

УДК 620.18:537.62:534.22

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 65Г

Пилипчук А.П.<sup>1</sup>, Степаненко Д.А.<sup>2</sup>, Бурак В.А.<sup>2,3</sup>, Киндрук А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УО «Военная академия Республики Беларусь»

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>3</sup>Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрено влияние термообработки (закалки и отпуска при различных температурах) на акустические и магнитные свойства стали 65Г. Показано, что магнитные характеристики являются более чувствительными к фазовому составу образца по сравнению с акустическими. Полученные результаты могут быть использованы для разработки простого в реализации метода неразрушающего контроля качества термообработки сталей в случаях, когда качество термообработки оказывает критическое влияние на эксплуатационные свойства и надежность стальных конструкций.

**Ключевые слова:** термообработка, закалка, отпуск, фазовый состав, скорость звука, остаточная намагниченность.

## EFFECT OF HEAT TREATMENT ON ACOUSTIC AND MAGNETIC PROPERTIES OF 1065 STEEL

Pilipchuk A.P.<sup>1</sup>, Stepanenko D.A.<sup>2</sup>, Burak V.A.<sup>2,3</sup>, Kindruk A.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Military academy of the Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

<sup>3</sup>Institute of applied physics of the National academy of science of Belarus

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The article considers effect of heat treatment (quenching and tempering at different temperatures) on acoustic and magnetic properties of 1065 steel. It is shown that magnetic properties are more sensitive to phase content of the sample in comparison with acoustic ones. The obtained results can be used for development of simple in implementation non-destructive method for controlling quality of heat treatment in the cases, when this quality has critical effect on operation properties and reliability of steel structures.

**Key words:** heat treatment, quenching, tempering, phase content, sound velocity, remanent magnetization.

Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, г. Минск, 220113, Республика Беларусь  
e-mail: dstepanenko@bntu.by

Изменение фазового состава сталей при термообработке существенно влияет на их эксплуатационные свойства и поэтому его контроль чрезвычайно важен для критических применений, в которых от свойств стальных конструкций зависит безопасность человека, в частности, в броневой защите. Обычно фазовый состав определяется по металлографическим шлифам, однако этот метод является деструктивным и может быть неточным при незначительных изменениях состава. К современным методам определения фазового состава относится метод рентгеновской дифракции, однако он требует применения сложного и дорогостоящего оборудования. С учетом сказанного представляет интерес создание простых в реализации неразрушающих методов контроля фазового состава, основанных на измерении коррелирующих с условиями термообработки физических свойств стали. Примерами подходящих характеристик являются акустические и магнитные свойства [1].

Для измерений использовались образцы стали 65Г со следующими режимами термообработки:

1. Закалка на мартенсит. Температура 815 °С, выдержка 9 мин (для образцов в виде пластин размером 200×150×6 мм), охлаждение в воде.

2. Без обработки (горячекатаный прокат).

3. Закалка (с режимами, указанными в п. 1) + отпуск. Температура отпуска 450 °С, выдержка 1,5 часа, охлаждение на воздухе.

4. Закалка + отпуск. Температура отпуска 510 °С, выдержка 1,5 часа, охлаждение на воздухе.

Скорость звука измерялась эхо-импульсным методом с помощью дефектоскопа УД2-12 с совмещенным преобразователем с рабочей частотой 5,0 МГц. Для этого из пластин вырезались цилиндрические образцы диаметром 40 мм. Для минимизации влияния качества поверхности на результаты измерений образцы шлифовались с двух сторон. Обработка всех образцов за один установ обеспечивала их равную толщину (5,474 мм). Акустический контакт между преобразователем и образцами обеспечивался с помощью тонкого слоя трансформаторного масла. Эхо-сигналы записывались с помощью цифрового осциллографа UTD2102С, вход которого подключался к гнезду контроля видеосигнала дефектоскопа. Точное измерение временного интервала  $\Delta t$  между последовательными эхо-сигналами затруднялось наличием шумов, в связи с чем он определялся автокорреляционным методом. Расчет автокорре-

ляционной функции производился с помощью программы Mathcad.

