

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ И ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Мищенко В. Г., Меняйло А. И.

Статья посвящена решению задач, связанных с обеспечением высокого качества конструкционных и инструментальных сталей в процессе производства изделий на предприятиях машино-, авиа-, судостроения. Предложен новый прогрессивный способ управления процессами химико-термической (ХТО) и термической обработки сталей, для чего специально разработан дифференциальный dilatometer.

Система управления ХТО позволяет гарантировано получать необходимые параметры диффузионного слоя – концентрацию насыщающего элемента и градиент его распределения, а также толщину слоя для изделий ответственного назначения.

Показано, что с помощью дифференциального dilatometer и предварительно построенных градуировочных графиков можно непосредственно в процессе ХТО сталей (цементация, нитроцементация и др.) гибко изменять активность эндотенциала печей и, следовательно, вносить поправку в параметры слоя. Разработанный метод позволяет также контролировать и предотвращать обезуглероживание и окалинообразование сталей.

Стаття присвячена вирішенню задач, які пов'язані із забезпеченням високої якості конструкційних і інструментальних сталей у процесі виготовлення виробів на підприємствах машино-, авіа-, суднобудування. Запропонований новий прогресивний спосіб керування процесами хіміко-термічного (ХТО) і термічного оброблення сталей, для чого спеціально розроблений диференційний dilatometer.

Система керування ХТО дозволяє гарантовано отримувати необхідні параметри дифузійного шару – концентрацію насичувального елемента і градієнт його розподілу, а також товщину шару для виробів відповідального призначення.

Показано, що за допомогою диференційного dilatometer і заздалегідь побудованих градуювальних графіків можна безпосередньо в процесі ХТО сталей (цементация, нитроцементация та ін.) гнучко змінювати активність ендотенциалу печей і, таким чином, вносити поправку в параметри шару. Розроблений метод дозволяє також контролювати та попереджувати знеуглецювання і окалиноутворювання сталей.

The paper is devoted to solve the problems connected with providing high quality constructional and tool steels in the manufacturing processes of machine-, aircraft- and ship building enterprises. A new progressive method to control processes of thermo-chemical and thermal treatment of steels is proposed, and the differential dilatometer is specially developed for its implementation.

Operating system of thermo-chemical treatment allows to get with guarantee all required parameters of the diffusion layer – saturating element concentration and gradient of its distribution, and also the layer thickness for products of high appointment.

It is shown that it is possible to change the activity of endo-potential furnaces flexibly and therefore to correct layer parameters directly in the process of steels thermo-chemical treatment (carburizing, nitrocarburizing, etc.) with the help of the differential dilatometer and previously constructed calibration curves. The developed method also allows to control and prevent steels decarburization and scale forming.

Keywords: alloy steel, thermochemical treatment, thermal treatment, high-temperature carburizing, decarburizing, diffusion layer parameters, differential dilatometer.

Мищенко В. Г.

д-р техн. наук, проф., зав. каф. ПФ ЗНУ
mishchen@yandex.ua

Меняйло А. И.

аспирант каф. ПФ ЗНУ
sanja_menjajlo@mail.ru

ЗНУ – Запорожский национальный университет, г. Запорожье.

УДК 532.73 : 691.714 : 621.78.015 – 034.14

Мищенко В. Г., Меняйло А. И.

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ НАУГЛЕРОЖИВАНИЯ И ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Стремительное развитие таких отраслей промышленности Украины, как авиастроение, машиностроение, судостроение, требует разработки новых перспективных материалов и технологий их обработки для получения конкурентоспособной продукции. Повышение надёжности и долговечности изделий, которые в процессе эксплуатации подвергаются влиянию температуры, знакопеременных нагрузок, работают в условиях трения и коррозионной или абразивной среды, на сегодняшний день является весьма актуальной задачей.

