

公路施工用高强度螺钉断裂分析

詹·独布克, 瓦拉迪米拉·高瓦斯诺加, 安德·克梅拉, 阿迪宇高·克梅拉洛娃, 佩德·安登
公共道路安全调查局, 摩洛哥

摘要: 高强度螺钉是一种主要的连接或紧固部件, 通常用于安装与交通道路有关的信息板或路标的框架结构。生产过程的控制可能并不总是足以确保道路安全的方法。螺杆材料加工的逆向排查和控制似乎是螺杆在运行过程中出现任何故障时最重要的程序之一。本文主要针对M直径 27×3 、柄长64mm的10.9级高强度螺钉的失效分析。提到和研究的螺钉被用作公路框架结构中的紧固件。本文主要从材料微纯度、材料显微组织、表面处理以及化学成分等方面对破碎螺杆的材料进行了分析。评估基于光学显微镜、扫描电子显微镜和能量色散光谱的研究。由于使用扫描电子显微镜的方法从断口分析得到的断面的微观形态和材料对比信息, 还获得了重要的知识和结果。在生产高强度螺钉的情况下, 回火代表着决定性或关键的热处理过程, 因为给定的过程可以确保降低硬度, 同时保持材料所需的延展性, 这也是体现在断裂面强度和微观形貌的提高上。从微纯度方面来看, 材料中未发现临界尺寸或分布的夹杂物, 参考捷克标准ČSN ISO 4967 (420471)。微观结构对应于回火马氏体, 但断裂螺钉的断裂表面基于晶间微观机制, 这对于给定类型的组件是不希望的。结合从螺钉边缘到中心区域的HV1 (载荷1kg时的维氏硬度) 的测量, 分析揭示了高强度螺钉在热处理中的显著缺陷。

关键词: 断裂分析; 扫描电镜; 高强度螺杆; 晶间断裂; 回火脆

Fracture Analysis of High-Strength Screw for Highway Construction

Jan Dubec, Vladim í ra Kov á čikov á, Andrej Krmela, Artyukhov Krmelov á, and Petra Artem
Public Road Safety Investigation Service, Morocco

Abstract: High-strength screws represent one of the main joining or fastening components which are commonly used in the process of installation of frame constructions for information boards or signposts, relating to the traffic roads. The control of the production process may not always be a sufficient method for ensuring road safety. The backward investigation and control of the screw material processing seems to be the one of the most important procedures when there is the occurrence of any failure during the operation of the screw. This paper is mainly focused on the analysis of the failure of the high-strength screw of 10.9 grade with M diameter of 27×3 and a shank length of 64 mm. The mentioned and investigated screw was used as a fastener in a highway frame construction. In the paper, there is mainly the analysis of the material for a broken screw in terms of the material micropurity, the material microstructure, the surface treatment as well as chemical composition. The evaluation was based on investigation by optical microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy. Important knowledge and results were also obtained due to information on micromorphology and material contrast of the fracture surface resulting from fractographic analysis, using the method of scanning electron microscopy. In the case of the production of the high-strength screws, the tempering stands for the decisive or crucial process of heat treatment because the given process can ensure a decrease in hardness, while the required ductile properties of the material are kept and this is also reflected in the increase of strength and micromorphology of the fracture surface. From the aspect of micropurity, inclusions of critical size or distribution were not identified in the material, referring to Czech standard ČSN ISO 4967 (420471). The microstructure corresponds to tempered martensite, but the fracture surface of the broken screw was based on an intercrystalline micromechanism, which is undesirable for the given type of component. Combined with the measurement of

the HV1 (Vickers hardness at a load of 1 kg) from the edge to the central area of the screw, the analysis revealed the significant drawbacks in the heat treatment of the high-strength screw.

Keywords: fracture analysis, scanning electron microscopy, high-strength screw, intergranular fracture, tempering embrittlement

引言:

公路钢框架结构的主要功能是支撑结构部件,用于与交通道路相关的信息和信号板或路标。从安装到维护需要特别注意保持所有相关或适当的要求。关于高强度螺钉的性能,必须对其功能以及可靠性和安全性给予关注。钢结构的参数必须适合特定的雪和风的条件,因为给定的螺钉会暴露在这些条件下。建筑物是用各种螺丝或焊接接头安装的,它们必须代表所需的质量和精度。在各种建筑和设备的运行过程中,在可变的振荡载荷下,建筑结构件和组件的断裂是很常见的,即使是在比材料的屈服点低得多的应力下,因此,生产过程必须不断创新、改进和优化。

