

深冷处理顺序对EM35工具钢组织性能的影响

张国立¹, 李伟秋¹, 彭继华^{2*}, 廖靖雯^{1,2}, 肖扬², 楚高洁¹

¹科益展智能装备有限公司广州分公司, 广东 广州

²华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州

收稿日期: 2021年9月3日; 录用日期: 2021年10月19日; 发布日期: 2021年10月26日

摘要

本文设计了由淬火、深冷步骤、回火步骤等不同组合的多种处理方式, 着重考察深冷步骤的顺序对EM35合金组织与性能的影响。采用场发射扫描电镜、X射线衍射、洛氏硬度、干式摩擦等表征合金的组织结构与力学性能。研究结果发现3次550℃ × 1 h回火之后进行-180℃ × 6 h深冷的复合处理可使EM35合金具有最佳的硬度及耐磨性能。深冷步骤放置在回火之后(后置深冷)的处理方式有利于保持重元素的固溶强化效应和超细弥散强化效应; 而深冷步骤放在回火之前的方式则促进重元素以MC碳化物相析出。深冷后实施的较高温度回火导致碳化物长大粗化、并降低合金的耐磨性能。

关键词

高速钢, EM35合金, 深冷处理, 显微组织, 力学性能

Effect of the Sequence of Cryogenic Treatment on Microstructure and Performance of EM35 Tool Steel

Guoli Zhang¹, Weiqiu Li¹, Jihua Peng^{2*}, Jingwen Liao^{1,2}, Yang Xiao², Gaojie Chu¹

¹Smartguy Intelligent Equipment Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²School of Materials and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong

Received: Sep. 3rd, 2021; accepted: Oct. 19th, 2021; published: Oct. 26th, 2021

Abstract

Different treatments including tempering and deep-cryogenically treating (DCT) were designed

*通讯作者。

文章引用: 张国立, 李伟秋, 彭继华, 廖靖雯, 肖扬, 楚高洁. 深冷处理顺序对 EM35 工具钢组织性能的影响[J]. 材料科学, 2021, 11(10): 1098-1105. DOI: 10.12677/ms.2021.1110127

for the quenched EM35 alloy, focusing on investigating the effect of the sequence of tempering step and DCT step on the microstructure and performance. Scanning electronic microscopy, X-ray diffraction, HRC indentation, and dry sliding of the pin-on disk were used to characterize the microstructure, hardness, friction coefficient, and wear resistance. It is found that the complex treatment A2 of 550°C × 1 h tempering for three times followed by DCT of -180°C × 6 h can lead to a good performance combination of hardness and wear resistance. After tempering, DCT is beneficial to maintain the solid-solution strengthening of heavy elements of the matrix and to enhance the dispersion strengthening of carbide refinement. The treatment with tempering after DCT promotes the formation of heavy-element-rich MC carbide. After A2 treatment, over-tempering at elevated temperature induces overaging and degrades the wear resistance of EM35 alloy.

Keywords

High-Speed Steel, EM35 Alloy, Cryogenic Treatment, Microstructure, Mechanical Properties

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高性能工模具合金钢在先进机械制造领域具有举足轻重的地位，其性能取决于化学成分及合理的热处理工艺。传统的工模具合金钢热处理工艺包括淬火 + 多次回火，通过工艺参数变化来调控奥氏体晶粒尺寸、回火马氏体组织、残余奥氏体含量及其稳定性、碳化物析出等，并提高合金的强度、硬度、耐磨性和韧性等综合性能[1]-[6]。深冷处理指在低于-130°C下进行保温处理的工艺，也可以改变工模具钢的组织结构，是对传统热处理工艺的补充和扩展[7]。深冷处理改善工模具钢的综合力学性能的有效性不仅取决于合金的成分与牌号[8]，也取决于深冷处理的工艺参数[9]，如降温速率、保温时间、保温温度，以及深冷与淬火/回火间的顺序关系等。深冷处理诱导组织演化的机理已取得有长足进步[10] [11]，但认识还有待深入。目前广泛认为工模具钢的深冷处理能促进碳化物的析出、细化，从而改善合金的耐磨性与断裂韧性[12] [13] [14] [15]。

