

履带板铸造工艺设计及生产实践

赵红乐¹, 张 纬¹, 惠亚兴², 张千龙², 刘宏斌², 孟少峰³, 周志勇³, 李瑞宁¹

(1. 晋西装备制造有限责任公司, 山西太原 030024; 2. 晋西工业集团有限责任公司, 山西太原 030024;

3. 晋西车轴股份有限公司 技术开发部, 山西太原 030024)

摘要: 对履带板铸件进行了铸造工艺设计, 并借助数值模拟软件对铸件的充型和凝固过程进行分析。模拟结果表明: 铸件充型平稳, 未发生明显的喷溅; 铸件放置冷铁的部位首先凝固, 整体上实现了自下而上的顺序凝固, 冒口部分最后凝固, 铸件凝固过程没有形成孤立液相区; 铸件缩孔、缩松集中于浇道和冒口内, 铸件部分未见缺陷。根据模拟结果进行了产品试制, 试制铸件在销孔内产生较严重粘砂缺陷, 解剖后经磁粉探伤发现内腔转角处普遍存在裂纹, 铸件其他方面符合要求。根据存在的问题, 进行了相应的工艺优化, 优化后生产验证表明, 铸件满足了产品的技术要求。

关键词: 履带板; 铸造工艺; 数值模拟; 生产实践

履带板铸件是电铲的关键部件, 其重量占设备总重量的10%~15%。作为矿山设备的行走部分, 其工作环境恶劣, 受力状况复杂多变, 这些因素极易导致履带板的磨损和变形, 甚至发生断裂。对于大型设备的履带板而言, 一般成组更换, 更换成本极高。因此要求履带板具有高强度、高耐磨性、高冲击韧性、高抗疲劳强度的综合性能^[1-5]。当前履带板铸件材质主要包括高锰钢、低合金钢等, 其中国外很多型号的履带板选用低合金钢制作。相对于高锰钢而言, 低合金钢在保留耐磨性的同时也具有更优的综合性能, 但是低合金钢中合金元素的加入降低了合金的导热性, 扩大了合金的凝固范围, 使其在凝固过程中更容易产生较大的应力, 进而导致产生裂纹^[6-7]。作者对低合金钢履带板的铸造工艺进行了研究, 试产过程中也发现了裂纹和粘砂问题。针对这些问题, 本文对履带板的铸造工艺进行了优化, 消除了铸件缺陷并生产出合格的履带板铸件产品。

1 技术要求及铸造工艺难点分析

1.1 技术要求

1.1.1 铸件化学成分

履带板由高强度低合金钢铸造, 具有很好的耐磨性和抗冲击能力, 其具体材质是在AS-1444-Grade4320的基础上改性而来, 化学成分见表1。

1.1.2 铸件质量要求

根据履带板各结构部位的使用情况, 将其分为关键区域和非关键区域, 关键区域为图1折线包围区域及销耳部分。试制过程中, 需对铸件进行整体外观检查、尺

表1 铸件化学成分要求
Table 1 Requirements of chemical composition

| 要求 | C | Si | Mn | S | P | Mo | Ni | Cu | Al | V | w _B /% |
|----|------|-----|-----|-------|-------|------|-----|-----|------|------|-------------------|
| 最小 | 0.21 | 0.3 | 0.8 | | | 0.4 | 1.4 | | 0.03 | | |
| 最大 | 0.25 | 0.6 | 1.1 | 0.035 | 0.035 | 0.45 | 1.7 | 0.3 | 0.06 | 0.03 | |

作者简介:

赵红乐(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为铸造工艺设计及热处理。电话: 18803418012, E-mail: zhaohongle1985@126.com

中图分类号: TG24

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)

09-1115-06

收稿日期:

2021-03-04 收到初稿,

2021-05-12 收到修订稿。

寸检查、磁粉探伤和超声波探伤；销孔在机加后需要对机加面进行渗透探伤；样件经过调质处理后，还需按照要求进行解剖，解剖位置见图1，解剖后对解剖断面进行渗透探伤、磁粉探伤、超声波探伤以及射线探伤。其中铸件表面光洁度应符合ASTM A802目测检定标准的规定，铸件表面不允许存在粘砂、氧化皮；超声波探伤按AS2574 2000-卡斯泰克超声波检验标准执行，关键区域执行一级要求，非关键区域执行二级要求；射线探伤执行ASTM E94-射线照相检验用标准导则的规定，关键区域A、B、C缺陷小于2级，D、E、F缺陷不允许存在，非关键区域A、B缺陷小于2级，C缺陷小于3级，D、E、F缺陷不允许存在。铸件质量要求严格，因此对铸造工艺提出了较高的要求。