用于生产螺钉的材料经历了各种生产技术以改善其性能,但材料选择不当以及不恰当的制造程序会导致材料的损坏或破裂以及随后的断裂或失效。这种类型的结构件或组件主要暴露在特定的周期性负载下,在选择和测试材料的过程中,必须考虑到这一事实。公路信息板或路标通常具有较大的重量以及几何尺寸。在大多数情况下,几个螺钉的组合被用来连接各种信息板或标志牌。考虑到前面提到的事实,重要的是要注意螺钉加工的几何和材料方面,以避免与整个螺钉截面有关的断裂和失效,因为给定的现象可能导致对其余螺钉的较低数量的操作截面的剪切应力影响。在这种情况下,可能会出现不稳定的螺丝连接,信息板可能会在交通过程中掉落在路上,这可能会造成致命的后果。

高强度钢特别容易受到材料脆性的影响,而给定的脆性是非常危险的。根据钢的化学成分和回火温度或热加工过程,如果材料达到回火脆性区域,可能会发生具有负面影响的微观结构变化。根据脆化发生的方式,可以观察到与断裂面有关的跨晶或晶间断裂机制。与跨晶断裂相比,由晶间延性断裂产生的断裂属于所需能量较少的低能量断裂组。这种断裂的形成意味着延性断裂的条件只保持在邻近晶界的狭窄区域。脆性可能是由不适当的热处理以及违反表面处理的技术程序造成的。

适当的回火温度对回火脆性有重要影响。给定的回火温度对不锈钢的结构变化和机械性能的变化程度起着决定性或关键性的作用。随着回火脆性的发生,钢的缺

口和断裂韧性的值会下降,而且,对腐蚀开裂或氢脆的敏感性更高。镍铬和锰铬钢特别容易变脆,因为与锰、镍和铬钢相比,即使在从回火温度缓慢冷却的过程中,韧性也会下降,而锰、镍和铬钢只有在特定温度下保持很长时间才会变脆。在较高温度下溶解在铁素体中的碳化物或其他化合物在冷却时发生偏析,从而导致回火脆性。在快速冷却过程中不会出现回火脆性。钼可以消除所述的脆性,钨和钒也可以部分消除。因此,添加钼用于生产大截面部件或长期暴露在临界温度下的部件的钢特别重要。在低温下,通常在350到450℃之间,会发生低温回火脆性。

在从回火温度缓慢冷却的过程中,由于所谓的异温成分部分的发展,会发生脆性。钢材对回火脆性的敏感性是基于钢材的化学成分,特别是表面活性元素的含量,如磷、硫、锡、砷、铋和其他。低回火脆性伴随着断裂表面的跨晶裂变破裂,其原因隐藏在雪明石颗粒的不适当的尺寸、形状和分布中。在沿先奥氏体晶粒发生晶间解聚的情况下,低温回火脆性的发生与奥氏体化加热过程中表面活性元素向边界的偏析密切相关,此外,它还伴随着在这些区域同时析出的碳化物。

高温回火脆性和韧性的最大下降发生在相对较高的回火温度,即500℃左右。高温回火可以在热处理的等温或异温条件下进行。发生高温脆化的主要原因是与先前奥氏体晶粒边界上的表面活性元素的偏析有关,特别是在回火或从回火温度缓慢冷却期间。在大多数情况下,合金元素的偏析,如镍、锰、铬和硅,被认为是导致晶界内聚强度下降的一个因素。对于具有高屈服点的粗晶粒钢来说,退化的影响更加明显和显著。

本文的主要目的是从个别应用分析中获得知识,并对结果进行总结,以获得有关安装在公路框架结构中的高强度螺钉失效原因的信息。由此产生的信息可以帮助确定制造过程中的个别程序,因为不适当的制造程序会导致微观结构的缺陷。

一、材料和实验方法

与钢结构的机械连接有关,包括螺丝在内的紧固件必须满足标准中规定的要求。螺钉和螺钉接头的材料必须满足STN EN 1993-1-1和STN EN 1993-1-8以及STN

