



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109641314 A

(43)申请公布日 2019.04.16

(21)申请号 201780052349.1

(22)申请日 2017.04.25

(30)优先权数据

62/377721 2016.08.22 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2019.02.21

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2017/029269 2017.04.25

(87)PCT国际申请的公布数据

W02018/038776 EN 2018.03.01

(71)申请人 诺维尔里斯公司

地址 美国乔治亚州

(72)发明人 S.K.达斯 H.艾哈迈德

G.巴斯卡兰

(74)专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司 72001

代理人 董均华 刘茜

(51)Int.Cl.

B23K 20/12(2006.01)

B23K 103/10(2006.01)

B23K 103/18(2006.01)

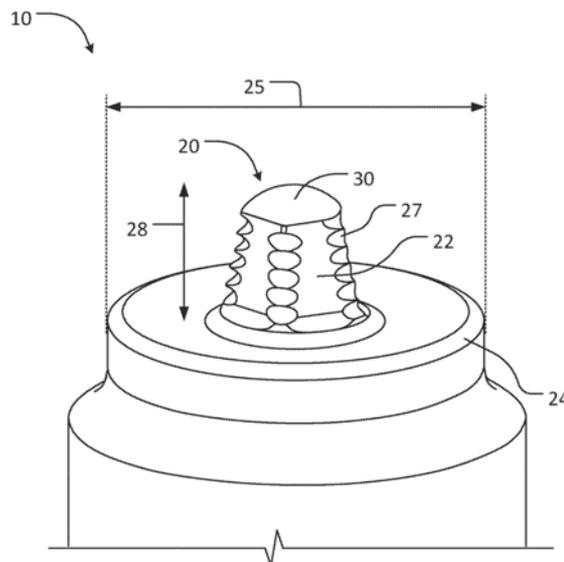
权利要求书2页 说明书14页 附图20页

(54)发明名称

用于摩擦搅拌焊接的部件和系统以及相关工艺

(57)摘要

本文中描述了用于摩擦搅拌焊接的工具和系统,包含冷却和夹紧系统。还公开了用于将铝金属,在一些情况下是厚规格铝金属,与其它金属进行摩擦搅拌焊接的工艺参数。所述工具和工艺参数可用于运输、电子、工业和机动车应用,仅仅是举了几个例子。



1. 一种摩擦搅拌焊接工具,包括:  
肩部,其包括直径;以及  
销,其从所述肩部延伸,所述销包括从所述销的尖端延伸到所述销的基底的长度,其中所述肩部的所述直径大于所述销的所述长度的三倍。
2. 根据权利要求1所述的摩擦搅拌焊接工具,其中所述肩部的所述直径大于所述销的所述长度的约3.5倍。
3. 根据权利要求1所述的摩擦搅拌焊接工具,其中所述工具的所述肩部包括凹形表面。
4. 根据权利要求1所述的摩擦搅拌焊接工具,其中所述销包括通过螺纹而彼此分离的多个大致平坦表面。
5. 根据权利要求4所述的摩擦搅拌焊接工具,其中所述多个大致平坦表面包括五个大致平坦表面。
6. 根据权利要求1所述的摩擦搅拌焊接工具,其中所述销沿着其长度渐缩。
7. 根据权利要求1所述的摩擦搅拌焊接工具,其中所述销的所述尖端是圆顶形,使得所述尖端包括凸形表面。
8. 根据权利要求1所述的摩擦搅拌焊接工具,其中所述摩擦搅拌焊接工具由M42高速工具钢形成。
9. 一种用于摩擦搅拌焊接的系统,包括根据权利要求1所述的摩擦搅拌焊接工具。
10. 根据权利要求9所述的系统,其进一步包括:  
第一金属板;  
第二金属板,其定位在固定件表面上,其中所述第一金属板被定位成邻近于所述第二金属板;以及  
多个夹具,其被配置成将所述第一金属板和所述第二金属板夹紧成抵靠所述固定件表面,并防止或减少在摩擦搅拌焊接期间所述第一和第二金属板从所述固定件表面的抬升。
11. 根据权利要求10所述的系统,其中所述多个夹具包括沿着所述第一和第二金属板中的每个金属板的纵向边缘布置的夹具,其中所述第一和第二金属板的所述纵向边缘在所述相应的第一和第二金属板的端部之间延伸。
12. 根据权利要求11所述的系统,其中所述多个夹具进一步包括沿着所述第一和第二金属板中的每个金属板的所述端部布置的端部夹具。
13. 根据权利要求10所述的系统,其中所述第一金属板是厚度介于约5 mm与约10 mm之间的铝板,且其中所述第二金属板是钢板、铜板、镍板或任何其它合适金属板。
14. 根据权利要求10所述的系统,其中所述第一金属板是2xxx、5xxx或6xxx合金。
15. 根据权利要求9所述的系统,其进一步包括:  
第一金属板;  
第二金属板,其中所述第一金属板被定位成邻近于所述第二金属板;以及  
散热器,其定位在固定表面上且被配置成传递在摩擦搅拌焊接期间产生的热,其中所述第二金属板定位在所述散热器上。
16. 根据权利要求15所述的系统,其中所述散热器是铜砧。
17. 根据权利要求15所述的系统,其中所述第一金属板是厚度介于约5 mm与约10 mm之间的铝板,且其中所述第二金属板是钢板、铜板、镍板或任何其它合适金属板。

18. 根据权利要求17所述的系统,其中所述第一金属板是2xxx、5xxx或6xxx合金。

19. 根据权利要求9所述的系统,其进一步包括至少一个冷却喷嘴,所述至少一个冷却喷嘴被布置成随着所述摩擦搅拌焊接工具沿着所述摩擦搅拌焊接工具后方的焊接路径横穿而沿着所述焊接路径横穿。

20. 根据权利要求9所述的系统,其中所述第一金属板具有对应于焊接路径的厚度减小区域。

21. 一种摩擦搅拌焊接方法,包括:

将第一金属板定位成邻近于第二金属板,其中所述第一金属板是厚度介于约5 mm与约10 mm之间的铝板,且其中所述第二金属板是厚度小于所述第一金属板的所述厚度的钢板、铜板、镍板或任何其它合适金属板;

以介于约50 RPM与约150 RPM之间的初始转速旋转根据权利要求1所述的摩擦搅拌焊接工具;

使所述摩擦搅拌焊接工具从竖直轴以期望角度倾斜,其中所述期望角度介于1°到5°之间;

施加介于约7 kN与约15 kN之间的初始轴向载荷,以致使所述摩擦搅拌焊接工具的所述尖端通过所述第一金属板的所述厚度穿透所述第一金属板,并部分地穿透所述第二金属板达插入深度;

将所述摩擦搅拌焊接工具的所述初始转速增加到第二转速,其中所述第二转速介于约400 RPM与约600 RPM之间;

将所述摩擦搅拌焊接工具的所述初始轴向载荷增加到介于约15 kN与约25 kN之间的第二轴向载荷;以及

使所述摩擦搅拌焊接工具沿着所述第一金属板的焊接路径横穿。

22. 根据权利要求21所述的方法,其进一步包括将所述第二金属板直接定位在铜散热器上。

23. 根据权利要求21所述的方法,其进一步包括使至少一个冷却喷嘴在所述横穿摩擦搅拌焊接工具后方横穿以冷却所述第一金属板。

24. 根据权利要求21所述的方法,其中所述初始轴向载荷为约7 kN。

25. 根据权利要求21所述的方法,其中所述期望角度介于2°到3°之间。

26. 根据权利要求21所述的方法,其中所述初始转速为约100 RPM。

27. 根据权利要求21所述的方法,其中所述第二轴向载荷介于约20 kN与约22 kN之间。

28. 根据权利要求21所述的方法,其中所述第二转速介于约480 RPM与约500 RPM之间。

29. 根据权利要求21所述的方法,其中所述插入深度介于约0.05 mm与约0.12 mm之间。

30. 根据权利要求29所述的方法,其中所述插入深度介于约0.05 mm与约0.07 mm之间。

## 用于摩擦搅拌焊接的部件和系统以及相关工艺

### [0001] 相关申请的交叉引用

本申请要求2016年8月22日提交的美国临时专利申请第62/377,721号的权益,所述临时专利申请的全文据此以引用的方式并入。

### 技术领域

[0002] 本发明涉及金属焊接,尤其是摩擦搅拌焊接。

### 背景技术

[0003] 摩擦搅拌焊接(被称为“FSW”)是一种将例如铝合金片或板的第一金属连接到例如钢、铜、镍或其它金属片或板的第二金属的方法。片/板被软化,但不熔化,所软化的金属和/或合金通过搅拌而机械地混合,并通过施加来自FSW工具的压力而连接,以使金属片或板互锁。

[0004] 在制造和各种应用中,铝合金越来越多地替换钢和其它金属。铝合金使用的增加会需要铝合金零件的较广泛的特性,例如较厚的规格。将铝合金与钢或其它金属连接是有挑战性的,尤其是在连接较厚的规格时。

### 发明内容

[0005] 如本文档中所使用的术语“本发明(invention/the invention/this invention/the present invention)”旨在广泛地是指本专利申请和以下权利要求书的所有主题。含有这些术语的陈述应被理解为不限制本文中所描述的主题或不限制以下专利权利要求书的含义或范围。本发明的涵盖实施例是由权利要求书限定,而非由此发明内容限定。此发明内容是本发明的各方面的高级概述,且介绍了下文在具体实施方式章节中进一步所描述的一些概念。此发明内容既不旨在识别所要求的主题的关键或必需特征,也不旨在单独地用于确定所要求的主题的范围。应参考整个说明书的适当部分、任何或所有附图和每项权利要求来理解主题。

[0006] 本文中提供用于FSW厚规格、相异和/或其它金属片(即,3.5到8 mm)和板(即,8到16 mm)的工具,所述金属片和板是例如但不限于铝合金和钢、铜、镍或其它金属片和板。如本文中所使用,术语金属包含合金。在一些情况下,FSW工具包含销,销具有通过多个齿而彼此分离的多个平坦表面。在一些情况下,销的尖端是弯曲的/圆顶形的。销从肩部延伸,在一些实例中,肩部可以是凹形的。在一些情况下,肩部的直径相对于销的长度增加。例如,肩部的直径相对于销的长度的比率可大于约2.5:1,例如但不限于约3:1或约3.5:1。

[0007] 还公开了用于减少FSW中产生的热的系统和方法。在一些情况下,使用散热器,例如但不限于铜砧和/或冷却喷嘴。在一些情况下,所述系统另外或替代地包含夹具以帮助在FSW期间维持金属的位置。

[0008] 此外,公开了焊接包含厚规格金属的相异金属而没有缺陷或具有最小化缺陷的方法。在一些情况下,所述方法产生具有分层金属间混合和强互锁的FSW连接部,而不会在接

合部处形成较厚(例如, $< 2 \mu\text{m}$ )金属间层。

### 附图说明

- [0009] 图1是根据一个实例的FSW工具的透视图。
- [0010] 图2是图1的工具的示意性侧视图,所述工具被示出为嵌入到两种金属中。
- [0011] 图3是根据一个实例的用于FSW的组件的俯视透视图。
- [0012] 图4是FSW期间产生的焊瘤的数字图像。
- [0013] 图5是根据另一实例的用于FSW的组件的俯视透视图。
- [0014] 图6是根据一个实例的用于FSW的系统的冷却喷嘴的特写侧视透视图。
- [0015] 图7是根据实例的具有厚度减小区域的金属板的数字图像。
- [0016] 图8是根据一个实例的变形金属板的数字图像。
- [0017] 图9是根据示范性方法形成的焊缝的扫描电子显微镜(scanning electron microscope;SEM)图像。
- [0018] 图10是与6xxx铝合金和钢相比的摩擦搅拌焊缝的结合强度的图形。
- [0019] 图11是变形的FSW工具的数字图像。
- [0020] 图12是摩擦搅拌焊接铝合金和钢的SEM图像。
- [0021] 图13是摩擦搅拌焊接铝合金和钢的数字图像。
- [0022] 图14是摩擦搅拌焊接铝合金和钢的SEM图像。
- [0023] 图15是呈对接配置的摩擦搅拌焊接铝合金和钢的数字图像。
- [0024] 图16A到16C含有摩擦搅拌焊接铝合金和钢的SEM图像。图16A是低倍率图像,且图16B和16C是高倍率图像。
- [0025] 图17A到17C含有摩擦搅拌焊接铝合金和钢的SEM图像。图17A是低倍率图像,且图17B和17C是高倍率图像。
- [0026] 图18是绘示各种焊缝的硬度的图形。
- [0027] 图19是在腐蚀之前和之后的FSW工件的抗拉强度的图形。
- [0028] 图20是呈对接焊接配置的FSW工件的抗拉强度的图形。
- [0029] 图21A到21B是腐蚀的FSW工件的数字图像。
- [0030] 图22A到22B是腐蚀的FSW工件的数字图像。
- [0031] 图23是在腐蚀测试之后的FSW工件的结合强度的图形。
- [0032] 图24A到24B是腐蚀的FSW工件的数字图像。
- [0033] 图25A到25B是腐蚀的FSW工件的数字图像。
- [0034] 图26A到26B是根据本文中所描述的方法和铝合金可实现的产品的示意图。

### 具体实施方式

#### [0035] 定义和描述

本文中所使用的术语“本发明(invention/the invention/this invention/the present invention)”旨在广泛地是指本专利申请和以下权利要求书的所有主题。含有这些术语的陈述应被理解为不限制本文中所描述的主题或不限制以下专利权利要求书的含义或范围。

**[0036] AA名称**

在本说明书中,参考由铝工业名称识别的合金,例如“系列”或“6xxx”。为了理解最常用于命名和识别铝及其合金的编号名称系统,请参见“用于锻铝和锻铝合金的国际合金名称和化学组成物限制(International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys)”或“用于呈铸件和铸锭形式的铝合金的铝业协会合金名称和化学组成物限制的登记记录(Registration Record of Aluminum Association Alloy Designations and Chemical Compositions Limits for Aluminum Alloys in the Form of Castings and Ingot)”,其都是由铝业协会(The Aluminum Association)出版。

**[0037]** 如本文中所使用,除非上下文另有明确规定,否则“一(a/an)”和“所述”的含义包含单个和多个参考。

**[0038]** 公开了一种用于对两个片、板或其它金属件进行摩擦搅拌焊接(FSW)的工具。在一些情况下,一种或两种金属是厚规格(例如,约5到10 mm)铝合金,但在其它情况下,一种或两种金属不是厚规格。在一些情况下,第二金属是不同的金属,例如钢、铜、镍或其它金属。在一些情况下,第二金属相比于第一金属具有不同的厚度;在一些情况下,第二金属薄于第一金属。对第一金属和第二金属进行摩擦搅拌焊接以形成任何合适配置的焊缝,包含搭接、边缘、对接、T形对接、卷边、T形边缘等等。

**[0039]** 图1是根据一个实例的工具10的透视图。工具10包含从肩部24延伸的销20。在一些情况下,如在图2中所看到,肩部24具有凹形表面26,其凹度介于约 $10^{\circ}$ 与约 $30^{\circ}$ 之间,例如但不限于介于约 $15^{\circ}$ 与约 $20^{\circ}$ 之间或介于约 $10^{\circ}$ 与约 $15^{\circ}$ 之间。凹形表面26可减少FSW期间的起瘤,且还用作材料储槽。肩部24可具有任何合适直径25(图1)。在一些非限制性实例中,肩部24的直径25介于约15 mm与25 mm之间,例如但不限于介于约17 mm与约22 mm之间或介于约19 mm与约21 mm之间。销20包含通过螺纹27而彼此分离的多个平坦或大致平坦侧22。在图1所示出的非限制性实例中,销20包含五个平坦或大致平坦侧22和五组螺纹27。在一些情况下,具有五个(或其它合适数目个)平坦侧的销在FSW期间提供改善的偏心率。

**[0040]** 销20可具有任何合适长度28。在一些非限制性实例中,销20的长度28介于约5 mm与约11 mm之间,例如但不限于介于约6 mm与约9 mm之间或介于约5.9 mm与约9.8 mm之间。销20包含可以是圆顶形/弯曲的尖端30。尖端30的圆顶形状可帮助改善工具10的寿命。圆顶形尖端30还可增加表面积并提供与金属工件的更多接触,这可改善被焊接的金属之间的互锁。尖端30可具有任何半径32(参见图2),包含介于约5 mm与约10 mm之间,这取决于待焊接的铝板厚度。

