

Повышение прочности конструкционных сталей путем предварительного нагрева в кислородсодержащей среде*

Афанасьев В.К., Попова М.В.

Сибирский государственный
индустриальный университет
г. Новокузнецк, Российская Федерация
in_afanaseva@mail.ru, m.popova@rdtc.ru

Жибинова И.А.

Кемеровский государственный университет
Новокузнецкий институт-филиал
г. Новокузнецк, Российская Федерация
irina.zhibinova@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты влияния предварительной термической обработки в среде с повышенным содержанием кислорода на микроструктуру и механические свойства конструкционных сталей. Показано, что использование предварительного нагрева в стекломассе в интервале ($A_{c1} - 30^\circ\text{C}$) – A_{c1} для сталей марок 50 и 40X приводит к формированию структуры с дисперсным зернистым перлитом и измельченными выделениями избыточного феррита. Такая структура при нагреве под закалку обеспечивает быстрое образование гомогенного аустенита и задержку роста аустенитного зерна, что обеспечивает наилучшее сочетание прочности и пластичности после окончательной термической обработки. Установлено, что предел прочности возрастает в 1,2-1,3 раза при сохранении характеристик пластичности. Надежность полученных оценок характеристик механических свойств подтверждена результатами статистического анализа.

Ключевые слова: конструкционная сталь, термическая обработка, внешняя среда, микроструктура, механические свойства.

ВВЕДЕНИЕ

Термическая обработка является важнейшим способом обеспечения требуемых свойств конструкционных сталей. Для повышения прочностных свойств используют упрочняющую термическую обработку, чаще всего закалку с отпуском [1-5]. Однако традиционные способы упрочнения не всегда удовлетворяют современным требованиям, предъявляемым к конструкционным материалам. Это привело к появлению комбинированных технологий, совмещающих различные принципы воздействия на металл в процессе формирования полуфабрикатов и изделий. К ним относятся химико-термическая, термомеханическая и термоциклическая обработки [6-9], а также совмещение термической обработки и физических методов воздействия, таких как лазерное облучение, обработка ультразвуком, обработка в электромагнитных полях [10-13].

Известно, что состав внешней среды оказывает существенное влияние на формирование структуры и физико-механических свойств металлических сплавов [14]. Нами были проведены исследования, подтверждающие активное участие среды нагрева в формировании структуры и свойств металлических сплавов при термической обработке. Было показано, что влияние внешней среды определяется изменением соотношения в сплавах элементов

внедрения – водорода, азота, кислорода и углерода. В статьях [15-17] мы показали, что термическая обработка в средах с повышенным содержанием водорода и азота ускоряет протекание фазовых превращений в алюминиевых и железных сплавах, поскольку активизирует диффузию водорода в них.

У.Р. Эвансом был предложен и обоснован механизм химического растрескивания, согласно которому кислород, имеющийся на поверхности металла, ускоряет диффузию водорода внутри него [18, 19]. Основываясь на этом, можно предположить, что внешние среды с повышенным содержанием кислорода также должны влиять на диффузию водорода внутри металла при термической обработке. Для сталей это означает также увеличение скорости диффузии углерода [17]. В качестве доступной среды нагрева с повышенным содержанием кислорода было использовано измельченное бутылочное стекло, представляющее собой смесь оксидов. В качестве предварительного режима термической обработки прутков из конструкционных сталей вместо сфероидизирующего отжига [20] проводили нагрев в стекломассе в интервале ($A_{c1} - 30^\circ\text{C}$)– A_{c1} с последующим охлаждением на воздухе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование влияния предварительной термической обработки в стекломассе на микроструктуру и механические свойства проводили на образцах, выточенных из прутков сталей марок 50 и 40X. В качестве режима предварительной термической обработки использовали нагрев образцов в стекломассе в интервале ($A_{c1} - 30^\circ\text{C}$)– A_{c1} , выдержку при заданной температуре и охлаждение на воздухе.

Образцы из стали помещали в контейнер и засыпали измельченным до порошкообразного состояния стеклом. Состав бутылочного стекла (мас. %): 60,4% SiO_2 , 13,9% Na_2O , 11,8% Al_2O_3 , 6,7% CaO , 2,5% K_2O , 1,4% Fe_2O_3 , 1,4% TiO_2 , 1,3% MnO_4 , 0,3% MgO , 0,3% SO_3 . Контейнеры загружали в печь, нагретую до заданной температуры и выдерживали в течение 1 часа. Охлаждение контейнера с образцами в стекломассе проводили на воздухе. По окончании предварительной обработки стекло механически удаляли с поверхности образцов.

