Б.Е. Попов (ИКЦ "Кран", Москва), В.Ф. Мужицкий (ЗАО "НИИИН МНПО "Спектр", Москва), Г.Я. Безлюдько (НПФ "СНР", г.Харьков), В.М. Долинский (ОАО "УкрНИИхиммаш"), *Е.А. Левин* (ОАО "УкрНИИхиммаш")

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МАГНИТНОЙ ДИАГНОСТИКИ СТАЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Приводятся известные выражения, устанавливающие зависимость коэрцитивной силы H_C от химического и фазового состава, размера зерен, плотности дислокаций, внутренних напряжений. Показано, что из-за отсутствия общей теории магнитной структуроскопии следует экспериментальным путем устанавливать корреляционные зависимости между H_C и механическими свойствами для каждого типа сталей. Установлены критерии браковки несущих элементов металлоконструкций по H_C. Приведены номограммы для контроля состояния и оценки остаточного ресурса металлоконструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Приведены сведения о новом магнитном структуроскопе КРМ-Ц-К2М, с помощью которого можно проводить оценку остаточного ресурса металлоконструкций.

Надежность и безопасность работы любой металлоконструкции определяется запасом прочности и режимом эксплуатации. Расчетный запас прочности в большинстве случаев обеспечивает безаварийную работу конструкции в течение нормативного срока 10-20 лет. После его окончания металлоконструкции работают «по состоянию», а срок службы определяется по результатам технической диагностики при проведении экспертизы промышленной безопасности объекта. Если учесть, что более 60% объектов отработали нормативный срок, то становится понятно насколько важно выбрать метод неразрушающего контроля для оценки структурного и напряженно-деформированного состояния металла и, тем более, остаточного ресурса несущих элементов конструкции.

Работы последних лет в области магнитной структуроскопии позволили установить зависимости между магнитными и физико-механическими свойствами конструкционных сталей [1, 2, 3]. В качестве основного магнитного параметра была выбрана коэрцитивная сила H_C, как наиболее чувствительная к структурным изменениям в процессе нагружения при статических и циклических нагрузках [4, 5]. По своей физической природе коэрцитивная сила является мерой сопротивления ферромагнетика размагничиванию, происходящему обычно путем смещения междоменных границ (МГД) или вращения вектора намагниченности. Модели Керстена, Кондорского и Нееля стали основой для установления связи коэрцитивной силы с параметрами тонкой структуры металла: химическим и фазовым составом, размером зерен, включениями, точечными дефектами и порами, плотностью дислокаций, внутренними напряжениями... [6, 7, 8].

Опытным путем было установлено, что вплоть до температуры размагничивания в конструкционных сталях (до 0,2% С), у которых необратимое намагничивание осуществляется смещением границы между доменами, магнитный параметр H_C следующим образом связан со структурными параметрами:

- $H_c = C\sqrt{\rho}$, т.е. с ростом плотности дислокации (ρ) H_C увеличивается.
- $H_c = K\dfrac{\gamma}{\mu_o M_s}\cdot\dfrac{1}{d_3}$, т.е. чем больше размер зерна d_3, тем меньше H_C.
- $H_c = P_o\dfrac{K_{эф}}{\mu_o M_s}Y^m$, т.е. с ростом включений (Y) H_C возрастает (m = 0,5-1).
- $H_c = \dfrac{\delta\lambda_s}{M_s}\cdot\dfrac{\Delta\sigma_{BH}}{\Delta x}$, т.е. с ростом внутренних напряжений H_C растет прямо пропорционально ширине междоменной границы δ и магнитострикции λ_S.
- $H_c = H_c^o + kE^{1/2}$, т.е. с ростом пластической деформации (Е) H_C возрастает.
- $H_c = H_c^{min} + \alpha(1-\cos\theta)$, т.е. имеется прямая связь H_C с кристаллографией решётки и доменов. H_c^{min} - соответствует направлению лёгкого скольжения (намагничивания) $\theta = 0°$, а α - константа.

В то же время, из-за отсутствия общей теории магнитной структуроскопии, приходится искать корреляцию между магнитными параметрами, структурой и механическими свойствами для каждого типа стали.

Поэтому, анализируя исходное магнитное состояние металла, а затем его изменение при нагружении вплоть до разрушения, можно получить информацию о поведении доменной структуры, и, соответственно, о накоплении повреждений, микропластической деформации и росте внутренних (остаточных) напряжений в металле. При этом, совокупное изменение всех структурных и механических параметров возможно только в рамках того запаса магнитной и механической энергии, исчерпание которого приведет к разрушению материала.

Основной метод получения информации - это построение корреляционных зависимостей в процессе нагружения, приближенного к реальным условиям эксплуатации. На рис.1 представлены характерные зависимости коэрцитивной силы от уровня напряжений (σ), действующих в стенках старых и новых баллонов и в плоских образцах из таких же баллонов, при испытании на разрыв. Испытания кислородных баллонов на разрыв внутренним давлением воды и на растяжение - плоских образцов (8х40х350мм) позволили не

только построить единую корреляционную зависимость H_C -σ, но и определить критические значения H_C^T в области предела текучести для исследуемой стали Дс, используя кривую ε - σ. Коэффициент корреляции обеих кривых выше 0,8.