EN 1090-2 + A1的要求。由碳钢、合金钢和奥氏体不锈钢制成的非预应力螺纹连接件必须符合STN EN 15048-1的要求。高强度预应力螺纹接头必须满足STN EN 14399-1的要求。强度等级为10.9的M27螺钉具有常用的几何形状,全螺纹柄和六角形头。它由高强度的41Cr4 (1.7035) 铬钢制成,它主要用作钢结构的外部紧固件。对于热处理后的高强度螺钉,硬度的持续控制是非常重要的,对于10.9强度等级,表面硬度不允许高于390HV。在实践中,34Cr4 (1.7033) 和37Cr4 (1.7034) 钢也可用于生产连接部件。两种类型的防腐表面保护是最常用的,即电镀或热浸锌,这取决于保护层的厚度和应用的类型以及周围环境的侵蚀性。

被调查的断裂的M27×3螺钉,其柄部长度为64毫米,与一定数量的相同名称的螺钉结合,用于紧固公路建设,但连接螺钉的确切数量并不清楚。当以准确的方式安装时,螺钉的负载是基于螺钉柄的一个区域的剪切应力。如果没有达到规定的1524Nm的紧固扭矩,即螺丝中的轴向力大小为291,534N,则会在螺丝材料中引起一个额外的拉伸力值。螺杆的受力截面位于螺杆的螺纹部分,因为这种类型的螺杆在结构上的设计是,螺纹正好位于螺杆头的下方。获得的重要信息是基于这样一个事实,即所有安装在公路建设中的螺钉中只有一个是坏的。为了解决公路结构连接件的故障原因,只提供了该螺丝的两处断裂,这代表了一块和另一块。同时,还交付了一块相同的未损坏的螺丝,该螺丝尚未投入使用。整个研究过程只与这部分材料紧密相连。由于这个原因,不可能对制造螺钉的材料机械性能进行广泛研究。因此,选择了微观方法来实现实验部分,因为它们的优点是可以用小体积的材料进行工作。选择断裂面比较的方法是为了给螺丝的热处理的正确性提供一个信息。具体来说,调查了螺杆操作区、未损坏的相同螺杆的实验室采石场以及来自操作区外的断裂螺杆的实验室采石场的断裂区域。为了获得这些断裂面,从受损和未受损的螺杆上制作了样品,这些样品可以通过施加拉力在撕裂机上撕裂。然而,由于材料的体积不允许按照标准制作拉伸试验的样品,因此不可能有通过拉伸试验获得的螺杆机械性能的数据。通过比较所得的断裂面,有可能确定热处理后的微观结构是否合适,这是标准所规定的。通过光学显微镜对螺丝材料进行分析,以评估钢中的夹杂物对螺丝故障发生的影响。样品已经从靠近断裂的区域的纵向方向上被移除。这些样品是通过使用砂纸对材料进行连续的打磨来准备的。在完成金相打磨后,样品在

乙醇介质中被抛光。在抛光的第一阶段,使用添加了粒度为2微米的磨料的抛光基体。在抛光的最后阶段,使用添加了粒度为0.7微米的磨料的抛光基底。通过该程序制备的样品在抛光状态下被用于评估符合标准的夹杂物。在下一步,样品被2%的腐蚀剂Nital蚀刻,以便能够评估热处理后的微观结构,同时进行维氏硬度测量。SEM分析的样品准备主要是在异丙醇中对断裂表面进行超声清洗。由于样品是导电的,所以没有必要对分析的区域进行额外的导电处理。在二次电子(SE)模式下对断裂区域进行分析,以评估微观形态,同时也评估了背面散射电子(BSE)模式下的材料对比。二次电子和背散射电子探测器在双显示模式下同时使用,以获得来自断裂表面的复杂信息。样品在高真空下进行了评估。能量色散光谱(EDS)方法被用来获取微区的化学成分信息。具体来说,使用了选定区域的化学成分分析。这种分析的结果是对给定材料中的化学元素进行定性和定量的评价。这种类型的分析还提供了关于化学元素相对于选定区域形状的大致位置的信息。

为了能够评估断裂螺丝的微观纯度、微观结构和表面处理,从靠近断裂面的区域取了一个纵向截面的样品。获得这些信息与以金相方式制备样品有关。通过光学显微镜进行的微观纯度分析表明,在生产强度等级为10.9的高强度螺钉时,使用了局部出现亚临界氧化物的高纯度钢。在100倍放大镜下观察到了氧化物夹杂物,并对其大小进行了评估,同时参照基于标准ČSN ISO 4967 (420471)的标准系列,将其划分为1级。在上述标准规定的放大率下,没有出现任何其他类型的夹杂物。用2%的Nital蚀刻剂对抛光表面进行蚀刻后,观察到螺丝的微观结构,它与回火马氏体相对应。这种类型的微观结构可以通过淬火和随后的回火在钢中实现,它代表了对这种类型的连接部件的热处理技术的适当选择。在实验的后续部分,有必要通过扫描电子显微镜进行硬度测量分析和微观结构形态分析,以确定贝氏体结构的确切类型,这主要取决于所用的回火温度。在螺杆的中心区域,微观结构主要基于半成品的塑性变形方向,这些半成品被用于后续生产最终的螺杆部件。另一方面,在边缘部分没有观察到任何明显的方向变化。在抛光状态下,观察到被调查样品的表面存在一个表面层。该层不均匀,其厚度从2.7到5.5微米不等。包括整体制图分析,能量色散光谱法被应用于调查样品,重要的是要指出,Zn层是被认可的。在几个区域观察到表面层的缺陷点。在螺纹部分,该层是不连续的,在个别微观区域完全没有。