Для сравнения в качестве предварительной термической обработки проводили отжиг при температуре 750°C . Окончательная термическая обработка включала закалку

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции "Материаловедение и металлургические технологии" (RusMetalCon-2018), <https://rusmetalcon.susu.ru>

и низкий отпуск. Нагрев проводили в печах сопротивления типа СНОЛ. Контроль температуры осуществляли с помощью термопары хромель-алюмель.

Микроструктуру образцов изучали при помощи металлографического микроскопа OPTON при увеличении 500.

Характеристики механических свойств сталей – временное сопротивление, относительное удлинение и относительное сужение определяли методом статических испытаний на растяжение согласно ГОСТ 1497-84 “Металлы. Методы испытаний на растяжение”. Испытания цилиндрических образцов проводили на разрывной машине УММ-5 при обычной температуре. На каждый режим обработки использовали по 20-25 образцов.

В случае, если разрыв образца происходил по рискам, в захватах испытательной машины или за пределами расчетной длины образца (при определении относительного удлинения), а также по дефектам металлургического производства, результаты испытаний при дальнейшей обработке данных не учитывали.

Статистическую обработку результатов механических испытаний проводили по известным методикам [21-24] проверки статистических гипотез и вычисления выборочных числовых характеристик при малом объеме выборки ($n < 50$) в режиме “Описательная статистика” Microsoft Excel [25, 26].

Рассчитывали выборочные числовые характеристики механических свойств, такие как среднее значение, медиана, выборочная дисперсия, выборочное среднее квадратическое отклонение, выборочный коэффициент вариации и доверительные интервалы с уровнем надежности 95 %.

При первичной обработке статистического материала, полученного в результате испытаний, принимая гипотезу о нормальном распределении опытных результатов, проверяли наличие резких отклонений опытных данных (выбросов) по критерию Смирнова при уровне значимости $\alpha = 0,05$ [21, 22]. Для этого характеристики механических свойств располагали в виде вариационных рядов, т. е. упорядоченными по мере возрастания и рассчитывали статистики u_1 и u_n первого или максимального члена вариационного ряда соответственно. В случае, если вычисленные значения u_1 и u_n превышали критическое значение $u_{\alpha=0,05}$ элемент выборки признавался аномальным и исключался из массива. Для полученной выборки сокращенного объема повторяли цикл вычислений статистических показателей и процедуру проверки наличия выбросов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для стали 50 проводили предварительную термическую обработку в стекломассе по трем режимам: при 700, 720 и 730°C, затем осуществляли закалку в воду от 830°C и отпуск при 180°C. Режимы термической обработки и механические свойства образцов из стали 50 приведены в табл. 1.

Для стали 40X предварительную термическую обработку в стекломассе проводили при 715, 725 и 740 °C, затем осуществляли закалку от 850°C в масло и отпуск при 180°C. Режимы термической обработки и механические свойства образцов из стали 40X приведены в табл. 2.

Из данных, приведенных в табл. 1 и 2 следует, что в случае проведения предварительной термической обработки в стекломассе (режимы I–III) среднеуглеродистая сталь 50 и низколегированная сталь 40X после закалки и отпуска имеют более высокую прочность по сравнению с режимом IV. Временное сопротивление возрастает в 1,2-1,3 раза при сохранении характеристик пластичности.

О надежности полученных оценок характеристик механических свойств свидетельствуют рассчитанные статистические показатели. Так во всех случаях наблюдается удовлетворительная однородность выборок, коэффициент вариации в рядах данных не превышает 0,04. Надежность средней в выборках подтверждается так же наблюдаемым незначительным отклонением средних значений от медианы. Предельная ошибка выборки (уровень надежности Δ) при $R_{дов}=0,95$ не превышает значений: ± 20 МПа – временное сопротивление, $\pm 0,1\%$ – относительное удлинение, $\pm 1,1\%$ – относительное сужение.