1.2 铸造工艺难点分析

1.2.1 产品结构特点

该型履带板为电铲关键部件，结构见图2。该产品单重909 kg，轮廓尺寸1 400 mm×760 mm×430 mm。产品壁厚变化大，最大壁厚190 mm，最小壁厚40 mm，主要壁厚70~120 mm。履带板单侧各有3个销孔，销孔需机械加工。利用产品三维图形能够很直观地观察铸件内部结构。履带板可以划分为几个相互独立的区域，分别为中心的链轮凸台，6个销耳，销耳与本体连接部位的大圆弧等，如图2所示。其典型断面如图3所示。

1.2.2 裂纹倾向分析

合金的特性、壁厚突变、收缩受阻等因素均能增加铸件发生裂纹的倾向。高淬透性合金铸件在焊接

过程中极易产生马氏体，导致裂纹难以修复，甚至导致产品报废。因此，减少履带板铸件裂纹的产生是工艺设计中一个很重要的方面。根据铸件结构的分析可知，履带板铸件凝固过程中可能受到砂型阻碍最大的部位为销耳与本体连接部位的圆弧部分，该部位壁厚变化很大，为铸件最易产生裂纹的区域，因此应在工艺设计时予以重点考虑。

2 履带板铸造工艺设计

2.1 生产基本条件

采用碱酚醛树脂砂造型、制芯，采用2 t中频炉熔炼合金。采用机器造型，手工制芯。采用醇基锆英粉涂料对砂型和砂芯的工作面进行涂刷。

2.2 分型面选取

履带板材质为低合金钢，其液态收缩和凝固收缩

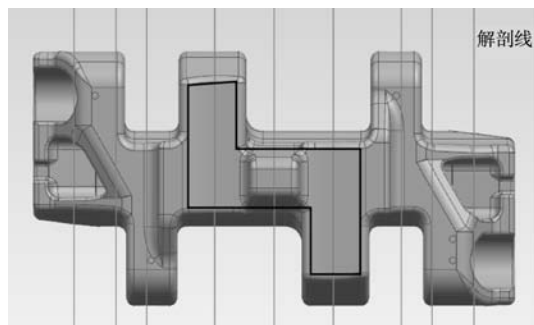


图1 履带板铸件的关键区域及需解剖位置

Fig.1 Critical areas and section positions of track pad casting

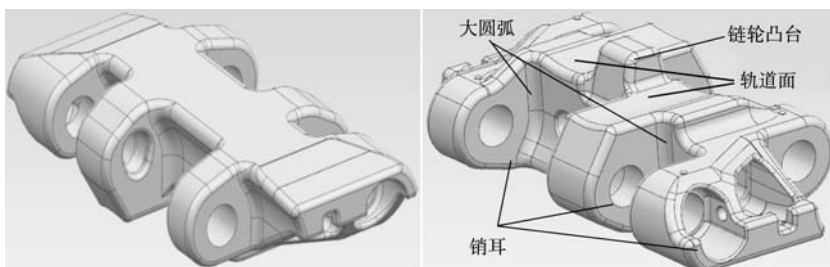


图2 履带板产品三维图

Fig. 2 3D drawing of track pad product

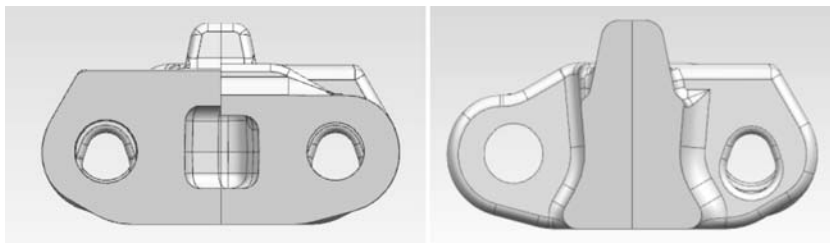


图3 履带板典型断面

Fig. 3 Typical sections of track pad casting

过程需要消耗一定数量的钢液，因此需要通过冒口对铸件进行液体补充。履带板的轨道面、链轮凸台、销耳为关键区域，应优先放置在下箱；同时将大平面放置在上箱便于冒口的布置及冒口的清理。为使砂芯结构简单，便于下芯，将分型面设计在销孔中心所在平面。铸造工艺简图如图4所示。

