

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГРАДУИРОВОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ВИХРЕТОКОВОГО СТРУКТУРОСКОПА

© 2024 г. А. В. Бызов^{1,*}, О. Н. Василенко¹, Д. Г. Ксенофонов¹, М. Г. Минин^{2,**},
И. А. Вайнштейн²

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

²Уральский федеральный университет, Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19
E-mail: *byzovav@imp.uran.ru; **m.g.minin@urfu.ru

Поступила в редакцию 31.05.2024; после доработки 04.06.2024
Принята к публикации 07.06.2024

Описан процесс цементации и закалки сталей 45 и 09Г2С для изготовления образцов для разработки методики вихретокового контроля качества и толщины упрочненных слоев на ферромагнитных основаниях. Проведен структурный анализ образцов в исходном состоянии, в закаленном, а также после цементации и закалки. В результате металлографических исследований было получено, что глубина цементированного слоя стали 45 оказалась равной 250 мкм, а у стали 09Г2С находится в диапазоне 550—800 мкм.

Ключевые слова: цементация, закалка, упрочнение, глубина цементированного слоя, сталь, градуировочные образцы.

DEVELOPMENT OF CALIBRATION SAMPLES MADE OF STEEL 45 AND 09G2S FOR EDDY CURRENT STRUCTUROSCOPE BY CARBURIZING

© 2024 A.V. Byzov^{1,*}, O.N. Vasilenko¹, D.G. Ksenofontov¹, M.G. Minin^{2,**}, I.A. Weinstein²

¹M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of UB RAS,
Russia 620108, Yekaterinburg, st. Sof'ya Kovalevskoy, 18

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia 620002, Yekaterinburg, st. Mira, 19
E-mail: *byzovav@imp.uran.ru; **m.g.minin@urfu.ru

The paper describes the process of carburizing and hardening of 45 and 09G2S steels for the production of samples for the development of a technique for eddy current testing of the quality and thickness of hardened layers on ferromagnetic cores. Structural analysis of samples in the initial state, in the hardened state, as well as after carburizing and hardening was carried out. As a result of metallographic studies it was obtained that the depth of the cemented layer of steel 45 was equal to 250 microns, and in case of steel 09G2C it is in the range of 550-800 microns.

Keywords: carburization, quenching, hardening, depth of carburized layer, steel, calibration samples.

DOI: 10.31857/S0130308224080065

ВВЕДЕНИЕ

Цементацией называется процесс насыщения изделия углеродом, целью которого является повышение твердости на поверхности изделия. Увеличение твердости поверхности приводит к повышению износостойкости детали, при этом упругие свойства сердцевины препятствуют тому, что изделие может сломаться при изгибающих, ударных и вибрационных нагрузках.

Основными контролируемыми параметрами при цементации, как и в случае всех других методов поверхностного упрочнения, являются твердость и ее распределение при увеличении глубины, а также глубина слоя. Под глубиной упрочненного слоя понимается расстояние по нормали от внешней поверхности изделия до границы слоя, твердость которого по Виккерсу равна 550 HV. А под глубиной диффузионного слоя — расстояние от поверхности до точки с содержанием углерода, соответствующим исходному содержанию углерода в стали [1, 2]. Исходя из приведенных определений, можно сказать, что четкой взаимосвязи между указанными понятиями нет.

В настоящее время для контроля толщины в основном используются акустические [3], магнитные методы [4, 5] неразрушающего контроля. Однако акустические методы требуют наличие выраженной границы между сердцевиной и упрочненным слоем изделия. В случае магнитных методов, в частности [5], чувствительность к упрочненным слоям с толщиной меньше 3 мм может быть низкой. Но для контроля слоев меньшей толщины могут быть использованы вихретоковые методы неразрушающего контроля.

Применение вихретоковых методов для контроля поверхностных слоев, которые отличались бы по свойствам от материала сердцевины, остается актуальной задачей. В настоящее время объекты контроля покрытий в своем большинстве имеют следующие комбинации поверхностного слоя и основания: непроводящий ($\mu = 0$; $\sigma = 0$) слой на проводящем ($\mu = 0$; $\sigma \neq 0$) основании [6]; проводящий слой на проводящем основании [7]; непроводящий слой на ферромагнитном ($\mu \neq 0$; $\sigma \neq 0$) основании [8]; проводящий слой на ферромагнитном основании [9]. Поэтому представляет большой интерес разработка вихретоковых методов контроля ферромагнитных покрытий толщиной от 0 до 3 мм на ферромагнитных основаниях, которые получают при поверхностной закалке или термохимической обработке поверхности.