Повышение прочностных свойств исследованных сталей после окончательной термической обработки объясняется тем, что при проведении предварительной обработки в стекломассе в сталях формируется более равномерная и мелкозернистая феррито-перлитная структура. Диспергирование структурных составляющих происходит вследствие того, что внешняя среда с повышенным содержанием кислорода ускоряет диффузию водорода внутри металла и меняет соотношение Н-С-N-O в нем [27]. В результате повышается диффузионная активность углерода и в сталях формируется структура с дисперсным зернистым перлитом и измельченными выделениями избыточного феррита. Такая структура при нагреве под закалку обеспечивает быстрое образование гомогенного аустенита и замедление роста аустенитного зерна.

Таблица 1

Влияние термической обработки на механические свойства образцов из стали 50

Режим	Предварительная термообработка	Окончательная термообработка	Механические свойства (средние значения)		
			Временное сопротивление, σ_B , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное сужение, Ψ , %
I	700 °C, стекломасса	закалка от 830°C в воду и отпуск при 180°C	2003	5,5	39,1
II	720 °C, стекломасса		2032	5,6	38,7
III	730 °C, стекломасса		2087	5,4	37,7
IV	750 °C, воздух		1527	5,9	37,1

Влияние термической обработки на механические свойства образцов из стали 40X

Режим	Предварительная термообработка	Окончательная термообработка	Механические свойства (средние значения)		
			Временное сопротивление, σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное сужение, Ψ , %
I	715 °С, стекломасса	закалка от 850 °С в масле и отпуск при 180°С	2082	5,5	38,6
II	725 °С, стекломасса		1991	5,7	40,1
III	740 °С, стекломасса		2014	5,6	36,5
IV	750 °С, воздух		1620	5,8	36,4

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, испытания механических свойств конструкционной углеродистой и низколегированной стали показали, что при проведении предварительной термообработки в кислородсодержащей среде (стекломассе) прочность стали после закалки и низкого отпуска выше в 1,2-1,3 раза, чем при предварительном отжиге в воздушной среде, причем комплекс характеристик пластичности остается практически на том же уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справочник* / О.Н. Альтгаузен и др.; под ред. Н.Т. Гудцова. – Москва: Металлургиздат, 1956. – 1204 с.
2. Новиков И.И. *Теория термической обработки металлов: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп.* – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.
3. Гуляев А.П. *Металловедение: учеб. для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп.* / А.П. Гуляев, А.А. Гуляев. – Москва: Альянс, 2012. – 643 с.
4. Tong M.W. Structure-mechanical property relationship in a high strength microalloyed steel with low yield ratio: The effect of tempering temperature / M.W. Tong, P.K.C. Venkatsurya, W.H. Zhou // *Materials Science and Engineering*. – 2014. – vol. 609. – P. 209-216. DOI:10.1016/j.msea.2014.05.004
5. Jena P.K. Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel / P.K. Jena, P Ponguru Senthil., K. Siva Kumar // *Journal of Applied Research and Technology*. – 2016. – vol. 14, is. 1(4). – P. 47-53. DOI: 10.1016/j.jart.2016.02.002
6. Федюкин В.К. *Термоциклическая обработка металлов и деталей машин: монография* / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Ленинград: Машиностроение, 1989. – 255 с.
7. Лахтин Ю.М. *Химико-термическая обработка металлов: учеб. для вузов* / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – Москва: Металлургия, 1985. – 256 с.
8. О воздействии термоциклической деформации и последующей термообработки на свойства малоуглеродистой стали / В.К. Афанасьев, А.А. Столбов, А.А. Золотовский и др. // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – 1994 – № 2. – С. 37-39.
9. Влияние термоциклической деформации и отжига на структуру и удельное электрическое сопротивление стали марки СтЗпс / В.К. Афанасьев, А.Н. Прудников, М.В. Попова, В.А. Прудников // *Актуальные проблемы в машиностроении: сборник материалов 1-ой Международной*

научно-практической конференции (Новосибирск, 26 марта 2014г.). – Новосибирск, 2014. – С. 431-434.

10. Влияние тепловых полей на структуру коррозионно-стойких сталей при различных схемах лазерной обработки / Т.В. Тарасова, А.В. Гусаров, К.Э. Протасов, А.А. Филатова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2017. – №7 (745). – С. 37-44.

11. Яровчук А.В. Влияние малоциклового термоциклической обработки на коррозионные и механические свойства облученной нейтронами коррозионно-стойкой стали 12X18H10T / А.В. Яровчук, О.П. Максимкин, К.В. Цай // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2017. – №7 (745). – С. 49-56.