此外,还确定了微裂纹在整体厚度上的传播,以及表层在几个区域的剥落。在轧制材料的表面观察到褶皱的发生,给定的搭接区域可以被认为是通过轧制技术产生的螺纹的结果。此外,在这些提到的区域也可以观察到微空洞。在没有Zn层的区域,有明显的微裂纹起始点,并且这些微裂纹以接近45°的角度传播到材料的核心。如果表面微裂纹传播的角度保持不变,就会大大增加与高强度螺钉的承重截面有关的削弱风险。当微裂纹向材料表面改变传播方向时,材料表面在进一步的微裂纹传播过程中被剥落。这个过程会大大增加螺纹接触面的表面粗糙度。此外,在拧紧螺钉和螺母的螺纹区域之间的螺钉时,被释放的材料会自由移动。还需要指出的是,接触面的表面粗糙度也有变化。表面微裂纹被确认在螺纹峰的区域以及螺纹根部的区域。由材料中的微裂纹扩展而产生的微空间,被腐蚀元素和锌所填充。

二、结果

使用扫描电子显微镜的方法,在二次电子模式下观察回火微观结构的微观形态,在背散射电子模式下观察分析区域的材料对比。顺序蚀刻的方法,使用2%的Nital蚀刻剂,被选择用于准确的可视化和随后的贝氏体结构的识别。通过这种方法,可以观察到单个贝氏体铁氧体板的存在,其中 ϵ -碳化物的形成是分布的。蚀刻剂的作用更加强烈,导致贝氏体结构的铁素体相被更明显地蚀刻,以及 ϵ -碳化物形成的图像更加明显。在靠近晶界的地方可以观察到较厚的贝氏体铁氧体板。给出的微观结构特征对应于下贝氏体的发生,即在较低温度下回火的马氏体结构。在蚀刻的微观结构中,也观察到几种类型的夹杂物的出现,根据标准ČSN ISO 4967 (420471),给定的夹杂物表现出亚临界的大小,但是它们的分布靠近晶界或直接在晶界处可以代表低能量临界微裂纹的传播。使用能量色散光谱的方法,对所选区域的化学成分进行分析,证实主要存在硫化锰夹杂物,特别是在微观结构的中心区域。关于微观结构,通过整个纵向截面区域,也可以观察到铝基氧化物和硅基氧化物。此外,在靠近晶界的地方可以看到复杂的硫化物。晶界用箭头表示。

二次和背散射电子模式的扫描电子显微镜被用于断裂表面的分析,与实践中断裂的螺丝有关。周边和中心区域主要是由晶间微机械形成的,在显露的晶界处观察到明显的凹坑微形态。然而,观察到的坑是浅的,几何参数小。断裂面在晶界处表现出明显的解聚现象和大量的晶间微裂纹。断裂面的特征对应于临界微裂缝的低能

量传播。在断裂面的整体区域,由于剪切载荷的作用,断裂面没有明显的方向。此外,没有任何可能是断裂面移动和磨损的结果的印象区域。

需要指出的是,断裂的螺钉的断裂面也没有表现出所需的韧性,因此,进一步的调查步骤是基于实验比较法,将实验室中断裂的螺钉与相同的未断裂螺钉的拉伸断裂进行比较。对断裂表面的分析是通过测量HV1硬度来补充的。使用拉伸载荷,未断裂螺钉的断裂表面显示出高度的韧性,存在着因过载而产生的韧性断裂的深坑。该螺杆三次测量的平均硬度值为372HV1。该硬度对应于马氏体结构在较高温度下的回火热处理,它代表了上贝氏体的微观结构。

