

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТАЛИ ГАДФИЛЬДА, УПРОЧНЕННОЙ ВЗРЫВОМ, СПЕКТРАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Маргарита Константиновна Акимова

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант, тел. (913)375-39-19, e-mail: akimrit@mail.ru

Надежда Федоровна Чайка

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры фотоники и приборостроения, тел. (913)911-88-72, e-mail: chayka@triwe.net

В статье показана актуальность применения в оборонной промышленности стали Гадфильда, упрочненной ударно-волновым нагружением. Приводится методика оценки содержания основных составляющих сплава по интенсивности спектральных линий. Выбрана принципиальная схема стилометра и вычислены параметры дифракционной решетки, используемой в качестве диспергирующей системы.

Ключевые слова: эмиссионный спектральный анализ, дифракционная решетка, сталь Гадфильда, ударно-волновое нагружение.

STUDY OF THE PROPERTIES OF HADFIELD STEEL, STRENGTHENED BY EXPLOSION, SPECTRAL METHOD

Margarita K. Akimova

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, phone: (913)375-39-19, e-mail: akimrit@mail.ru

Nadezhda F. Chayka

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Photonics and Instrument Engineering, phone: (383)344-29-29, e-mail: chayka@triwe.net

The article shows the relevance of the application of Hadfield steel strengthened by shock-wave loading in the defense industry. The basic characteristics of Hadfield steel properties are evaluated with regard to the main spectral lines of the alloy components. The schematic diagram of the stylometer is shown and the parameters of the dispersing lattice are calculated.

Key words: emission spectral analysis, diffraction grating, Hadfield steel, shock-wave loading.

Введение, актуальность, цель статьи

Отечественная оборонная промышленность постоянно нуждается в новых материалах с набором предварительно заданных, иногда достаточно противоречивых, физико-механических и химических свойств [1]. Создание таких материалов актуально и требует соответствующих методов контроля качества,

в частности, изучения их химического состава. Спектральные методы в последнем случае обладают рядом известных преимуществ и нередко является безальтернативными [2].

Эмиссионный спектральный анализ является экспрессным методом, позволяющим определять химический состав образцов и проб различных веществ, например, сплавов черных или цветных металлов, и выявлять в них содержание легирующих добавок, различных примесей и т. д.

Традиционно в военном деле широко применяются различные виды и марки сталей. В России металлургия является важнейшей отраслью экономики, второй после нефтегазовой, по выплавке стали в мировом рейтинге наша страна находится на 5-м месте.

Одной из первых полученных легированных сталей в мире была аустенитная высокомарганцевая сталь Гадфильда. В СССР выплавку аналогичной стали освоили в 1936 г., и в настоящее время она выпускается под маркой 110Г13Л. Этот уникальный материал характеризуется чрезвычайно высокой износостойкостью и пластичностью, причем даже малые отклонения в химическом составе сильно изменяют свойства сплава [3].

Современные работы по усовершенствованию данного материала связаны с исследованиями его свойств, приобретаемых под влиянием ударно-волновых нагрузок [4]. При этом происходит упрочнение стали, и оно сопровождается существенным изменением ее физико-механические свойств. Также вследствие ударно-волновой нагрузки, вероятно, происходит изменение химического состава поверхностного слоя стали, и, таким образом, исследования, направленные на выявление изменений спектральным методом являются актуальной задачей.

Данная работа посвящена определению рабочих условий спектрального анализа стали Гадфильда, упрочненной взрывом, и целью статьи является обоснование требований к спектральному оборудованию, предназначенному для исследования изменений в составе стали и выбор его основных характеристик.

Ударно-волновое упрочнение стали Гадфильда

Сталь Гадфильда впервые получена в результате выплавки английским металлургом Робертом Гадфильдом в 1882 г. Данная сталь обладает необычайно высокой износоустойчивостью при трении, в тоже время она имеет низкую твердость и довольно высокую ударную вязкость.

