

УДК 532.73 : 691.714 : 621.78.015 – 034.14

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ДИФФУЗИОННОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

МЕНЯЙЛО А. И. ^{1*}, *асп.*,
МИЩЕНКО В. Г. ², *д.т.н, проф.*

^{1*} Кафедра прикладной физики, Государственное высшее учебное заведение "Запорожский национальный университет", ул. Жуковского, 66, 69600, Запорожье, Украина, тел. +38 (0612) 89-12-07, e-mail: sanja_menajlo@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-8458-7520

² Кафедра прикладной физики, Государственное высшее учебное заведение "Запорожский национальный университет", ул. Жуковского, 66, 69600, Запорожье, Украина, тел. +38 (0612) 28-75-31, e-mail: mishchen@vandex.ua. ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

Аннотация. *Цель.* Целью данной работы была разработка и испытание системы управления ХТО, которая позволяет гарантированно получать необходимые параметры диффузионного слоя – концентрацию насыщающего элемента C и градиент его распределения, а также толщину слоя B для изделий ответственного назначения. *Методика.* Материалом для исследований выбрана сталь марки 14ХГСН2МА, которую подвергали цементации в твёрдом карбюризаторе при температуре 1300 К. Для исследования кинетики диффузионного насыщения (цементации) был использован дифференциальный dilatометр. *Результаты.* Установлены закономерности изменения линейных размеров трубчатого образца дифференциального dilatометра в процессе всего периода цементации стали 14ХГСН2МА. Использование пустотелого эталона вместо сплошного позволило значительно повысить точность фиксации начала процесса диффузионного насыщения, что можно объяснить более ускоренным прогревом пустотелого эталона. В работе показано, что построенные dilatометрические кривые дают возможность определить и предотвратить непосредственно в процессе насыщения такие нежелательные процессы, как обезуглероживание и внезапное прекращение диффузионного насыщения при недостаточной активности насыщающей атмосферы. После выхода на температуру цементации стали 14ХГСН2МА (1300 К) наблюдалось удлинение трубчатого образца. Указанные результаты подтверждены теоретическими расчетами длины трубчатого образца на основании данных зависимости параметра решетки аустенита от содержания в нём углерода. Также, с помощью результатов металлографического и химического анализа установлено пересыщение опытных образцов стали 14ХГСН2МА углеродом и предложены режимы насыщения для получения требуемых параметров цементированного слоя. *Научная новизна.* Впервые для контроля и управления процесса ХТО стали предложено использование дифференциального dilatометра. В работе указаны особенности конструкции, принцип работы прибора и правила его эксплуатации на примере цементации стали 14ХГСН2МА. *Практическая значимость.* Показано, что с помощью дифференциального dilatометра и предварительно построенных градуировочных графиков можно непосредственно в процессе ХТО сталей гибко изменять активность эндотенциала печей и, следовательно, вносить поправку в параметры диффузионного слоя. Одновременное использование нескольких dilatометров в цементационной печи позволит выявить проблемные зоны печи для устранения их влияния на качество обрабатываемых изделий. Таким образом, использование разработанного прибора в производственном процессе позволит обеспечить высокое качество продукции путём получения наперед заданных параметров диффузионного слоя.

Ключевые слова: специальная сталь; химико-термическая обработка; высокотемпературная цементация; параметры диффузионного слоя; дифференциальный dilatометр

КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ДИФУЗІЙНОГО ШАРУ В ПРОЦЕСІ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ СТАЛІ

МЕНЯЙЛО О. І. ^{1*}, *асп.*,
МІЩЕНКО В. Г. ², *д.т.н, проф.*

^{1*} Кафедра прикладної фізики, Державний вищий навчальний заклад "Запорізький національний університет", вул. Жуковського, 66, 69600, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (0612) 89-12-07, e-mail: sanja_meniailo@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-8458-7520

² Кафедра прикладної фізики, Державний вищий навчальний заклад "Запорізький національний університет", вул. Жуковського, 66, 69600, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (0612) 28-75-31, e-mail: mishchen@vandex.ua. ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

Анотація. *Мета.* Метою даної роботи була розробка та випробування системи керування ХТО, яка дозволяє гарантовано отримувати необхідні параметри дифузійного шару - концентрацію насичуваного елементу C і градієнт його розподілу, а також товщину шару B для виробів відповідального призначення. *Методика.* Матеріалом для досліджень вибрана сталь марки 14ХГСН2МА, яку піддавали цементації у твердому карбюризаторі при температурі 1300 К. Для дослідження кінетики дифузійного насичення (цементації) був використаний диференційний dilatометр. *Результати.*