2.3 砂芯设计

在确定了分型面的基础上，进行履带板铸件的砂芯设计，如图5所示。外侧六个销孔的砂芯为圆柱结构，其结构简单，方便制作；内腔砂芯整体呈L形，通过在尾部设置大芯头起定位和固定作用，在头部设置圆柱芯头，起辅助定位和固定的作用，从而防止砂芯错位和发生漂浮。

2.4 冒口及冷铁布置

履带板的主要热节位置为中间的链轮凸台及销耳与本体的连接部位，共计7个。通过放置冷铁，将链轮凸台及其两侧的热节形成一个热节；在销耳下部及侧面放置冷铁实现外侧两个热节共用一个冒口。因此铸件需放置3个冒口即可，如图6。

2.5 浇注系统设计

铸件浇注系统是钢液填充铸件型腔的通道。设计合理的浇注系统在钢液充填的过程中能够降低钢液进入型腔的速度，减少紊流，减少钢液的氧化，提高浇注过程平稳性，减少气孔发生几率；同时降低钢液对砂型冲击，从而减少铸件产生砂眼的风险^[8-9]。履带板铸件的浇注系统如图7所示，通过计算确定各组元截面

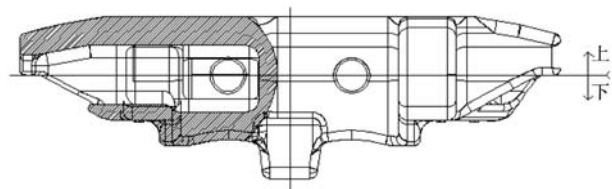


图4 铸造工艺简图

Fig. 4 Schematic of casting process design

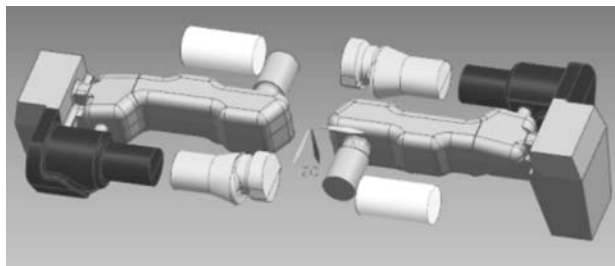


图5 带板砂芯图

Fig. 5 Sand core diagram of track pad casting

积比为 $A_{直} : A_{横} : A_{内} = 1 : 1.12 : 1.43$ ，为开放式浇注系统。

2.6 铬铁矿砂设计

铬铁矿砂相比硅砂具有更高的耐火度，从而能够减少放置部位的铸件粘砂倾向；同时铬铁矿砂还能加速放置部位的凝固速度，能够使放置铬铁矿砂部位的铸件表面较快地建立起强度，从而降低铸件在该部位产生裂纹的倾向。由履带板结构可知，销耳与本体连接部位的圆弧部位在铸件凝固过程中受到砂型的阻碍，会产生较大的应力，加之该部位壁厚较大，强度建立相对较慢，容易产生裂纹，因此应在该部位放置铬铁矿砂以减少裂纹的产生，如图6所示。铸件表面放置冷铁的区域和其周围区域在金属液凝固过程中会产生较大的温度梯度，进而产生收缩应力，特别是在铸件厚大部位放置冷铁的周围会产生较大的应力，很容易超过金属液膜的强度，从而引起裂纹缺陷。在铸件和冷铁之间可以通过放置蓄热性能良好的铬铁矿砂来避免裂纹的产生。因此，在履带板铸件工艺设计时，在铸件厚大部位的冷铁周围放置了10~20 mm厚的铬铁矿砂。