12. Счастливец В.М. Влияние внешних воздействий и магнитного поля на мартенситное превращение в сталях и сплавах / В.М. Счастливец, Ю.В. Калетина, Е.А. Фокина // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2016. – №5 (731). – С. 3-9.

13. Малинов Л.С. Нетиповые режимы термической и деформационно-термической обработок, повышающие свойства сталей // *Металлургия машиностроения*. – 2018. – №1. – С. 43-48.

14. Карпенко Г.В. *Влияние среды на прочность и долговечность металлов: монография*. – Киев: Наукова думка, 1976. – 127 с.

15. Попова М.В. Внешняя среда и поведение алюминиевых сплавов при термической обработке / М.В. Попова, В.В. Герцен // *Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение*. – 1999. – №2. – С. 38-41.

16. Воздействие внешней среды на формирование свойств алюминиевых сплавов при термической обработке / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, В.В. Герцен и др. // *Обработка металлов*. – 2013. – №4 (61). – С. 28-34.

17. Нетрадиционные способы термической обработки алюминиевых и железных сплавов / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, Н.Б. Лаврова и др. // *Обработка металлов*. – 2009. – №3 (44). – С. 3-8.

18. Evans U.R. *Metallic corrosion, passivity and protection*. – London: E. Arnold & Co, 1946. – 863 p.

19. Evans U.R. *The corrosion and oxidation of metals scientific principles and practical applications*. – London: E. Arnold, 1960. – 1094 p.

20. Бернштейн М.Л. *Металловедение и термическая обработка стали: справочник. – 3-е изд., перераб. и доп.* – В 3-х томах. Т.2. *Основы термической обработки* / М.Л.

Бернштейн, А.Г. Рахштадт; под. ред. М.Л. Бернштейна. – Москва: Машиностроение, 1983. – 368. с.

21. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. / М.Н. Степнов, А.В. Шаврин. – Москва: Машиностроение, 2005. – 399 с.

22. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятных закономерностей. Компьютерный подход: монография. / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, С.Н. Постовалов, Е.В. Чимитова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 888 с.

23. Lemeshko V.Y. Application and power of criteria for testing the homogeneity of variances. Part I. Parametric criteria / V.Y. Lemeshko, S.B. Lemeshko, A.A. Gorbunova //

Measurement Techniques. – 2010. – vol. 53, № 3. – P. 237-246. DOI: 10.1007/s11018-010-9489-7

24. Brian S. Everitt. Applied multivariate data analysis / Brian S. Everitt, Graham Dunn. – London: Arnold; New York: Oxford University Press, 2001. – 342 с.

25. Тюрин Ю.Н. Анализ данных на компьютере: учебное пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров. – Москва: ИНФРА-М, 2003. – 544. с.

26. Козлов А.Ю. Статистический анализ данных в MS Excel: учебное пособие / А.Ю. Козлов, В.С. Мхитарян, В.Ф. Шишов. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 320 с.

27. О новом понимании микроструктуры чистого железа / В.К. Афанасьев, С.В. Долгова, М.В. Попова и др. // Металлургия машиностроения. – 2017. – №2. – С. 29-33.

DOI: 10.24892/RIJE/20180407

Improving Strength of Structural Steels by Preheating in an Oxygen-Containing Medium

Afanasyev V.K., Popova M.V.

Siberian State Industrial University
Novokuznetsk, Russian Federation

in_afanaseva@mail.ru, m.popova@rdtc.ru

Zhibinova I.A.

Kemerovo State University, Novokuznetsk Branch
Novokuznetsk, Russian Federation

irina.zhibinova@mail.ru

Abstract. The results of the preliminary heat treatment effect in a medium with a high oxygen content on the microstructure and mechanical properties of structural steels are presented. It is shown that the use of preheating in the glass mass in the range ($A_{c1} - 30^{\circ}\text{C}$) - A_{c1} for steels of grades 50 and 40H leads to the formation of a structure with dispersed granular pearlite and crushed excess ferrite precipitates. Such a structure, when heated for quenching, provides rapid formation of a homogeneous austenite and a delay in the growth of austenite grain, which provides the best combination of strength and plasticity after the final heat treatment. It is established that the tensile strength increases by 1.2-1.3 times while maintaining the plasticity characteristics. The reliability of the obtained estimates of the mechanical property characteristics is confirmed by the results of statistical analysis.

Keywords: structural steel, heat treatment, external medium, microstructure, mechanical properties.