Встановлено закономірності зміни лінійних розмірів трубчастого зразка диференційного дилатометру в процесі всього періоду цементації сталі 14XГCH2MA. Використання пустотілого еталону замість суцільного дозволило значно підвищити точність фіксації початку процесу дифузійного насичення, що можна пояснити більш прискореним перегріванням пустотілого еталону. У роботі показано, що побудовані дилатометричні криві дають можливість визначити і запобігти безпосередньо в процесі насичення таким небажаним процесам, як зневуглецювання і раптове припинення дифузійного насичення при недостатній активності насичуючої атмосфери. Після виходу на температуру цементації сталі 14XГCH2MA (1300 K) спостерігалось видовження трубчастого зразка. Зазначені результати підтвержені теоретичними розрахунками довжини трубчастого зразка на підставі даних залежності параметра гратки аустеніту від вмісту в ньому вуглецю. Також, за допомогою результатів металографічного та хімічного аналізу встановлено пересичення дослідних зразків сталі 14XГCH2MA вуглецем та запропоновано режими насичення для отримання необхідних параметрів цементованого шару.

Наукова новизна. Вперше для контролю та керування процесу ХТО сталі запропоновано використання диференційного дилатометру. У роботі вказані особливості конструкції, принцип роботи приладу та правила його експлуатації на прикладі цементації сталі 14XГCH2MA. **Практична значимість.** Показано, що за допомогою диференційного дилатометру і попередньо побудованих градувальних графіків можна безпосередньо в процесі ХТО сталей гнучко змінювати активність ендотенціалу печей і, таким чином, вносити поправку в параметри дифузійного шару. Одночасне використання декількох дилатометрів в цементацийній печі дозволить виявити проблемні зони печі для усунення їх впливу на якість оброблених виробів. Таким чином, використання розробленого приладу у виробничому процесі дозволить забезпечити високу якість продукції шляхом отримання наперед заданих параметрів дифузійного шару.

Ключові слова: спеціальна сталь; хіміко-термічне оброблення; високотемпературна цементація; параметри дифузійного шару; диференційний дилатометр

PARAMETERS CONTROL OF STEEL DIFFUSION LAYER IN THE PROCESS OF THERMOCHEMICAL TREATMENT

MENIAILO O. I. ^{1*}, *Gr. St. (Ph. and M.)*

MISHCHENKO V.G. ², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

^{1*} Department of Applied Physics, State Higher Education Establishment "Zaporizhzhya National University", 66, Zhukovsky str., Zaporizhzhya 69600, Ukraine, ph. +38 (0612) 89-12-07, e-mail: sanja_menijailo@mail.ru. ORCID ID: 0000-0001-8458-7520

² Department of Applied Physics, State Higher Education Establishment "Zaporizhzhya National University", 66, Zhukovsky str., Zaporizhzhya 69600, Ukraine, ph. +38 (0612) 28-75-31, e-mail: mishchen@vandex.ua. ORCID ID: 0000-0003-0992-478X

Abstract. Purpose. The aim of this study is to develop and to test management system TCT, which allows to get the required parameters of the diffusion layer - saturating concentration of the element *C* and the gradient of its distribution, as well as the thickness of the layer *B* to products of critical appointment. **Methodology.** As the material for research is selected the steel of the type 14XГCH2MA which was influenced by carburizing in solid carburizer at 1300 K. In order to study the kinetics of diffusion saturation (cementation) was used differential dilatometer. **Findings.** The laws of change of the linear dimensions of the sample tube differential dilatometer during the entire cycle of carburizing steel 14XГCH2MA. The use of standard hollow instead of a solid, greatly improving the accuracy of fixing the beginning of diffusion saturation, which can be explained by more rapid heating of the hollow standard. This shown that the constructed dilatometric curves allow to identify and prevent saturation directly in the process of such undesirable processes as decarburization and sudden cessation of diffusion saturation with insufficient activity saturating the atmosphere. After reaching the temperature of carburizing steel 14XГCH2MA (1300 K) there was an increase over time elongated tubular sample. These results confirmed the theoretical calculations of the length of the tubular sample based on the data dependence of the lattice parameter of austenite on the content of carbon in it. Also, using the results of chemical analysis and metallographic analysis supersaturation prototypes carbon steel 14XГCH2MA and ways saturation mode to obtain the required parameters of cemented layer. **Originality.** For the first time to monitor and control the process suggested the use of steel TCT differential dilatometer. We give the design features, the operating principle of the device and its proper use as an example of carburizing steel 14XГCH2MA. **Practical value.** It is shown that by using differential dilatometer and pre-constructed calibration curves can be directly during the TCT steel flexible to change the activity endopotential furnaces and therefore to amend the parameters of the diffusion layer. Simultaneous use of several dilatometers in carburizing furnace will identify problem areas of the furnace to eliminate their impact on the quality of processed products. Thus, the use of the developed device in the manufacturing process would significantly improve product quality by obtaining preassigned diffusion layer parameters.