Широкое распространение для поверхностного упрочнения деталей и инструмента приобрела химико-термическая обработка (ХТО). Для получения высококачественных изделий необходимо контролировать и управлять процессами ХТО (в частности, цементацией, нитроцементацией), которые могут проводиться в газообразной или жидкой среде, с использованием вакуумного тлеющего разряда, электролитно-плазменной обработки и т.д. Цементации (диффузионному насыщению поверхности углеродом) и нитроцементации (насыщению углеродом и азотом) подвергают конструкционные легированные стали. Например, для изготовления зубчатых колёс редукторов авиационных двигателей используют стали повышенной и высокой теплостойкости: 14ХГСН2МА, 13Х3НВМ2Ф, 16Х3НВФМБ, М50NiL и др. [1...4]. ХТО указанных марок сталей проводят при высокой температуре (1220...1300 К) в углеродо- и/или азотосодержащей среде. Качество обрабатываемых изделий может существенно снизиться в результате прекращения насыщения в процессе выдержки при ХТО, возникновения таких процессов, как обезуглероживание, деазотирование, а также превышения концентрации углерода (азота) на поверхности.

Качество ХТО определяется формированием таких параметров диффузионного слоя, которые позволяют гарантированно получать оптимальные физико-механические и эксплуатационные свойства изделия. Параметрами диффузионного слоя являются концентрация насыщающего элемента C , градиент его распределения с глубиной слоя, а также толщина слоя B . Структурное состояние и свойства поверхностных слоев стали после окончательных операций ХТО зависят от концентрации углерода на поверхности и его распределения с глубиной слоя.

При длительной высокотемпературной выдержке во время термической обработки (ТО) стали (закалка, отжиг) может происходить обезуглероживание и последующее окисление поверхности обрабатываемого материала. В особенности, такие процессы наиболее сильно проявляются при обработке цементированных и высокоуглеродистых сталей (ШХ15, ШХ15СГ, У8 и др.) и приводят к безвозвратным потерям стали в виде окалины, а также к снижению механических свойств наиболее близкого к поверхности обезуглероженного слоя материала.

Таким образом, нужно управлять величиной параметров диффузионного слоя непосредственно в процессе ХТО для получения оптимальных свойств изделий. При термической обработке необходимо избегать обезуглероживания, которое предшествует окислению, а, следовательно, потерям металла и снижению его свойств.

Целью работы является испытание системы, которая позволяет контролировать и управлять процессами ХТО и ТО специальных сталей. В работе показано, что поставленные задачи можно успешно решить путем использования специально разработанного прибора – дифференциального дилатометра [5...8].

Материалами для исследований были выбраны стали марок 14ХГСН2МА и ШХ15СГ-В (табл. 1). Сталь 14ХГСН2МА применяют на ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко г. Запорожье для изготовления зубчатых колес, которые подвергаются газовой цементации. Сталь марки ШХ15СГ-В производят на ПАО «Днепрспецсталь» г. Запорожья в виде сортового проката; необходимой технологической операцией при изготовлении готовой продукции является термическая обработка (высокотемпературный отжиг) проката.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Содержание легирующих элементов в стали, % мас.									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	W	Mo	V
ШХ15СГ-В	0,98	1,08	0,51	0,014	0,006	1,49	0,16	0,02	0,03	0,01
14ХГСН2МА	0,13	0,9	0,6	0,019	0,012	1,5	1,7	-	0,35	0,04

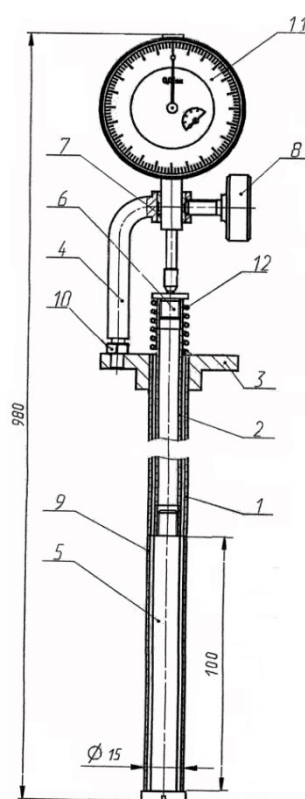


Рис. 1. Дифференциальный dilatометр: 1 – внешний толкатель, 2 – внутренний толкатель, 3 – фланец, 4 – кронштейн, 5 – эталон, 6 – пластина, 7 – втулка, 8 – винт, 9 – образец, 10 – гайка, 11 – индикатор МК, 12 – пружина [9]