以 M35 为代表的工具钢广泛应用于攻丝工具、铣刀、冲压模具等。目前研究更多地集中于深冷处理之后，无回火或回火步骤之前。这样的处理有助于促进细小二次碳化物析出、改善合金组织、提高合金的耐磨性和工具使用寿命[16]-[23]。而将 M35 合金深冷处理放在回火之后的相关报道却很少见。就 M2 工具钢而言，深冷处理居于回火步骤的前、中、后的顺序似乎不影响残余奥氏体含量，耐磨性的改善主要归因于深冷产生的均匀细化碳化物析出[24] [25]。为此，本文设计了回火和深冷处理不同顺序的处理工艺，研究深冷处理的顺序对 EM35 高速钢组织和力学性能的影响，为该钢的深冷处理工艺制定提供积极的参考。

2. 试验材料与方法

原始材料为购自法国艾赫曼集团的Φ20.5 mm × 100 mm EM35 高速钢棒，材料的化学成分见表 1。将棒料切割为 5 mm 厚度的圆片，在乙醇中超声清洗圆片样品后待用。采用 VUQ-557H-10 型真空空气淬炉(沈阳佳誉真空科技有限公司)对 EM35 高速钢圆片样品进行淬火处理，淬火温度为 1170°C，保温 15 min，氮气作为淬火介质冷却至室温。将淬火圆片样品分为四组，采用 VPT-557H 型真空回火炉(沈阳佳誉真空科技有限公司)和 Cryometal-50 型程控式液氮深冷箱(江苏爱思科冷冻科技仪器有限公司)并按照表 2 进行后

续处理。表 2 中回火指 560℃ 保温 1 h, 用氮气冷却至室温; 深冷处理指以 5℃/min 的冷却速率冷至 -180℃, 保温 6 h, 然后再以 5℃/min 的速率升至室温。

采用 SFT-2M 型销盘式摩擦磨损试验机(中国)在室温、大气环境, 相对湿度 40% RH 的条件下对 M35 高速钢及其表面涂层进行干式摩擦磨损试验。不同处理的 EM35 圆片样品为盘, 采用 $\phi 4$ mm 的 Si_3N_4 球为对磨副, 施加载荷 40 N, 旋转半径为 3 mm, 旋转速度为 300 r/min, 摩擦时间 60 min。磨痕轮廓测试采用 RTEC UP DUAL Model 3D 光学轮廓仪, 用软件 Gwyddion 获取轮廓截面并计算磨损体积。

处理后的圆片样品分别用 180~1500 目的砂纸打磨样品表面, 用金刚石研磨剂抛光至镜面。用 4% 的硝酸酒精(4 ml HNO_3 + 96 ml 无水乙醇)腐蚀样品。采用配有能谱仪的 Sigma 300 型场发射扫描电子显微镜(德国)观察微观组织、磨痕形貌等。

采用 Future-tech 型洛氏硬度计(日本)测试样品的洛氏硬度(HRC), 总载荷 150 kgf; 在样品表面测定 7 个不同位置的硬度值, 取点均匀覆盖整个表面; 去除最大值和最小值后计算平均硬度值。采用 X'pert Powder 型 X 射线衍射仪(荷兰)对样品进行物相分析, 选用 Cu 靶 $K\alpha$ 射线, 射线的波长为 1.54056 Å; 扫描速率为 0.02°/s, 扫描范围设定为 30°~90°。

Table 1. Chemical composition of EM35 high-speed steel (wt.%)

表 1. EM35 高速钢的化学成分(wt.%)

C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	Co	Fe
0.92	0.3	0.35	4.1	5.0	6.3	1.9	4.8	Bal.