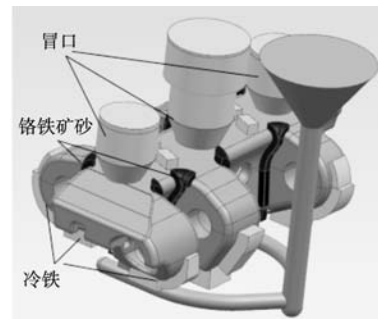


图6 铸造工艺三维图

Fig. 6 3D drawing of casting process design for track pad casting

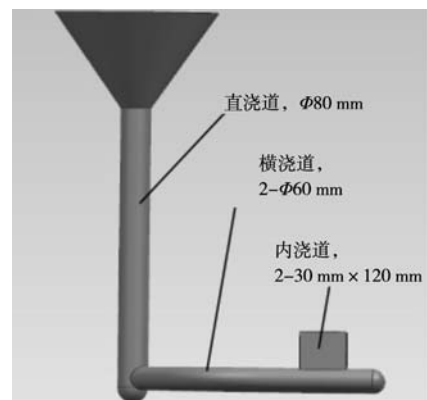


图7 铸件浇注系统

Fig. 7 Gating system of track pad casting

2.7 铸造工艺可行性预测

利用华铸CAE对履带板铸造工艺的可行性进行验证。模拟分析时铸件材质设定为铸钢，其化学成分选择为合金各主要元素的中限；铸型材料选择树脂砂；设定模拟浇注温度为1 580 ℃，砂型初温设定为20 ℃，砂芯初温设定为20 ℃，环境温度设定为20 ℃；设定漏包浇注，液面高度80 cm，浇包内径80 cm，浇口杯直径30 cm。

2.7.1 充型过程模拟分析

图8为履带板铸件的充型过程。浇注1 s时，钢液开始填充铸件型腔，刚进入的液体发生少量飞溅，如图8a。随后金属液填充铸件型腔，首先填充铸件底平面，底平面填充完成后，钢液逐层向上填充，充型过程较为平稳。在充型过程中，从温度上可以看出，放置冷铁的部位温度最低，其次是铸件边缘部分。

2.7.2 凝固过程模拟分析

图9为履带板铸件的凝固过程液相分布情况。由图可知，铸件首先从放置冷铁的铸件下部和侧面开始凝固，逐渐由下向上凝固，3个冒口最后凝固。铸件整体实现了自下而上的顺序凝固，凝固过程中没有在铸件中形成孤立液相区。图10为铸件的缩孔、缩松图。

由图可知，铸件的缩孔、缩松分布在浇注系统和冒口中，铸件本身未发现缩孔、缩松区域，因此，工艺设计达到了预期效果。

3 产品试制及缺陷分析

根据履带板的铸造工艺设计进行了产品试制。采用2 t中频炉熔炼钢液，使用3 t底漏包浇注，钢液出炉温度1 605 ℃，浇注温度约1 580 ℃，浇注时间实测为55~70 s。铸件开箱后的毛坯如图11所示。经过清砂、抛丸后进行外观检查，然后进行打磨、抛丸、磁粉探伤、超声波探伤、致密性解剖、解剖块渗透探伤、解剖块超声波探伤等处理。外观检查发现在铸件销孔内存在粘砂缺陷，个别部位的粘砂难以处理，如图12所示。该处产生粘砂的原因为该处砂芯直径较小，在充型和凝固过程中钢液很容易将砂芯加热到很高温度。解剖后发现铸件内腔弯角处也普遍存在粘砂缺陷，其原因与销孔处的粘砂相同。对解剖块进行磁粉探伤，发现内腔弯角处存在多处裂纹，如图12，其形成原因为该部位结构为封闭腔体，在凝固过程受到砂芯的阻碍，产生的应力超过了合金的强度极限，因而形成热裂。