**[0041]** 在一些非限制性实例中,肩部24的直径25对销20的长度28的比率相比于传统工具增加。例如,直径25对长度28的比率可大于2.5:1,例如但不限于约3:1或约3.5:1,这可减少FSW期间产生的热。

**[0042]** 图2是嵌入到第一金属板110中的工具10的示意图,第一金属板110定位在第二金属板120的顶部上。板110、120可具有相同或不同的厚度。在一个非限制性实例中,第一金属板110是受热的铝合金板,且第二金属板120是受热的钢板。在一个非限制性实例中,第一金属板110具有介于约5与10 mm之间的厚度,而第二金属板120具有约2 mm的厚度,但是板110和120中的每个板可具有任何合适的厚度。

[0043] 销20穿透第一金属板110达深度150且穿透第二金属板120达深度160。在一些情况下,深度150通常对应于第一金属板110的厚度。在图2所绘示的实例中,深度150介于约5 mm与约10 mm之间。深度160可以是任何合适的深度,包含例如介于约0.05 mm与约0.15 mm之间,例如但不限于介于约0.07 mm与约0.12 mm之间或介于约0.08 mm与约0.10 mm之间。工具10的肩部24插入到第一金属板110中达任何合适深度180,例如介于约0.05 mm与约0.15 mm之间,例如但不限于介于约0.07 mm与约0.12 mm之间或介于约0.08 mm与约0.10 mm之间。肩部24的插入深度180直接与凹形表面26的曲度相关。

[0044] 在一些实例中,如图2所示出,工具10相对于垂直轴220以角度 $\beta$ 倾斜,其中 $\beta$ 介于约 $1^\circ$ 与约 $4^\circ$ 之间,例如介于约 $1^\circ$ 与约 $3^\circ$ 之间,或介于约 $1.5^\circ$ 与约 $2.5^\circ$ 之间。

[0045] 工具10可由例如钢的任何合适材料制成。下表1中绘示了工具10的组成物的两个非限制性实例,但是可使用任何合适材料。

工具钢	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Co	Fe	硬度(HRC)
H13	0.40	0.40	1.00	5.25	0	1.35	1.00	0	剩余部分	42
M42	1.08	0	0.45	3.85	1.50	9.50	1.20	8.00	剩余部分	68到70

表1

[0046] 如上文所提到,第一金属板110和第二金属板120可以是任何合适材料。在一个实例中,第一金属板110是铝合金,而第二金属板120是钢。下表2列出了第一金属板110的组成物的两个非限制性实例,但是可使用任何合适铝合金,包含任何2xxx、5xxx或6xxx系列铝合金。作为一个非限制性实例,第二金属板120可以是AISI 1018。

合金	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	杂质		Al
									各	总	
5xxx	0.1到0.5	0.25到0.40	0.05到0.20	0.1到1.0	2.2到5.0	0.05到0.30	0.02到0.3	0.02到0.2	0.05	0.15	剩余部分
6xxx	0.5到1.2	0.18到0.26	0.1到1.0	0.07到0.2	0.6到1.5	0.02到0.1	0.01到0.5	0.01到0.2	0.05	0.15	剩余部分

表2

[0047] 图3绘示了夹紧系统300,随着工具10或其它合适工具在FSW期间沿着焊接路径350横穿,夹紧系统300可用于夹紧第一金属板110和第二金属板120以紧固所述金属板。第一金属板110和第二金属板120定位在FSW固定件表面310上。在一些非限制性实例中,第一金属板110和第二金属板120(在此图像中第二金属板120被遮挡)放置在两个硬化金属件330之间,金属件330可以是钢或任何其它合适金属,使得第一金属板110和第二金属板120的每个纵向侧接触一个金属件330。为了确保和维持第一金属板110和第二金属板120相对于金属件330的对准,可将端部止动件340定位成紧靠第一金属板110和第二金属板120的一个或两个端部的至少一部分以及金属件330的一个或两个端部的至少一部分。多个夹具360,其可以是趾状夹具或任何合适类型的夹具,与金属件330重叠并以任何合适方式紧固到固定件表面310,例如通过将垫圈配合螺栓370驱动到固定件表面310的螺纹孔320中。夹具360可彼此隔开,例如达约25 mm或任何其它合适距离。

[0048] 在一些实例中,夹紧系统300还包含端部夹具380,端部夹具380紧固第一金属板

110和第二金属板120的端部,且在一些情况下紧固端部止动件340。如同夹具360一样,夹具380可以任何合适方式被紧固,包含通过将垫圈配合螺栓370驱动到螺纹孔320中而将夹具380用螺栓连接到固定件310。在一些情况下,不使用端部夹具380。利用具有夹具360和/或夹具380的夹紧系统300会帮助将第一金属板110和第二金属板120紧固成抵靠它们被定位的表面,例如固定件表面310。通过防止第一金属板110和第二金属板120从固定件表面310抬升,可防止或减少如图4所示出的焊瘤400。利用例如夹紧系统300的夹紧系统还可防止第一金属板110和第二金属板120在FSW之后翘曲。

[0049] 在一些情况下,FSW系统包含散热器或其它传热部件,例如图5所绘示的砧500。砧500可以是铜或用于传递热的任何合适材料。在一些情况下,砧500包含多个孔510,用于通过固定件表面310的螺纹孔320将砧500紧固到例如固定件表面310的表面,但是砧500可以任何合适方式被紧固。如图5所绘示,端部止动件340可被定位成紧靠砧500。第一板110和第二板120定位在砧500的顶部上,且可使用上述夹紧系统300或其它方式被紧固。如图5所示出,第二板120直接定位在砧500的顶部上。在一些非限制性实例中,砧500用作散热器以促进FSW期间第一金属板110和第二金属板120的冷却,以减少或消除FSW之后的第一金属板110和第二金属板120的翘曲、变形和/或脱结。这在第一金属板110和第二金属板120是比如铝和钢的相异材料时是特别有利的,因为铝和钢具有显著不同的热膨胀系数且因此在FSW期间产生的热可导致严重的翘曲。

[0050] 还公开了一种用于控制FSW期间的热流的冷却系统。图6绘示了示范性冷却介质输送喷嘴600。喷嘴600被定位成邻近于例如工具10的FSW工具,使得随着工具10在方向610上沿着第一金属板110和第二金属板120横穿,喷嘴600跟随工具10。冷却系统可包含一个或多个喷嘴600,每个喷嘴沿着焊接路径350输送例如液体或气体的冷却介质,尾随FSW工具10以移除在第一金属板110和第二金属板120中产生的热。在一些非限制性实例中,冷却介质是加压空气和/或水(在一些情况下呈雾的形式)。加压空气可以约5 L/min到约20 L/min(例如,介于约10 L/min与约15 L/min之间)的速率流动。将冷却介质输送到邻近于FSW工具10的焊接路径350可防止在FSW之后的焊接板110、120的翘曲、变形和/或脱结。

[0051] 在一些情况下,第一金属板110和第二金属板120中的一个或两个金属板可被修改为具有厚度减小区域700,如图7所示出。厚度减小区域700对应于焊接路径350(图3和6)。在一些非限制性实例中,第一金属板110的厚度减小了约0.05 mm到约0.50 mm,例如约0.21 mm。减小板厚度将会引起调整插入深度的灵活性,并可帮助防止或减少FSW之后的焊瘤400(图4)的出现。

[0052] 图8绘示了已在FSW之前被预加应力的板,例如板120。对第一金属板110和第二金属板120中的一个或两个金属板预加应力会导致板翘曲或变形,如图8所示出。第一金属板110和第二金属板120中的一个或两个金属板的翘曲800可从原始平面延伸约1 mm到约100 mm,例如约38 mm。在一些非限制性实例中,第二金属板120在FSW之前被预加应力。对第一金属板110和第二金属板120中的一个或两个金属板预加应力可提供变形板,其抵消了可在FSW之后发生的此类翘曲。

[0053] 还公开了用于FSW的方法和工艺。在一些情况下,如上文所描述,FSW连接相异金属的和/或具有不同厚度的板(或片和/或其它件)。本文中所公开的工艺参数在包含一个或多个厚板(例如,约5 mm到约10 mm)的板之间提供合适的焊缝,而不会危害板110、120的机械

和/或腐蚀性质。如上文所提到,在一些情况下,第一金属板110可以是高强度2xxx、5xxx或6xxx铝合金,而第二板120可以是钢。

[0054] 需要时,可在FSW之前制备第一金属板110和第二金属板120中的一个或两个金属板。例如,可通过研磨垫和/或溶剂清洁第一金属板110和/或第二金属板120。在一些非限制性实例中,研磨垫包括金属、合金、玻璃、金刚石、聚合物、天然海绵等等。在一些非限制性实例中,溶剂是有机的。在一些另外非限制性实例中,溶剂充当脱脂剂。在一些非限制性实例中,溶剂包含丙酮、异丙醇、乙醇、甲醇、己烷、氯仿、氯苯等等。

[0055] 一旦制备了第一金属板110和/或第二金属板120,就使它们相对于彼此而定位。在一个非限制性实例中,第一金属板110与第二金属板120重叠达约25 mm,但是所述板可具有任何合适重叠。一旦已根据需要而定位了第一金属板110和第二金属板120,就使用例如上述工具10的FSW工具将板110、120摩擦搅拌焊接在一起。在FSW期间可采用夹紧系统300、散热器500和冷却喷嘴600中的任何一个或多个。

[0056] 具体地说,FSW工具(例如工具10)的销(例如销20)以期望的初始轴向力和初始转速嵌入到第一金属板110中达插入深度150(参见图2)。在一个实例中,初始轴向力介于约7到25 kN之间,例如介于约10到22 kN之间,或介于约15到21 kN之间,且初始转速介于约50到150 RPM之间,例如约70到120 RPM或约80到100 RPM。工具10通过第一金属板110的整个厚度而嵌入。如上文所论述,工具10可嵌入到第一金属板110中,使得其远离竖直轴而倾斜,例如倾斜角度介于约1°到5°之间,例如介于约1°到3°之间,或介于约1.5°到2.5°之间,或其它合适角度。在一个实例中,工具10嵌入到第一金属板110中达足够远离第一金属板110和/或任何夹具的边缘的距离。例如,销20可以与第一金属板110和/或夹具360的边缘相隔介于约10到25 mm之间的距离而嵌入。

[0057] 工具10进一步嵌入到第二金属板120中达合适的插入深度160(参见图2),例如介于约0.05 mm与约0.15 mm之间,例如但不限于介于约0.07 mm与约0.12 mm之间或介于约0.08 mm与约0.10 mm之间。一旦达到期望的插入深度160,工具10的转速和轴向力就都会增加。例如,一旦达到期望的插入深度160,工具10的初始轴向力可增加到介于约7到25 kN之间的第二轴向力,例如介于约10到22 kN之间,或介于约15到21 kN之间。类似地,工具10的初始转速可增加到介于约400到600 RPM之间的第二转速,例如介于约450到550 RPM之间或介于约480到500 RPM之间。工具10在方向610(图6)上沿着焊接路径350以合适的速度沿着第一金属板110和第二金属板120横穿,所述速度例如介于约50到150 mm/min之间,或介于约70到120 mm/min之间,或介于约80到100 mm/min之间。

[0058] 下表3和4提供了合适工艺参数的两个非限制性实例。

工具转速	插入深度 (进入第二板 120)	工具 倾斜角度	轴向载荷	横穿 速度	横穿 长度
400 到 600 rpm	0.05 到 0.12 mm	1 到 3°	15 到 25 kN	60 到 120 mm/min	50 到 1000 mm

表 3

工具转速	插入深度 (进入第二板 120)	工具倾斜 角度	轴向载荷	横穿 速度	横穿 长度
480 到 500 RPM	0.05 到 0.07 mm	2 到 3°	20 到 22 kN	80 到 100 mm/min	400 到 500 mm

表 4

[0059] 如上文所论述,所述方法可任选地包含在FSW之前将例如砧500的散热器定位在第一金属板110和第二金属板120下方。所述方法可另外或替代地包含使用例如夹紧系统300的夹紧系统以相对于第一金属板110和第二金属板120被定位的固定表面紧固第一金属板110和第二金属板120。如上文所论述,所述方法可另外或替代地涉及使用冷却系统(例如一个或多个冷却喷嘴600)以随着工具10沿着第一金属板110和第二金属板120横穿而冷却所述板。一旦达到期望的焊缝长度,就从第一金属板110和第二金属板120移除工具10。

[0060] 控制如上文所描述的工具10(图1)的肩部直径25、工具(图2)的销半径32、工具10的销长度28、横穿速度、转速、插入力和/或插入深度中的一个或多个可帮助减少FSW期间产生的热。这又可帮助减少FSW期间的第一金属板110和第二金属板120的塑性变形,这可在通过FSW形成的焊缝内产生较小的焊核区920(图9)。焊核区是指焊缝中由于FSW期间的塑性变形而在微结构上变化的失真区。在一些情况下,如图9所示出,本文中所描述的装置和工艺可引起焊缝中的焊核区920和分层根部930小于用传统工具和工艺参数形成的焊核区和分层根部。例如,焊核区920可近似等于或小于工具肩部,且第一金属板110与第二金属板120之间的接合部处的金属间区可小于约2  $\mu\text{m}$ 。

[0061] 第一金属板110与第二金属板120之间的金属间区可能是脆性的且降低了焊接强度。所公开的工艺参数产生无缺陷的FSW连接部或具有最小化缺陷的连接部。工具10的所公开的转速和/或横穿速度与所公开的插入力和/或插入深度的组合帮助减轻或最小化第一金属板110和第二金属板120中的一个或两个金属板在焊核区920处的破碎(特别是当第二金属板120是钢时),以改善可成形性和耐腐蚀性。

[0062] 在一些情况下,焊接的第一金属板110和第二金属板120实现了非焊接金属的强度的约60到70%,其中改善了耐腐蚀性,而不会干扰非焊接金属微结构。图10是绘示与非焊接的(母体)第一金属板110(左条形图)和第二金属板120(中间条形图)相比,焊接的第一金属板110和第二金属板120(右条形图)的FSW接合部结合强度的图表。在此特定情况下,第一金属板110是厚度为10 mm的6xxx铝合金,且第二金属板120是厚度为2 mm的钢合金。

[0063] 已详细地参考了所公开的主题的各种实例,上文阐述了所述主题的一个或多个实例。每个实例是通过对主题的阐释而非其限制来提供的。实际上,所属领域的技术人员将理解,在不脱离本公开的范围或精神的情况下,可对本主题进行各种修改和变化。例如,作为一个实例的部分而说明或描述的特征可与另一实例一起使用以得到又一实例。

[0064] 下列实例将用来进一步说明本发明,然而,同时不对其构成任何限制。相反,应清

楚地理解,在不脱离本发明的精神的情况下,可借助各种实施例,在阅读本文中的描述之后,所述实施例的修改和等效物可本身暗示给所属领域的技术人员。

#### [0065] 实例1

使用由H13钢制成的FSW工具10对铝板和钢板进行摩擦搅拌焊接。通过使用研磨垫在丙酮中擦洗来清洁铝板和钢板。铝板是AA 5083合金,厚度为5.82 mm。钢板是AISI 1018合金,厚度为2.0 mm。表5中列出了焊缝1和2的工艺参数。

焊缝编号	工具转速	插入深度 (进入钢板)	工具倾斜 角度	轴向载荷	横穿 速度	横穿 长度
1	350 RPM	0.12 mm	3°	24.5 kN	57 mm/min	457 mm
2	350 RPM	0.07 mm	3°	28 kN	57 mm/min	457 mm

表 5

[0066] 使用条形夹具以将铝板和钢板固持就位。FSW工具由AISI H13钢制成(参见表1)。基于洛氏硬度试验(Rockwell scale)的硬度为42 HRC(HRC表示金属由120°球锥形金刚石以1.47 kN轴向载荷压印)。工具的销长度为5.94 mm,且针对焊缝#1的进入钢板的销插入深度160为0.12 mm。图4是焊缝#1的结果的数字图像。不足的竖直约束导致了焊缝中心中的板抬升,以及焊缝最后三分之一中的表面破裂缺陷420。此外,板抬升造成了FSW工具切开铝板,而不是将铝合金合结合到焊缝中,从而产生焊瘤400。