REFERENCES

1. Althausen O.N. et al. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali i chuguna: spravochnik* [Metallurgy and heat treatment of steel and cast iron: a reference book], Moscow, Metallurgizdat, 1956, 1204 p. (in Russ.)

2. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov: ucheb. dlya vuzov. – 4-e izd., pererab. i dop.* [Theory of heat treatment of metals: studies. for universities], Moscow, Metallurgy, 1986, 480 p. (in Russ.)

3. Gulyaev A.P., Gulyaev A.A. *Metallovedenie: ucheb. dlya vuzov. – 7-e izd, pererab. i dop.* [Metal science: studies. for universities], Moscow, Alliance, 2012, 643 p. (in Russ.)

4. Tong M.W., Venkatsurya P.K.C., Zhou W.H. Structure-mechanical property relationship in a high strength microal-

loyed steel with low yield ratio: The effect of tempering temperature, *Materials Science and Engineering*, 2014, vol. 609, pp. 209-216. DOI:10.1016/j.msea.2014.05.004

5. Jena P.K., Senthil P Ponguru, Kumar K. Siva. Effect of tempering time on the ballistic performance of a high strength armour steel, *Journal of Applied Research and Technology*, 2016, vol. 14, is. 1(4). pp. 47-53. DOI: 10.1016/j.jart.2016.02.002

6. V. Fedyukin, Smagorinsky M.E. *Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detaley mashin: monografiya* [Thermocyclic treatment of metals and machine parts: monograph], Leningrad, Mechanical Engineering, 1989, 255 p. (in Russ.)

7. Lakhtin Yu.M., Arzamas B.N. *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov: ucheb. dlya vuzov* [Chemical heat treatment of metals: studies. for universities], Moscow, Metallurgy, 1985, 256 p. (in Russ.)

8. Afanasyev V.K., Stolbov A.A., Zolotovskiy A.A. et al. On the effect of thermal cyclic deformation and subsequent heat treatment on the properties of low-carbon steel [O vozdeystvii termotsiklicheskoy deformatsii i posleduyushchey termoobrabotki na svoystva malouglerodistoy stali], *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya* [News of universities. Ferrous metallurgy], 1994, no.2, pp. 37-39. (in Russ.)

9. Afanasyev V.K., Prudnikov A.N., Popova M.V., Prudnikov V.A. Influence of thermocyclic deformation and annealing on the structure and specific electrical resistivity steel grade St3ps [Vliyaniye termotsiklicheskoy deformatsii i otzhiga na strukturu i udel'noye elektricheskoye soprotivleniye stali marki St3ps], *Aktual'nye problemy v mashinostroyenii: sbornik materialov 1-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konfer-*

entsii [Actual problems in the machine-building], (Novosibirsk, March 26, 2014), Novosibirsk, 2014, pp. 431-434. (in Russ.)

10. Tarasova T.V., Gusarov A.V., Protasov K.E., Filatov A.A. Effect of Thermal Fields on the Structure of Corrosion-Resistant Steels Under Different Modes of Laser Treatment *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, vol. 59, is. 7-8, pp. 433-440. DOI: 10.1007/s11041-017-0168-z

11. Yarovchuk A.V. P.P. Maksimkin, K.V. Tsay Effect of Low-Cycle Thermocycling Treatment on Corrosion and Mechanical Properties of Corrosion-Resistant Steel 12Kh18N10T Irradiated with Neutrons, *Metal Science and Heat Treatment*, 2017, vol. 59, is. 7-8, pp. 446-453. DOI: 10.1007/s11041-017-0170-5

12. Schastlivtsev V.M., Kaletina Yu.V., Fokina E.A. Mirzaev D.A. Effect of External Actions and a Magnetic Field on Martensitic Transformation in Steels and Alloys, *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, vol. 58, is. 5-6, pp. 247-253. DOI: 10.1007/s11041-016-9997-4

13. Malinov L.S. Atypical modes of thermal and deformation-thermal treatments that increase the properties of steels [Netipovye rezhimy termicheskoy i deformatsionno-termicheskoy obrabotok, povyshayushchie svoystva staley], *Metallurgiya mashinostroeniya [Metallurgy of mechanical engineering]*, 2018, no.1, pp. 43-48. (in Russ.)