Подобные свойства материала обусловлены химическим составом: Fe – 82 %, Mn – 12 %, C – 1 %, Si – 1 %, другие примеси – 4 %. Характерной его особенностью является высокая концентрация марганца. Такое соотношение углерода и марганца дает аустенитную структуру стали. Микроструктуру стали Гадфильда (рис. 1, б) можно сравнить с микроструктурой обычной аустенитной стали (см. рис. 1, а).

Такой состав и структура стали дают повышенную склонность к упрочнению и высокую пластичность при деформации. Это обусловлено повышенной

способностью к наклепу, которая намного выше, чем у других сталей, обладающих аналогичной твердостью. Наклеп – это упрочнение сплава, обусловленное изменением структуры и фазового состава материала в процессе пластической деформации.

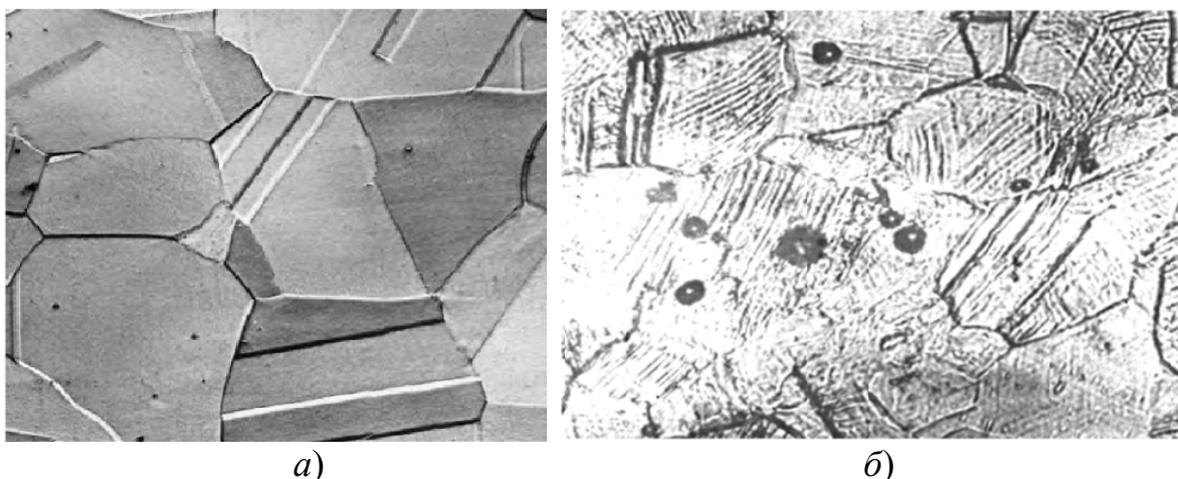


Рис. 1. Микроструктура сталей:

а) микроструктура аустенитной стали; б) микроструктура стали Гадфильда

Одним из первых применений стали Гадфильда стало изготовление траков танковых гусениц еще в Первую мировую войну, что позволило увеличить их ресурс пробега с 500 км (рекорд периода Первой мировой войны) до 4 800 км, т. е. почти в 10 раз. Также, начиная с 1915 г. и вплоть до 80-х гг. XX в., из нее изготавливались пехотные шлемы для солдат.

Применение данной стали эффективно не только в оборонной промышленности: из нее изготавливают изделия, работающие преимущественно на истирание, и сильно нагруженные детали, которые должны быть износостойкими. К примеру, конусы и другие компоненты дробилок, зубья, стенки экскаваторов, железнодорожные крестовины и стрелочные переводы и т.д.

В последнее время ударно-волновое нагружение применяется как технология упрочнения различных материалов, в данном случае стали. Ударные волны неразрушающей амплитуды, рассеивающие энергию в процессе распространения внутри стали, приводят к необратимым изменениям их структуры, а следовательно, к изменениям ее свойств.

Изменения, зафиксированные в материале после ударных волн, представляют практический и научный интерес. Их воздействие на металлические сплавы сопровождается различными механическими и физико-химическими процессами, в том числе остаточным упрочнением верхних слоев. Даже при малой величине обработки ударными волнами структурные изменения в материале очень существенны.