Keywords: alloy steel; thermochemical treatment; high-temperature carburizing; diffusion layer parameters; differential dilatometer

Введение

Динамическое развитие авиастроения, автомобилестроения, машиностроения и других отраслей промышленности Украины требует от материаловедов развития и освоения новых материалов и технологий изготовления из них современной и конкурентноспособной продукции.

Детали машин и инструмент могут работать при высоких температурных, знакопеременных нагрузках, в условиях трения и коррозионной или абразивной среде. Поэтому стали, которые используются для изготовления зубчатых колёс, чеканочных штампов, поршневых пальцев, червяков, осей, роликов шарикоподшипников и других изделий, подвергают поверхностному упрочнению [6, 8, 10].

Для получения оптимальных поверхностных свойств изделий из стали используют преимущественно химико-термическую обработку (ХТО). Заслуживают внимания такие виды ХТО, как цементация, азотирование, нитроцементация, которые могут проводиться в газообразной и жидкой среде, с использованием тлеющего электролитно-плазменного разряда и т.д. [5, 11, 13]

С целью повышения теплостойкости зубчатых колёс редукторов газотурбинных двигателей (ГТД) до 670–720 К могут применяться цементированные вторичнотвердеющие стали 13ХЗНВМ2Ф (ВКС-4) и 13ХЗНЗМ2ВФБ (ВКС-10). При пониженных температурах (~570 К) используют преимущественно стали 12Х2НВФА, 14ХГСН2МА, 13ХЗНВМ2Ф, 16ХЗНВФМБ (ВКС-5), М50 NiL [1, 9, 12].

В процессе ХТО указанные выше марки сталей подвергают высокотемпературной выдержке в насыщающей среде, параметры которой и определяют кинетику процесса диффузионного насыщения поверхности атомами углерода, азота и других элементов. При этом факторами, негативно влияющими на качество продукции, являются: внезапное прекращение диффузионного насыщения с течением времени в процессе выдержки, процессы обезуглероживания, деазотирования и превышение заданной концентрации насыщающего элемента на поверхности.

Таким образом, при ХТО необходимо стремиться к формированию заданных параметров диффузионного слоя и получению оптимальных физико-механических и эксплуатационных свойств.

Цель

Целью данной работы является разработка и испытание системы управления ХТО, которая позволяет гарантированно получать необходимые параметры диффузионного слоя – концентрацию насыщающего элемента C и градиент его распределения, а также толщину слоя B для изделий ответственного назначения. С распределением углерода связаны процессы формирования структуры и свойств в поверхностных слоях изделий из стали.

Использование для контроля и управления процессами диффузионного насыщения (цементация, нитроцементация и т.д.) дифференциального dilatометра позволяет успешно решать поставленные задачи.

Методика

Материалом для исследований была выбрана сталь марки 14ХГСН2МА (табл. 1), которую применяют на ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко (г. Запорожье) для изготовления средненагруженных зубчатых колёс с температурой на рабочей поверхности до 450 К. В процессе изготовления зубчатые колёса подвергают ХТО (газовая цементация, нитроцементация).

Таблица 1

Химический состав стали 14ХГСН2МА
A chemical composition of steel 14ХГСН2МА

Содержание легирующих элементов в стали, % мас.								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0,13	0,9	0,6	0,019	0,012	1,5	1,7	0,35	0,04

Химический состав исследуемой стали определяли с помощью спектрометра Spectromax, а содержание углерода в цементированном слое – с помощью газоанализатора LECO-CS-230. Исследование микроструктуры после цементации осуществляли с помощью металлографического микроскопа МИМ-8М. Травление образцов проводили в 4-% спиртовом растворе азотной кислоты.

Исследование кинетики процесса ХТО стали 14ХГСН2МА осуществляли на специально разработанном приборе – дифференциальном dilatометре (рис. 1, а) [2, 3].

С помощью dilatометра и предварительно построенных градуировочных графиков можно осуществлять постоянный контроль изменения параметров диффузионного слоя непосредственно в процессе ХТО: регистрировать начало и завершение диффузионного насыщения, фиксировать процессы обезуглероживания (одновременное деазотирование при нитроцементации), регулировать потенциал атмосферы насыщения для получения насыщенного слоя с наперед заданными параметрами [2, 3, 7].