14. Karpenko G.V. Vliyanie sredy na prochnost' i dolgovechnost' metallov: monografiya [The influence of the environment on the strength and durability of metals: a monograph], Kiev, Naukova doom, 1976, 127 p. (in Russ.)

15. Popova M.V., Herzen V.V. External environment and behavior of aluminum alloys during heat treatment [Vneshnyaya sreda i povedenie alyuminievykh splavov pri termicheskoy obrabotke], *Vestnik Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie [Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences. West Siberian Branch]*, 1999, no.2, pp. 38-41. (in Russ.)

16. V.K. Afanasyev, M.V. Popova, V.V. Herzen et al. Influence of external environment on forming of aluminum alloys characteristics under heat treatment [Vozdeystvie vneshney sredy na formirovanie svoystv alyuminievykh splavov pri termicheskoy obrabotke], *Obrabotka metallov [Processing of metals]*, 2013, no.4 (61), pp. 28-34. (in Russ.)

17 V.K. Afanasyev, S.V. Dolgova, N.B. Lavrova et al. Nonconventional ways of thermal processing of aluminum and iron alloys [Netraditsionnye sposoby termicheskoy obrabotki

alyuminievykh i zheleznykh splavov], *Obrabotka metallov [Metalworking]*, 2009, no.3 (44), pp. 3-8. (in Russ.)

18. Evans U.R. Metallic corrosion, passivity and protection, London, E. Arnold & Co, 1946, 863 p.

19. Evans U.R. The corrosion and oxidation of metals scientific principles and practical applications, London, E. Arnold, 1960, 1094 p.

20. Bernstein, M.L., Rahstadt A.G. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali: spravochnik. – 3-e izd., pererab. i dop. – V 3-kh tomakh. T.2. Osnovy termicheskoy obrabotki* [Metallurgy and heat treatment of steel: a guide. In 3 volumes. T.2. Basics of heat treatment], Moscow, Mechanical Engineering, 1983, 368. p. (in Russ.)

21. Stepnov M.N., Shavrin A.V. *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy: cpravochnik. – 2-e izd., pererab. i dop.* [Statistical methods for processing the results of mechanical tests: Reference book], Moscow, Mechanical Engineering, 2005, 399 p. (in Russ.)

22. Lemesheko B.Yu., Lemesheko S.B., Postovalov S.N., Chimitova E.V. *Statisticheskii analiz dannykh, modelirovanie i issledovanie veroyatnykh zakonomernostey. Komp'yuternyy podkhod: monografiya* [Statistical data analysis, modeling and research of probable patterns. Computer approach: monograph], Novosibirsk, Publishing house of NSTU, 2011, 888 p. (in Russ.)

23. Lemesheko B.Y., Lemesheko S.B., Gorbunova A.A. Application and power of criteria for testing the homogeneity of variances. Part I. Parametric criteria, *Neasurement Techniques*, 2010, vol. 53, no.3, pp. 237-246. DOI: 10.1007/s11018-010-9489-7

24. Brian S. Everitt. Applied multivariate data analysis / Brian S. Everitt, Graham Dunn, London, Arnold; New York, Oxford University Press, 2001, 342 c.

25. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Analiz dannykh na komp'yutere: uchebnoe posobie. – 3-e izd., pererab. i dop.* [Analysis of data on the computer: study guide], Moscow, INFRA-M, 2003, 544. p. (in Russ.)

26. Kozlov A.Yu., Mkhitaryan V.S., Shishov V.F. *Statisticheskii analiz dannykh v MS Excel: uchebnoe posobie* [Statistical analysis of data in MS Excel: a tutorial], Moscow, INFRA-M, 2012, 320 p. (in Russ.)

27. Afanasyev V.K., Dolgova S.V., Popova M.V. et al. About the new understanding of the microstructure of pure iron [O novom ponimani mikrostruktury chistogo zheleza], *Metallurgiya mashinostroeniya [Metallurgy of mechanical engineering]*, 2017, no.2, pp. 29-33. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Афанасьев В.К. Повышение прочности конструкционных сталей путем предварительного нагрева в кислородсодержащей среде / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, И.А. Жибинова // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т.6, №4. – С. 34-38. DOI: 10.24892/RIJE/20180407

Reference to article

Afanasyev V.K., Popova M.V., Zhibinova I.A. Improving strength of structural steels by preheating in an oxygen-containing medium, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2018, vol.6, no.4, pp. 34-38. DOI: 10.24892/RIJE/20180407