Не существует единого механизма упрочнения сплавов при воздействии ударных волн. Степень упрочнения определяется амплитудой ударной волны и зависит от количества искажений, произошедших в решетке стали после ударной волны. В результате ударно-волнового нагружения изменяются физические и механические свойства стали Гадфильда. Кроме того, происходят изменения в химическом составе поверхностных слоев, и помимо этого можно ожидать внедрение химических элементов под влиянием взрыва.

Применение спектрального анализа для стали Гадфильда после ударно-волнового нагружения позволит установить изменения качественных и количественных свойств стали. В результате проведения спектрального анализа можно определить количественный состав элементов, узнать содержание примесей, выявить наличие инородных включений и их концентрацию и т. д.

Спектральный анализ состава стали

Спектральный анализ позволяет обнаружить составляющие стали, объемное содержание которых лежит в пределах $10^{-4} - 10^{-6} \%$. Эмиссионный спектральный анализ химического состава металлов и сплавов осуществляется по оптическим спектрам излучения элементов анализируемой пробы, возбуждаемых внешним источником. Анализ состава производится на основании обнаружения и измерения интенсивности характерных для каждого химического элемента спектральных линий.

Для эмиссионного качественного и полуколичественного анализа сталей и сплавов применяются специализированные визуальные приборы – стилоскопы, само название которых произошло от английского steel, что в переводе означает «сталь». С помощью стилоскопов можно контролировать химический состав непосредственно в процессе плавки.

Количественный спектральный анализ проводится с помощью стилометров и основывается на зависимости интенсивностей спектральных линий определяемых элементов от их концентрации в анализируемой пробе.

При атомно-эмиссионном анализе зависимость интенсивности I линий характеризуемого спектра от концентрации C элемента выражается формулой Ломакина:

$$I = a \cdot C^b, \quad (1)$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от свойств аналитической линии, источника возбуждения, соотношения концентраций элементов в пробе.

Коэффициенты a и b в формуле (1) определяются опытным путем в каждом отдельном случае. Линию определяемого элемента называют аналитической линией. Интенсивность аналитической линии соотносится с интенсивностью линии сравнения. Нередко в качестве линии сравнения выбирают линию основы сплава. К примеру, при анализе сталей используют в качестве линии сравнения линию железа, как основы сплава.

Зачастую в пробу намеренно вводят элемент (внутренний стандарт) спектральная линия которого выбрана в качестве линии сравнения. Линия сравнения (гомологичная) должна соответствовать требованиям: иметь близкие энергии возбуждения; принадлежать атомам или ионам одинаковой кратности; относиться к спектрам элементов, имеющих близкую энергию ионизации, температуру плавления и кипения, а также близкие химические свойства.

В качестве источников света для эмиссионного анализа обычно используют различные виды плазмы, включая плазму электрической искры и др. Необходимо возбудить электрическим разрядом атомы, для того что бы они начали испускать свет.

Эмиссионные спектры большинства металлов лежат в ближнем ультрафиолетовом (УФ) и видимом диапазонах. Исходя из химического состава стали Гадфильда, можно определить длины волн испускания элементов, входящих в состав стали, и, следовательно, выбрать рабочий диапазон спектрального прибора. Для определения аналитических атомных линий химических элементов воспользуемся таблицей.

Спектроаналитическая таблица элементов

| Химический элемент | Аналитические атомные линии, λ , нм |
|--------------------|---|
| Fe | 290,416; 302,064 |
| Mn | 271,8269; 280,1081 |
| C | 175,183; 247,856 |
| Si | 198,8994; 390,552 |
| H | 486,133; 656,272 |
| O | 557,7; 630,02 |
| N | 337,124; 486,13; 678,74 |

Из сокращенной спектроаналитической таблицы элементов, видно, что для охвата всех необходимых эмиссионных линий достаточно проанализировать область длин волн λ в диапазоне от 170 до 680 нм.