[0067] 在焊缝#2中,应用局部夹具以防止板抬升,且销插入深度减小到0.07 mm。安全气囊系统向邻近于FSW工具的辊施加力。在FSW过程期间,辊将工件固持就位。焊缝#2得到改善,但是在板的端部附近发生了一些抬升,从而造成焊瘤。销尖端进一步磨损,且销长度减小到5.82 mm。图11示出了销变形1100的程度。在FSW过程中,42 HRC的工具硬度显得不足以用于与钢的硬接触。工具损坏是归因于焊接期间的机械变形和钢间相互作用造成的磨损。

#### [0068] 实例2

使用工具10以对铝板与钢板进行摩擦搅拌焊接。由于实例1表明了较厚规格金属的FSW中采用由H13工具钢制成的工具的问题,故使用M42工具钢的FSW工具(参见表1),因为所述组成物提供高硬度。铝板是AA 5083合金,厚度为5.82 mm。钢板是AISI 1018合金,厚度为2.0 mm。表6中列出了采用所公开的FSW工具的焊接参数。

焊缝编号	工具转速	插入深度 (进入钢板)	工具倾斜 角度	轴向载荷	横穿 速度	横穿 长度
3	600 RPM	0.03 到 0.06 mm	2°	22.2 kN	127 mm/min	457 mm
4	525 RPM	0.03 到 0.06 mm	2°	20.9 kN	127 mm/min	457 mm

表 6

[0069] 在焊缝#3中应用使用上文所描述的趾状夹具360的夹紧系统300(参见图3)。不使用端部夹具380。此夹紧系统有效地防止了焊接期间的板抬升。此配置适合于搭接配置FSW。焊缝#3开始于FSW工具的销20插入到钢板中达0.03 mm,且在中途,进入钢板的焊接插入深度160增加了0.03 mm以维持恒定的插入深度。在焊接开始时观测到适量的焊瘤(插入深度160 = -0.1 mm),其随着插入深度160增加而增加(插入深度160 = 0.08 mm)。样品在从固定件中被移除时翘曲。图12是焊缝#3的横截面SEM图像。图12中示出了铝板110和钢板120的接合部1215。焊缝的焊核区920是明显的,示出了搅拌的效果。在图12中还可看到工具10的轮廓1230。

[0070] 焊缝#4在整个焊接中采用与趾状夹具360相同的夹紧系统300。允许焊接板110、120被动地冷却到环境温度,同时保持被夹紧。焊缝#4开始于FSW工具10的销20插入到钢板中达0.03 mm(插入深度160 = -0.12 mm),且在中途,焊接插入深度160增加了0.03 mm(插入深度160 = -0.25 mm)。焊接的铝板和钢板在固定件中完全冷却,且随着样品冷却,可听到响亮的爆裂声和开裂声。焊接板在从固定件中被移除时展现了翘曲。焊接起点和终点在铝板与钢板之间脱结,从而示出了不良的结合。

#### [0071] 实例3

本文中描述了用于FSW较厚规格金属的工艺的进一步发展。进行了三次FSW试验以探索以下效果:(i)通过减小焊接路径的厚度来减小FSW工具10的销20的插入深度;(ii)在FSW之前对钢板加应力;以及(iii)在FSW之前预加热钢板。这些修改帮助防止焊瘤和翘曲。使用M42工具钢的FSW工具10(参见表1)。铝板是AA 5083合金,厚度为5.82 mm。钢板是AISI 1018合金,厚度为2.0 mm。表7中列出了FSW的工艺参数。

焊缝编号	工具转速	插入深度 (进入钢板)	工具倾斜 角度	轴向载荷	横穿 速度	横穿 长度
5	600 RPM	0.05 mm	2°	15.6 kN	127 mm/min	457 mm
6	600 RPM	0.05 mm	2°	15.8 kN	127 mm/min	457 mm
7	600 RPM	0.05 mm	2°	17.4 kN	127 mm/min	457 mm

表 7

[0072] 表7中列出了焊缝#5的焊接参数。图7是铝板110的数字图像,其具有厚度减小区域以引起销20的插入深度160减小。铝板110的焊接区域700从5.82 mm减薄到5.61 mm,以减少肩部接触和焊瘤产生。板厚度减小700产生了没有焊瘤产生、具有光滑焊缝表面且在出口孔中没有蚀迹指示的焊缝。

[0073] 表7中列出了焊缝#6的焊接参数。如图7所示出,铝板110的焊接区域700从5.82 mm减薄到5.61 mm,以减少肩部接触和焊瘤400的产生。此外,如图8所示出,在焊接之前,钢板120在焊接期间变形了与预期的翘曲方向相对的高度800(在这种情况下,38 mm)。在FSW之后,板翘曲到与使用平钢板的先前焊接相同的水平。

[0074] 表7中列出了焊缝#7的焊接参数。如图7所示出,铝板110的焊接区域700从5.82 mm减薄到5.61 mm,以减少肩部接触和焊瘤产生。在FSW之前,将钢板和固定件表面预加热到100℃以降低焊缝的冷却速率。在焊接期间,工具10的肩部24深深地接合在铝板110中并产生大量的焊瘤。在出口孔中存在蚀迹指示。

[0075] 通过板减薄而减小销20的插入深度160会很好地减少焊瘤。焊接载荷减小。预加应力或预加热都不会对翘曲减少产生明显的影响。

#### [0076] 实例4

本文中描述了用于FSW较厚规格金属的工艺的进一步发展。进行了四次FSW试验以探索以下效果:(i)降低工具转速;以及(ii)在FSW期间进行加压空气冷却。这些修改帮助防止翘曲。使用FSW工具10 M42工具钢(参见表1)。铝板是AA 5083合金,厚度为5.82 mm。钢板是AISI 1018合金,厚度为2.0 mm。采用夹紧系统300,其对以下四个焊缝应用侧夹具360和端部夹具380(参见图3)。表8中列出了工艺参数。

焊缝编号	工具转速	插入深度 (进入钢板)	工具倾斜 角度	轴向载荷	横穿 速度	横穿 长度
8	600 RPM	0.05 mm	2°	15.8 kN	80 mm/min	457 mm
9	500 RPM	0.15 mm	2°	16.1 kN	80 mm/min	457 mm
10	500 RPM	0.15 mm	2°	16.9 kN	100 mm/min	457 mm
11	500 RPM	0.15 mm	2°	18.2 kN	100 mm/min	457 mm

表 8

[0077] 表8中列出了焊缝#8的焊接参数。如图7所示出,铝板110的厚度在焊接区域700中从5.82 mm减小到5.21 mm。销20的插入深度160为0.05 mm。焊缝表面光滑且一致,无焊瘤。出口孔示出了小蚀迹。随着移除夹具360、380,板110、120沿着焊接路径分离。

[0078] 表8中列出了焊缝#9的焊接参数。与焊缝#8达0.15 mm相比,销20的插入深度160增加了0.1 mm。焊缝表面光滑且一致,无焊瘤。随着移除夹具360、380,板110、120从焊接出口脱结到与出口孔相隔100 mm的距离。铝板110在脱结之后移位。图13是所得焊缝的数字图像,绘示了由于钢板和铝板的出口孔未对准而使板在出口孔1300中移位。

[0079] 表8中列出了焊缝#10的焊接参数。进入钢板的销插入深度160为0.15 mm。焊缝表面光滑且一致,无焊瘤。随着移除夹具360、380,板保持结合,但是从连接线发出一系列滴答声。

[0080] 表8中列出了焊缝#11的焊接参数。在FSW工具10后方添加加压空气冷却射流,例如图6所示出的喷嘴600,以增加冷却。进入钢板的销插入深度160为0.15 mm。焊缝表面光滑且一致,无焊瘤。随着从夹具360、380移除工件,没有听到滴答声或爆裂声。

[0081] 焊缝#8和9产生的热最多,这可能会导致低结合强度。焊缝#10产生的热略低,焊缝#10保持被结合,但是被怀疑有局部分离。焊缝#11采用加压空气冷却并保持被结合,不被怀疑有结合层分离。增加焊缝的冷却速率展现了减少的翘曲。

#### [0082] 实例5

本文中描述了用于FSW较厚规格金属的工艺的进一步发展。进行了四次FSW试验以探索以下效果:(i)对钢工件预加应力;(ii)用加压空气冷却;(iii)用水雾冷却;(iv)降低工具转速;以及(v)增加FSW期间的横穿速度。这些修改防止了翘曲和在铝板内发现的钢屑。使用M42工具钢的FSW工具10(参见表1)。铝板是AA 5083合金,厚度为5.82 mm。钢板是AISI 1018合金,厚度为2.0 mm。采用夹紧系统300,其对以下四个焊缝应用侧夹具360和端部夹具380(参见图3)。表9中列出了工艺参数。

焊缝编号	工具转速	插入深度 (进入钢板)	工具倾斜 角度	轴向载荷	横穿 速度	横穿 长度
12	500 RPM	0.15 mm	2°	18.2 kN	100 mm/min	457 mm
13	500 RPM	0.15 mm	2°	18.7 kN	100 mm/min	457 mm
14	480 RPM	0.15 mm	2°	19.4 kN	120 mm/min	457 mm
15	480 RPM	0.15 mm	2°	18.3 kN	100 mm/min	457 mm

表 9

[0083] 表9中列出了焊缝#12的焊接参数。进入钢板的销插入深度160为0.15 mm。遍及508 mm板长度将钢板预加应力(参见图8)到46.5 mm的中心高度800。随着移除夹具360、380,板110、120从焊接插入点和焊接出口点脱结了与插入点和出口点都相隔150 mm的距离。如上文所描述,在工具10后方使用一个加压空气冷却喷嘴,例如图6所示出的喷嘴600,

以辅助焊缝冷却。通过6.4 mm喷嘴以90 psi供应压缩空气。

[0084] 表9中列出了焊缝#13的焊接参数。进入钢板的销插入深度160为0.15 mm。在FSW工具10后方使用四个水雾冷却喷嘴(例如图6所示出的喷嘴600)以在FSW过程期间辅助冷却材料。随着移除夹具360、380,连接线没有明显的开裂噪音。在从固定件表面移除后,铝板和钢板就保持非常平坦。

[0085] 表9中列出了焊缝#14的焊接参数。进入钢板的销插入深度160为0.15 mm。对焊缝#14没有应用冷却。焊缝表面光滑且一致,无焊瘤。焊接顺利地完成。随着移除夹具360、380,没有发出爆裂声或开裂声。

[0086] 表9中列出了焊缝#15的焊接参数。进入钢板的销插入深度160为0.15 mm。对焊缝#14没有应用冷却。焊缝表面光滑且一致,无焊瘤。焊接顺利地完成,且在移除夹具360、380并从固定件移除后,就没有注意到爆裂声或开裂声。

[0087] 当产生了最多的热时会发生脱结,对于具有预加应力的钢板的焊缝#12,内应力较大,且有效销尖端插入深度160增加。由于在FSW工具10后方存在水雾而造成的冷却速率增加会极其有效地减少由焊接过程造成的翘曲。

#### [0088] 实例6

本文中描述了用于FSW较厚规格金属的工艺的进一步发展。进行了两次FSW试验以探索以下效果:(i)组合来自先前试验的发现结果;以及(ii)在FSW期间采用铜砧500作为散热器。这些修改防止了铝板和钢板的翘曲。使用M42工具钢的FSW工具(参见表1)。铝板是AA 5083合金,厚度为5.82 mm。钢板是AISI 1018合金,厚度为2.0 mm。表10中列出了工艺参数。

焊缝编号	工具转速	插入深度 (进入钢板)	工具倾斜 角度	轴向载荷	横穿 速度	横穿 长度
16	480 RPM	0.08 mm	2°	21.8 kN	100 mm/min	457 mm
17	480 RPM	0.08 mm	2°	21.6 kN	100 mm/min	457 mm

表 10

[0089] 表10中列出了焊缝#16的参数。与焊缝#15相比,进入钢板的销插入深度160减小了0.07 mm到0.08 mm的深度。焊缝表面光滑且一致,无焊瘤。焊接顺利地完成,但是在固定件中冷却时注意到了轻微的爆裂声。

[0090] 表10中列出了焊缝#17的焊接参数。所有条件与焊缝#16相同,包含插入深度160。焊缝表面光滑且一致,无焊瘤。焊接顺利地完成,且在冷却期间或在从固定件移除后就没有注意到爆裂声或开裂声。图14是焊缝#17的横截面SEM图像。示出了铝板110和钢板120的接合部1215。焊缝的焊核区920是明显的,示出了搅拌的效果。还可看到FSW工具10的轮廓1230。

[0091] 对于两个焊缝#16到17,在焊接之后发生了铜砧500的轻微塑性变形。尽管试图维持相同的焊接条件,但是在焊缝之间仍存在一些差异。例如,在焊缝#16上存在略多的前进侧材料积聚,在焊缝#16上存在较多的失真,且在焊缝#17上存在可能的蚀迹。

#### [0092] 实例7

本文中描述了用于FSW较厚规格金属的工艺的进一步发展。进行了两次FSW试验以探索使用FSW对铝合金和钢板进行对接焊接。使用M42工具钢的FSW工具10(参见表1)。铝板是AA 5083合金,厚度为5.82 mm。钢板是AISI 1018合金,厚度为2.0 mm。表11中列出了工艺参数。

焊缝编号	工具转速	插入深度 (进入钢板)	工具倾斜 角度	轴向载荷	横穿 速度	横穿 长度
18	480 RPM	4.85 mm	0°	17 kN	100 mm/min	450 mm
19	480 RPM	4.85 mm	2°	18 kN	100 mm/min	450 mm

表 11

[0093] 表11中列出了焊缝#18的参数。工具位置的参考点是钢板120的外边缘。图15是对接焊接金属板110、120的数字图像。焊接路径350在整个焊缝长度内的连接接合部处含有线1500。焊缝的前进侧显得含有由于FSW工具10嵌入到钢板中过远而造成的钢带1510。出口孔1300含有蚀迹类型的指示。

[0094] 表11中列出了焊缝#19的参数。工具位置的参考点是钢板120的外边缘。焊缝表面在整个焊缝长度内的连接接合部处含有线。出口孔含有蚀迹类型的指示。此焊缝的工具倾角为2°。尽管工具编程发生了变化,但是工具仍插入到钢板中过远达约0.7 mm(目标为0.2 mm)。

#### [0095] 实例8

分析了FSW结合件的翘曲、粒状结构、硬度、抗拉强度和耐腐蚀性,以进行选择焊接试验。

#### [0096] 翘曲

表12中呈现了翘曲结果。通过参考平坦表面放置焊接结合物来测量翘曲量。

焊缝编号	铝板 (mm)	钢板 (mm)
5	9.9	9.1
6	11.0	8.3
7	12.25	12.2
9	脱结	脱结
10	8.05	8.1
11	7.2	6.7
12	脱结	脱结
13	2.7	-2.1
14	7.2	4.6
15	7.2	4.4
16	6.3	5.7
17	5.4	4.5

表 12

#### [0097] 粒状结构

图12(焊缝#3)和图14(焊缝#17)中呈现了FSW之后的一些样品的粒状结构。焊核区920、热机械影响区1240和热影响区1250是明显的。

#### [0098] SEM

图16A到16C和图17A到17C是焊缝#2的横截面SEM图像。在所述图像中,铝板110和钢板120的接合部1215是明显的。工具10的圆顶形尖端30的轮廓1230是清晰可见的。

#### [0099] 硬度

图18呈现了来自焊缝#2、3、4、5、6、7、10和11的焊接工件的显微硬度数据。使样品经受维氏硬度测试(Vickers hardness test)。轴向载荷是50 g。压印的持续时间是10秒。图形示出,由于FSW过程,整个焊缝焊核区内没有硬度变化。FSW是一种固态连接方法,其中母体材料保持其完整性和固有性质。由于钢破碎,焊缝#3和#5在根部中示出某一离散值。

