此,差厚板方盒形件的起皱现象仍然不能完全避免,过渡区法兰部分也是起皱缺陷的易发生地带.即使采用了阶梯状的模具间隙调整板,由于过渡区发生移动而不能与压边圈完全贴合,压边圈的作用得不到充分发挥,板料仍可能在厚度方向上发生失稳,进而在过渡区位置发生起皱,如图 5 所示.图 5a 为通过拉深实验所获得的差厚板方盒零件,其褶皱发生在过渡区的法兰部分.图 5b 则显示了通过仿真分析所获得的差厚板方盒形件厚度应变的分布情况,可以看出,在差厚板方盒形件两侧过渡区位置的正应变值较大,发生起皱现象,这与实验结果保持一致.此外,厚度应变值在薄板侧、厚板侧的法兰直边区和圆角区也比较大,但不至于出现明显的褶皱.

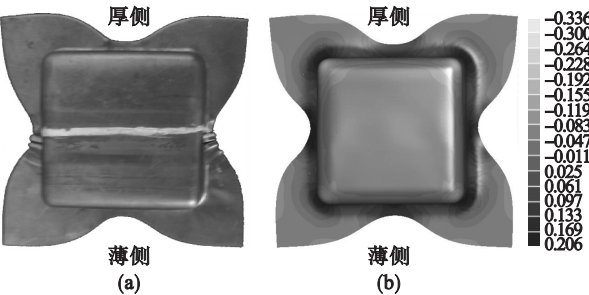


图 5 差厚板方盒形件的过渡区起皱

Fig. 5 Wrinkle in transition zone of TRB square box  
(a)—实验;(b)—仿真.

图 6 为板料中心和过渡区中心板料厚度分布情况的仿真与实验对比.

由图 6 可以看出,在法兰部分板料厚度增加,而凸模圆角部分板料厚度减薄,方盒形件底部的厚度基本不发生变化,从凸模圆角部分到法兰的端部,板料的厚度是逐渐增大的,厚度应变值随之增大,从而在法兰端部发生起皱.此外,由图 6 还

可以知道,无论对于板料中心或者是过渡区中心而言,其厚度分布的仿真值和实验值均较为接近.

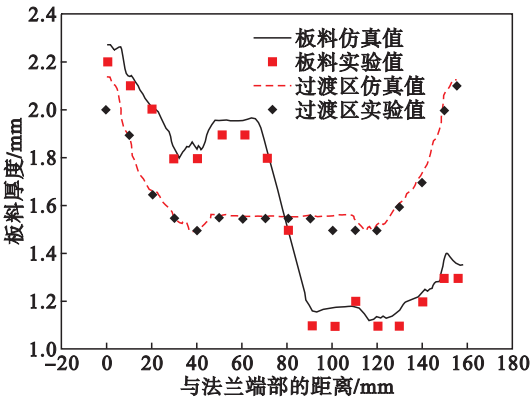


图 6 板料中心和过渡中心厚度分布

Fig. 6 Thickness distribution of blank center and transition zone center

2.2 压边力对起皱缺陷的影响

压边力是影响差厚板方盒形件成形质量的一个关键工艺参数,压边力的大小和加载方式直接关系到差厚板零件是否会发生起皱缺陷.

2.2.1 压边力值

图 7 为厚板侧压边力保持不变时,差厚板厚度应变与薄板侧压边力的关系曲线.