Table 2. Different treatment groups after quenching of EM35 high-speed steel

表 2. EM35 合金淬火后的处理分组

A1	A2 (后置深冷)	A3 (前置深冷)	A4 (过渡回火)
3 次回火	3 次回火 + 深冷	深冷 + 3 次回火	3 次回火 + 深冷 + 1 次回火

3. 试验结果与分析

3.1. 不同处理对组织结构的影响

图 1、图 2 分别为不同处理样品的微观组织 SEM 形貌图像和 X 射线谱图。与其它工具钢的研究报道相似[16] [24] [26], 不同处理后的 EM35 合金中的碳化物按照尺寸形状可分为大于 2 μm 的不规则碳化物块(LCs)、介于 0.2~2 μm 的圆形碳化物颗粒(MSCs)、小于 200 nm 的细/超细碳化物颗粒(FCs)等三种类型。原奥氏体转变为回火马氏体板条, 且在原晶界处析出细碳化物群(图 1(a))。碳化物的主要物相结构为 M_6C 及 MC 相, 前者为富 Fe、W、Cr 的相, 后者为富 V、W 的相[27] [28]。MC 相中重元素含量高, 在二次电子相中呈黑色衬度, 如图 1(c)。结合 XRD 图谱分析(图 2), 本文 EM35 合金经过不同处理后, 几乎难以检出残余奥氏体[29], 这可能是所选淬火处理合理, 残奥含量极低, 也可能与淬火后未在 24 小时内实施表 2 所示处理, 已有的极低含量残奥得以稳定化。

表 3 列出了四种不同处理微观组织的基本特征。深冷处理可以明显地减少组织中粗大的、不规则的碳化物块(LCs), 这与深冷处理的顺序无关。过渡回火的处理(A4 组)将导致碳化颗粒融合长大, 产生较多的粗大碳化物块。深冷顺序对组织影响突出地体现在: 1) 后置深冷(A3)有利于产生更多的富含重元素的 MC 型碳化物; 2) 细化回火马氏体板条; 3) 后置深冷(A2)可能有利于三次析出纳米级 M_{23}C_7 [20] [28]; 限于扫描电镜分辨能力, 本文组织中未标出。过渡回火处理(A4)导致这些超细的碳化物相长大。

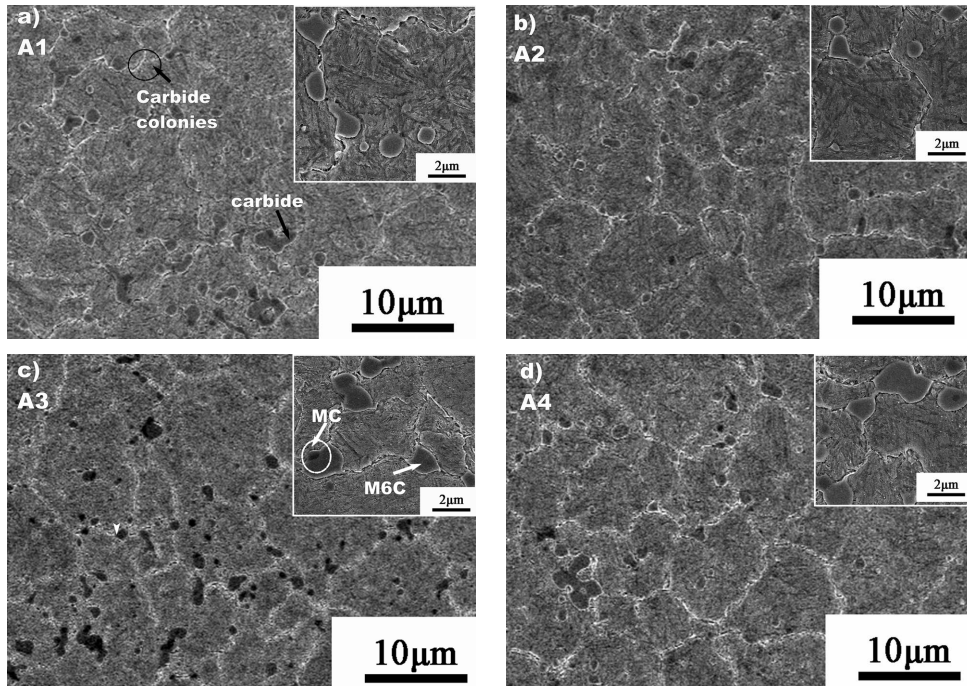


Figure 1. The SEM images of microstructures of EM35 alloys with different treatments
图 1. 不同处理 EM35 合金的组织形貌图