В качестве магнитной характеристики образцов был выбран градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности  $\nabla H_m$ , измерявшийся с помощью импульсного магнитного анализатора ИМА-6. Перед измерениями образцы, приобретшие случайную остаточную намагниченность при шлифовании на магнитной плите, размагничивались в поле электромагнита. Начальное намагничивание образцов производилось в поле с амплитудой  $|H| = 250$  кА/м, после чего определялась величина  $\nabla H_m$  по одному из трех вариантов:

1. После снятия намагничивающего поля.

2. После снятия намагничивающего поля и частичного размагничивания полем с амплитудой  $|H_p| = 30$  кА/м, противоположным по отношению к намагничивающему полю.

3. После снятия намагничивающего поля и частичного размагничивания полем с амплитудой  $|H_p| = 70$  кА/м.

Результаты измерений скорости звука представлены на рисунке 1.

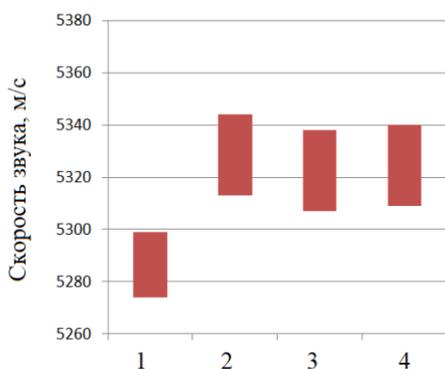


Рисунок 1 – Результаты измерений скорости звука

Как видно, между образцами 2–4 не наблюдается статистически значимых различий, что ограничивает применимость акустического метода для контроля фазового состава. Недостатком акустического метода также является необходимость предварительной подготовки (шлифования) поверхностей контролируемых изделий. Мартенситная структура (образец 1) характеризуется статистически значимым снижением скорости звука по сравнению с образцами 2–4. Теоретически повышение модуля упругости при закалке на мартенсит должно приводить к росту скорости звука,

однако помимо модуля упругости на скорость звука влияют степень искажения кристаллической решетки и упругая анизотропия, более сильно выраженные в мартенсите и приводящие к снижению скорости звука [1].

Результаты измерений величины  $\nabla H_m$  представлены на рисунке 2.

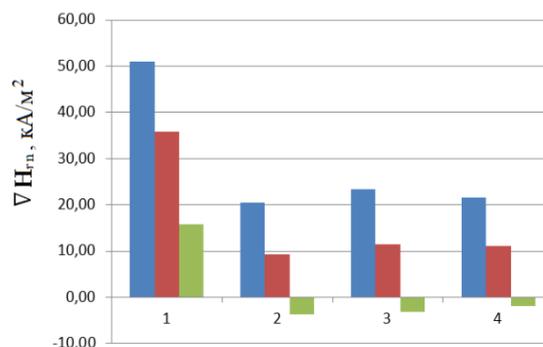


Рисунок 2 – Результаты измерений величины  $\nabla H_m$

Как видно, образец с мартенситной структурой является трудно размагничиваемым (магнитотвердым) и имеет очень значительное (до 2,5 раз) различие в магнитных свойствах по сравнению с образцами 2–4. Между образцами 2–4, как и в случае со скоростью звука, не наблюдается значительного различия, что объясняется близкими фазовыми превращениями, проходящими при рассматриваемых температурах отпуска. Возможным способом увеличения чувствительности остаточной намагниченности к структурному состоянию является выбор величины размагничивающего поля  $|H_p|$ , соответствующей равной или близкой к нулю величине градиента остаточной намагниченности на образце, подвергнувшемся термообработке при максимальной или минимальной из рассматриваемых температур.

Магнитный метод контроля фазового состава по сравнению с акустическим не предъявляет повышенных требований к качеству поверхности образцов, а также дает объемную оценку фазового и структурного состояния, позволяющую нивелировать возможные погрешности, связанные с несовершенством структуры образца.

#### Литература

- Gür, C.H. Comparison of magnetic Barkhausen noise and sound velocity measurements for characterisation of steel microstructures / C.H. Gür, İ. Çam // 9th European Conference on NDT. – Berlin, 2006.