## [0100] 抗拉强度

图19呈现了在暴露于腐蚀性环境之前和之后的焊缝#2、3、4、5、6、7、10、11、13、14、15、16和17的抗拉强度测试的结果。空心圆圈表示没有涂漆或腐蚀的样品的最大断裂载荷(以N为单位)。空心正方形表示在没有涂漆或腐蚀的样品断裂之前的延伸(以mm为单位)。空心星形表示没有涂漆的腐蚀样品的最大断裂载荷(以N为单位)。暗X表示在没有涂漆的腐蚀样品断裂之前的延伸(以mm为单位)。空心五边形表示涂漆且腐蚀的样品的最大断裂载荷(以N为单位)。暗十字(+)表示在涂漆且腐蚀的样品断裂之前的延伸(以N为单位)。如图19所示出,即使在暴露于中性盐雾达500 h之后,FSW连接部仍保持连接强度而没有任何降级。对于在裸露(未涂覆)条件下经受腐蚀的样品观测到略微强度下降,然而,对于电涂覆(electrocoated/e-coated)样品没有观测到强度下降。

[0101] 图20是对接焊接金属板(焊缝#18和#19)的抗拉强度的图形。相比于呈搭接配置的FSW,使用FSW对金属板进行对接焊接会产生较弱的结合。

## [0102] 腐蚀

根据ASTM B117标准测试焊接连接部的耐腐蚀性。将焊接工件暴露于盐雾达500小时。在按原样(裸露/无涂覆)和涂漆条件下测试连接部。使用电涂覆(electrocoat/e-coat)方法应用Cathoguard 500(由BASF供应)。在电涂覆之前,使样品经受Zn磷化,目标涂覆重量为2.5到3.0 g/m<sup>2</sup>。在500小时的测试之后,基于通过拉伸测试的残余机械强度和通过金相横截面的腐蚀形态评估来评估样品。出于比较目的,还使未暴露的裸露和涂漆样品经受拉伸测试。

[0103] 图21A到21B和图22A到22B是来自焊缝#17的样品的铝-钢接合部处的FSW区域中发生的腐蚀的数字图像。图21A到21B示出了涂覆样品的腐蚀测试结果。图22A到22B示出了未涂覆的样品的腐蚀测试结果。总的来说,未涂覆的样品展现了较高程度的腐蚀2100。如所预期,金相横截面在破碎件和焊接区域中都示出了钢周围的铝板腐蚀的明显迹象。然而,在暴露于盐雾达500小时之后,裸露试样的残余强度仍然非常接近于涂漆样品。

[0104] 图23示出了在FSW和任选涂漆之后经受500小时的中性盐雾腐蚀测试的AA6xxx系列铝合金的结合强度。将两种铝合金AA6061(左组直方图)和AA6111(右组直方图)结合到钢样品。切割结合的铝-钢样品以提供两个测试样品。表13中总结了为腐蚀测试而制备的样品:

合金	制备		
	AA6061	焊接时	裸露
AA6111	焊接时	裸露	涂覆

表 13

[0105] 不使焊接时样品经受腐蚀测试以供比较。将示范性裸露样品结合到钢并经受腐蚀测试。将示范性涂覆样品结合到钢并如上文所描述而涂覆。对于这两种合金,与未腐蚀的铝-钢FSW样品相比,腐蚀测试的样品的结合强度略有下降。图24A到24B和25A到25B示出了腐蚀测试之后的FSW连接部的显微照片。图24A示出了结合到钢并涂覆的铝合金AA6061。显微照片中明显的是摩擦搅拌焊接和涂覆工件的结合区域(即,FSW连接部)中的优异耐腐蚀性。图24B示出了结合到钢而未涂覆的铝合金AA6061。显微照片中明显的是邻近于FSW连接部的铝合金中的麻点腐蚀。同样明显的是没有粒间腐蚀,表明FSW连接部可抵抗粒间腐蚀。

图25A示出了结合到钢并涂覆的铝合金AA6111。显微照片中明显的是摩擦搅拌焊接和涂覆工件的FSW连接部周围的优异耐腐蚀性。图25B示出了结合到钢而未涂覆的铝合金AA6111。显微照片中明显的是邻近于FSW连接部的铝合金中的麻点腐蚀。同样明显的是没有粒间腐蚀,表明FSW连接部可抵抗粒间腐蚀。

#### [0106] 实例9

本文中所描述的合金和方法可用于汽车和运输应用,例如商用车辆、飞机、造船、汽车或铁路应用,或其它应用。例如,合金可用于底盘、横梁和底盘内部件(涵盖但不限于商用车辆底盘中的两个C通道之间的所有部件)以获得强度,作为高强度钢的完全或部分替换。在某些实例中,合金可用于0、F、T4、T6x或T8x回火。在某些方面中,合金与加强件或嵌入件一起使用以提供额外强度。图26A示出了可根据本文中所描述的方法提供的框架轨道的透视图。图26B示出了可根据本文中所描述的方法提供的含有加强件2610的框架轨道的透视图。加强件可以是铝合金、钢、其任何组合,或任何合适金属(例如,镍、铜等等),其可增加框架轨道的刚度。将加强件添加到框架轨道可将框架轨道的刚度增加高达约80%(例如,所述框架轨道的耐弯曲和扭转性比没有加强件的框架轨道的耐弯曲和扭转性多80%)。

[0107] 在某些方面中,所述合金和方法可用于制备机动车车身零件产品。例如,所公开的合金和方法可用于制备汽车车身零件,例如保险杠梁、侧梁、顶梁、横梁、柱加固件(例如,A柱、B柱和C柱)、内板、侧板、地板、管道、结构板、加固板、内罩或后备箱盖板。所公开的铝合金和方法还可用于飞机、造船或铁路车辆应用,以制备例如外板和内板。在某些方面中,所公开的合金可用于其它应用,例如汽车电池极板/板条和布线槽。