Разработанный прибор позволяет определять толщину диффузионного слоя B с точностью $\pm 0,001$ мм, а концентрацию углерода C в диффузионном слое – с точностью $\pm 0,01$ %. Тонкостенный трубчатый образец 9 и эталон 5 (см. рис. 1) dilatометра изготавливают из того же материала, что и детали, которые подвергают ХТО. Толкатели 1 и 2 изготавливают из жаростойкого сплава, который не подвергается воздействию науглероживающей среды и не имеет фазовых превращений в рабочем интервале температур (например, нихром Х20Н80) [7].

После достижения температуры ХТО исчезает разница в длине толкателей 1 и 2, которая была вызвана температурным градиентом при нагреве. В процессе ХТО (при неизменной температуре насыщающей атмосферы) образец 9 удлиняется за счёт увеличения в нём концентрации углерода, что связано с увеличением параметра решетки аустенита [8]. В это время эталон 5 сохраняет свои размеры, потому что имеет специальное защитное покрытие от диффузии углерода (например, слой никеля толщиной 0,1 мм). Это дает возможность с высокой точностью измерять удлинение образца Δl с помощью индикаторных часов 11 [7].

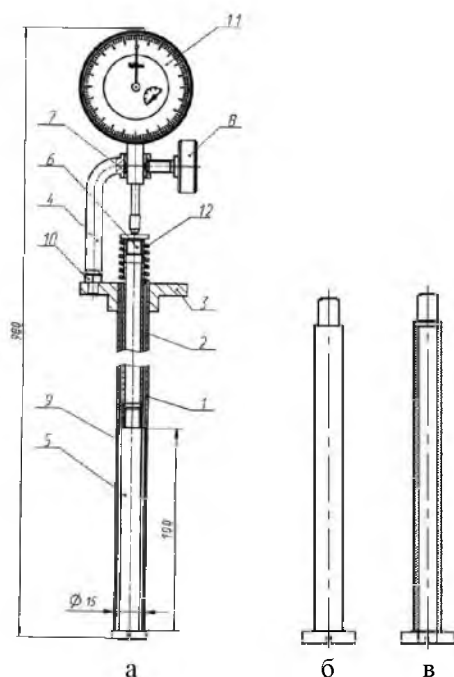


Рис. 1. Дифференциальный dilatometer и эталоны: а – дифференциальный dilatometer (1 – внешний толкатель, 2 – внутренний толкатель, 3 – фланец, 4 – кронштейн, 5 – эталон, 6 – пластина, 7 – втулка, 8 – винт, 9 – образец, 10 – гайка, 11 – индикаторные часы, 12 – пружина); б – сплошной эталон; в – пустотелый эталон [2, 3]

Differential dilatometer and standards: a – the differential dilatometer (1 – an external pusher, 2 – an internal pusher, 3 – a flange, 4 – a bracket, 5 – a standard, 6 – a plate, 7 – the sleeve, 8 – the screw, 9 – a sample, 10 – a nut, 11 – a dial indicator, 12 – a spring); b – a continuous standard; c – a hollow standard [2, 3]

Параметры диффузионного слоя непосредственно в процессе ХТО можно определить с помощью показаний величины Δl по градуировочным графикам. Градуировочные графики зависимостей толщины слоя B и концентрации углерода на поверхности C от удлинения Δl предварительно строят по результатам химического, металлографического и дюрметрического анализов [7].

Результаты

Испытание дифференциального dilatometer проводили при цементации стали 14ХГСН2МА.

Цементацию осуществляли в лабораторной электропечи СШОЛ–11.6/12-МЗ при температуре 1300 ± 10 К с использованием твердого карбюризатора (ГОСТ 2407-83) (рис. 2). После цементации проводили закалку образцов с охлаждением в индустриальном масле непосредственно с температуры ХТО и последующим 3-кратным отпуском при 620 К с выдержкой 1 час. Фиксировали выход печи на температуру цементации (1300 К), который составлял 1740 сек после загрузки контейнера с dilatometer в печь (рис. 3, точка а). После достижения точки а температура в контейнере (1300 К) оставалась неизменной на протяжении всей последующей выдержки. Поэтому точка а выбрана в качестве начала отсчёта продолжительности диффузионного насыщения.