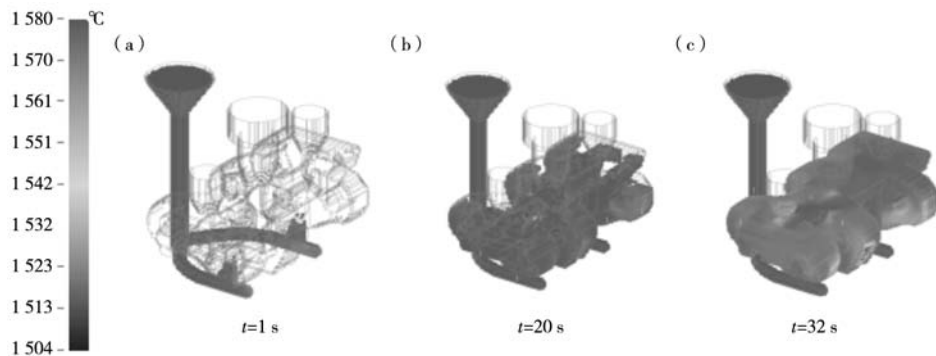


图8 铸件充型过程模拟结果

Fig. 8 Simulation results of filling process for track pad casting

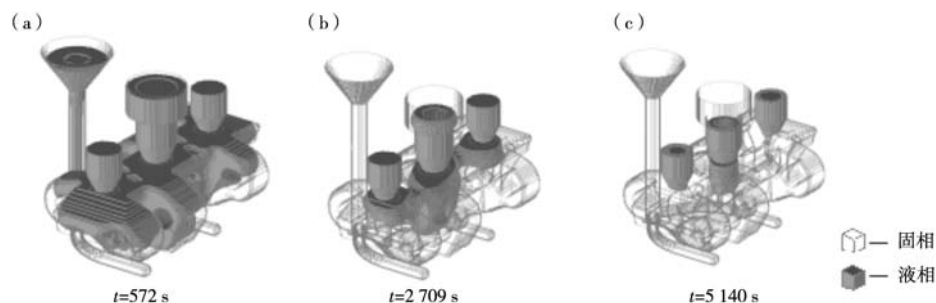


图9 铸件凝固过程模拟结果

Fig. 9 Simulation results of casting solidification process

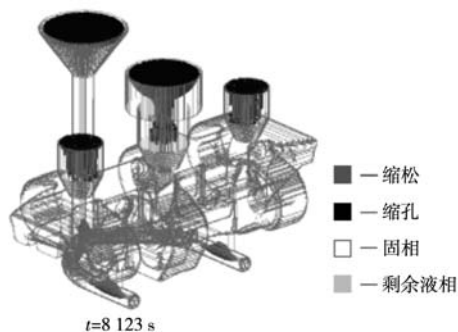


图10 铸件缩孔、缩松模拟结果

Fig. 10 Simulation results of shrinkage cavity and porosity in track pad casting



图11 铸件试制毛坯

Fig.11 Trial casting blank

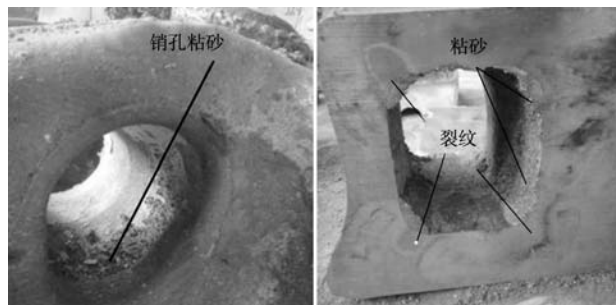
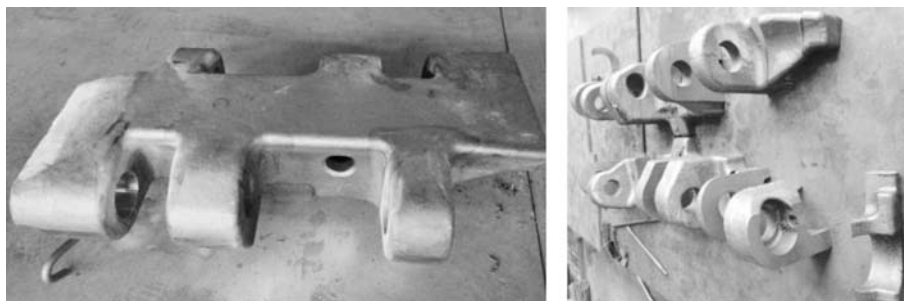