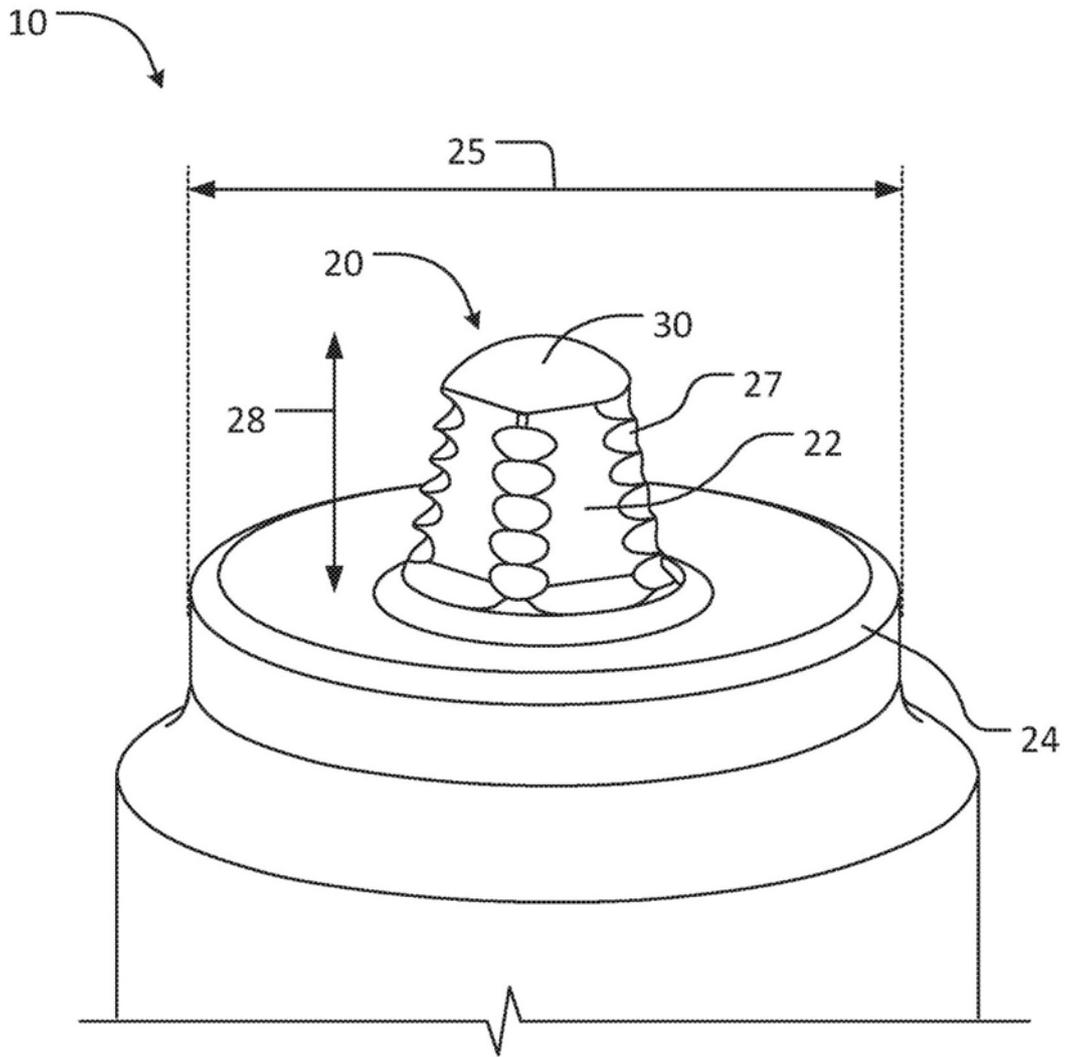


图 1

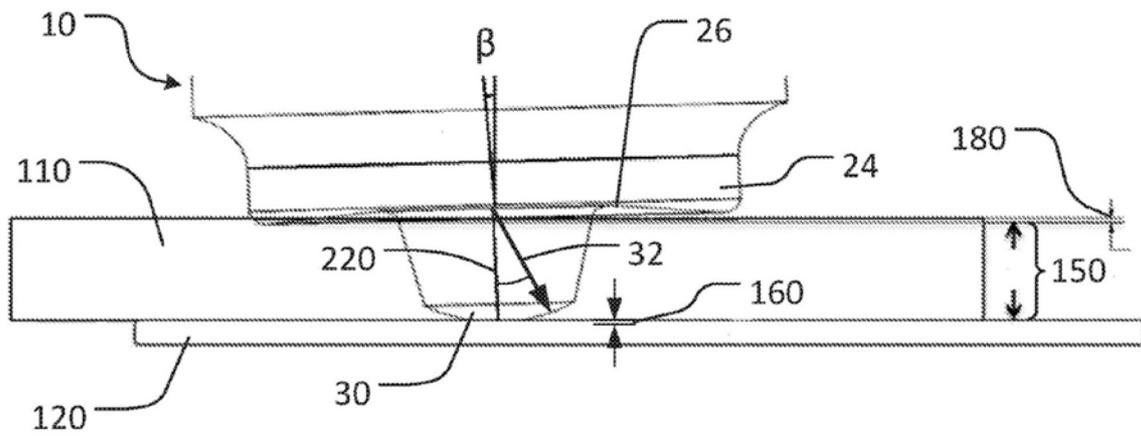


图 2

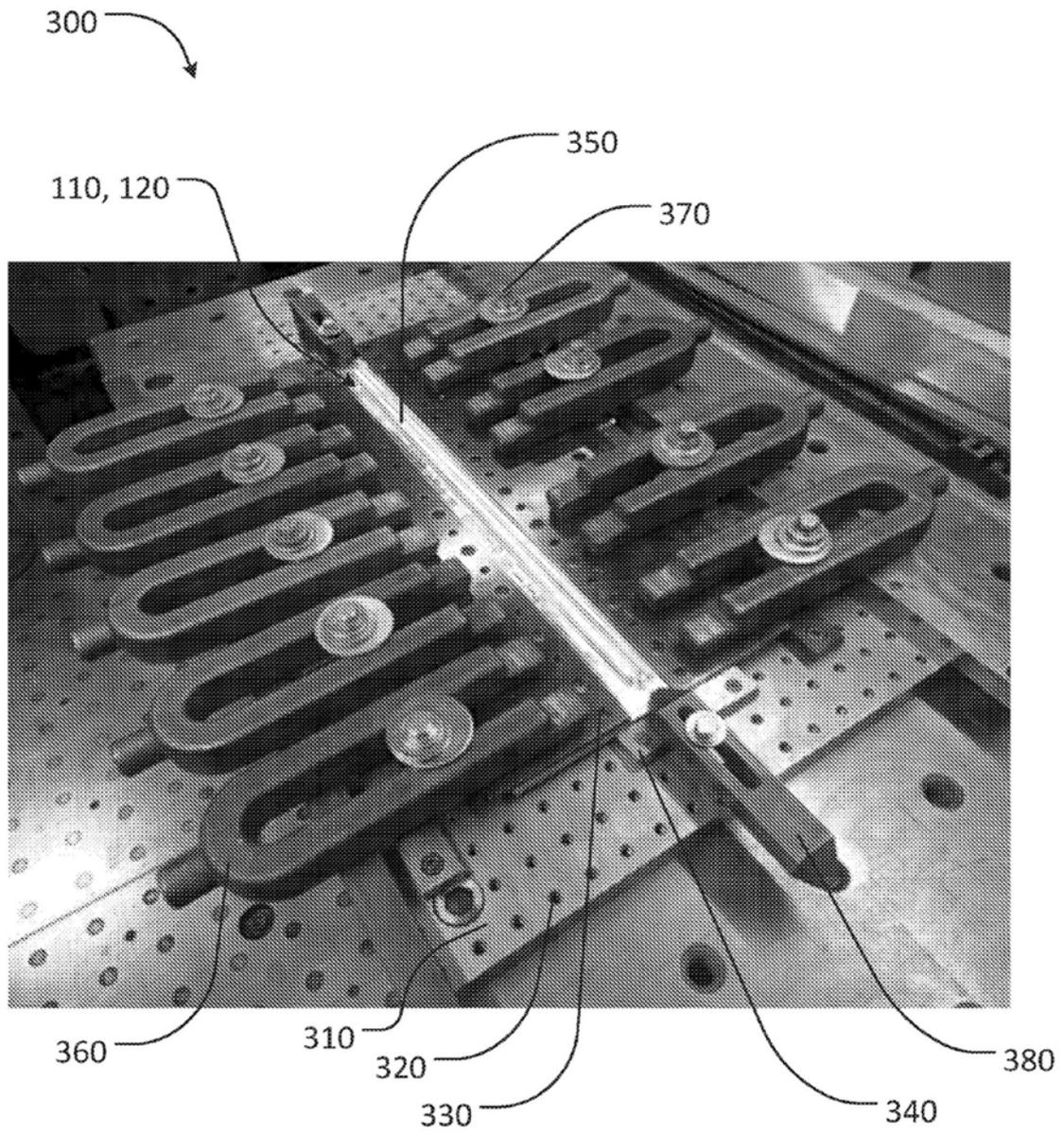


图 3

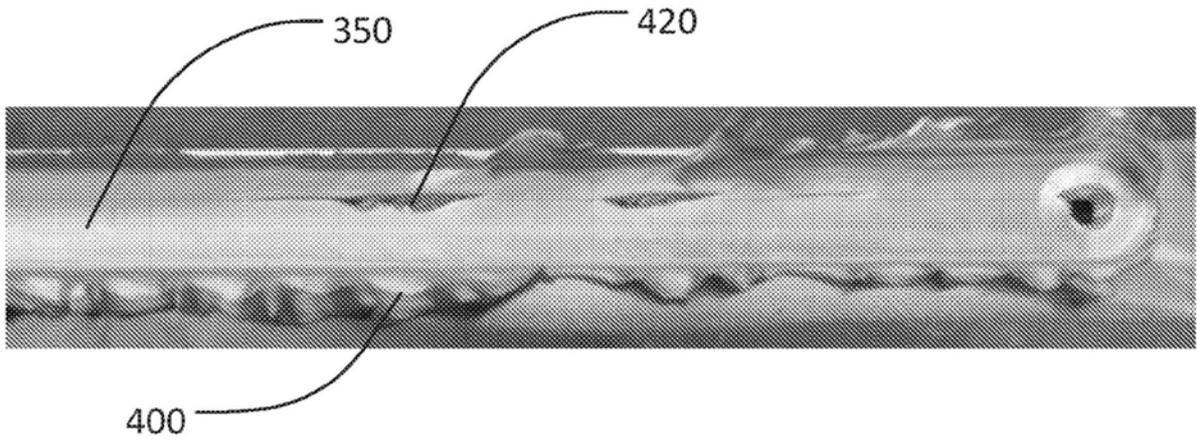


图 4

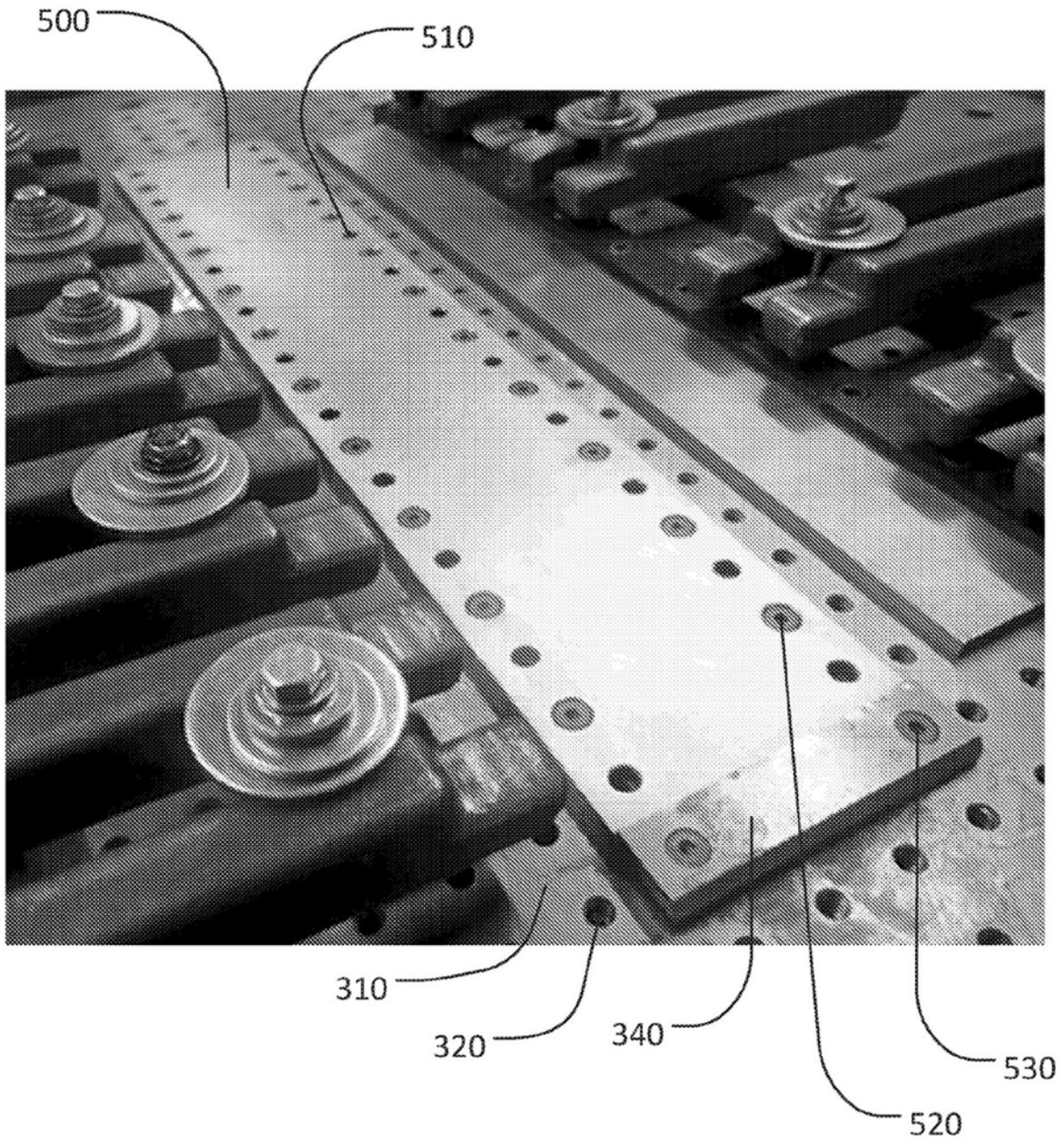


图 5

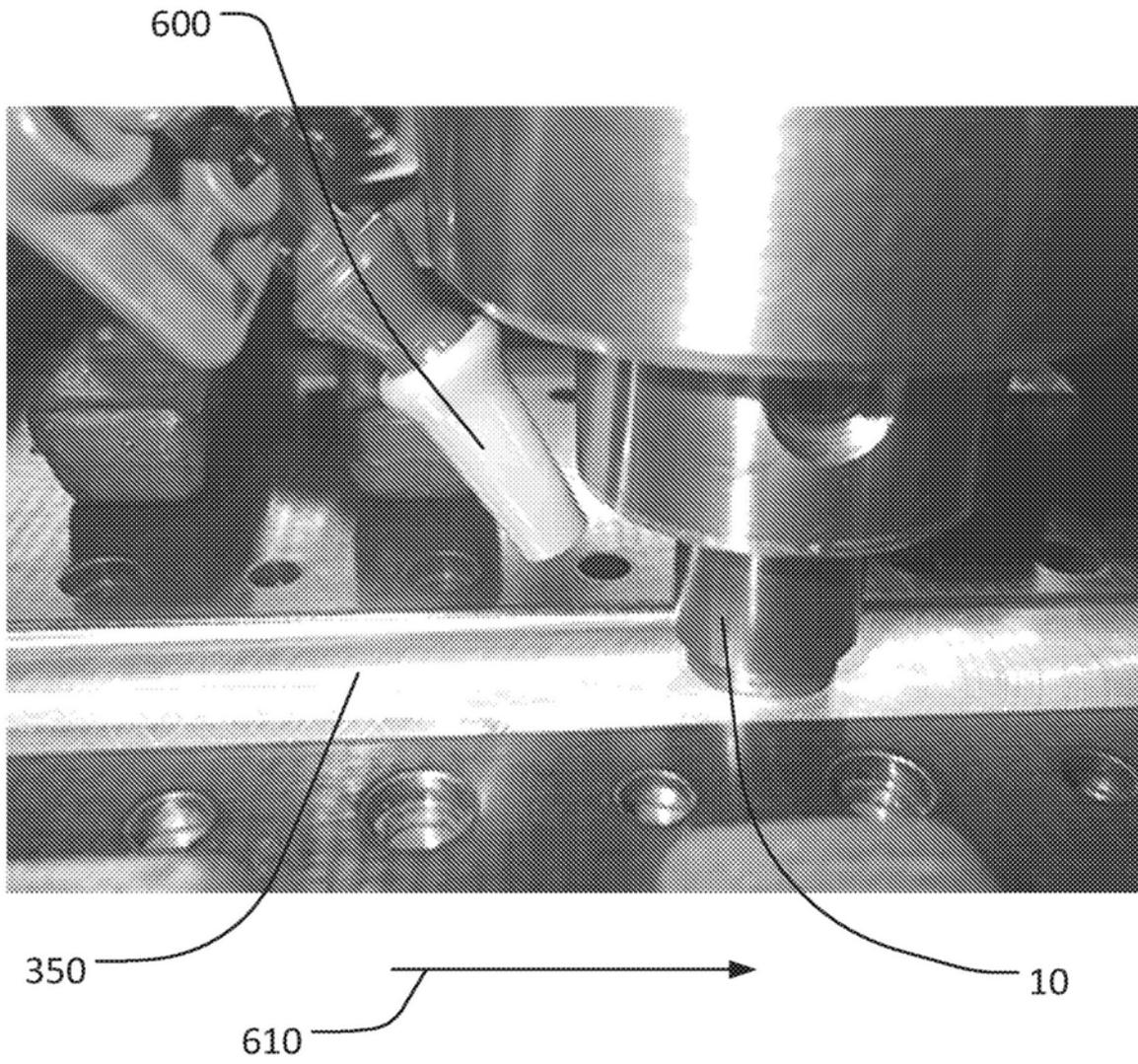


图 6

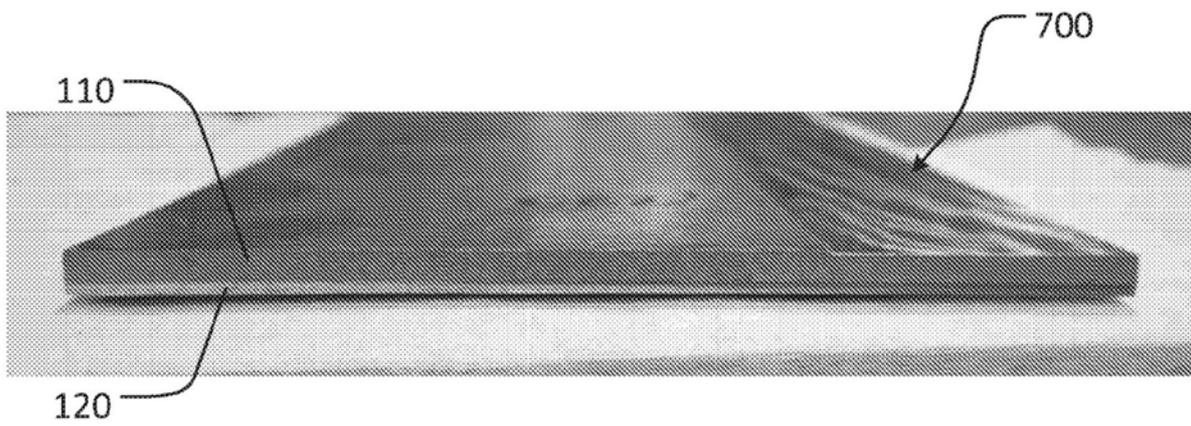


图 7

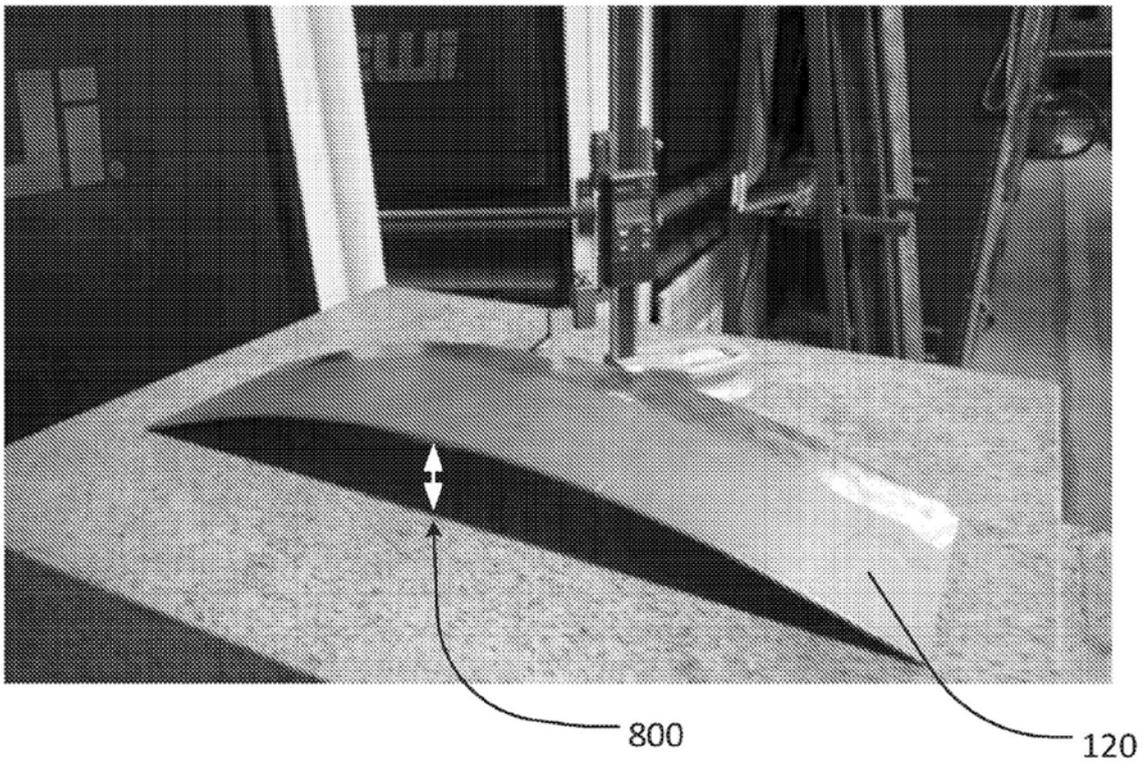


图 8

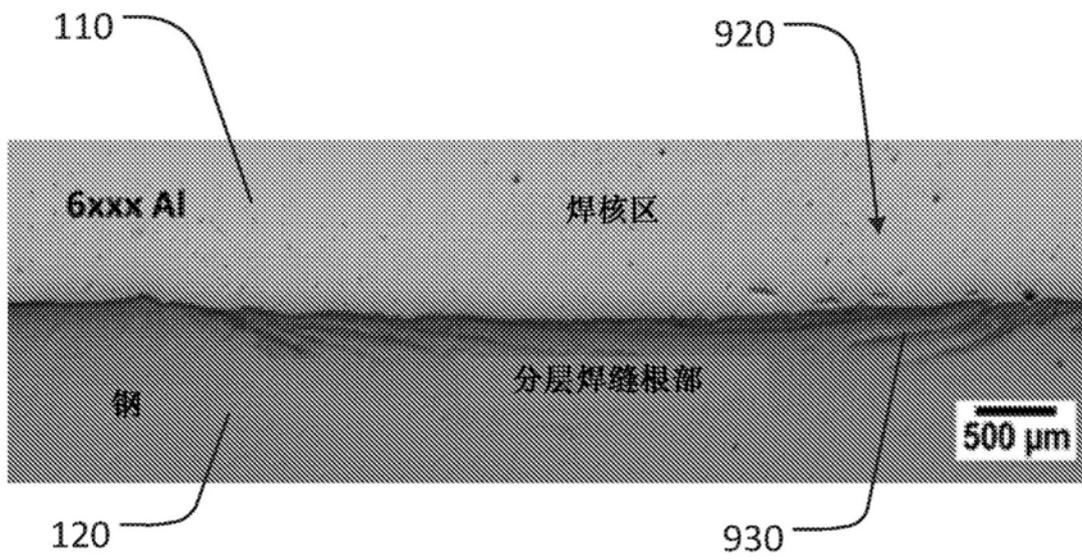
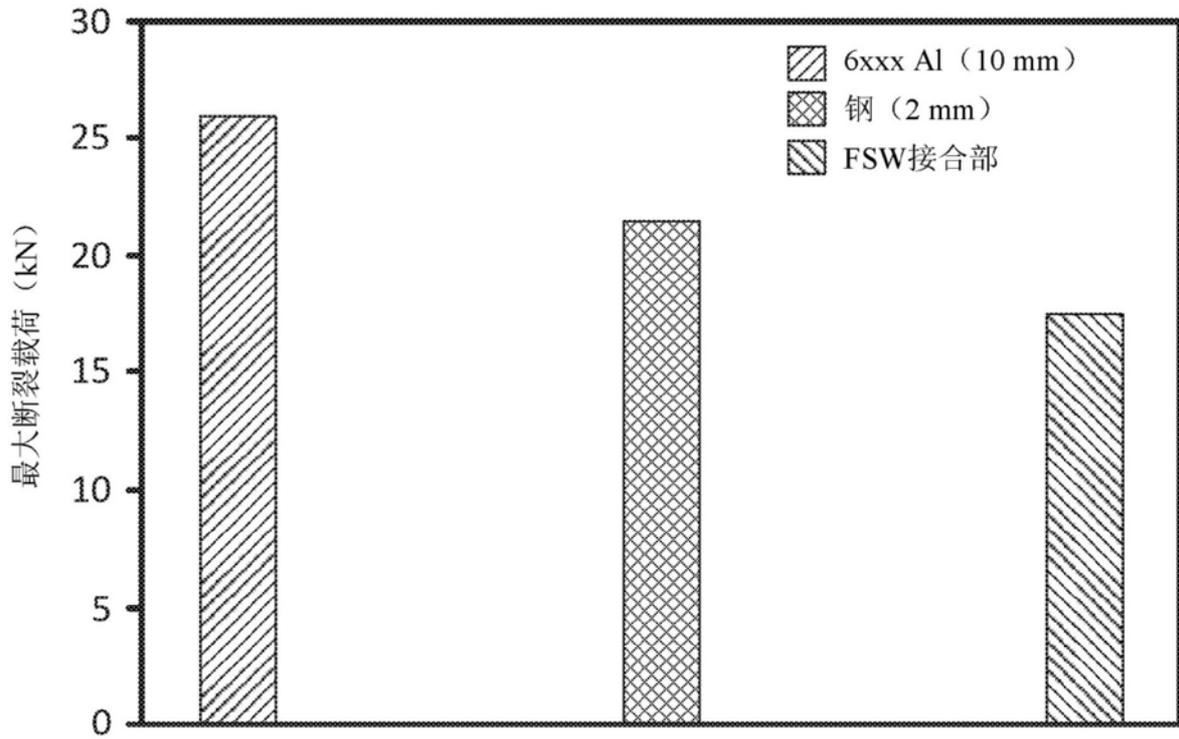