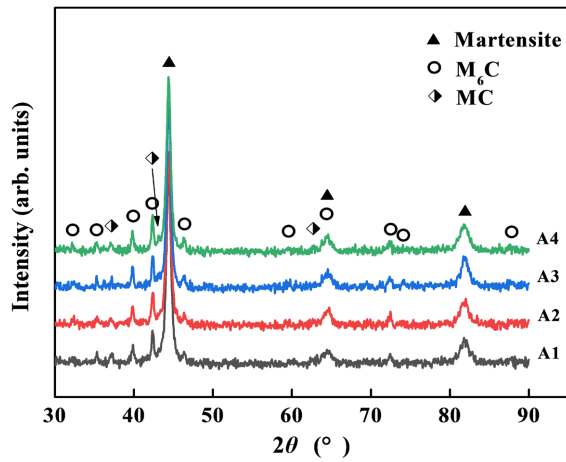


Figure 2. The XRD patterns A1~A4 specimens.
图 2. A1~A4 样品的 XRD 图谱

Table 3. Microstructural features of specimens with different treatments
表 3. 不同处理样品的微观组织特征

处理方式	3 次回火(A1)	3 次回火 + 深冷(A2)	深冷 + 3 次回火(A3)	3 次回火 + 深冷 + 1 次回火(A4)
LCs	多	减少	减少	与 A1 相当, 甚至增加
MSCs	-	增加	增加	长大, 甚至融合
FCs	观察视场中多	减少, 可能超细增加	与 A1 相当	观察视场中多
MC 相含量	-	-	大幅度增加	与 A2 相当
回火马氏体板条	-	-	板条变细	-

3.2. 不同处理对力学性能的影响

图 3 给出了不同处理样品的洛氏硬度。与仅回火处理的 A1 样品比较, 回火后增加 1 次深冷处理的前置深冷处理 A2 样品基本不变, 但过渡回火的 A4 样品硬度略有降低。当将深冷处理放置在回火之前时, 前置深冷 A3 处理的样品硬度明显下降。

不同处理样品在 40 N 载荷下干式摩擦的曲线及磨损体积示于图 4。不同处理的 A1~A4 样品的摩擦系数随时间的变化均较平稳, 相差不大, 在 0.63 附近上下波动。但是耐磨性则体现出明显的差异。后置深冷处理的 A2 样品表现出最高的耐磨性, 为 0.022 mm³; 即使考虑试验数据偏差, 其耐磨性也优于仅回火处理的 A1 样品。前置深冷处理的 A3 样品耐磨性不及 A2, 但仍优于 A1。过渡回火处理的 A4 样品表现出最差的耐磨性。由上述力学测试可见, 针对本文研究的 EM35 合金, 建议深冷处理放置在淬火 + 3 次回火之后, 且深冷后不宜在较高温度下做过渡的回火处理。