Химический состав исследуемых сталей определяли с помощью спектрометра Spectromax, а содержание углерода в цементированном слое стали 14ХГСН2МА – с помощью газоанализатора LECO-CS-230. Распределение микротвёрдости по глубине обезуглероженного слоя стали ШХ15СГ-В определяли на микротвердомере ПМТ-3. Исследование кинетики процессов цементации стали 14ХГСН2МА и отжига стали ШХ15СГ-В осуществляли на разработанном дифференциальном dilatометре (рис. 1).

Использование dilatометра позволяет непосредственно в процессе ХТО стали регистрировать начало и завершение насыщения, фиксировать процесс обезуглероживания (деазотирования), а также регулировать эндотенциал насыщающей среды для получения наперед заданных параметров диффузионного слоя. Толкатели 1, 2 не должны подвергаться

влиянию науглероживающей среды и испытывать фазовых превращений при эксплуатации (изготавливали толкатели из стали 12Х18Н10Т или сплава Х20Н80). Эталон 5 и трубчатый образец 9 изготавливали из той же марки стали, что и детали, подвергаемые ХТО (см. рис. 1). Точность фиксации начала диффузионного насыщения при ХТО можно повысить путем использования пустотелого эталона 5 (толщина стенки 1,5 мм) вместо сплошного за счет более быстрого прогрева в период выхода на температуру ХТО (см. рис. 1) [5, 7, 9].

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 [10]. 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. 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 дюрOMETрического анализов [6, 9].

Испытание дифференциального dilatометра осуществляли при цементации стали 14ХГСН2МА и отжиге стали ШХ15СГ-В.

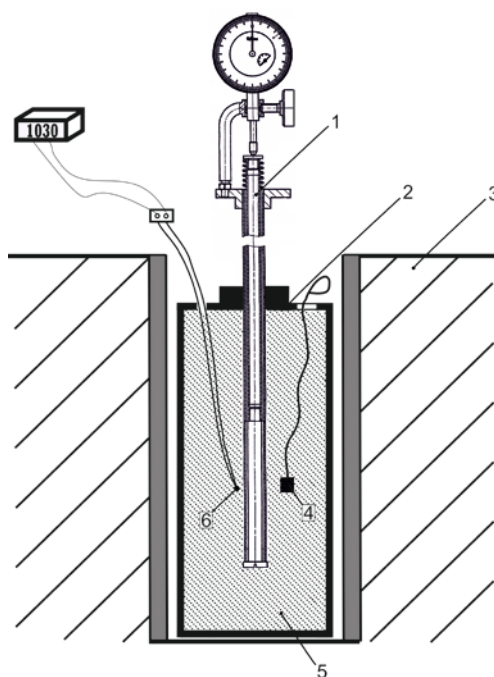


Рис. 2. Схема установки dilatометра в контейнере: 1 – dilatометр, 2 – контейнер, 3 – электропечь, 4 – образец-свидетель, 5 – карбюризатор, 6 – термопара [9]

Цементацию проводили в лабораторной электропечи СШОЛ – 11.6/12-М3 с использованием твердого карбюризатора (ГОСТ 2407-83) при температуре 1300 ± 10 К (рис. 2). Для изучения влияния активности насыщающей среды на параметры диффузионного слоя выбраны следующие составы карбюризатора: 1) 100 % свежего карбюризатора; 2) 50 % свежего и 50 % отработанного карбюризатора (по объёму).