图 9



与6xxx Al合金和钢比较的FSW结合强度

图 10

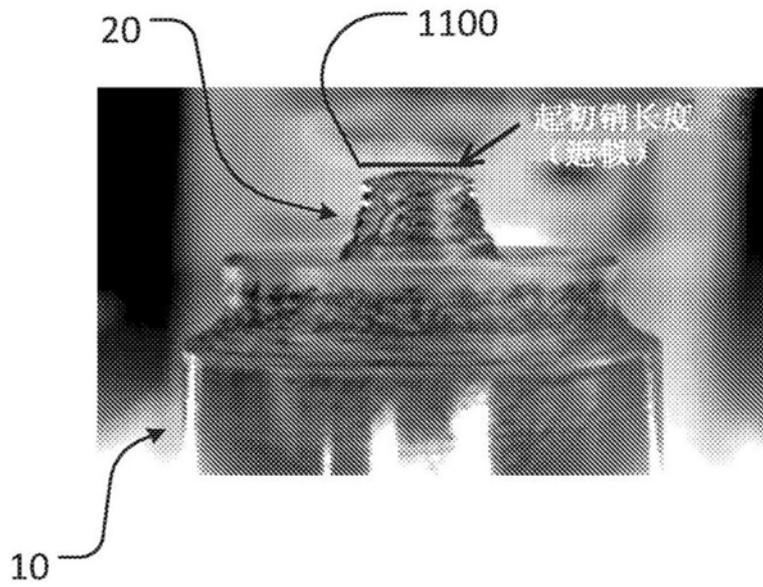


图 11

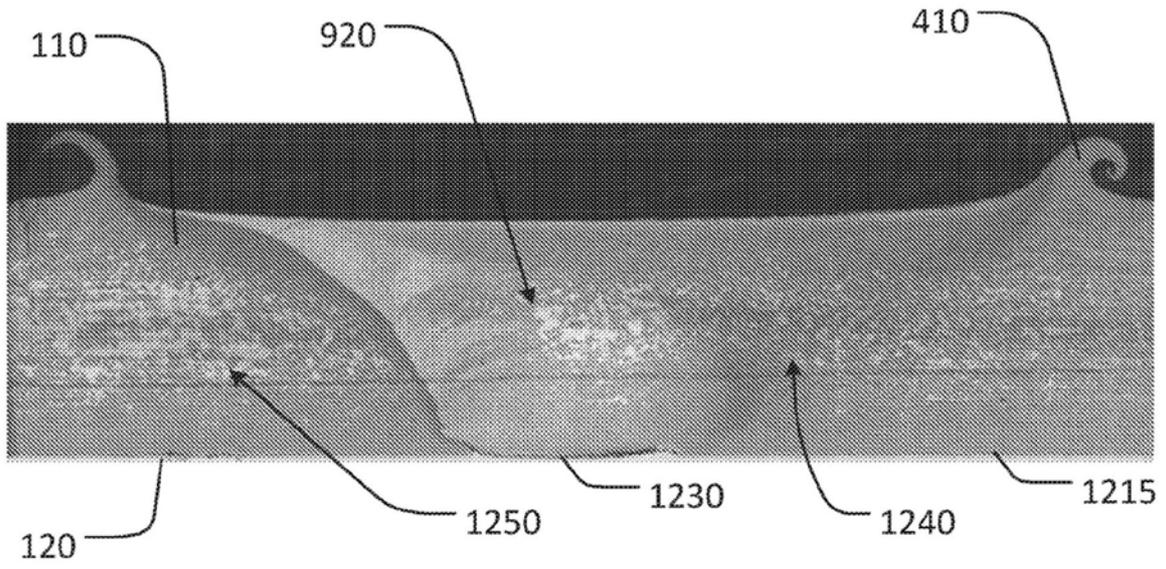


图 12

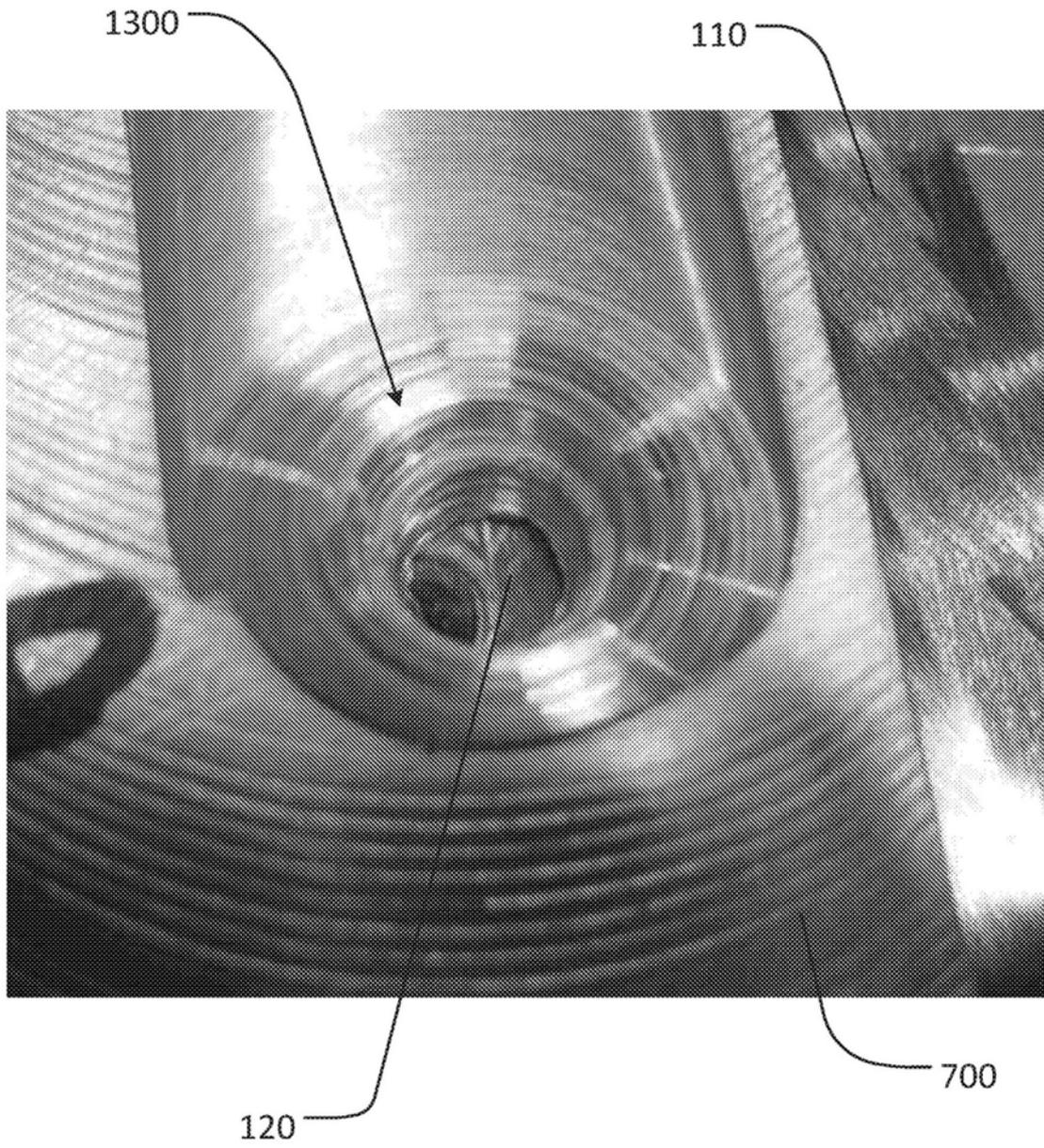


图 13

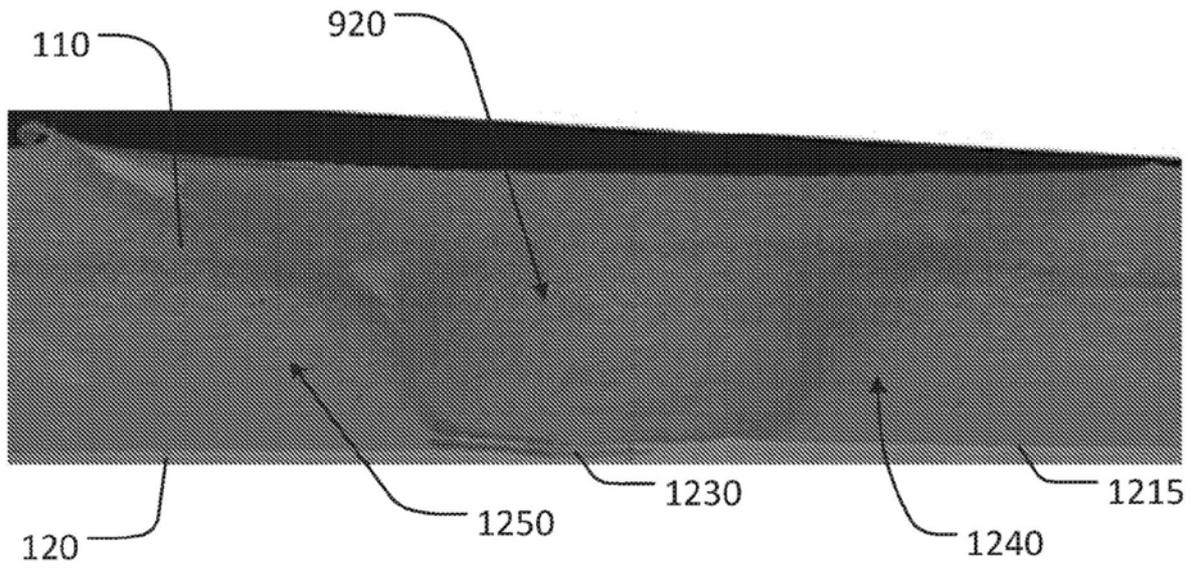


图 14

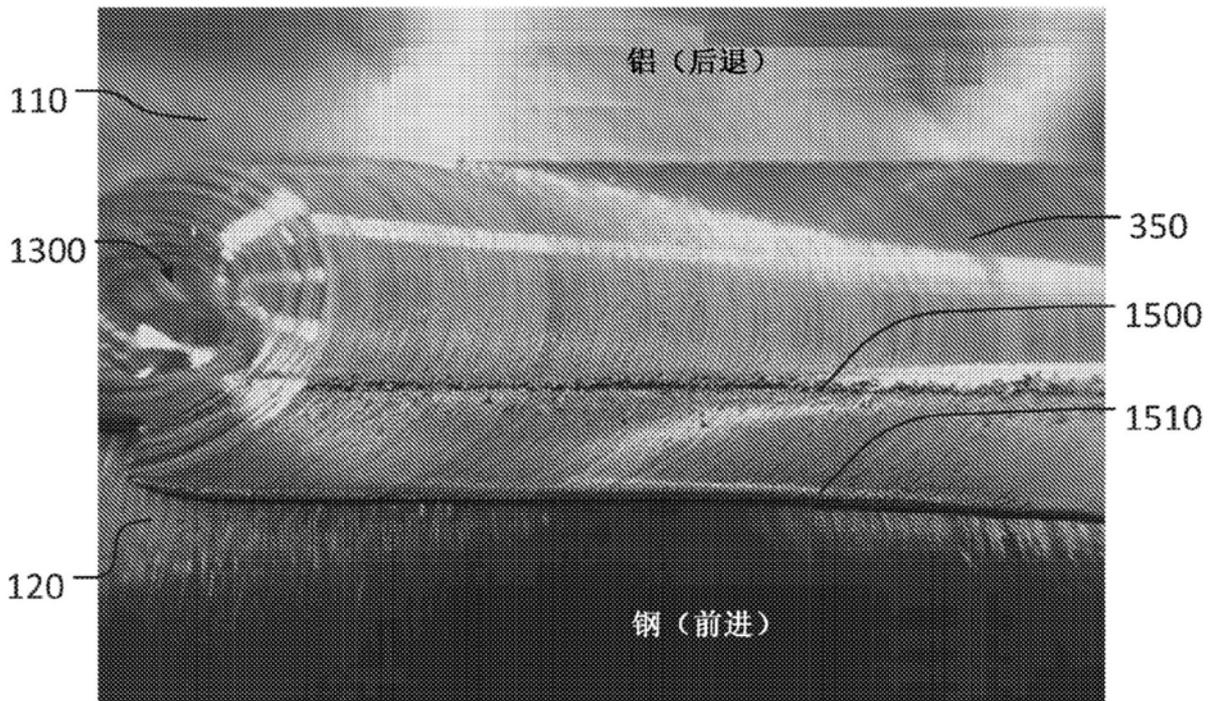


图 15

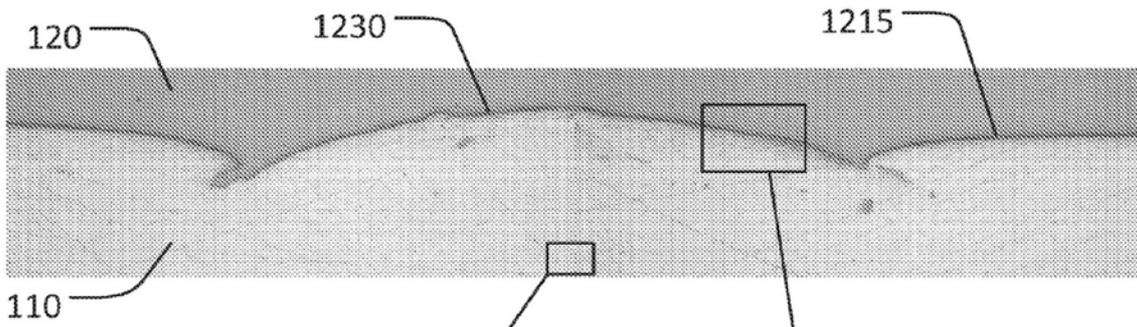


图16A

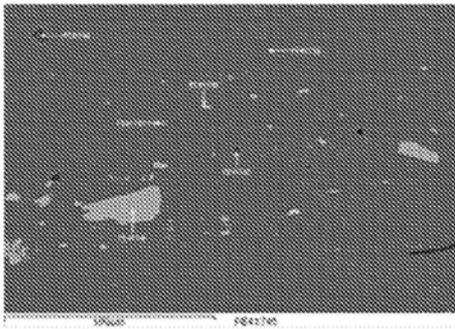


图16B

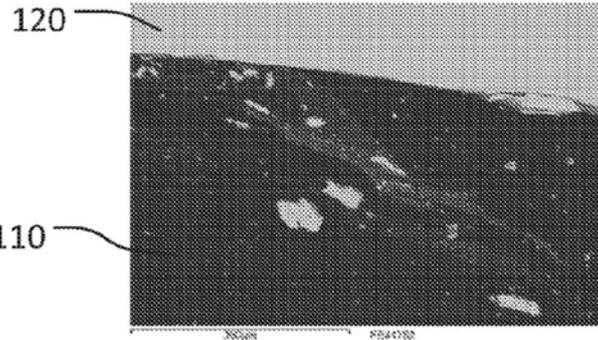