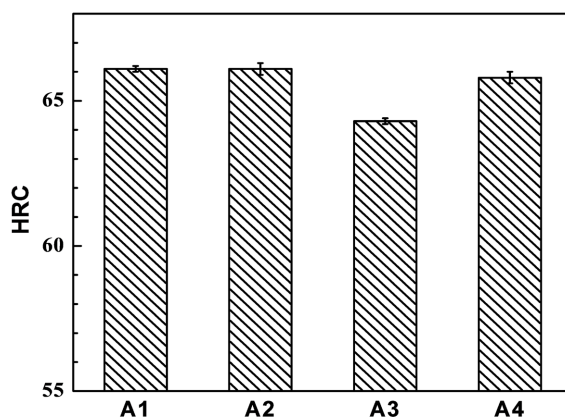


Figure 3. The HRC hardness of A1~A4 specimens

图 3. A1~A4 样品的洛氏硬度

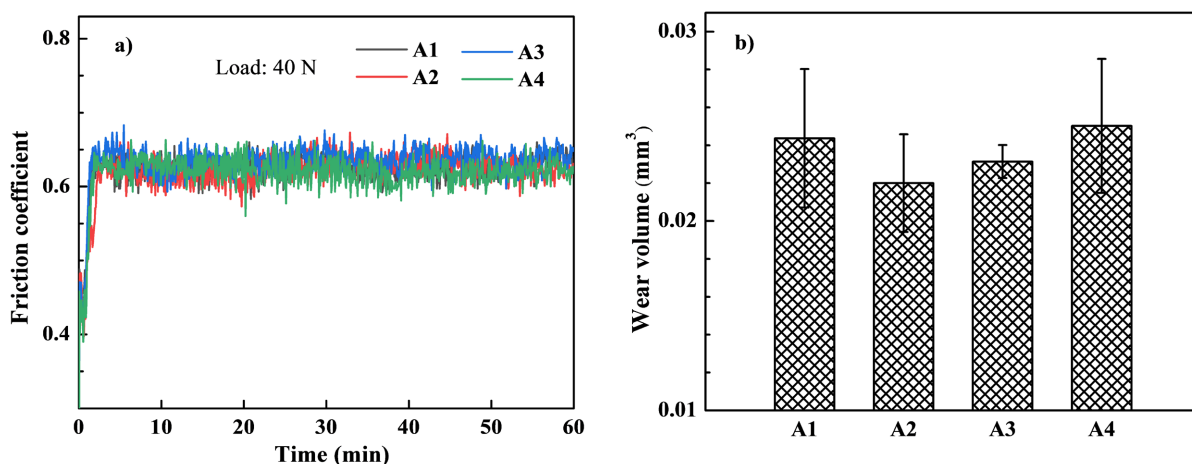


Figure 4. Friction curves (a) and wear volume (b) of specimens A1~A4 under 40 N load

图 4. 40 N 载荷下样品 A1~A4 的摩擦系数(a)和磨损体积(b)

不同处理样品的磨痕表面 SEM 图像示于图 5。磨痕的突出特点是: 1) 磨痕表面存在疑似碳化物粒子, 这些粒子可能疏松地散布在磨痕中, 如 A1、A3 样品; 也可以牢固地镶嵌在磨痕表面不脱落, 如 A2 样品;

2) 磨痕中存在有大量微裂纹组成的鲮纹区域。鲮纹区的分布面积、鲮纹区中裂纹间距随着处理工艺有差异,前置深冷处理 A3 样品的鲮纹区面积小、间距小;而深冷后置的 A2、A4 样品鲮纹区面积大,间距宽。大量微裂纹的存在,表明 40 N 载荷下粘着磨损起着非常重要的作用。