При этом и акустические, и магнитные измерительные системы, равно как и вихретоковые, требуют наличия стандартных образцов, по варьируемой величине которых и величине измеряемого параметра измерительной системы строится градуировочная характеристика. Целью данной работы является разработка методики изготовления градуировочных образцов для дальнейшего их использования при измерениях вихретоковым структуроскопом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе из полос из сталей 45 и 09Г2С была изготовлена серия образцов, которые были подвержены либо только закалке, либо цементации и закалке, либо оставались в состоянии поставки. Размеры образцов составили $50 \times 50 \times 4$ мм.

Цементируемые образцы подвергались твердой цементации, т. е. цементация осуществлялась с использованием карбюризатора. Сам карбюризатор представлял собой смесь из активированного угля (90 %) и углекислого бария (10 %). Время цементации составило для образца из стали 45 составило 3 ч, а для образцов из стали 09Г2С — 3 и 5,5 ч. Температура, при которой образцы цементировались, была 920 °С. Такая температура превышает температуры заковки данных сталей, которые определялись по справочным данным [10] на основе указываемых критических температур A_{c3} , чего требует технология цементации.

Закалка образцов осуществлялась при температуре 850 °С. Время выдержки при данной температуре в муфельной печи составило 16 мин. Время рассчитывалось формулам, приведенных в [11]. Закалка осуществлялась в воду.

Исследование микроструктуры образцов производилось на цифровом микроскопе Carl Zeiss AxioVert 40 MAT. Боковые грани образцов, вдоль которых производилась резка, были отшлифованы с помощью набора наждачной бумаги с зернистостью в диапазоне 60—2500. На полировальном круге в течение 5—10 мин боковые грани образцов обрабатывались оксидом хрома. Травление поверхности боковой грани образца производилось в 4 %-растворе азотной кислоты в этиловом спирте в течение 6 с. С помощью микроскопа исследовалась структура и оценивалась толщина цементированного слоя. Для подтверждения результатов измерения глубины цементированного слоя были проведены исследования на сканирующем нанотвердомере Nysitron TI 750 Ubi, величина максимальной нагрузки при исследованиях составила 6 мН, индентирование выполнялось по диаграмме нагружения, применявшейся ранее в изучении наномеханических свойств материалов различной природы [12],[13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и 2 представлены изображения структуры исследованных образцов из стали 45 и стали 09Г2С соответственно. Увеличение, при котором были получены изображения структуры сердцевины, было $\times 500$. Увеличение, при котором были получены изображения структуры образцов на поверхности при наличии цементированного слоя, было $\times 50$.

Как видно из представленных фотографий, исходная структура углеродистой доэвтектоидной стали Ст45 представляла собой перлит и феррит. Структура закаленной Ст45 представляет собой мелкоигольчатый мартенсит с меньшим размером зерна по сравнению с исходным состоянием стали. Можно заметить, что сердцевина цементированной стали имеет аналогичную структуру, что говорит о том, что процесс цементации не повлиял на структуру сердцевины. Основываясь на рис. 1з, можно утверждать, что глубина цементированного (диффузионного) слоя составляет 250 мкм.

Исходная структура доэвтектоидной стали 09Г2С так же представляет собой смесь феррита и перлита, но с заметно большим содержанием ферритной фазы и крупным зерном феррита. После закалки также можно отметить мелкозернистую мартенситную фазу в сердцевине образцов. Из представленных изображений на рис. 2в и 2г можно отметить, что время цементации прямо влияет на глубину цементированного слоя. В случае, когда время цементации составляло