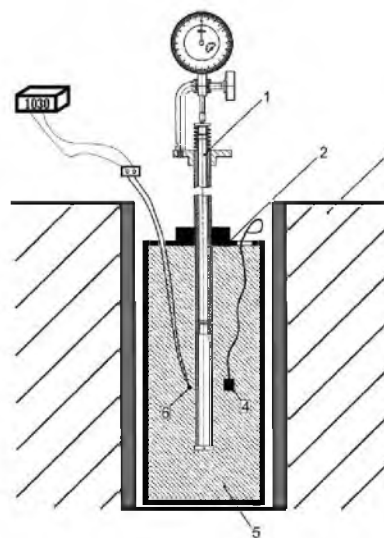


Рис. 2. Схема установки dilatometer в шахтной электропечи СШОЛ – 11.6/12-МЗ при цементации стали 14ХГСН2МА: 1 – dilatometer, 2 – контейнер, 3 – электропечь, 4 – образец-свидетель, 5 – карбюризатор, 6 – термопара

The installation diagram of the dilatometer in the СШОЛ–11.6/12-МЗ mine electric furnace in case of steel 14ХГСН2МА carburizing: 1 – the dilatometer, 2 – the container, 3 – the electric furnace, 4 – a sample witness, 5 – solid carburizing agent, 6 – the thermocouple

Использование пустотелого эталона с толщиной стенки 1,5 мм (см. рис. 1, в) позволяет существенно повысить точность фиксации начала диффузионного насыщения (см. рис. 3, вар. II, кр. 3) по сравнению со случаем использования сплошного эталона (см. рис. 1, б; рис. 3, вар. III, кр. 2). Постепенное увеличение Δl после выравнивания температуры эталона и образца начинается с 1460 сек для варианта II и 1860 сек для варианта III.

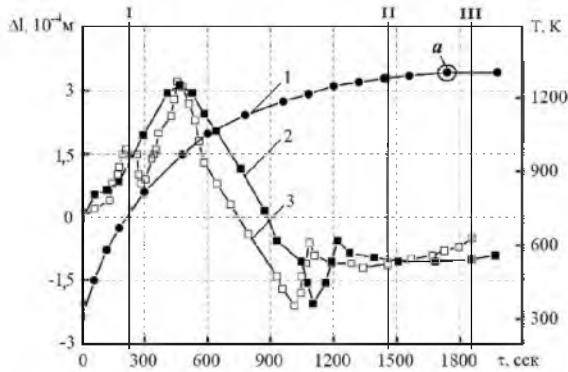


Рис. 3. Зависимости: 1- температуры в контейнере от длительности выдержки; 2, 3 – удлинения Δl трубчатого образца от времени нагрева τ до температуры цементации стали 14ХГСН2МА с использованием сплошного и пустотелого эталона соответственно

Dependences: 1 temperatures in the container from exposure duration; 2, 3 – lengthening Δl of a tubular sample from time of heating τ to temperature of carburizing of steel 14ХГСН2МА with the use of a continuous and hollow standard respectively

Таким образом, при использовании сплошного эталона момент начала увеличения Δl (см. рис. 3, вар. III) происходит уже после выхода на температуру 1300 К (см. рис. 3, т. а). Кроме того, в этом случае наблюдается менее резкое повышение значения Δl после достижения указанной температуры по сравнению со случаем использования пустотелого эталона (см. рис. 3, вар. II). Указанные особенности можно объяснить замедленным прогревом сплошного эталона по сравнению с пустотелым, что сопровождается снижением точности измерений в интервале выхода печи на температуру цементации.

Нагрев стали 14ХГСН2МА в карбюризаторе без предварительной просушки сопровождался некоторым снижением Δl трубчатого образца в диапазоне температур 725...820 К (см. рис. 3, кр. 3, вар. I), что объясняется протеканием процесса окисления стали в связи с использованием карбюризатора, содержащего воду в исходном состоянии. Использование просушенного твёрдого карбюризатора повышает устойчивость от окисления (см. рис. 3, кр. 2). После выхода на температуру цементации (1300 К) на размеры трубчатого образца Δl оказывало влияние только количество в нём диффундированного углерода (рис. 4).

При температуре насыщения (1300 К) структура образца аустенитная поликристаллическая (ГЦК решётка) с незначительным включением труднорастворимых карбидов типа MeC (VC для стали 14ХГСН2МА). Коэффициент линейного расширения аустенита имеет одинаковые значения для всех кристаллографических направлений ([010], [100], [001]). В трубчатом образце при температуре 1300 К поликристаллы аустенита разориентированы

друг относительно друга. Поэтому можно считать, что линейные размеры образца изменяются одинаково во всех направлениях прямо пропорционально изменению параметра решётки аустенита.

На основе данных [4] (рис. 5, а) построен градуировочный график зависимости удлинения Δl трубчатого образца от концентрации в нём углерода (рис. 5, б).