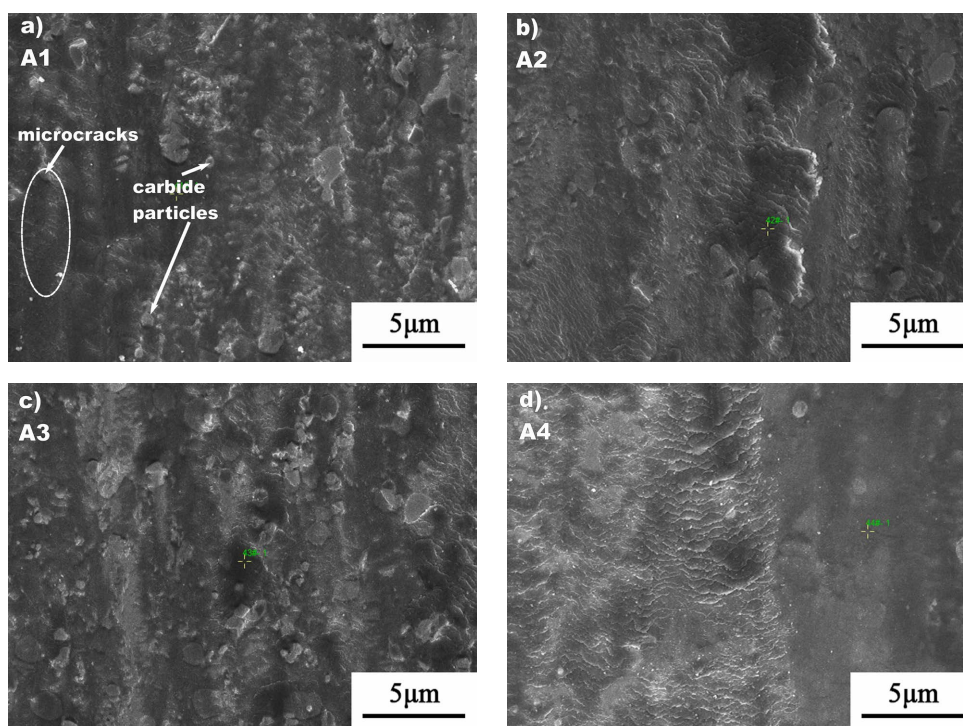


Figure 5. Worn surface morphologies of A1~A4 specimens treated by different tempering and cryogenic treatments under 40 N load

图 5. 40 N 载荷下不同回火和深冷处理样品 A1~A4 的磨痕表面形貌

3.3. 讨论

高速钢、模具钢的回火过程是合金碳化物形核、长大、粗化同步竞争的过程[1] [3] [6]。合理的回火导致碳化物的细化弥散析出,发生了二次强化的作用。但仅依靠回火过程难以破碎细化初生的大尺寸、不规则稳定碳化物块,如本文中的 A1 样品。碳化物与基体之间的共格性随着尺寸增加而降低,即碳化物与基体的结合力降低。当施加深冷处理时,来自残奥相转变及深冷产生的巨大收缩应力为大尺寸的初生碳化物破碎、 M_2C 相不稳定碳化物的稳定化解转变提供了动力[9] [10] [11] [24] [25],这是 A2/A3 样品中 LCs 降低的原因。但是如果淬火后直接深冷带来的巨大压力和变形有可能导致起裂、甚至材料的断裂[18],因此前置深冷必须慎重,后置深冷则较为保险。

从组织形貌及其特征(图 1, 表 2)来看,深冷处理的顺序的前置、后置顺序最大的影响在于富含重元素 W、V 等的 MC 相析出含量。前置深冷(A3)将直接作用于淬火组织,淬火过程中存在的过渡 M_2C 相、基体深冷中缺陷相互作用产生的重元素偏聚可能为 MC 在随后回火析出创造了有力条件[7] [8] [9] [10]。MC 相析出含量的增加,意味着基体中重元素含量的减少,即基体的固溶强化效应降低。反之,当深冷处于回火之后时(A2),前述 M_2C 等不稳定相以获得充分转变,合金的组织均匀性提高,深冷过程产生的缺陷密度、内应力将有所降低,所以 MC 析出相含量相对低,保证了基体的固溶强化效应,也有利于紧随深冷的升温过程三次超细碳化物的析出,加强弥散强化效应。A4 处理导致上述三次超细碳化物的粗化及其它碳化物的粗化,降低弥散强化效应。这从不同处理合金的硬度分布及其耐磨性可以得到印证。

A1 样品含有较多 LCs, 且这些 LCs 与基体结合力差, 摩擦过程中容易从基体脱落。A3 样品的基体软化, 其支撑碳化物硬质相的能力降低, 磨痕表面中出现大量剥落的粒子。A2 样品则兼具良好的基体硬度和弥散强化效应, 所以硬质碳化物相不易脱落, 且磨痕表面微裂纹的起裂、扩展较困难, 仅在局部应力集中区产生小间距、高密度微裂纹。过渡回火降低了 A4 样品的强韧性; 虽然碳化物颗粒与基体之间仍有较强的结合力, 但在几乎整个磨道上产生均匀分布的微裂纹。由此可见, 合理的 EM35 合金深冷处理宜放置在回火之后; 当然回火及深冷处理的相关工艺参数还可以进一步优化。