为了获得断裂的螺钉在其螺纹部分整个体积上的断裂特性的全面信息,在实验室中从螺钉的其余部分制备了拉伸载荷下的断裂面。给出的断裂面主要是由跨晶断裂微机制形成的,具有可见的凹坑微形态。凹坑有更大的深度和几何参数,而且,它们的数量更多,这给高能断裂提供了重要的信息。在拉伸载荷后,断裂面显示出较高等度的韧性断裂,但是,对于一个给定的连接部件来说,这不是一个理想的或预期的与螺钉过载有关的故障,它与下贝氏体的微观结构相对应,与上贝氏体的微观结构相比,硬度值较高。基于断口分析和研究结果,对HV1硬度进行了进一步的补充测量,从螺钉的边缘到核心部分逐步进行测量。每个区域都进行了三次硬度测量,并从中计算出平均值。边缘获得891 HV1的平均值,边缘和中心之间的区域获得796 HV1的平均值,螺杆中心区域获得695 HV1的平均值。为了进行评估,HV1载荷下的维氏硬度测量方法采用了标准ČSN EN ISO 6507-1金属材料-维氏硬度测试-第1部分:测试方法。硬度是在V10 K/AQ设备上测量的。

三、讨论

公路框架结构的连接或紧固部件必须符合相应标准中严格规定的要求。对个别加工程序的控制在其生产过程中起着非常重要的作用。如果不可能对有缺陷的部件的机械性能进行广泛的研究,则广泛使用显微镜和断面分析。这些方法提供了有关材料的微观纯度、微观结构和断裂性能的宝贵信息。所获得的知识与每个钢铁部件的生产和加工有直接关系。另一方面,给定的连接部件在操作中可能会被破坏,如果出现这种情况,就需要对材料加工进行逆向分析,以帮助识别与制造过程有关的任何不适当的步骤或程序。被调查的断裂螺丝由10.9级的高强度41CR4 (1.7035) 铬钢制成,尺寸为M27×3,

柄长为64毫米。使用光学显微镜的方法,结合基于标准ČSN ISO 4967(420471)的标准系列,对材料微观纯度的分析表明,该螺丝是由高纯度的钢制成的。蚀刻后,检测到基于铝、硅以及复杂的硫化物的氧化物夹杂物。给出的夹杂物在尺寸上是亚临界的,但是它们分布在靠近晶界的地方,从内聚力特性的角度来看,它可能会对不适当的热处理产生危险。

根据上述技术标准,在中心区域有大量的1级硫化锰,并且这些硫化物呈平行线分布。关于微观结构的观察,材料的热处理是基于淬火和随后的硬化过程。此外,中心区域的硬度值达到了695HV1。微观形态和硬度符合下贝氏体的结构。使用扫描电子显微镜和能量色散光谱的方法,在螺丝的表面确定了表面锌层,它代表了防腐保护。另一方面,从所进行的调查的结果来看,必须指出,给定的保护层表现出大量的缺陷区域。根据锌表面层的厚度,可以假设它是在电镀过程中以电化学的方式形成的。在抛光状态下,钢中可见微裂纹,从螺纹部分的表面观察到这些微裂纹的扩展。此外,微裂缝的微空间充满了腐蚀产物和锌。关于提到的微裂纹,可以认为是在最后的表面处理之前的螺丝生产过程中产生的,随后的传播也是如此。

表面微裂纹的存在会对钢金属基体的内聚强度产生负面影响。从测量值和获得的结果以及知识,可以得出结论,螺杆失效的主要原因是基于不适当的钢材热处理。就螺杆的应用而言,这种类型的螺杆可以通过淬火和回火达到上贝氏体结构,从而达到所需的强度。只有通过较高的回火温度才能达到上述贝氏体结构,它能使材料达到所需的断裂和缺口韧性。用于生产高强度螺钉的铬钢也符合这种提到的热处理过程。此外,高回火马氏体的断裂表面表现出明显的凹坑微观形态,这代表了材料的高能断裂。然而,被调查的断裂螺丝的微观结构是由低贝氏体形成的,这种类型的结构代表了硬度值的增加,但它也代表了材料韧性值的减少。在回火过程中,回火温度选择不准确,此外,在给定的热处理过程中,加工的材料处于低温回火脆性区域。引入的材料脆化类型通常发生在350到450℃的温度下。显然,当使用较长的回火时间时,碳化物被溶解在贝氏体铁素体中,随后,它们向原奥氏体晶粒的边界沉淀。钢中的表面活性元素可以向晶界偏析,并导致这些区域的内聚力性能显著降低。贝氏体铁素体板中的碳化物相的出现和大小达到了更高的值,它可能导致这种微观结构的硬度和脆性的增加。

