

热处理对 Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er 合金低温力学性能的影响

张惠帝¹, 马昌龙¹, 郝建飞¹, 吴惠舒², 陈斌², 陈明³, 李卫荣⁴, 李润霞²

(1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870; 2. 东莞理工学院材料科学与工程学院, 广东东莞 523000;

3. 青岛科技股份有限公司, 广东东莞 523000; 4. 东莞宜安科技股份有限公司, 广东东莞 523000)

摘要: 研究了热处理对 Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er 合金的显微组织和低温力学性能的影响。结果表明, 经过 525 °C × 6 h 固溶 + 180 °C × 6 h 时效的 T6 热处理后, 在低温 (-60 °C) 下拉伸时, 合金中位错滑移所受内部阻力增大而阻碍其进一步滑动, 使合金的强度升高而伸长率略微降低。T6 热处理显著改善了合金中第二相的形貌及分布, 较粗大第二相固溶入基体, 时效阶段弥散析出, 使合金力学性能提高。

关键词: 铸造 Al-Si 合金; 热处理; 低温拉伸性能; 显微组织

作者简介:

张惠帝 (1995-), 女, 硕士, 研究方向为铸造 Al-Si 系合金低温性能研究。E-mail: ZHDzhanghuidi@163.com

通讯作者:

李润霞, 女, 博士, 教授。E-mail: Runxiali@163.com

中图分类号: TG146

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

01-0044-05

项目基金:

国家自然科学基金面上项目 (51974092); 东莞市科技特派员项目 (20201800500092, 20221800500773); 新型铝合金开发项目 (2020ZDZX2016); 广东省重点实验室项目 (2021B1212050001)。

收稿日期:

2022-11-14 收到初稿,

2022-11-21 收到修订稿。

铸造 Al-Si 系合金在全部铸造铝基合金市场用量的占比约为 85%, 广泛应用于航空航天及高速动车组零部件的制造^[1-3]。随着我国高速动车组枕梁相关技术全部依赖进口壁垒的突破, 高速动车组不断地深入到东北腹地、高原地区及俄罗斯等冬季极为寒冷的地区, 这对高速列车用 Al-Si 合金材料在低温下使用的综合性能提出了更高的要求^[4-6]。

Cu 和 Er 元素的添加使铸造 Al-Si 合金的强度大幅提升, 但伸长率降低^[7]。热处理是提高铸造 Al-Si 合金综合性能的极为常用的手段^[8]。Sun^[9] 等研究了固溶处理时 Al-Si 合金的 Si 相形貌的演变过程, 发现固溶处理有利于 Al-Si 合金共晶硅相形貌的改善。时效处理能够大幅提升合金的强度及硬度, 多元体系铝合金中所含的 Cu、Mg、Si 等元素与 Al 能形成 Al₂Cu、Mg₂Si 等强化相, 这些强化相在时效过程中析出, 形成脱溶相或沉淀相, 产生时效硬化, 从而使铝合金得到强化^[10]。因此, 本文研究热处理对 Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er 合金显微组织和常低温拉伸性能的影响, 探讨低温 (-60 °C) 环境下热处理后合金性能变化的原因, 为满足 Al-Si 合金材料在低温下更高的使用要求提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为成分优化后的铸造 Al-Si 合金 (Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er 合金), 其化学成分见表 1。合金熔炼在井式电阻炉中进行, 将计算好的纯 Al、Al-30Si 和 Al-50Cu 中间合金放入炉内坩埚中, 此时设定炉温为 750 °C。待炉内金属完全熔化静置保温一段时间后, 将炉温降至 720 °C, 使用钟罩将用铝箔包覆的纯镁压入金属液中, 待其完全熔化后稍作搅拌, 压入 Al-10Zr (0.3%) 和 Al-10Sr (0.3%) 中间合金进行变质和细化处理, 随后加入 Al-20Er (0.3%) 中间合金, 采用 C₂Cl₆ 进行除气精炼, 静置