Для повышения температуры в контейнере до уровня 1300 К потребовалось 29 мин. с момента загрузки контейнера с dilatометром в печь, после чего температура в контейнере оставалась неизменной в течении всего процесса изотермической выдержки. На величину Δl

при выдержке влияла только концентрация углерода в образце для выбранного состава карбюризатора, поскольку размеры эталона оставались фиксированными (рис. 3).

Параметры кривых 1 и 2 на рис. 3 для выбранного режима цементации определяются составом насыщающей среды (карбюризатора). Не смотря на то, что свежий карбюризатор (100 %) должен быть более активным, наблюдаются более низкие значения Δl (см. кривая 2, рис. 3), чем при использовании смеси свежего и отработанного карбюризатора (см. кривая 1, рис. 3). Это можно объяснить тем, что во время изотермической выдержки при цементации произошла усадка карбюризатора. В результате последней повысилось содержание CO_2 , то есть изменилось соотношение газов $\text{CO}-\text{CO}_2$ в контейнере, что, в свою очередь, привело к снижению активности карбюризатора.

С помощью газоанализатора LECO-CS-230 было установлено, что после цементации с использованием свежего (100 %) карбюризатора содержание углерода в трубчатом образце (на глубине до 300 мкм от поверхности) составляло 1,15-1,32 % мас.

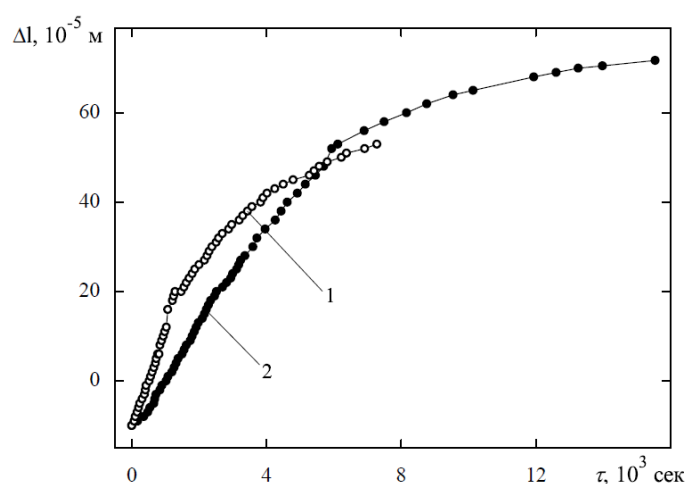


Рис. 3. Зависимость удлинения Δl образца от времени τ в процессе изотермической выдержки при цементации стали 14ХГСН2МА для карбюризатора такого состава: 1) 50 % свежего, 50 % отработанного (по объёму); 2) 100 % свежего.

Для использования дилатометра при ХТО необходимо также построить градуировочные графики зависимостей максимальной концентрации углерода в слое C и толщины слоя B от удлинения Δl образца, на которых каждой точке графика соответствует определенное распределение концентрации углерода и структурного состояния с глубиной слоя. Таким образом, можно управлять величиной параметров диффузионного слоя непосредственно в процессе ХТО при наличии возможности изменять потенциал атмосферы насыщения (газовая, вакуумная цементация и др.).

Отжиг стали ШХ15СГ-В проводили в шахтной электропечи СШОЛ – 11.6/12-М3 при температуре 1070 К на протяжении 19 час. в атмосфере воздуха (рис. 4). Атмосфера термической печи, которая не является защитной (в особенности, атмосфера воздуха), способствует обезуглероживанию и последующему окислению поверхности стали [11].

Эталон и трубчатый образец дилатометра были изготовлены из стали ШХ15СГ-В (см. табл. 1). Внешняя поверхность эталона, а также внутренняя поверхность и торцы трубчатого образца были покрыты слоем никеля толщиной 0,1 мм для защиты от окисления.

Образцы-свидетели и дилатометр были загружены в печь после её предварительного разогрева до 1070 К. За начало отсчёта времени при построении кривой зависимости сокращения образца Δl от времени τ в процессе отжига стали ШХ15СГ-В на воздухе (рис. 9, а, кривая 2) было выбрано момент полного разогрева трубчатого образца до температуры отжига (через 720 сек после загрузки дилатометра).