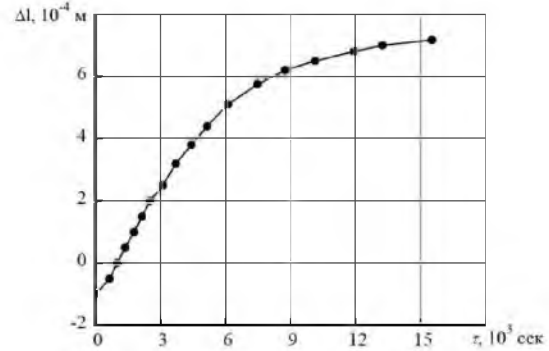


Рис. 4. Зависимость удлинения Δl трубчатого образца от продолжительности диффузионного насыщения τ в процессе цементации стали 14ХГСН2МА

Dependence of lengthening Δl of a tubular sample on duration of diffusion saturation τ in the course of steel 14ХГСН2МА carburizing

Исследование кинетики процесса насыщения стали 14ХГСН2МА изучали с помощью построенной зависимости усреднённого содержания углерода от длительности цементации и изменения микроструктуры поверхностного слоя (рис. 6 и 7 соответственно).

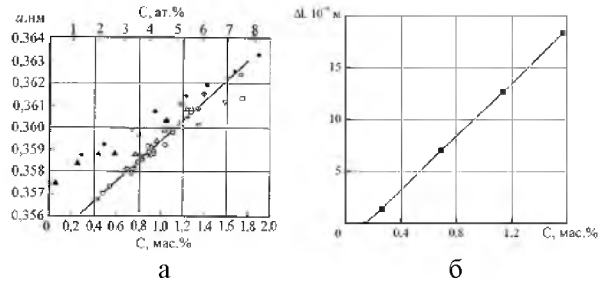


Рис. 5. Зависимости изменения физических свойств от концентрации углерода в стали: а – параметра решётки углеродистого аустенита [4]; б – удлинения Δl трубчатого образца

Dependences of change of physical properties on concentration of carbon in steel: а – lattice parameter of carbon austenite [4]; б – lengthening Δl of a tubular sample

Структура цементированного слоя (непосредственно возле поверхности) образцов-свидетелей стали 14ХГСН2МА являла собой смесь игольчатого мартенсита и остаточного аустенита (см. рис. 7).

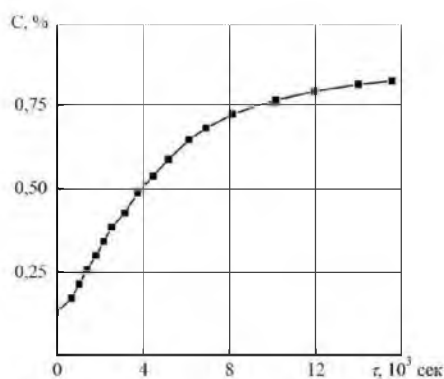


Рис. 6. Зависимость усреднённого содержания углерода в трубчатом образце от длительности цементации

Dependence of the average content of carbon in a tubular sample from carburizing duration

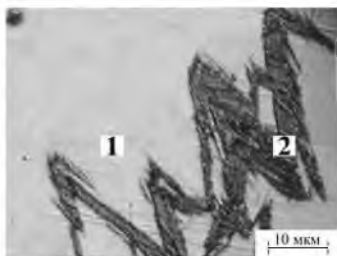


Рис. 7. Микроструктура игольчатого мартенсита (1) и остаточного аустенита (2) в поверхностном слое образца после цементации

A microstructure of an acicular martensite (1) and residual austenite (2) in a surface layer of a sample after carburizing

Изменение содержания углерода (усреднённое значение) в трубчатом образце от длительности процесса диффузионного насыщения (см. рис. 6) рассчитано на основе данных градуировочного графика (см. рис. 5, б) и дилатометрической кривой (см. рис. 4).

После цементации стали 14ХГСН2МА содержание углерода в поверхностных слоях (до глубины 300 мкм от поверхности) трубчатого образца составляло 1,15-1,32 % мас., а рассчитанное усреднённое содержание углерода в образце – 0,83 % (смотри рис. 6).

В реальных условиях высокотемпературной цементации стали 14ХГСН2МА некоторое количество углерода связывается в карбиды и может нарушать прямую пропорциональность между содержанием углерода в аустените и удлинением трубчатого образца (смотри рис. 5, б). При этом достигнутые при цементации значения усреднённой концентрации углерода в трубчатом образце могут отличаться от рассчитанных (см. рис. 6).