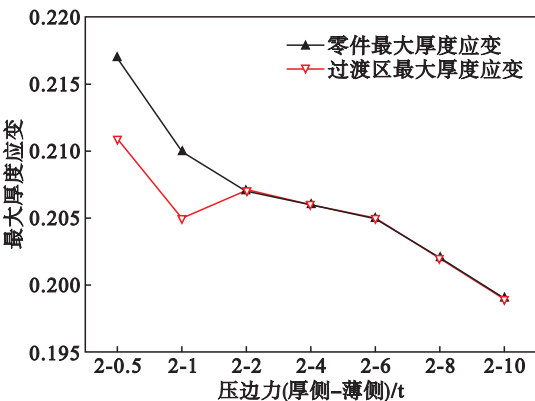


图 7 压边力值对厚度应变的影响(厚侧压边力不变)  
Fig. 7 Effect of binder force value on thickness strain (constant on the thicker side)

由图 7 可知,随着薄侧压边力的增加,板料在厚度方向上的变形受到抑制,厚度应变减小,即厚度增厚率减小,板料不容易发生起皱.当薄侧压边力小于  $2t$  时,零件的最大厚度应变发生在差厚板的薄侧法兰直边部分,其值大于过渡区的最大厚度应变值,当压边力继续减小时会导致起皱现象的出现.原因在于此时薄侧压边力较小,对于薄板侧沿厚度方向上的变形限制较小,因而该处发生较大应变.而当薄侧压边力大于  $2t$  时,过渡区最大厚度应变曲线与零件的最大厚度应变曲线重

合,即零件的最大厚度应变处由薄侧法兰直边处转移到厚度过渡区法兰部分,这时厚度应变值较小,不会产生起皱缺陷.此时由于薄板侧的压边力增大,厚度方向上变形受到限制,而过渡区法兰部分由于过渡区的移动而导致与模具的贴合性变差,从而发生较大的厚度应变,最大厚度应变处由薄板侧的法兰直边区转移到过渡区法兰部分.

图 8 为薄板侧压边力保持不变时,差厚板厚度应变随厚板侧压边力的变化曲线.由图 8 可知,随着厚侧压边力的增大,最大厚度应变值减小,但是这种变化趋势在压边力大于 2t 之后变得比较平缓.当厚侧压边力较小时,板料在厚度方向上受到较小的约束力作用,材料容易在厚度方向上产生失稳起皱,此时厚侧与过渡区厚度较大部分均会在法兰直边区产生比较严重的起皱现象,其中过渡区法兰部位的厚度应变值更大.随着厚侧压边力值的增大,板料沿厚度方向受到了更大的约束力,厚度应变值减小,并且零件最大厚度应变处由过渡区法兰转移到差厚板薄侧的法兰直边部分,两个区域的厚度应变值均较小,不会产生起皱现象.

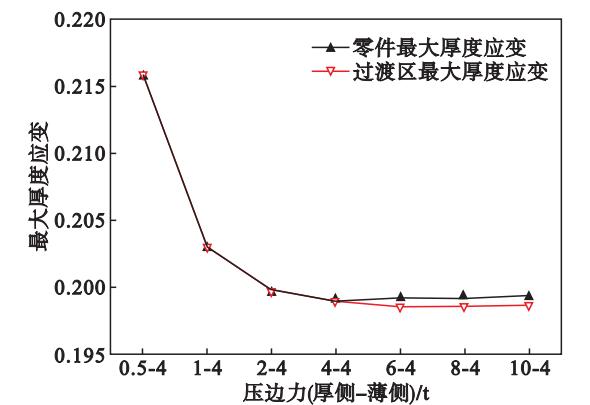


图 8 压边力值对厚度应变的影响(薄侧压边力不变)  
Fig. 8 Effect of binder force value on thickness strain (constant on the thinner side)

综合图 7 和图 8,对于差厚板而言,采用较大的压边力可以抑制起皱缺陷的出现,但是压边力的数值过大有可能会造成零件破裂以及厚度过渡区移动量增大<sup>[12]</sup>,因此需要同时考虑破裂缺陷、过渡区移动和起皱缺陷,合理匹配合差厚板薄、厚侧的压边力,以便获得优质的差厚板零件,本文选用薄侧 4 t、厚侧 2 t 的压边力.

2.2.2 压边力类型

图 9 为不同压边力类型时,差厚板厚度应变的分布情况,表 2 为不同压边力类型时薄、厚侧压边力的变化情况.