图16C

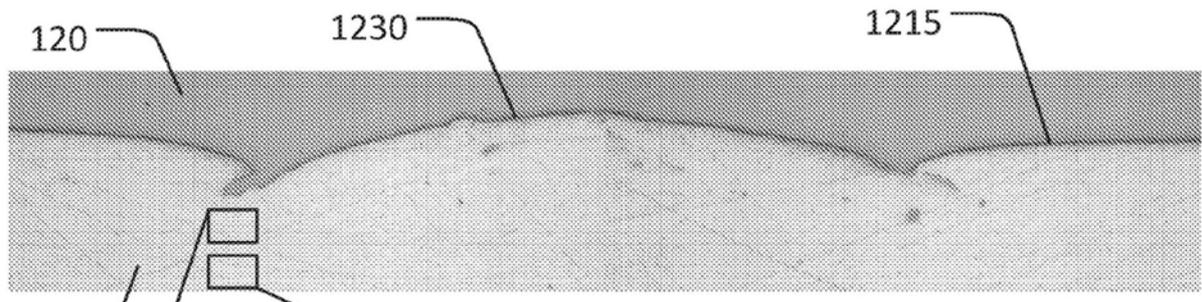


图17A

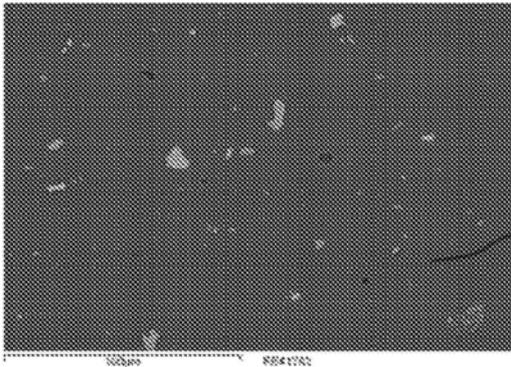


图17B

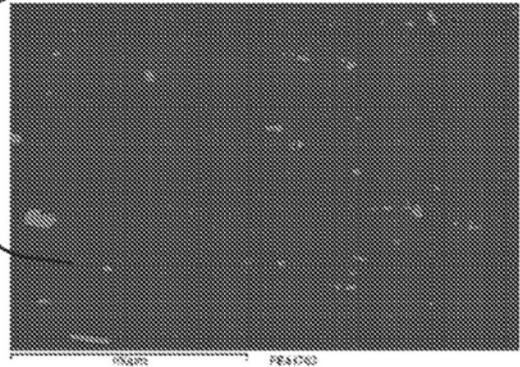


图17C

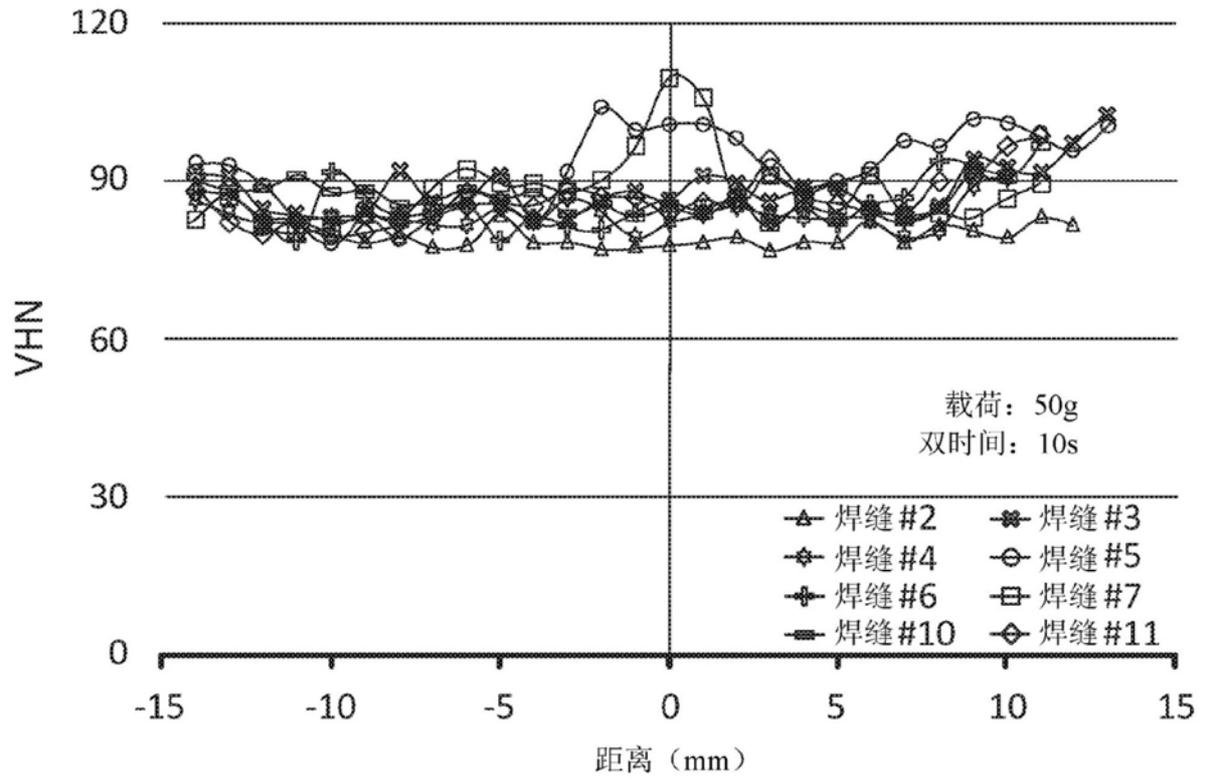


图 18

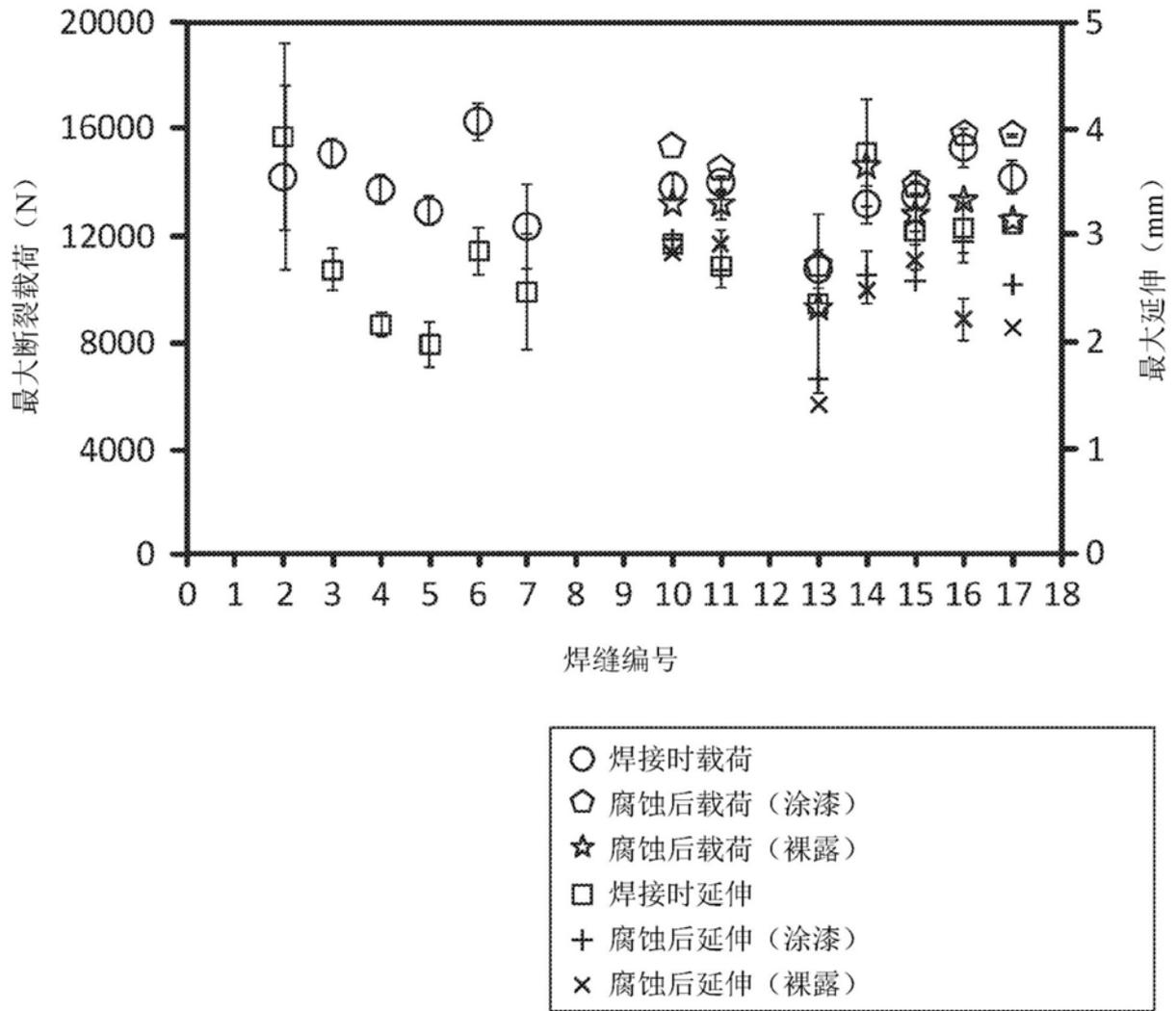


图 19

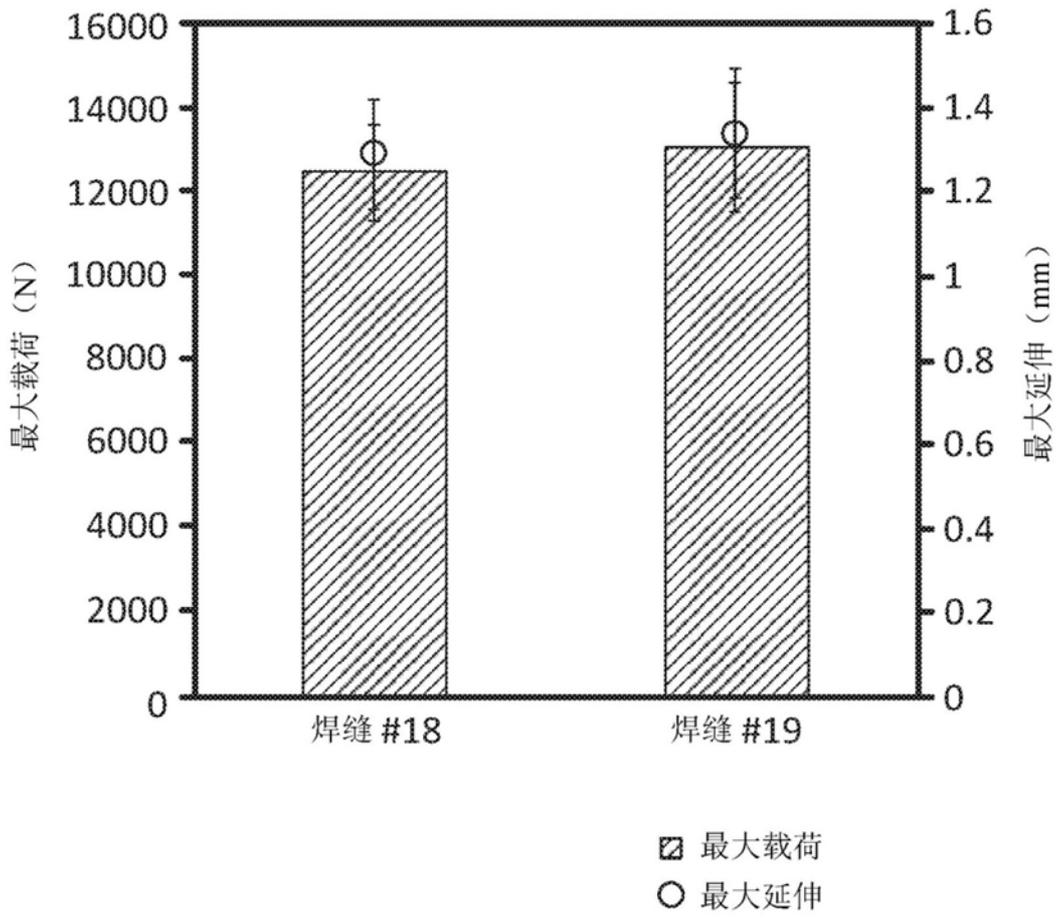


图 20

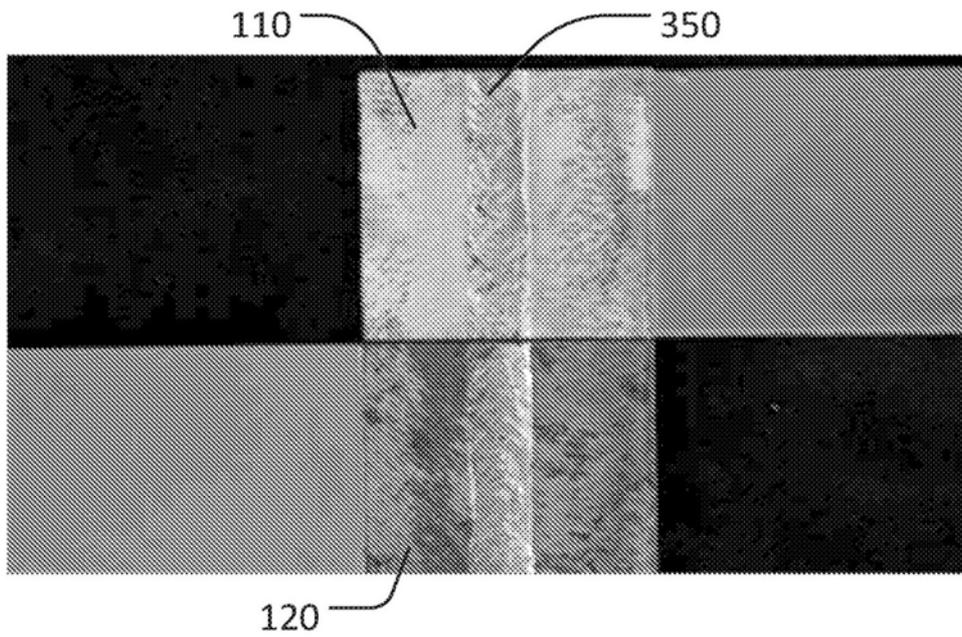


图 21A

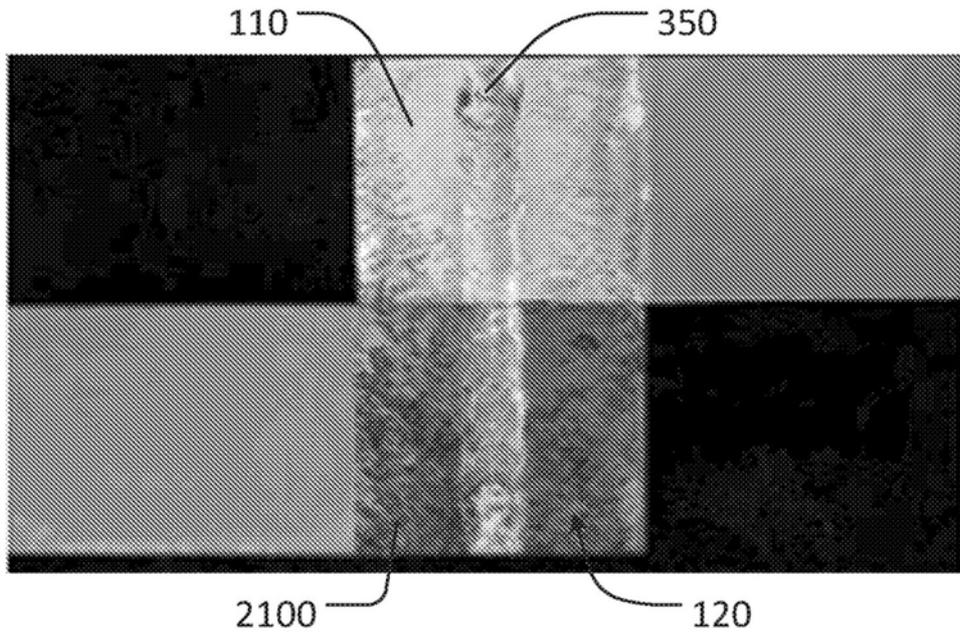


图 21B

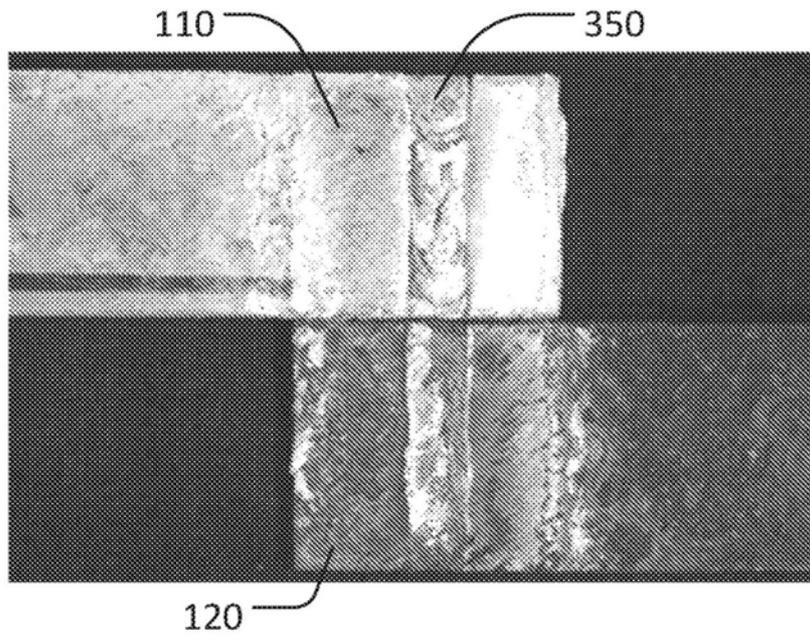