4. 结论

本文重点探讨了 EM35 合金深冷步骤与回火步骤间先后顺序对组织结构和力学性能的影响, 得到以下主要结论。

1) 深冷处理有助于降低合金中大尺寸、不规则碳化物的数量和密度; 深冷处理后合金的摩擦系数几乎保持不变, 但其耐磨性可以有明显的提高。

2) 应将深冷处理步骤放置在回火步骤之后(后置深冷), 且深冷后不宜实施较高温度的过渡回火。后置深冷可以保持重元素的固溶强化效应、超细弥散强化效应, 具有最佳的硬度、耐磨性等综合力学性能。

基金项目

本文得到广州市科技计划项目(201902010018)及科益展智能装备有限公司广州分公司项目(合同号: 2021440002000539, 2021440002001460)的支持。

参考文献

- [1] Mao, W., Ning, A. and Guo, H. (2016) Nanoscale Precipitates and Comprehensive Strengthening Mechanism in AISI H13 Steel. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, **23**, 1056-1064. <https://doi.org/10.1007/s12613-016-1323-z>
- [2] Demir, H., Gündüz, S. and Akif, E. (2018) Influence of the Heat Treatment on the Microstructure and Machinability of AISI H13 Hot Work Tool Steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **95**, 2951-2958. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1426-3>
- [3] Zhu, J., Zhang, Z. and Xie, J. (2019) Improving Strength and Ductility of H13 Die Steel by Pre-Tempering Treatment and Its Mechanism. *Materials Science & Engineering: A*, **752**, 101-114. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.02.085>
- [4] Soffritti, C., Fortini, A., Sola, R., Fabbri, E., Merlin, M. and Garagnani, G. (2020) Influence of Vacuum Heat Treatments on Microstructure and Mechanical Properties of M35 High Speed Steel. *Metals*, **10**, Article ID: 643. <https://doi.org/10.3390/met10050643>
- [5] Stoyanova, T. and Ivanova, V. (2020) Study of the Influence of Carbide Inhomogeneity on Operational and Technological Properties of High-Speed Tool Steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **986**, Article ID: 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/986/1/012007>
- [6] 何星, 李炎铮, 雷雄辉, 郑毅, 陈卓, 韦习成. 热处理工艺对 CM2 高速钢组织性能的影响[J]. *上海金属*, 2019, 41(1): 66-70.
- [7] Sonar, T., Lomte, S. and Gogte, C. (2018) Cryogenic Treatment of Metal—A Review. *Materials Today: Proceedings*, **5**, 25219-25228. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.324>
- [8] Podgornik, B., Paulin, I., Zajec, B., Jacobson, S. and Leskovsek, V. (2016) Deep Cryogenic Treatment of Tool Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, **229**, 398-406. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.045>
- [9] Gill, S., Singh, H., Singh, R. and Singh, J. (2010) Cryoprocessing of Cutting Tool Materials—A Review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **48**, 175-192. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2263-9>
- [10] Li, S., Min, N., Li, J., Wu, X., Li, C. and Tang, L. (2013) Experimental Verification of Segregation of Carbon and Precipitation of Carbides Due to Deep Cryogenic Treatment for Tool Steel by Internal Friction Method. *Materials Science & Engineering A*, **575**, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.070>
- [11] Gavriljuk, V., Theisen, W., Sirosh, V., Polshin, E., Kortmann, A., Mogilny, G., Petrov, Y. and Tarusin, Y. (2013) Low-Temperature Martensitic Transformation in Tool Steels in Relation to their Deep Cryogenic Treatment. *Acta Ma-*

