

## Многопараметровый метод неразрушающего контроля качества термоупрочнённых изделий

Буда Г.В., Ничипурук А.П., Сташков А.Н.



*В результате наших исследований были разработаны и физически обоснованы многопараметровые методы неразрушающего контроля эксплуатационных свойств различных деталей и изделий, качество которых невозможно проконтролировать по одной характеристике.*

Для неразрушающего контроля структуры и механических свойств стальных и чугуновых изделий разработаны многопараметровые методы, включающие в себя коэрцитивную силу, другие магнитные и контролируемые технологические характеристики изделий.

**Коэрцитивная сила.** Коэрцитивная сила  $H_c$  и коэрцитиметры типа ИФМ-1 используются наиболее широко. Её величина обусловлена задержкой необратимых процессов при перемагничивании ферромагнитного материала. Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям, такая задержка может осуществляться неферромагнитными включениями (или пустотами) различных размеров, дисперсности и концентрации, градиентами напряжений, обусловленными дислокациями разной плотности, границами зёрен и блоков мозаики и другими причинами.

Существует значительная чувствительность коэрцитивной силы к многим структурным изменениям. Однако этот факт отражает и обратную сторону структурной чувствительности  $H_c$ : отдельные одновременно протекающие структурные изменения могут повлиять на неё противоположным образом и в итоге привести к отсутствию зависимости  $H_c$  от параметров самого процесса, например, от температуры отпуска закалённых средне- и высокоуглеродистых сталей. Возникла необходимость в привлечении других характеристик, обладающих отличным от  $H_c$  характером структурной и фазовой чувствительности.

**Намагниченность насыщения.** Она является фазочувствительной характеристикой.

Согласно закону аддитивности для намагниченности насыщения  $M_s$  гетерогенных систем она аддитивно складывается из намагниченностей насыщения составляющих ферромагнетик фаз. Совместно с коэрцитивной силой  $M_s$  измеряют дифференциальными магнитными приборами и применяют при контроле качества закалки деталей подшипников качения, инструмента, контроле остаточной пористости и структуры стальных деталей, полученных способом порошковой металлургии и др.

**Релаксационные намагниченность и магнитная восприимчивость.** При контроле качества среднего и высокотемпературного отпуска углеродистых и низколегированных сталей с содержанием углерода свыше 0,3% при температурах отпуска свыше 250°C коэрцитивная сила непригодна, поскольку при таком отпуске она изменяется немонотонно. Дополнительным параметром контроля здесь может служить релаксационная намагниченность  $M_{Hr}$ , обусловленная величиной обратимого смещения 180-градусных доменных границ. Она, главным образом, определяется средним размером магнитного домена (расстояние между доменными границами), а также зависит от размера неферромагнитных включений и плотности дислокаций.

Релаксационную намагниченность напрямую измерять затруднительно. Поэтому были найдены косвенные магнитные характеристики, которые позволили объединить чувствительность  $H_c$  и  $M_{Hr}$ . Таковыми являются релаксационная коэрцитивная сила тела и вторичные остаточные намагниченности тела, полученные

после намагничивания и перемагничивания до заранее подобранных одинаковых значений магнитной индукции или внешнего магнитного поля. Были получены выражения, связывающие твёрдость многих марок сталей в закалённом и отпущенном при разных температурах состояниях с коэрцитивной силой, релаксационными намагниченностью и магнитной восприимчивостью в различных расчётных моделях (линейной, квадратичной и др.). Для неразрушающего контроля твёрдости таких сталей применяются магнитные структуроскопы МС-2.

**Контроль качества массивных изделий после термообработки.** Сложность в неразрушающем контроле возникает у массивных изделий, подвергаемых операции закалки, но вследствие низкой прокаливаемости после закалки они обладают структурой не мартенсита, а сорбита, или другими типами перлитных структур. После операции «закалки» или нормализации они подвергаются отпуску: рельсы – при  $T_{отп}=450^{\circ}\text{C}$ , трубы нефтяного сортамента – при более высоких температурах. Все изменения здесь протекают на основе феррито-перлитной структуры: у рельсов – от сорбита закалки к сорбиту отпуска.

Был применён двухпараметровый метод контроля прочностных (предел текучести и временное сопротивление при разрыве) и пластических (относительное удлинение и сужение) свойств рельсов и труб с помощью магнитного структуроскопа МС-2.

**Контроль механических свойств стального проката.** Одним из способов повышения надёжности контроля прочностных, пластичес-

ких и вязких свойств проката по коэрцитивной силе является магнитохимический метод. Его суть состоит в том, что в уравнениях связи механических свойств с параметрами контроля кроме показаний коэрцитиметра КИФМ-1 присутствует процентное содержание элементов плавочного химического состава, а иногда и характеристики технологического процесса прокатки (температура конца прокатки, степень обжата в последнем проходе и др.). Метод внедрён на Нижнетагильском металлургическом комбинате для контроля прочностных, пластических и вязких свойств листового и сортового проката.

**Контроль глубины и твёрдости поверхностно-упрочнённых слоёв на деталях.** К многопараметровому может быть отнесён коэрцитиметрический метод контроля глубины и твёрдости поверхностно-упрочнённых слоёв на различных деталях при использовании двух и более приставных электромагнитов (ПЭМ) с разными размерами полюсов. При неразрушающем контроле качества слоев, закаленных с нагрева токами высокой частоты, возникла необходимость применять два ПЭМ: один для контроля глубины слоя, другой – твердости. Такой контроль с помощью коэрцитиметров КИФМ-4КВ был внедрён для шеек коленчатых валов двигателя автомобиля ЗИЛ-157 из стали 45 и дизельного двигателя из стали 40ХФА и других деталей автомобилей серии ЗИЛ.

Более подробно с представленными результатами и выводами можно ознакомиться в публикациях<sup>[1-9]</sup>.

<sup>1</sup> Бида Г.В., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле. - Дефектоскопия, 2000, №10, с. 3-28.

<sup>2</sup> Бида Г.В. Дифференциальный магнитный метод неразрушающего контроля и фазового анализа. - Дефектоскопия, 2000, №1, с. 26-43.

<sup>3</sup> Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Ч.1. Атлас свойств. Ч.2. Справочник.- Екатеринбург: УрО РАН, 2005. - 218 с.

<sup>4</sup> Бида Г.В. Магнитные свойства термоупрочненных сталей и неразрушающий контроль их качества. - М.: Маршрут, 2006, - 304 с.

<sup>5</sup> Бида Г.В. Магнитные характеристики тела – параметры неразрушающего контроля качества отпуска закаленных изделий. - Дефектоскопия, 2002, №6, с. 19-33.

<sup>6</sup> Бида Г.В., Сташков А.Н. Комплексное использование магнитных свойств сталей при неразрушающем контроле качества термообработанных деталей. - Дефектоскопия, 2003, №4, с. 67-74.

<sup>7</sup> Бида Г.В., Ничипурук А.П., Камардин В.М., Сташков А.Н. Исследование магнитных и механических свойств стали М74 и возможности неразрушающего контроля качества термоупрочненных рельсов. - Дефектоскопия, 2005, №6, с. 75-89.

<sup>8</sup> Бида Г.В., Горкунов Э.С., Шевнин В.М. Магнитный контроль механических свойств проката. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. - 252 с.

<sup>9</sup> Бида Г.В. Магнитный контроль глубины и твердости поверхностно-упрочненных слоев на изделиях (Обзор). - Дефектоскопия, 2006, №5, с. 10-28