图 22A

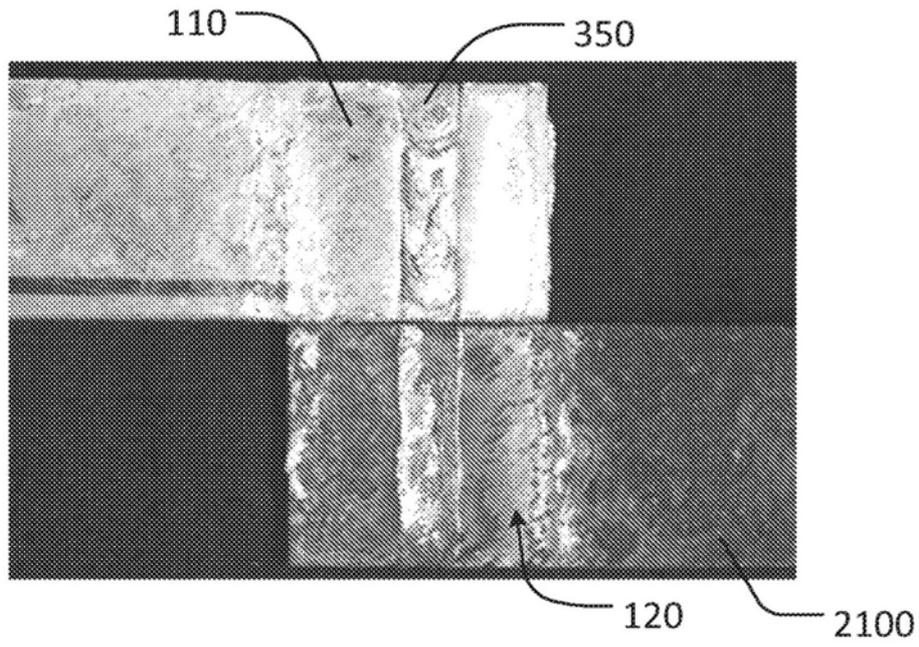


图 22B

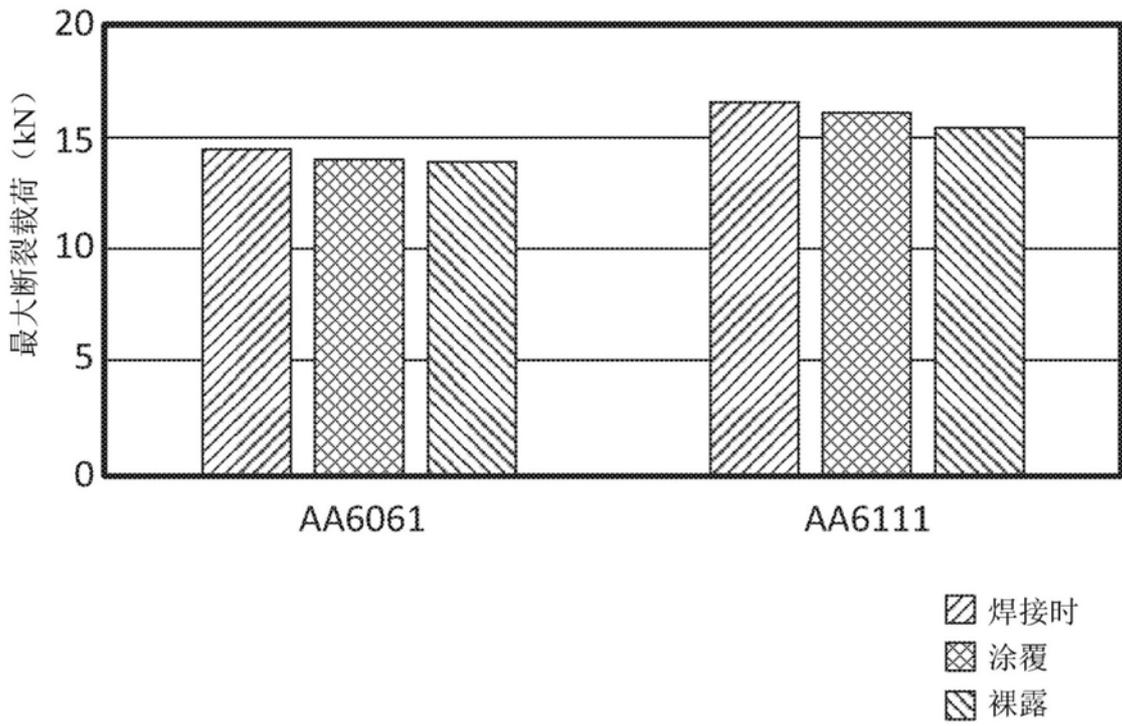


图 23

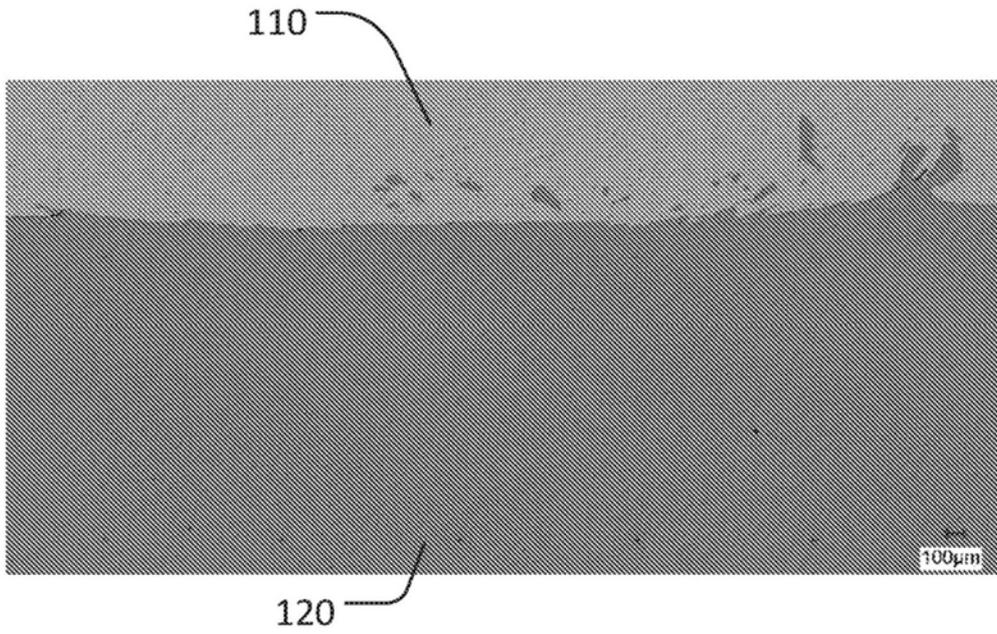


图 24A

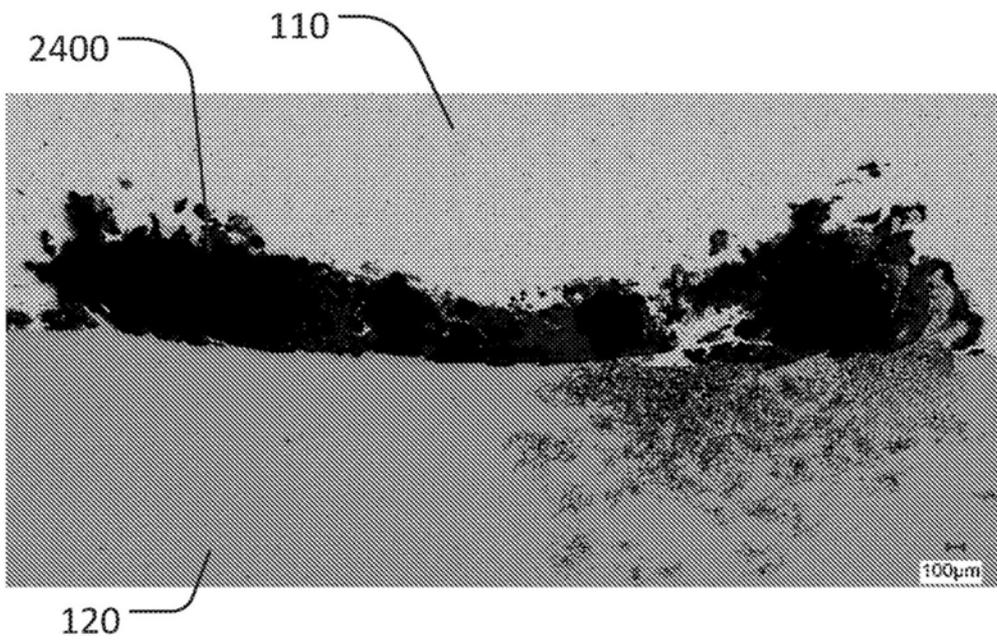


图 24B

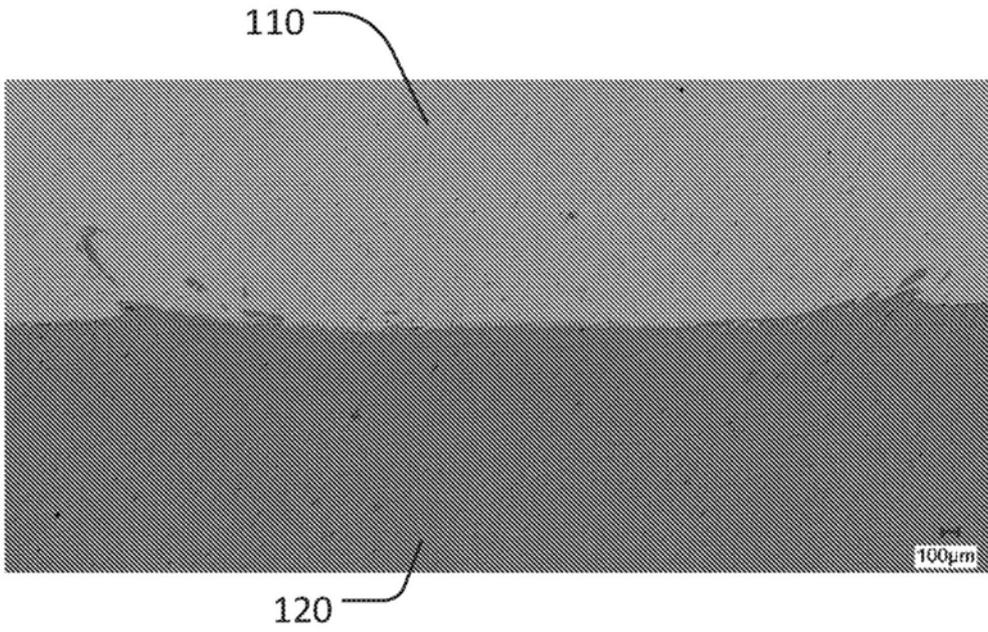


图 25A

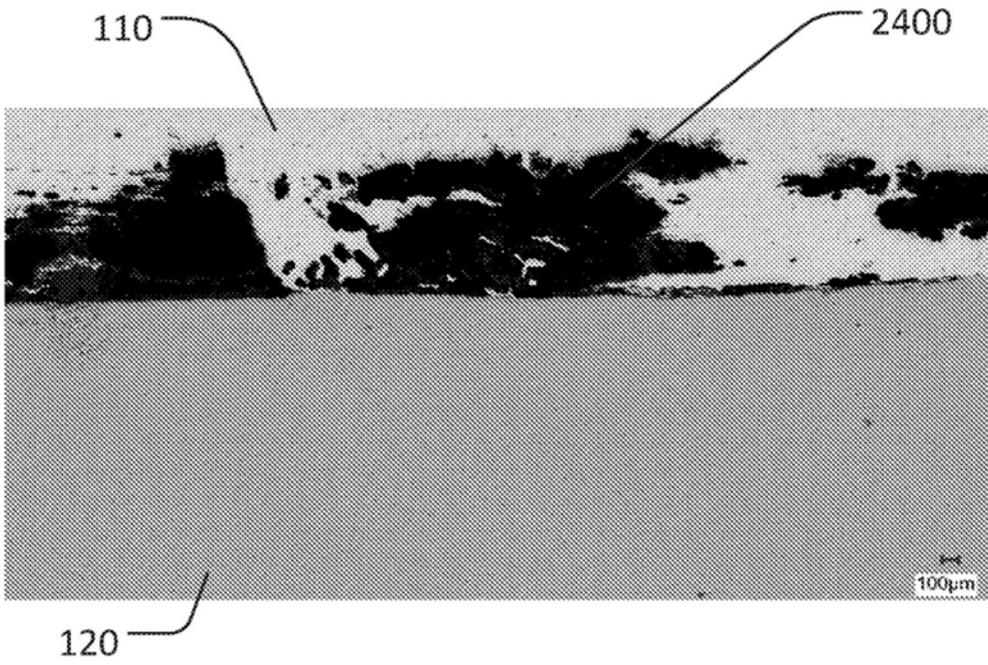


图 25B

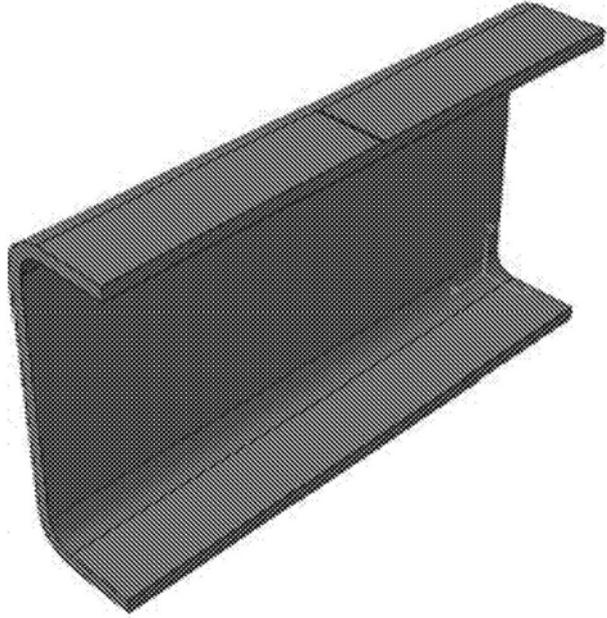


图 26A

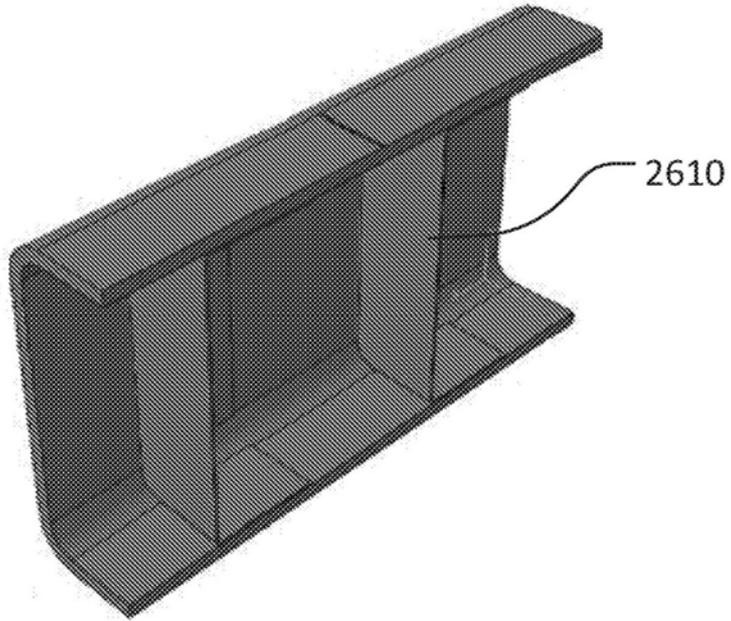


图 26B