图12 铸件裂纹和粘砂

Fig. 12 Hot tear and burning-on defects of trial casting blank

4 工艺优化及生产验证

对于销孔处的粘砂缺陷，使用高耐火度的铬铁矿砂来消除，即销孔处的砂芯全部由铬铁矿砂制作。对于铸件内腔弯角处的裂纹缺陷，一方面通过将芯砂换成铬铁矿砂，以加快铸件内腔表面部分的凝固速度，使内腔表面较快地建立强度；另一方面，在砂芯制作过程中放置排气绳和草绳，提高砂芯退让性。工艺优化后进行了试生产，铸件粘砂和裂纹缺陷得以解决。铸件经外观检查、磁粉探伤、超声波探伤、致密性解剖、解剖块渗透探伤、解剖块超声波探伤均符合要求。随后又对解剖块进行了射线探伤，结果符合技术条件的要求。所生产的铸件成品及其解剖块如图13。



(a) 铸件产品

(b) 解剖块

图13 铸件产品及解剖块

Fig. 13 Casting product and section blocks

5 结束语

(1) 对于致密性要求严格的铸件，可以对铸件进行区域划分。通过冒口、冷铁的配合实现单个区域的顺序凝固，进而实现整个铸件的顺序凝固，从而使得铸件内部致密性符合要求。

(2) 铸件存在封闭内腔且存在应力集中部位时，可以在该部位放置铬铁矿砂来减少粘砂缺陷；借助铬铁矿砂加速该部位凝固的同时，宜采取增加砂芯退让性的措施，从而减少或避免铸件产生裂纹。

参考文献:

- [1] FRIMPONG S, THIRUVENGADAM M. Multibody dynamic stress simulation of rigid-flexible shovel crawler shoes [J]. Minerals, 2016, 6 (3) : 61-69.
- [2] 张龙, 刘志毅, 李志国, 等. 大型履带板热裂缺陷的原因及对策 [J]. 铸造, 2003, 52 (6) : 439-441.
- [3] 朱权利, 李微, 张先满, 等. 低合金钢履带板铸造裂纹的研究 [J]. 铸造技术, 2011, 32 (8) : 1061-1063.
- [4] 盖巍巍, 席亚兵. 履带板销耳断裂故障分析及改进对策 [J]. 矿山机械, 2020, 48 (9) : 81-83.
- [5] 李平, 刘松涛, 李锋军. CAE分析在煤矿掘进机用履带板开发中的应用 [J]. 铸造, 2016, 65 (3) : 248-252.
- [6] 陆亦工, 岳先才, 曹文. 采煤机摇臂铸件缺陷分析及防止措施 [J]. 铸造, 2012, 61 (5) : 530-532.
- [7] 徐家颖, 刘会龙, 赵丽, 等. FR型车钩裂纹的消除 [J]. 铸造, 2016, 65 (4) : 388-390.
- [8] JEZIERSKI J, DOJKA R, JANERKA K. Optimizing the gating system for steel castings [J]. Metals, 2018, 8 (4) : 266-275.
- [9] PAPANIKOLAOU M, PAGONE E, JOLLY M, et al. Numerical simulation and evaluation of campbell running and gating systems [J]. Metals, 2020, 10 (1) : 68-75.

Casting Process Design and Production Practice of Track Pad

ZHAO Hong-le¹, ZHANG Wei¹, HUI Ya-xing², ZHANG Qian-long², LIU Hong-bin², MENG Shao-feng³, ZHOU Zhi-yong³, LI Rui-ning¹

(1. Jinxi Equipment Manufacturing Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, Shanxi, China; 3. Technology Development Department, Jinxi Axle Company Limited, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract:

The casting process of track pad casting was designed, and the filling and solidification processes of the casting were analyzed by means of numerical simulation software. The simulation results show that the mold filling is stable and free from obvious splashing. The casting is firstly solidified at the positions of chills and the risers are finally solidified, i.e., the bottom-to-up sequence solidification is realized on the whole. During the solidification process of the casting, no isolated liquid phase zone is formed in the casting. The shrinkage cavity and porosity of the casting are concentrated in the gate system and risers, and no defects are found in the casting. According to the simulation results, the trial production was done. In the pin holes of the trial casting blank produced, there are serious burning-on defects. It is found by magnetic particle inspection that there are cracks in the corners of the inner cavity, while other aspects of the casting meet the technical requirements. Aiming at the existing problems, the corresponding process optimization was carried out. The production verification after the casting process optimization shows that the casting product meets the technical requirements of the customer.

Key words:

track pad; casting process; numerical simulation; production practice