表 1 Al-Si 合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of Al-Si alloy

	Si	Mg	Cu	Er	Al
	10.11	0.31	3.21	0.24	余量

w_B /%

10~15 min后将合金熔体浇注到预热至200~300 ℃的金属型模具中,随后等待其自然凝固冷却成形。

采用线切割制备GB/T13239—2006标准拉伸试样,室温(约20 ℃)拉伸试验在WGW-100H型微机控制电子万能材料试验机上进行,低温(-60 ℃)拉伸试验在配有温度触控实验箱的拉伸试验机上进行,拉伸速度均为0.5 mm/min。在低温拉伸时,先将液氮通入实验机所配有的低温保温箱内,在温度触控显示屏上将拉伸温度设置为-60 ℃,待保温箱内温度降低至-60 ℃后,将拉伸试样放入保温箱内保温10 min后进行低温拉伸。合金试样的固溶处理在RX-8-6箱式电阻炉中进行,固溶温度为525 ℃,固溶时间6 h,固溶后的试样采用水淬处理,淬火时间不超过10 s;时效处理在DG/20-200A干燥箱中进行,时效温度为180 ℃,时效时间6 h。利用配有能谱分析系统的S3400N扫描电子显微镜观察合金显微组织及拉伸断口附近形貌,利用透射(TEM)电子显微镜观察第二相析出。

2 结果与讨论

2.1 合金低温拉伸性能

图1为对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金进行T6热处理后,在20 ℃和低温(-60 ℃)环境下的拉伸性能。在室温的拉伸温度下,与铸态Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金相比较,T6热处理后合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到327 MPa、298 MPa和7.95%,分别提升了24.33%、21.63%和63.92%。在-60 ℃的拉伸温度下,T6热处理后合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率分别达到368 MPa、317 MPa和6.97%,与铸态Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金相比,分别提升了24.75%、20.08%和75.13%。经过T6热处理后合金的低温(-60 ℃)拉伸强度高于室温,但伸长率有所降低。

图2为对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金进行T6热处理后在室温和低温(-60 ℃)环境下的拉伸断口形貌。在室温拉伸温度下,铸态Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金的拉伸断口中存在较多的解理平台,而韧窝和撕裂

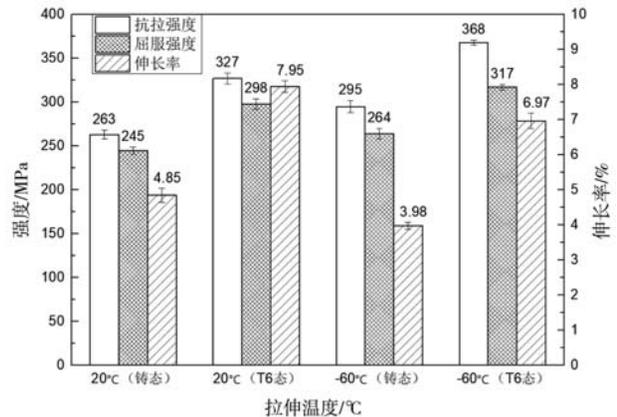


图1 T6处理对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金低温拉伸性能的影响
Fig. 1 Effect of T6 treatment on low temperature tensile properties of Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er alloy

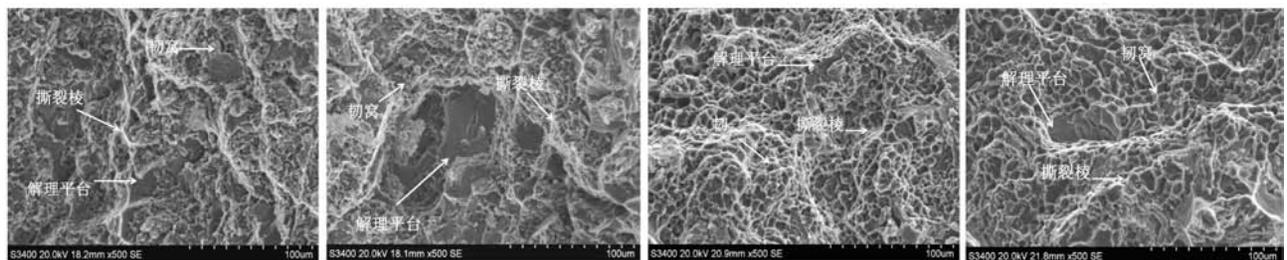
棱存在的数量均较少,见图2a。进行T6热处理后的合金拉伸断口中韧窝数量明显增多,且韧窝尺寸较为均一,解理平台数量减少,撕裂棱数量略微增多,显示合金的强韧性提升,见图2c。

在-60 ℃环境下拉伸,T6热处理对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金拉伸断口中韧窝、撕裂棱和解理平台的影响规律与20 ℃环境下拉伸相一致。并且在同一热处理条件下,与20 ℃环境下拉伸相比较,-60 ℃下拉伸断口中韧窝和撕裂棱数量略微减少,解理平台数量略微增多,见图2b, d。

2.2 合金显微组织分析

图3为Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金的显微组织及EDS能谱分析。从图3a、b中可以看出,A点短棒状相为Al₂Cu相。图3a、c中B点较大块状相由Al、Cu两种元素组成,为Al₂Cu相。不规则网格状相中的C点较小颗粒状相为Al-Si-Cu-Mg四元相(见图3a、d)。