Каждой точке градуировочного графика (см. рис. 5, б) соответствует не только значение усреднённой концентрации углерода C в слое

трубчатого образца, но и определённое его распределение по глубине слоя, и соответствует толщине B и структуре цементированного слоя в образце-свидетеле (см. рис. 2). Эти закономерности справедливы только для отдельно выбранного режима ХТО – температура, потенциал атмосферы и продолжительность диффузионного насыщения.

При изменении режима насыщения необходимо проводить дополнительные исследования с целью установления соответствий между усреднённой концентрацией углерода в трубчатом образце (см. рис. 6) и распределением углерода в образце-свидетеле (или цементуемых деталях).

Оптимальное содержание углерода в поверхностном слое для стали 14ХГСН2МА близко 1 %, а наличие высокого содержания аустенита подтверждается результатами микроструктурного анализа. Поэтому для избежания пересыщения поверхности стали углеродом необходимо уменьшать продолжительность процесса ХТО и/или понижать активность эндоатмосферы.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые для контроля и управления процесса ХТО стали предложено использование дифференциального dilatометра. В работе указаны особенности конструкции, принцип работы прибора и правила его эксплуатации на примере цементации стали 14ХГСН2МА. Показано, что с помощью дифференциального dilatометра и предварительно построенных градуировочных графиков можно непосредственно в процессе ХТО сталей гибко изменять активность эндопотенциала печей и, следовательно, вносить поправку в параметры диффузионного слоя. Одновременное использование нескольких dilatометров в цементационной печи позволит выявить проблемные зоны печи для устранения их влияния на качество обрабатываемых изделий. Таким образом, использование разработанного прибора в производственном процессе позволит значительно повысить качество продукции путём гарантированного получения наперед заданных параметров диффузионного слоя.

Выводы

1. Предложен новый прогрессивный способ управления процессами химико-термической обработки сталей, для чего специально разработан дифференциальный dilatометр.
2. С помощью dilatометра и предварительно построенных градуировочных графиков можно непосредственно в процессе ХТО сталей (цементация, нитроцементация и др.) гибко изменять активность эндопотенциала печей и, следовательно, вносить поправку в параметры диффузионного слоя.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ
/ REFERENCES**

1. Авиационно-космические материалы и технологии : [перевод с украинского] / В. А. Богуслаев, А.Я. Качан, Н.Е. Калинина и др. – Запорожье : изд. ОАО «Мотор Сич», 2009. – 383 с.

V. A. Boguslaev, A. J. Kachan, N. E. Kalinina. Aviccionno-kosmicheskie materiali i tehnologii. Translation from Ukrainian. [Aerospace materials and technologies]. – Zaporozhie: izd. ОАО “Motor Sich”, 2009. – 383 p.
<http://catalog.odnb.odessa.ua/opac/index.php?url=/notices/index/IdNotice:171717>

2. Пат. 94867 Україна, МПК G01N25/16, G01N25/48, G01B5/02, G01B7/16. Диференційний дилатометр / Міщенко В.Г.; заявник і патентовласник Запорізький національний університет. – № a201007916 ; заявл. 24.06.2010 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.

Pat. 94867 Ukraine, IPC G01N25/16, G01N25/48, G01B5/02, G01B7/16. Differently the dilatometer / Mischenko V. G.; Savnik, patentblatt Zaporzye national University. No. a ; Appl. 24.06.2010 ; publ. 10.06.2011, bull. No. 11.

<http://base.ukrpatent.org/search/INV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=160074&chapter=description>

3. Пат. 105734 Україна, МПК G01N25/16, G01N25/48, G01B5/02. Диференційний дилатометр / Міщенко В.Г.; заявник і патентовласник Запорізький національний університет. – № a201308274 ; заявл. 01.07.2013 ; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.

Pat. 105734 Ukraine, IPC G01N25/16, G01N25/48, G01B5/02. Differently the dilatometer / Mischenko V. G.; Savnik, patentblatt Zaporzye national University. No. a ; Appl. 01.07.2013 ; publ. 10.06.2014, bull. No. 11.

<http://base.ukrpatent.org/search/INV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=201142&chapter=description>

4. Богумил Прженосил Нитроцементация: Пер. с чеш. Могилевского Л.Д., Рамма С.Н. / Прженосил Богумил - Ленинград: Машиностроение, 1969. - 212 с. – С. 55-56.

L.D. Mogilevsciy, S.N. Ramma Bogumil. Prgenosil Nitro cementacia. [Nitrocarburizing]. - Leningrad: Mashinostroenie, 1969. - 212 p. - Pp. 55-56.
<http://www.twirpx.com/file/691039/>

5. Лазечный И.М. Перетворення аустеніту в цементованій сталі 13Х3НВМ2Ф / І.М. Лазечний О.В., Лисиця, В.Г. Міщенко, В.Л. Сніжної, Г.В. Сніжної // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. - №2. – С. 47-52.