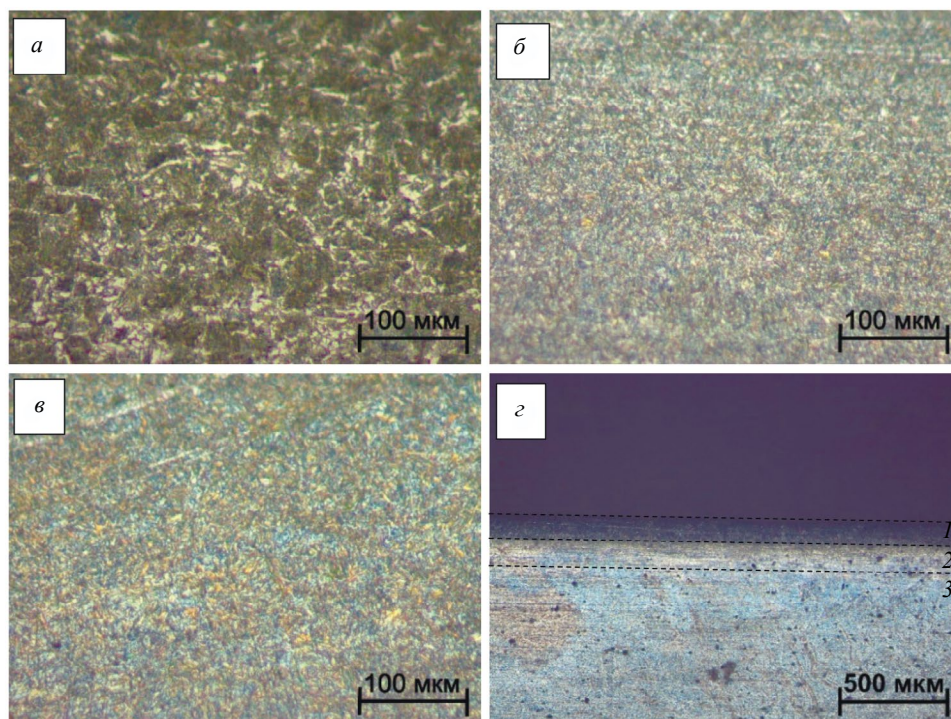


Рис. 1. Структуры образцов из стали 45: *a* — исходное состояние; *б* — после закалки; *в* — после цементации и закалки (сердцевина); *г* — после цементации и закалки (поверхность); 1 — поверхностный слой; 2 — переходный слой; 3 — сердцевина.

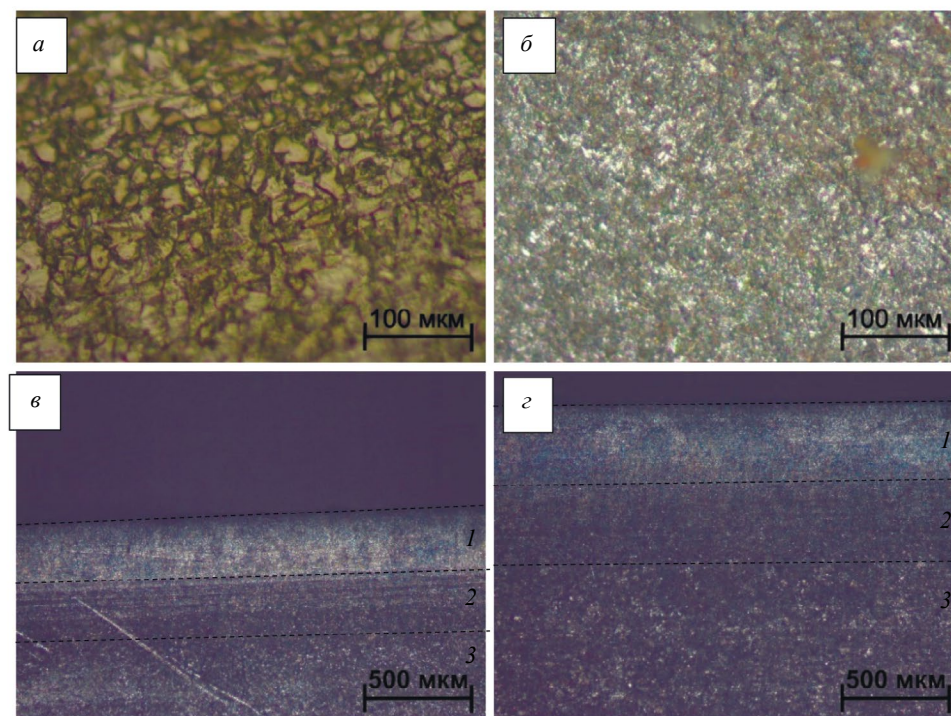


Рис. 2. Структуры образцов из стали 09Г2С: *a* — исходное состояние; *б* — после закалки; *в* — после цементации (3 ч) и закалки; *г* — после цементации (5,5 ч) и закалки; 1 — поверхностный слой; 2 — переходный слой; 3 — сердцевина.

3 ч, глубина слоя оказалась равной 550 мкм и 800 мкм при длительности цементации 5 ч. Глубина слоя у 09Г2С при цементации в течение 3 ч оказалась выше, чем у стали 45.