由图 9 和表 2 可以看出,对于各种类型的压

边力而言,过渡区最大厚度应变值与零件的最大厚度应变值完全一致,即最大厚度应变均是发生在过渡区法兰的直边部分,并且厚度应变从小到大依次为压边力类型 1、压边力类型 4、压边力类型 7、压边力类型 3、压边力类型 6、压边力类型 9、压边力类型 5、压边力类型 2、压边力类型 8. 因此,优先采用压边力类型 1(薄、厚两侧均采用恒定的压边力),以便获得更小的厚度应变值,抑制起皱缺陷的发生.当采用薄侧 4 t、厚侧 2 t 的压边力时,薄侧压边力较大,能够较好地限制薄板侧的厚度应变.而过渡区由于在成形过程中发生移动而导致贴模性变差,从而产生较大的厚度应变.当同时考虑压边力类型对破裂缺陷的影响时,仍能够得到相同的结论,即采用恒定的压边力能够很好地控制差厚板的过渡区移动以及厚度减薄,获得良好的成形性能<sup>[12]</sup>.

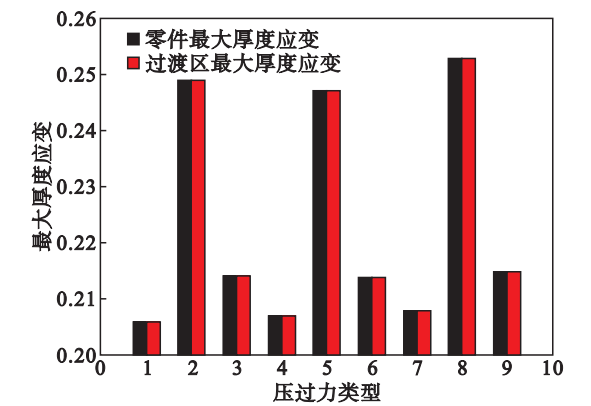


图 9 压边力类型对厚度应变的影响  
Fig. 9 Effect of binder force mode on thickness strain

表 2 压边力类型 Table 2 Binder force mode		
压边力类型	厚侧压边力	薄侧压边力
1	恒定	恒定
2	恒定	线性增加
3	恒定	线性减小
4	线性增加	恒定
5	线性增加	线性增加
6	线性增加	线性减小
7	线性减小	恒定
8	线性减小	线性增加
9	线性减小	线性减小

3 结 论

1) 对于差厚板方盒形件,薄板侧法兰直边区以及过渡区法兰部分是褶皱缺陷的易发区,当厚板侧压边力过小时,厚侧法兰直边部分也有可能产生褶皱.

2) 在保证零件不产生破裂和较大的厚度过



渡区位移的前提下,采用较大的压边力并且确保薄、厚侧压边力的合理匹配,对于提高差厚板的抗皱性是非常有利的。

3) 采用恒定类型的压边力可以提高差厚板的抗皱性。

参考文献:

[1] Merklein M, Johannes M, Lechner M, et al. A review on tailored blanks—production, applications and evaluation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(2): 151–164.

[2] Krux R, Homberg W, Kleaner M. Properties of large-scale structure work-pieces in high-pressure sheet metal forming of tailor rolled blanks[J]. *Sheet Research International*, 2005, 76(12): 800–806.

[3] Liu X H. Prospect for variable gauge rolling technology theory and application [J]. *Journal of Iron and Steel Research( International)*, 2011, 18(1): 1–7.

[4] Liu X H, Zhao Q L, Liu L Z. Recent development on theory and application of variable gauge rolling: a review[J]. *Acta Metallurgica Sinica ( English Letters )*, 2014, 27(3): 483–493.

[5] Kopp R, Windiner C, Meyer A. Flexible rolling for load-adapted blanks[J]. *International Sheet Metal Review*, 2005, 4: 20–24.

[6] Meyer A, Wietbrock B, Hirt G. Increasing of the drawing depth using tailor rolled blanks—numerical and experimental

analysis [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2008, 48(5): 522–531.