Оборудование для спектрального анализа и основные характеристики

Принципиальная схема спектрометра включает в себя осветительную часть, спектральную часть, в которой происходит разложение излучения на монохроматические составляющие, а также приемно-регистрающую систему. Осветительная часть, в свою очередь, состоит из источника излучения и конденсора.

Спектральный прибор для анализа стали Гадфильда должен охватывать видимый и УФ диапазон длин волн. Следовательно, для обеспечения подходящего рабочего диапазона нужно выбрать соответствующий диспергирующий элемент. В вакуумном ультрафиолете работают только вогнутые решетки, так как в этой области большие потери излучения и количество элементов в оптической схеме должно быть минимизировано. Во всех других областях спектра

применение плоских решеток возможно, но вогнутые решетки находят все более широкое применение за счет того, что одновременно выполняют функцию диспергирующего и фокусирующего элемента.

Современные стилометры являются исключительно дифракционными с отражательными профилированными решетками. Дифракционные решетки применяются как плоские, так и вогнутые, с шагом нарезки до 3 600 штрих/мм.

В настоящее время принято использовать различные оптические схемы спектральных приборов с вогнутыми решетками, так как это позволяет сделать схемы более компактными и минимизировать количество элементов в схеме. В большинстве схем с вогнутыми решетками основные элементы, такие как входная щель, дифракционная решетка и приемная система, располагаются на круге Роуланда, диаметр которого равен радиусу кривизны решетки [5]. Наиболее оптимальной компоновка оптической системы характерна для схемы Пашена – Рунге, изображенной на рис. 2. Она широко применяется в современных разработках, так как эффективно работает при небольших радиусах кривизны.

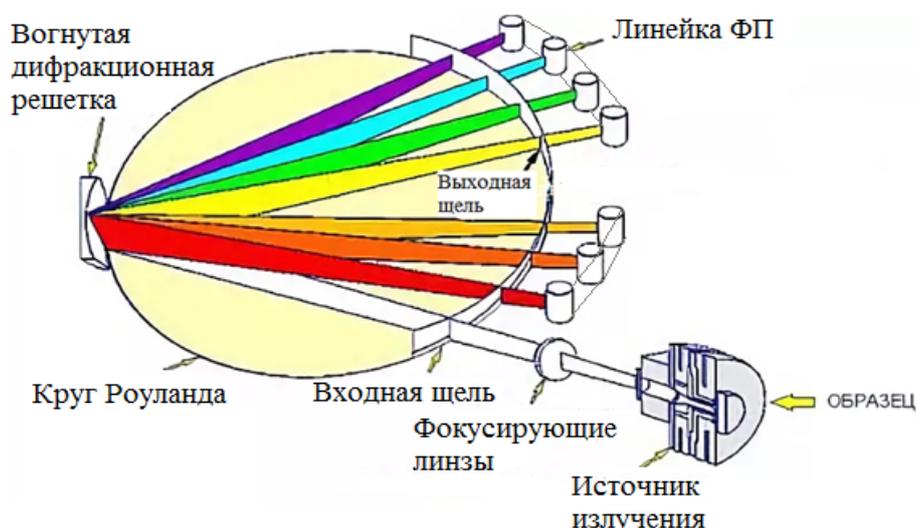


Рис. 2. Схема Пашена – Рунге

Дифракционная решетка является одним из основных элементов спектрального прибора. Основное уравнение дифракционной решетки:

$$\sin \varphi + \sin \varphi' = kN\lambda, \quad (2)$$

где φ – угол падения, град;

φ' – угол дифракции пучков, град;

k – спектральный порядок;

N – число штрихов на 1 мм;

λ – длина волны, нм [6].

Исходя из основного уравнения дифракционной решетки (2), выбирается оптимальное количество штрихов для рабочего диапазона длин волн от 175 до

680 нм. Поскольку углы падения обычно не превышают 50–55°, то левая часть уравнения (2) изменяется в пределах:

$$|\sin \varphi + \sin \varphi'| \leq 1,5.$$

Отсюда можно найти N , приняв в качестве условия, что решетка работает в 1-м порядке дифракции, т. е. при $k = 1$, поскольку в этом случае область свободной дисперсии наиболее широкая.