结论

这些事实也反映在断裂表面的特征上,它是基于低能量的晶间断裂,在显露的晶界区域有坑的微形态。一个有趣的发现也与比较方法的结果有关,该方法是基于剪切操作载荷和拉伸载荷下断裂螺钉的断裂表面的比较。给出的比较方法给出了关于晶界弱点的信息。在螺丝的整个体积中没有观察到弱点的出现,而只是在操作断裂的区域。螺丝的其余部分呈现出具有明显凹坑微形态的跨晶高能断裂。断裂表面的这一特征与表面硬度值较高的下贝氏体结构相一致。此外,从边缘到中心区域的HV1硬度测量过程表明,在整个横截面上对螺钉进行了适当的回火,因为在边缘测量的硬度为891HV1。给定的测量硬度值与马氏体结构相对应。可以认为,在螺丝的整个横截面上,没有出现最佳的松动情况。基于上述事实,可以得出结论,既没有使用最佳也没有使用有效的回火工艺。

对断裂的高强度螺钉进行金属学和断裂学分析,有助于改进生产过程的措施,并能提高安装特定部件的环境的安全性。高强度螺钉用于钢结构的可拆卸连接件的组装,这对强度有很高的要求。例如,这些部件被用于建筑和运输业的钢结构。在螺丝出现类似断裂的情况下,可以按照本文所示的方式进行。重要的信息提供了关于断裂面的微观结构和微观形态的知识。如果用材料的基本机械性能的信息来补充微观方法是合适的。当然,总是有必要寻找断裂的原因,寻找结构的载荷是否超过了允许的载荷极限,以及是否违反了规定的扭力紧固条件等。

参考文献:

- [1]Technical and Quality Conditions Part 20, Steel Structures, Distler-Šuppa. [(accessed on 3 January 2021)];2014 :39. Available online:
- [2]Ptáček L. Material Science II. 2rd ed. Academic Publishing CERM; Brno, Czech Republic: 2002. p. 392.
- [3]Hrivňák I. Fractography. MTF STU; Bratislava, Slovakia: 2009. p. 93.
- [4]Hunkel M., Surm H., Steinbacher M. Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry. Elsevier; Amsterdam, The Netherlands: 2018. p. 860.
- [5]Barnyi I., Krbaťa M., Majerík J., Mikušová I. Effect of deformation parameters on microstructure evolution and properties of 33NiCrMoV15 steel. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020;776:776. doi: 10.1088/1757-899x/776/1/012001.
- [6]Krbata M., Majerík J., Barényi I., Eckert

M. Experimental determination of continuous cooling transformation diagram for high strength steel OCHN3MFA. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2020;776:776. doi: 10.1088/1757-899x/776/1/012095.

[7]Krbata M., Eckert M., Krizan D., Barený I., Mikušová I. Hot Deformation Process Analysis and Modelling of X153CrMoV12 Steel. Metals. 2019;9:1125. doi: 10.3390/met9101125.

[8]Barényi I., Majerík J., Krbata M. Structure evolution of 33NiCrMoV15 steel after its processing by various quenching conditions. Proc. Struc. Integr. 2019;23:547 - 552. doi: 10.1016/j.prostr.2020.01.143.

[9]Reza T., Abbas N., Reza S. Drawing of CCT diagrams by static deformation and consideration deformation effect on martensite and bainite transformation in NiCrMoV steel. J. Mater. Process. Technol. 2008;196:321 - 331. doi: 10.1016/

j.jmatprotec.2007.05.059.

[10]García-Mateo C., Caballero F.G., Capdevila C., De Andrés C.G. Estimation of dislocation density in bainitic microstructures using high-resolution dilatometry. Scr. Mater. 2009;61:855 - 858. doi: 10.1016/j.scriptamat.2009.07.013.

[11]Pickering E.J., Collins J., Stark A., Connor L.D., Kiely A.A., Stone H.J. In situ observations of continuous cooling transformations in low alloy steels. Mater. Charact. 2020;165:110355. doi: 10.1016/j.matchar.2020.110355.

[12]Wang Y.F., Li X.F., Song X.L., Dou D.-Y., Shen L.-M., Gong J.-M. Failure analysis of pre-stressed high strength steel bars used in a wind turbine foundation: Experimental and FE simulation. Mater. Corros. 2015;67:406 - 419. doi: 10.1002/maco.201508506.