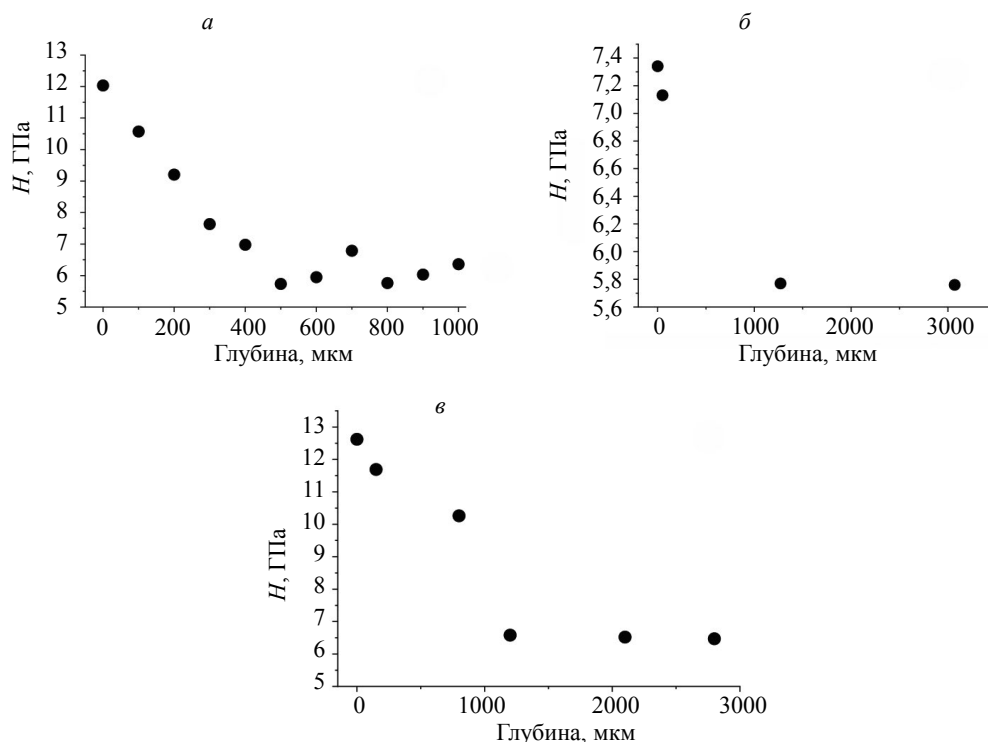


Рис. 3. Профили твердости образцов после закалки и цементации: *a* — Ст45; *б* — 09Г2С (3 ч); *в* — 09Г2С (5,5 ч).

На рис. 3 показаны профили твердости цементированных образцов в зависимости от глубины.

По результатам, показанным на рис. 3, можно отметить, что образец из стали 45 был процементирован на глубину 400—500 мкм. В сравнении с ним, в образцах из сталей с меньшим изначальным содержанием углерода углерод продиффундировал на большие глубины. Глубина цементации для образца из 09Г2С, который цементировался в течение 3 ч, составила не больше 1250 мкм, а для образца из 09Г2С, который цементировался в течение 5,5 ч, — 800—1200 мкм. Наблюдаемые результаты, полученные с помощью микроскопа и нанотвердомера, согласуются между собой.

ВЫВОДЫ

В работе подробно описан процесс цементации и закалки сталей 45 и 09Г2С. Получены изображения в микроскопе образцов в исходном состоянии, в закаленном, а также после цементации и закалки. В результате металлографических исследований и исследований на нанотвердомере были получены схожие результаты измерения глубины цементированного слоя, благодаря чему можно судить о глубине слоя в стальном изделии.

В дальнейшей работе образцы с различными глубинами цементированных слоев будут использоваться в качестве градуировочных при разработке методики и аппаратуры вихретокового контроля глубины поверхностного упрочнения стальных изделий.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Диагностика» №122021000030-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майсурадзе М.В., Рыжков М.А., Беликов С.В., Корниенко О.Ю., Карабанов М.С., Жияков А.Ю. Цементация, нитроцементация и азотирование стальных изделий / Учебное пособие. Мин-во науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 102 с.
2. ГОСТ 33439—2015. Металлопродукция из черных металлов и сплавов на железоникелевой и никелевой основе. Термины и определения по термической обработке. М.: Стандартинформ, 2016. 40 с.
3. Баев А.Р., Майоров А.Л., Тищенко М.А. Ультразвуковой метод анализа поверхностного упрочнения металлических изделий // Литье и металлургия. 2010. № 4. С. 267—271.