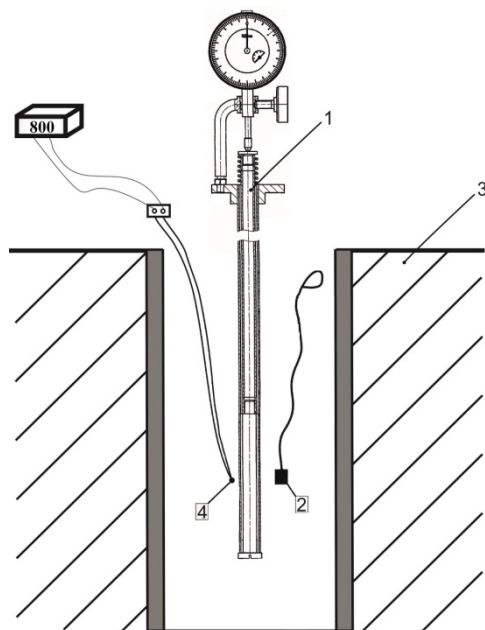


Рис. 4. Схема установки дилатометра в шахтной электропечи СШОЛ – 11.6/12-МЗ при отжиге стали ШХ15СГ-В: 1 – дифференциальный дилатометр, 2 – образец-свидетель, 3 – электропечь, 4 – термопара

При отжиге стали ШХ15СГ-В в электропечи (в атмосфере воздуха) увеличивалась толщина окисленного слоя образцов-свидетелей в зависимости от продолжительности выдержки (смотри рис. 4; рис. 5, а). Проведённые измерения микротвёрдости поверхностных слоёв образцов-свидетелей стали ШХ15СГ-В после отжига на воздухе позволили установить величину обезуглероженного слоя, которая не превышала 0,03 мм на протяжении всего процесса отжига.

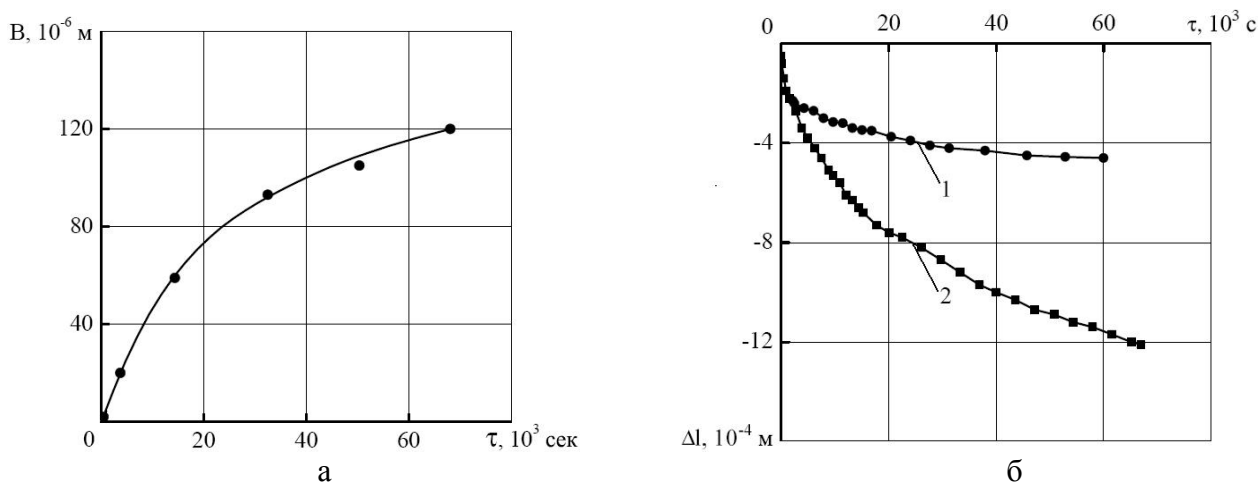


Рис. 5. Зависимости изменения параметров образцов от продолжительности τ отжига стали ШХ15СГ-В: а – толщины B окисленного слоя образца-свидетеля при отжиге на воздухе; б – сокращения Δl трубчатого образца: 1 – в атмосфере камерной печи ПАО «Днепро-спецсталь»; 2 – на воздухе

Таким образом, уменьшение длины Δl трубчатого образца со временем τ (смотри рис. 5, а, кривая 2) могло происходить под воздействием одновременного влияния таких факторов: уменьшения параметра решётки аустенита в результате обезуглероживания и процессов окисления.