I.M. Lazechnyy, O.V. Lisica, V.G. Mischenko, V.L. Snignoy, G.V. Snignoy. Novi materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni. [New materials and technology in Metallurg mashinobuduvannia]. - 2011. - No. 2. Pp. 47-52.

<http://cyberleninka.ru/article/n/peretvorennya-austenitu-v-tsementovaniv-stali-13h3nvm2f>

6. Про зниження зневуглецювання каліброваної сталі в термічних печах / [В.С. Баздирев, В.І. Іванов, Т.М. Нестеренко, Б.П. Серєда] // Металознавство та обробка металів. – 2002. – №2. – С. 31 – 34.

V.S. Basdirev, V.I. Ivanov, T.M. Nesterenko, B.P. Sereda. Pro znizennia znevuglecyvannia kalibrovanoi stali v termichnih

pechah. [About snejanna snowplane calprofen stall in thermic furnaces]. - 2002. - No. 2. - P. 31 - 34.

http://ptima.kiev.ua/index.php?option=com_content&task=categovy§ionid=8&id=26&Itemid=43&lang=ru

7. Пат. 94552 Україна, МПК C23C8/00, G01N13/00, G01B5/02, G01B21/02. Спосіб визначення параметрів дифузійного шару при хіміко-термічній обробці / Міщенко В.Г.; заявник і патентовласник Запорізький національний університет. – № a201007915 ; заявл. 24.06.2010 ; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.

Pat. 94552 Ukraine, IPC SS/00, G01N13/00, G01B5/02, G01B21/02. The method viznachennya parametru diffusing ball when hmm-termni opobs / Mischenko V. G.; Savnik, patentblatt Zaporzye national University. No. a ; Appl. 24.06.2010 ; publ. 10.05.2011, bull. No. 9.

<http://base.ukrpatent.org/search/INV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=158449&chapter=description>

8. Краснокутський П.Г. Теплотехнічні процеси і конструкції нагрівальних печей: Навч. посібник / П.Г. Краснокутський, Ф.І. Колесник. – К.: ІСДЮ, 1995. – 248 с.

P.G. Krasnokytckiy., F.I. Kolesnik. Teplotehnichni procesi i konstrukcii nagrivalnih pechey: Navch. Posibnik. [Teplotechics procesi, constructs nagrivalni furnaces] . - K.: SDO, 1995. - 248 p.

http://www.e-catalog.name/x/x/x?LNG=&P2IDBN=NBUV&I2IDBN=NBUV_PRINT&S21FMT=infow_wh_print&C21COM=F&Z21MFN=161779

9. Лазечный И.Н. Формирование при ХТО структуры и свойств цементуемых сталей различной теплостойкости / И.Н. Лазечный, И.П. Банас // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2005. - №1. – С. 37-44.

Lazechnyy I.N., Banas I.P. Formirovanie pri HTO strukturi i svoistv cementuemih staley razlichnoi teplostoikosti. [New materials and technology in metallurg mashinobuduvannia]. - 2005. - No. 1. Pp. 37-44.

<http://www.zounb.zp.ua/periodika?id=1233>

10. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.

Lahtin Y.M., Arzamasov B.N. Himiko-termicheskaia obrabotka metalov. [Thermochemical treatment of metals] . Moscow: Metallurgiya, 1985. - 216 p.

<http://www.twirpx.com/file/333929/>

11. Kazerooni N.A., Bahrololoom M.E., Shariat M.H., Mahzoon F., Jozaghi T. Effect of Ringer’s Solution on Wear and Friction of Stainless Steel 316L after Plasma Electronic Nitrocarburising at Low Voltages // Journal of Materials Science & Technology. – 2011. – Vol.27, №10. – P.906-912.

<http://www.imst.org/fileup/PDF/20110002.pdf>

12. Ervin V. Zaretsky. Rolling Bearing Steels – A Technical and Historical Perspective / Ervin V. Zaretsky – National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, Cleveland, 2012 – 16 s.

<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120008557.pdf>

13. Skakov M.K., Rakhadilov B.K., Karipbaeva G.S. Specifics of microstructure and phase composition of high-speed steel R6M5 / Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol.404. – P.20-24.

<http://www.scientific.net/AMM.404.20>

Статья рекомендована к публикации д-ром. техн. наук, проф. В. З. Грицаком (Украина); д-ром. техн. наук, проф. В. В. Лунёвым (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015