4. Бидя Г.В., Михеев М.Н., Костин В.Н. Определение размеров приставного электромагнита, предназначенного для неразрушающего контроля глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев // Дефектоскопия. 1984. № 8. С. 10—16.
5. Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В., Ксенофонов Д.Г. Патент № 2782884 Российская Федерация. Способ селективного контроля глубины и качества поверхностного упрочнения изделий из ферромагнитных материалов: № 2022109732: заявл. 12.04.2022. Опубликовано 07.11.2022; заявитель ИФМ УрО РАН. 1 с.: ил. Текст: непосредственный.
6. Сясько М.В., Соловьев И.П., Соломенчук П.В. Методика измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном электропроводящем основании с автоматическим учетом влияния удельной электропроводности основания // Дефектоскопия. 2023. № 7. С. 58—60.
7. Чернышев А.В. Выбор рабочей частоты вихретокового толщиномера с накладным преобразователем // Приборы и методы измерений. 2014. № 1 (8). С. 73—77.
8. Будалин О.Н., Кульков А.А., Козельская С.О., Щипцов В.С. Патент № 2616071 Российская федерация. Способ магнитоиндукционного измерения толщины диэлектрического покрытия и устройство для его осуществления: № 2016104680: заявл. 11.02.2016. Опубликовано 12.04.2017. Заявитель ОАО Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения. 1 с.: ил. Текст: непосредственный.
9. Чернышев А.В., Загорский И.Е., Шарандо В.И. Контроль толщины хромового покрытия на никелевом основании вихретоковым методом / Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Сборник статей 8-й Международной научно-технической конференции, Могилев, 29—30 сентября 2022 года. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2022.
10. Критические точки стали: сайт. 2015. URL: <https://heattreatment-ru.com/kriticheskie-tochki-stali#> (дата обращения: 17.05.2024).
11. Самохоцкий А.И., Парфеновская Н.Г. Технология термической обработки металлов / Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1976. 311 с.
12. Kossovich E.L., Borodich F.M., Epshtein S.A., Galanov B.A., Minin M.G., Prosina V.A. Mechanical, structural and scaling properties of coals: depth-sensing indentation studies // Applied physics A. 2019. V. 125. Is. 3. DOI: 10.1007/s00339-018-2282-1
13. Brusnitsyna E.V., Grokhovsky V.I., Minin M.G. Nanoindentation of different structures within the metallic part of the Seymchan pallasite pmg // Meteoritics & Planetary Science. 2016. V. 51. P. A184—A184.

REFERENCES

1. Maisuradze M.V., Ryzhkov M.A., Belikov S.V., Kornienko O.Y., Karabanalov M.S., Zhilyakov A.Yu. Cementation, nitrocementation and nitriding of steel products. Ekaterinburg: Ural University Publ., 2021. 102 p. (in Russian).
2. State standard. 33439—2015. Metal products, ferrous metals and alloys on iron-nickel and nickel-based. Heat treatment terms and definitions. Moscow: Standardinform, 2016. 40 p. (In Russian).
3. Baev A.R., Majorov A.I., Tishchenko M.A. Ultrasonic methods of analysis of the metal articles surface hardening // Foundry Production and Metallurgy. 2010. No. 4. P. 267—271.
4. Bida G.V., Mikheev M.N., Kostin V.N. Determination of dimensions of an attachable electromagnet designed for nondestructive testing of depth and hardness of surface-hardened layers // Soviet Journal of Nondestructive Testing. 1984. No. 8. P. 10—16.
5. Patent Russia, no. 2782884, 07.11.2022.
6. Syayako M.V., Soloviev I.P., Solomenchuk P.V. Method of measuring the thickness of non-electrically conductive coating on non-magnetic electrically conductive base with automatic consideration of the influence of specific conductivity of the substrate // Defectoskopiya. 2023. No. 7. P. 58—60.
7. Chernyshev A.V. Choosing of operating frequency of eddy current thickness meter with superimposed transducer // Devices and Methods of Measurements. 2014. No. 1. P. 73—78. (In Russian).
8. Patent Russia, no. 2616071, 12.04.2017.
9. Chernyshev A.V., Zagorskii I.E., Sharando V.I. Chromium plating thickness testing on nickel base by eddy current method. Modern methods and instruments of quality testing and diagnostics of objects' condition. Mogilev, 2022.
10. Critical points of steel. 2015. Available at: <https://heattreatment-ru.com/kriticheskie-tochki-stali#> (accessed 17.05.2024) (in Russian).
11. Samohotsky A.I., Parfenovskaya N.G. Technology of heat treatment of metals. M.: Mashinostroenie, 1976. 311 p. (In Russian).
12. Kossovich E.L., Borodich F.M., Epshtein S.A., Galanov B.A., Minin M.G., Prosina V.A. Mechanical, structural and scaling properties of coals: depth-sensing indentation studies // Applied physics A. 2019. V. 125. Is. 3. DOI: 10.1007/s00339-018-2282-1
13. Brusnitsyna E.V., Grokhovsky V.I., Minin M.G. Nanoindentation of different structures within the metallic part of the Seymchan pallasite pmg // Meteoritics & Planetary Science. 2016. V. 51. P. A184—A184.