- terialia*, **61**, 1705-1715. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.11.045>
- [12] 张展展, 刘恒三, 王淼辉, 葛学元, 范斌. 深冷处理对喷射成形 H13 钢组织及耐磨性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(10): 86-90.
- [13] Oppenkowski, A., Weber, S. and Theisen, W. (2010) Evaluation of Factors Influencing Deep Cryogenic Treatment That Affect the Properties of Tool Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, **210**, 1949-1955. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.07.007>
- [14] Li, J., Yan, X., Liang, X., Guo, H. and Li, D. (2017) Influence of Different Cryogenic Treatments on High-Temperature Wear Behavior of M2 Steel. *Wear*, **376-377**, 1112-1121. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.11.041>
- [15] 郭宏, 梁晓阳, 闫献国, 李俊吉, 陈玉华, 郝振彪. 深冷处理保温时间对 W6Mo5Cr4V2 高速钢磨损性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(2): 249-253.
- [16] Dhokey, N. and Lalge, P. (2018) Influence of Cryosoaking Period on Wear Characteristics and Surface Topography of M35 Tool Steel. *Tribology—Materials, Surfaces & Interfaces*, **12**, 170-175. <https://doi.org/10.1080/17515831.2018.1488090>
- [17] Cicek, A., Uygur, I., Kivak, T. and Ozbek, N. (2012) Machinability of AISI 316 Austenitic Stainless Steel with Cryogenically Treated M35 High-Speed Steel Twist Drills. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, **134**, Article ID: 061003. <https://doi.org/10.1115/1.4007620>
- [18] Dhokey, N., Dandawate, J., Gangurde, H. and Harle, A. (2012) Metallurgical Investigation of Cryogenically Cracked M35 Tool Steel. *Engineering Failure Analysis*, **21**, 52-58. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2011.11.013>
- [19] Ekici, E. and Motorcu, A. (2014) Evaluation of Drilling Al/SiC Composites with Cryogenically Treated HSS Drills. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **74**, 1495-1505. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6085-z>
- [20] Dhokey, N., Hake, A., Kadu, S., Bhoskar, I. and Dey, G. (2014) Influence of Cryoprocessing on Mechanism of Carbide Development in Cobalt-Bearing High-Speed Steel (M35). *Metallurgical and Materials Transactions A*, **45**, 1508-1516. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-2067-2>
- [21] 艾峥嵘, 于凯, 吴红艳, 刘相华. 深冷处理温度对 W6Mo5Cr4V2 高速钢组织及硬度的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(7): 150-154.
- [22] 廖婧雯, 李烈军, 彭继华, 高吉祥, 毕君, 廖嘉诚. 回火及深冷处理对 M35 高速钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(6): 107-114.
- [23] Liao, J., Li, L., Peng, J. and Gao, J. (2020) Effects of Deep Cryogenic Treatment on the Microstructure and Friction Performance of M35 Highspeed Steel. *Journal of Physics: Conference Series*, **1676**, Article ID: 012098. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1676/1/012098>
- [24] Jovicevic-Klug, P., Jovicevic-Klug, M. and Podgornik, B. (2020) Effectiveness of Deep Cryogenic Treatment on Carbide Precipitation. *Journal of Materials Research and Technology*, **9**, 13014-13026. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.063>
- [25] Fantineli, D., Parciannello, C., Rosendo, T., Reguly, A. and Tier, M. (2020) Effect of Heat and Cryogenic Treatment on Wear and Toughness of HSS AISI M2. *Journal of Materials Research and Technology*, **9**, 12354-12363. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.090>
- [26] 周雪峰, 朱旺龙, 江红兵, 涂益友, 吴建忠. 高速钢过回火合金碳化物演变行为[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(9): 139-143.
- [27] 于凯, 艾峥嵘, 吴红艳, 李建中. 深冷及回火处理对 W6Mo5Cr4V2 高速钢组织和硬度的影响[J/OL]. 热加工工艺, 2021, 54(4): 1-6. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1133.TG.20201224.1459.016.html>, 2021-08-30.
- [28] Jovicevic-Klug, P., Jenko, M., Jovicevic-Klug, M., Batic, B., Kovac, J. and Podgornik, B. (2021) Effect of Deep Cryogenic Treatment on Surface Chemistry and Microstructure of Selected High-Speed Steels. *Applied Surface Science*, **548**, Article ID: 149257. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149257>
- [29] 董良, 闫献国, 陈峙, 寇国富, 李俊吉, 陈高华, 赵桐羽, 李佳乐. 深冷处理对 W6Mo5Cr4V2 高速钢硬度和冲击性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(12): 144-148.