Разработанный dilatометр был также использован при исследовании процесса обезуглероживания сортового проката стали ШХ15СГ-В (смотри табл. 1). Испытание прибора проводили в камерной печи термического цеха ПАО «Днепроспецсталь» г. Запорожье.

Отжиг стали ШХ15СГ-В проводили по следующему режиму: нагрев проката на протяжении 5 час. до температуры 1070 К, выдержка при этой температуре длительностью 17 час (разогрев садки – 3 час, продолжительность выдержки разогретого проката – 14 час); охлаждение с печью до температуры 950 К на протяжении 6 час, выдержка при этой температуре продолжительностью 6 час; охлаждение до 850 К на протяжении 5 час.; охлаждение до 290 К при открытой двери печи.

Dilatометр размещали в месте установления термопары 1 в камерной печи (рис. 6) в момент выхода на температуру отжига (1070 К). Трубочатый образец дифференциального dilatометра находился рядом с верхней частью садки.

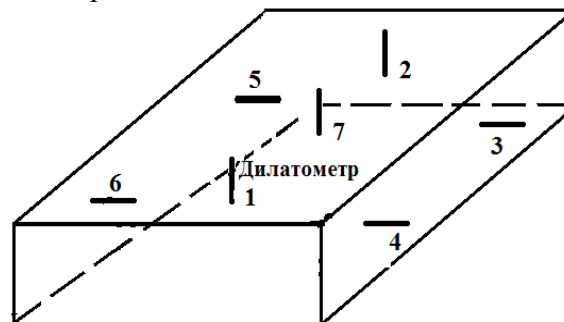


Рис. 6. Схема размещения термопар и dilatометра в рабочем пространстве камерной печи

С помощью металлографического и дюрOMETрического методов анализа определена глубина обезуглероженного слоя, которая составляла около 0,6 мм (рис. 7). Наблюдали постепенное повышение микротвёрдости от 3050 до 4500 МПа в направлении от поверхности до сердцевины стали.

Изменение размеров трубчатого образца Δl от времени выдержки τ при отжиге стали ШХ15СГ-В в атмосфере камерной печи термического цеха ПАО «Днепроспецсталь» представлено на рисунке 5 (кривая 1). Уменьшение значения Δl (сокращение образца) вызывает необходимость изменения эндотенциала атмосферы печи для довосстановления размеров образца к исходному значению, что позволяет избежать дальнейшего обезуглероживание и окисление сортового проката.

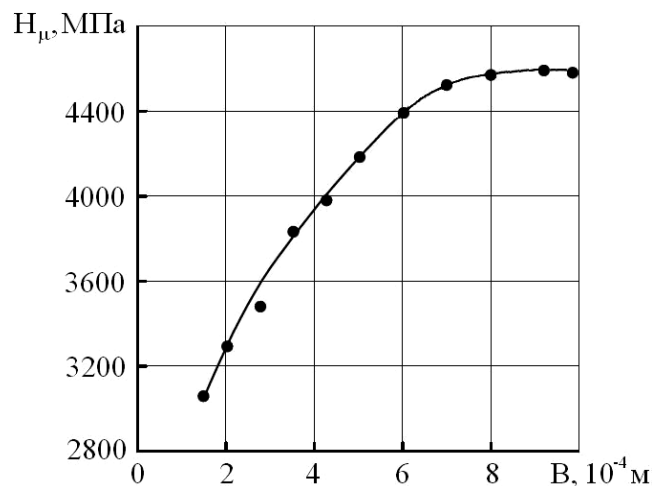


Рис. 7. Зависимость распределения микротвёрдости от глубины обезуглероженного слоя стали ШХ15СГ-В после отжига

С помощью разработанного дифференциального dilatометра и градуировочных графиков можно контролировать степень обезуглероживания непосредственно в процессе отжига, как стали ШХ15СГ-В, так и других сплавов, с целью полного его предупреждения путём образования защитной атмосферы в камерной печи [12].