[7] 温彤, 贾朋举, 方刚, 等. 连续变截面薄板的塑性变形特点及其冲压成形性能[J]. *热加工工艺*, 2010, 39(23): 107–109.

(Wen Tong, Jia Peng-ju, Fang Gang, et al. Plastic deformation characteristics and stamping formability of variable cross section thin sheet [J]. *Hot Working Technology*, 2010, 39(23): 107–109.)

[8] Groche P, Mirtsch M. Tailored profiles made of tailor rolled strips by roll forming-part 2 of 2 [J]. *Steel Research International*, 2012, 83(1): 106–114.

[9] 王艳青, 李军, 陈云霞. TRB 差厚板在汽车前纵梁上的应用[J]. *汽车工艺与材料*, 2013(6): 10–13.

(Wang Yan-qing, Li Jun, Chen Yun-xia. Application of tailor rolled blank on automotive front rail structure[J]. *Automobile Technology & Material*, 2013(6): 10–13.)

[10] Zang H W, Liu X H, Liu L Z, et al. Study on nonuniform deformation of tailor rolled blank during uniaxial tension[J]. *Acta Metallurgica Sinica ( English Letters )*, 2015, 28(9): 1198–1204.

[11] Lang L H, Kang D C, Zhang S H, et al. Effects of specified blank size on body wrinkling during hydrodynamic deep drawing of tapered rectangular box [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2000, 13(2): 476–480.

[12] 张华伟. 轧制差厚板成形性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

(Zhang Hua-wei. Research on formability of tailor rolled blank [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.)

(上接第 1553 页)

3 结 论

1) 通过在 F313 铁基合金粉末中添加纯镍粉, 可以制备出无明显缺陷、硬度可控的激光熔覆层。

2) 调整粉末材料中纯镍粉的添加量可以调控熔覆层的相结构及硬度。当粉末中纯镍粉添加量为 8% 时, 熔覆层硬度约为 500 HV, 基本满足 Cr5 钢支承辊再制造的表面硬度需求。

参考文献:

[1] 赵晓辉, 章大健, 范国平. 大型锻钢支承辊热处理工艺的探讨[J]. *重型机械*, 2011(5): 23–26.

(Zhao Xiao-hui, Zhang Da-jian, Fan Guo-ping. Technology for heating processing of large-scale forged steel supporting roller[J]. *Heavy Machinery*, 2011(5): 23–26.)

[2] Wang Q B, Li Z X, Shi Y W, et al. Interior crack and its formation mechanism in overlaying weld of back-up rolls [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 34: 268–277.

[3] Tsai K C, Jeng S L, Huang J Y. Prevention of delayed cracking of iron based hardfacing welds [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 48: 210–217.

[4] Shang S, Wellburn D, Sun Y Z, et al. Laser beam profile modulation for microstructure control in laser cladding of an

NiCrBSi alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 248: 46–53.

[5] Del V J, Comesaña R., Lusquiños F, et al. Laser cladding of Co-based superalloy coatings; comparative study between Nd YAG laser and fibre laser [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204: 1957–1961.

[6] Ryan C, Brandt M. Laser cladding of Ti-6Al-4V powder on Ti-6Al-4V substrate: effect of laser cladding parameters on microstructure[J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 323–329.

[7] Capello E, Colombo D, Previtali B. Repairing of sintered tools using laser cladding by wire [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164/165: 990–1000.

[8] 封慧, 李剑峰, 孙杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 1–6.

(Feng Hui, Li Jian-feng, Sun Jie. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(8): 1–6.)

[9] Yao C W, Huang J, Zhang P L, et al. Toughening of Fe-based laser-clad alloy coating [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(6): 2184–2192.

[10] Yang X Y, Peng X, Chen J, et al. Effect of a small increase in the Ni content on the properties of a laser surface clad Fe-based alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253: 4420–4426.

[11] Danial K, Amir M, Ahmad A A. Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations [J]. *Materials & Design*, 2014, 61: 251–263.