Результаты расчета числа штрихов дифракционной решетки следующие: для длины волны $\lambda = 175$ нм получили $N = 8\,570$ штр/мм, а для длины волны $\lambda = 680$ нм $N = 2\,200$ штр/мм. Таким образом, изменение числа штрихов превышает 3 раза, и, следовательно, использование единственной дифракционной решетки нецелесообразно, так как не сможет обеспечить разложение света на монохроматические составляющие во всем диапазоне с одинаково высоким разрешением.

Отличительной чертой спектрального прибора для анализа стали, упроченной взрывом, заключается в необходимости одновременной регистрации всего спектра с целью обнаружения изменений в химическом составе образцов под воздействием ударно-волнового нагружения. Для обеспечения одновременной регистрации с высокой разрешающей способностью можно использовать две или даже три вогнутые дифракционные решетки, помещенные в одном блоке, например, одна под другой. В приборах с плоской отражательной решеткой, как правило, применяется сканирование спектра, т. е. последовательное выделение узких спектральных интервалов.

Заключение

Подводя итоги вышесказанному, стоит отметить, что эмиссионный спектральный анализ высокомарганцевой стали Гадфильда обладает рядом особенностей, которые задают специфические требования к спектральному оборудованию. Для реализации экспериментальных исследований нужны стилометры с улучшенными техническими характеристиками.

С этой целью был проведен анализ существующих принципиальных схем дифракционных спектральных приборов. В качестве оптимальной выбрана принципиальная схема Пашена – Рунге с вогнутой решеткой, позволяющая без снижения разрешающей способности уменьшить габаритные размеры прибора, сделав его более компактным.

Определен спектральный диапазон работы стилометра, а также обоснован и выполнен выбор параметров дифракционной решетки, предназначенной для использования в качестве диспергирующей системы для пространственного разделения монохроматических составляющих излучения при анализе изменений в составе стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шехонин А. А., Домненко В. М., Гаврилина О. А. Методология проектирования оптических приборов : учеб. пособие. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2006. – 91 с.
2. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. – М. : Наука, 1972. – 376 с.
3. Гуськов А. В., Милевский К. Е., Яковлев А. Г. Сравнительный анализ упрочнения стали Гадфильда статической и высокоскоростной нагрузкой // Наука. Промышленность. Оборона. XV Всероссийская научно-технической конференция. (Новосибирск, 23–25 апреля 2014 г.). – Новосибирск : НГТУ, 2014. – С. 207–210.
4. Исследование физико-механических свойств стали Гадфильда при ударно-волновом нагружении / А. В. Гуськов, К. Е. Милевский, Н. Ф. Чайка, В. А. Ломан // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 3. – С. 232–236.
5. Смирнова М. В., Воронин А. А., Бурбаев А. М. Способ повышения разрешающей способности спектрофотометра с вогнутой дифракционной решеткой // Изв. вузов. Приборостроение. – 2013. – Т. 56, № 5. – С. 10–14.
6. Чайка Н. Ф., Шлишевский В. Б. Теоретические основы спектральных приборов. Изучение и расчет основных характеристик диспергирующих элементов и систем сканирующих спектральных приборов : учеб. пособие. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 77 с.
7. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. Таблицы спектральных линий. – М. : Наука, 1977. – 800 с.
8. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. – Л. : Машиностроение, 1975. – 312 с.
9. Глазырин А. В., Кузнецов А. А. Оценка структурных параметров стали методом атомно-эмиссионной спектроскопии // Омский научный вестник. – 2012. – № 113. – С. 253–258.
10. Лабусов В.А. Многокристальные сборки многоканальных анализаторов атомно-эмиссионных спектров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Специальный выпуск. – 2007. – Т. 73. – С. 13–17.
11. Власов В. И., Комолова Е. Ф. Высокомарганцовистая сталь. – М. : Машиностроение, 1972. – 220 с.

© М. К. Акимова, Н. Ф. Чайка, 2019