图4为对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金经T6热处理前后的组织形貌及分布。铸态Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金中的Si相呈较大板块状和长棒状,且其边缘较为尖锐,见图4a。同时,合金中存在较多短棒状和不规



(a) 铸态, 室温

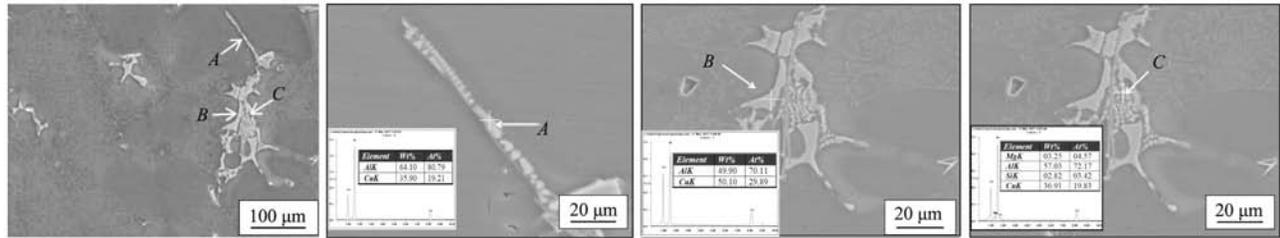
(b) 铸态, -60 ℃

(c) T6处理, 室温

(d) T6处理, -60 ℃

图2 T6处理对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金拉伸断口形貌的影响

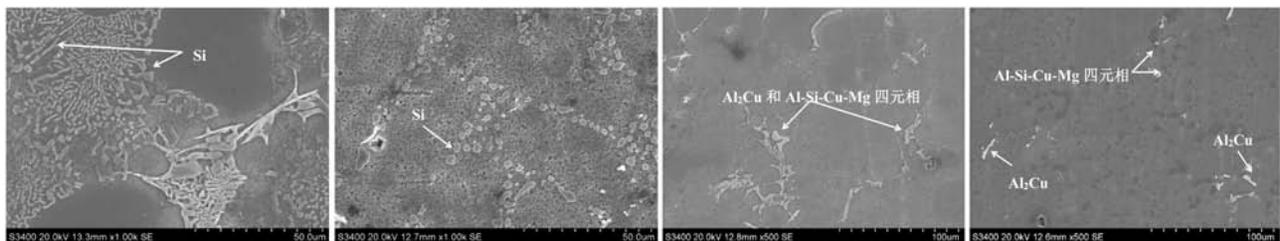
Fig. 2 Effect of T6 treatment on tensile fracture morphology of Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er alloy



(a) Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er显微组织 (b) A点组织及能谱 (c) B点组织及能谱 (d) C点组织及能谱

图3 Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金的显微组织及EDS能谱分析

Fig. 3 Microstructure and EDS energy spectrum analysis of Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er alloy



(a) 未热处理 (b) T6处理 (c) 未热处理 (d) T6处理

图4 T6处理对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金中组织的影响

Fig. 4 Effect of T6 treatment on microstructure in Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er alloy

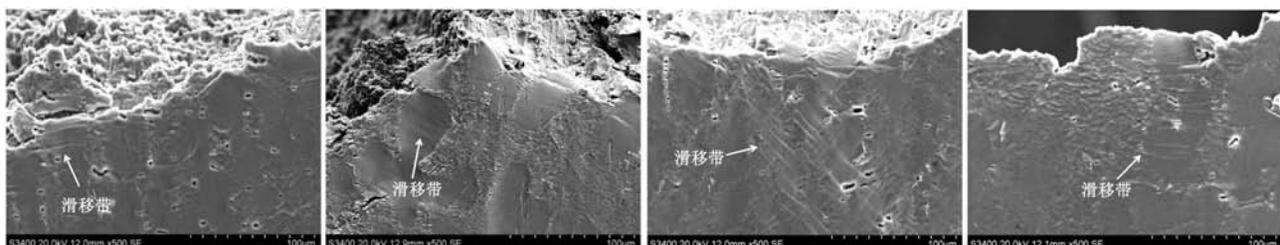
则网格状的 Al_2Cu 相和Al-Si-Cu-Mg四元相,见图4c。经过T6热处理后,合金中较大板状Si相的锐利边缘钝化,长棒状Si相发生熔断、球化,部分Si相溶解,见图4b。此外,合金中 Al_2Cu 相和Al-Si-Cu-Mg四元相数量减少,不规则网格状的 Al_2Cu 相和Al-Si-Cu-Mg四元相基本固溶入基体中,但仍然隐约可见不规则网格状相的痕迹,同时合金中仍存在较少短棒状的 Al_2Cu 相,见图4d。