ВЫВОДЫ

1. В работе представлены результаты испытаний разработанного дифференциального dilatометра, с помощью которого можно управлять процессами химико-термической и термической обработки сталей.
2. С помощью dilatометра и градуировочных графиков можно непосредственно в процессе ХТО стали гарантированно получать необходимые параметры диффузионного слоя путем изменения активности эндопотенциала атмосферы насыщения.
3. Разработанный прибор и способ его эксплуатации позволяют предупреждать нежелательные явления обезуглероживания и окисления непосредственно в процессе отжига специальных сталей путём изменения потенциала атмосферы в термической печи.
4. Результаты испытаний dilatометра при отжиге дали возможность внедрить в производство рекомендации по изготовлению сортового проката сталей ШХ15 і ШХ15СГ на электрометаллургическом предприятии ПАО «Днепрспецсталь» г. Запорожье.
5. Конструкция дифференциального dilatометра и способа его применения защищены патентами Украины на изобретения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Лазечний І.Н. Формирование при ХТО структуры и свойств цементунных сталей различной теплостойкости / И.Н. Лазечный, И.П. Банас // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2005. – №1. – С. 37–44.
3. Ervin V. Zaretsky. Rolling Bearing Steels – A Technical and Historical Perspective / Ervin V. Zaretsky – National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center, Cleveland, 2012 – P.16
4. Лахтин Ю.М. Химико-термическая обработка металлов / Ю.М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.
5. Пат. 94867 Україна, МПК G01N25/16, G01N25/48, G01B5/02, G01B7/16. Диференційний dilatометр / Міщенко В.Г.; заявник і патентовласник Запорізький національний університет. – № а201007916; заявл. 24.06.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.
6. 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. – № а201007915; заявл. 24.06.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.
7. Пат. 105734 Україна, МПК G01N25/16, G01N25/48, G01B5/02. Диференційний dilatометр / Міщенко В.Г.; заявник і патентовласник Запорізький національний університет. – № а201308274; заявл. 01.07.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 11.
8. Пат. 108280 Україна, МПК C21D 3/00, C21D 9/00, C21D 11/00, G01F 17/00, G01N 13/00, G01N 25/00, G01N 25/16, G01B 5/02, G01B 21/02 Спосіб регулювання процесу знеуглецювання деталей при їх термічному обробленні / Міщенко В.Г.; заявник і патентовласник Запорізький національний університет. – № а 201308273; заявл. 01.07.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 7.
9. Меньяйло А.И. Управление параметрами диффузионного слоя в процессе химико-термической обработки стали / А.И. Меньяйло, В.Г. Міщенко // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. Серия: «Стародубовские чтения 2015». Вып. 80. – Днепропетровск: ПГАСА, 2015. – С. 197–203.
10. Богумил Прженосил Нитроцементация: Пер. с чеш. Могилевского Л.Д., Рамма С.Н. / Прженосил Богумил - Ленинград: Машиностроение, 1969. – 212 с. – С. 55-56.
11. Про зниження знеуглецювання каліброваної сталі в термічних печах / [В.С. Баздирев, В.І. Іванов, Т.М. Нестеренко, Б.П. Середа] // Металознавство та обробка металів. – 2002. – №2. – С. 31–34.
12. Краснокутський П.Г. Теплотехнічні процеси і конструкції нагрівальних печей: Навч. посібник / П.Г. Краснокутський, Ф.І. Колесник. – К.: ІСДО, 1995. – 248 с.