Si相形貌的改善使其对 α -Al基体的割裂作用减弱,同时位错易于绕过Si粒子运动,减弱合金内部所受的局部应力集中。由于Cu原子与Al原子的原子半径相差较大, Al_2Cu 相与Al-Si-Cu-Mg四元相溶解会引发合金内部产生弹性畸变,同时,溶质原子偏聚在位错线周围形成“柯氏气团”,对位错起到钉扎作用^[11-12]。合金中这些第二相形貌的改善及其溶解所产生的固溶强化作用,使得合金的强韧性提高。

2.3 合金断口附近位错滑移带分布

图5为对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金经T6热处理后拉伸断口附近的滑移带分布。在低温($-60\text{ }^\circ\text{C}$)环境下拉伸时,与铸态的Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金(图5b)相比较,进行T6热处理后的合金拉伸断口附近的滑移带数量增多,形态略微加深,见图5b, d。与室温环境下拉伸相比较,经过T6热处理后的Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金在 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 环境下拉伸时,拉伸断口附近的滑移带数量减少,形态变浅,见图5c, d。

图6为经过T6热处理后的Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金拉伸断口附近位错及第二相粒子分布的TEM图。可以看出,合金中有第二相纳米级微粒子弥散析出,并且其附近有位错存在。与室温拉伸相比较,在 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 拉伸时合金拉伸断口附近的位错线数量减少,见图6a, b。在T6热处理过程中,合金中的第二相率先固溶入基体中形成过饱和固溶体,在后续的时效过程中以



(a) 未热处理, 20 °C (b) 未热处理, -60 °C (c) T6处理, 20 °C (d) T6处理, -60 °C

图5 T6处理对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金拉伸断口附近滑移带的影响

Fig. 5 Effect of T6 treatment on slip band near tensile fracture of Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er alloy

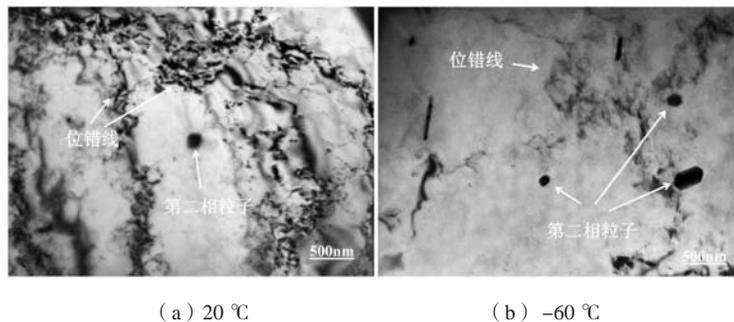


图6 Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金低温拉伸断口附近位错及第二相粒子分布

Fig. 6 Dislocation and second-phase particle distribution near the fracture of Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er alloy in low-temperature tension

纳米级微粒子的形式弥散析出，这些弥散析出的第二相使其周围基体产生晶格畸变，随着第二相的进一步析出，对位错运动的阻碍更大，此时合金的力学性能达到最佳^[13]。此外，合金中位错的移动必然会受到内部阻力，铝基体中位错所受到的阻力 τ 可以表示为^[14]：

$$\tau = \tau_p + \tau_\mu \quad (1)$$

式中： τ_μ 为位错应力场产生的阻力，其与环境温度呈反比； τ_p 为点阵阻力。点阵阻力 τ_p 可以表示为^[15]：

$$\tau_p = \tau_0 \exp\left(-\frac{16\pi^2 u^2 r_0}{a^3}\right) \quad (2)$$

式中： τ_0 为不考虑热振动的点阵阻力； u 为原子的热振动幅度； a 为能垒之间的距离； r_0 为位错的中心半径。

温度降低使原子的热振动幅度 u 减小，故位错滑移所受到的点阵阻力 τ_p 增大。由式(1)~(2)可知，随着温度的降低，铝基体中位错滑移所受到的阻力 τ 增大，位错开动所需的外加临界应力值增大，合金强度升高。而位错塞积群在障碍处产生的应力集中随外加应力增加而增大^[13]，导致拉伸断口附近的部分位错在进一步滑移之前，合金就发生断裂，因此，合金在低温

下拉伸的塑性略有降低，表现为拉伸断口附近的滑移带数量减少，存在形态较浅。

3 结论

(1) 热处理对Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金的力学性能有显著改善。低温(-60 °C)下拉伸时，经热处理后合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到368 MPa、317 MPa和6.97%，与铸态合金相比较，分别提升了24.75%、20.08%和75.13%。

(2) 经热处理后，Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er合金中的Si相发生熔断、球化，形貌得到改善，减弱其对基体割裂作用，部分网格状Al₂Cu相和Al-Si-Cu-Mg四元相溶解，时效阶段第二相以纳米级粒子弥散析出，强化合金基体，使合金强韧性提高。

(3) 与室温拉伸相比较，经热处理后的Al-Si合金在低温(-60 °C)下拉伸时，断口附近的部分位错在进一步滑移之前，合金便发生断裂，合金拉伸断口附近滑移带数量减少，并且滑移带的形态变浅。

参考文献：

- [1] 钱翰城, 吴奇峰, 赵建华, 等. 铸造亚共晶铝硅合金绿色化规划探讨 [J]. 特种铸造及有色合金, 2002, 6(6): 1-4.
- [2] 张春波, 王祝堂. 航空航天器铸造铝合金(1) [J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(11): 5-18.
- [3] 李卫荣, 马昌龙, 姜雄华, 等. 稀土Nd对铸造Al-Si合金低温拉伸断裂行为的影响 [J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(4): 58-64.
- [4] 方喜凤, 刘拥军. 轨道车辆车体A6N01S-T5铝合金焊接接头低温性能研究 [J]. 电焊机, 2014, 44(4): 142-145.
- [5] LI Runxia, LIU Lanji, ZHANG Lijun, et al. Effect of squeeze casting on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-xSi alloys [J]. Mater. Sci. Technol., 2017, 33(4): 7.
- [6] MA Guanghui, LI Runxia, LI Rongde, et al. Effects of stress concentration on low-temperature fracture behavior of A356 alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 667: 459-467.
- [7] 张惠帝. Cu/Er元素和热处理对铸造Al-Si合金低温性能的影响 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [8] 李荣德. 铸造铝合金热处理技术现状及展望 [C]//中国机械工程学会98铸造技术交流会. 沈阳: 中国机械工程学会, 1998.
- [9] SUN Y, CHEN J, SUN G X. Variation of the second-phase morphology and its influence on fracture behavior of Al-Si alloy [J]. Journal of Southeast University, 2004, 20(1): 53-57.

- [10] LEE C D. Effect of artificial ageing on the defect susceptibility of tensile properties to porosity variation in A356 aluminium alloys [J]. *International Journal of Metal casting*, 2018, 12 (2) : 321–330.
- [11] GAUTHIER J, SAMUEL F H. Tensile properties and fracture behavior of solution-heat-treated 319.2 Al automotive alloy [J]. *AFS Trans*, 1995, 114: 849-856.
- [12] 李润霞, 李荣德, 吕伟, 等. 固溶处理对铸造Al-Si-Cu-Mg合金组织与性能的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17 (2) : 193–199.
- [13] 崔忠圻. *金属学与热处理* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 172–385.
- [14] 马广辉. 铸造Al-Si-Mg合金低温力学性能及其断裂行为 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- [15] SMIRNOV B I. Temperature dependence of the Peierls-Nabarro forces in body-centered cubic metals [J]. *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov*, 1967, 3 (4) : 498–499.

Effects of Heat Treatment on Mechanical Properties of Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er Alloy at Low Temperature

ZHANG Hui-di¹, MA Chang-long¹, HAO Jian-fei¹, WU Hui-shu², CHEN Bin², CHEN Ming³, LI Wei-rong⁴, LI Run-xia²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523000, Guangdong, China; 3. Qingniao Technology Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, China; 4. Dongguan Yi'an Technology Co., Ltd., Dongguan 523000, Guangdong, China)

Abstract:

The effects of heat treatment on the microstructure and low-temperature mechanical properties of the Al-10Si-3Cu-0.3Mg-0.2Er alloy were investigated. The results show that after the T6 heat treatment of 525 °C ×6 h solid solution + 180 °C×6 h aging, the internal resistance to dislocation sliding in the alloy increases and hinders its further sliding when it is stretched at low temperature (-60 °C), resulting in an increase in strength and a slight decrease in elongation of the alloy. T6 heat treatment significantly improves the morphology and distribution of the second phase in the alloy, the coarse second phase dissolves into the matrix and precipitates in the subsequent aging stage. These changes in the second phase improve the mechanical properties of the alloy.

Key words: cast Al-Si alloy; heat treatment; low temperature tensile properties; microstructure