Полученные данные свидетельствуют о возможности осуществления контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) металлоконструкций по результатам испытаний образцов из того же металла и построения номограмм на основе корреляционных зависимостей H_C -σ, рис.2 [9].

Такие экспериментальные номограммы позволяют связать коэрцитивную силу с основными параметрами нагружения: H_C^O - исходное ненагруженное состояние с минимальными остаточными напряжениями; H_C^T – соответствует пределу текучести металла; H_C^B - соответствует пределу прочности металла. Статистический анализ по результатам серийных испытаний позволяет определить критические величины H_C^{KP}, соответствующие допустимому напряжению, установленному конструкторами для данной металлоконструкции.

Исследования, проведенные авторами в течение семи лет на подъемных сооружениях, сосудах, котлах, трубопроводах, объектах железнодорожного транспорта, позволили обобщить результаты и оформить их в виде сводной таблицы физико-механических свойств конструкционных сталей (менее 0,2%С).

В практической работе специалистам по диагностике приходится иметь дело с анизотропным металлом, находящимся под действием сжимающих и растягивающих нагрузок в сложно-напряженном состоянии. Поэтому для анализа НДС необходимо понимание характера распределения напряжений в контролируемой зоне. Так как величина H_C определяется структурой и векторной суммой действующих напряжений первого, второго и третьего рода, то при магнитном анализе напряженно-деформированного состояния металла приходится учитывать не только абсолютное значение напряжений, но и направление действия этих напряжений по отношению к расположению силовых линий магнитного поля в месте контроля.

Напряжения третьего рода определяются тонкой структурой и зависят от состава , типа решетки, наличия включений и плотности дислокации. Напряжения второго рода формируются при сварке и сборке конструкции, термообработке и её испытании. Эти напряжения повышают величину коэрцитивной силы по сравнению с исходной и создают в металле поля остаточных напряжений определённого знака. Эксплуатационные нагрузки создают в конструкции сжимающие или растягивающие напряжения первого рода, которые,

накладываясь на предыдущие, могут в области упругих деформаций как уменьшать, так и увеличивать H_C в зависимости от направления действия последних. Однако при переходе в упруго-пластическую область преобладающее влияние оказывают внешние нагрузки, под действием которых коэрцитивная сила возрастает по закону, близкому к линейному, вплоть до H_c^B, соответствующей пределу прочности материала. Априори, в магнитной структуроскопии изменения величины H_C связаны в первую очередь с изменениями структуры, сформированной при изготовлении металла и конструкции. Если в металле в процессе прокатки или прессования сформировалась устойчивая структура со значительными остаточными напряжениями сжатия, то при растягивающих нагрузках коэрцитивная сила H_C сначала должна уменьшиться до значения H_c^O, соответствующего минимуму потенциальной энергии, а затем расти пропорционально приложенному напряжению [10].

В случае, когда уровень остаточных напряжений в металле составляет $0{,}8\sigma_T$ и для структурных изменений необходимо приложить $\sigma > 0{,}8\sigma_T$, величина H_C под нагрузкой может оставаться примерно постоянной вплоть до достижения физического предела текучести, т.е. пока не произойдут изменения в структуре.

После преодоления предела текучести H_C растёт по закону, близкому к линейному вплоть до H_c^B, соответствующему пределу прочности металла. Для практики важно, что у каждой марки стали H_c^O, H_c^T, H_c^B остаются постоянными, как и энергетические параметры разрушения. По сути, регистрируемые магнитные параметры — это характеристики структурного состояния металла с фиксированным уровнем запаса энергии разрушения. Чем больше затрачивается энергии на пластическую деформацию, тем быстрее структура металла перестраивается и достигает по своим магнитным свойствам H_c^T, а в дальнейшем H_c^B.

Энергетическая теория позволяет объяснить, почему максимальная величина коэрцитивной силы при испытании на выносливость (H_c^N) также остаётся постоянной и равной H_c^B для данной марки стали. H_c^N, соответствующая пределу усталости материала, и H_c^B соответствующая пределу прочности на разрыв, независимо от вида приложения нагрузки определяются только запасом энергии, заложенным в металл при его изготовлении. Предельное магнитное состояние при статическом и циклическом нагружениях остаётся постоянным.

Это позволяет, не проводя трудоёмких испытаний на усталость сложных металлоконструкций, делать оценку НДС и остаточного ресурса объектов, по результатам испытаний образцов из такого же металла при одноосном растяжении в режиме малоцикловой усталости и при статике [11].

Полноценные корреляционные зависимости $H_C(\sigma)$ получаются в случае снижения до нуля внутренних остаточных напряжений в металле и приведения его перед испытаниями в структурное состояние, соответствующее минимуму потенциальной энергии. Тогда величина H_C при увеличении нагрузки растёт по закону, близкому к линейному, вплоть до H_C^B, как это показано на рис.2 для сталей СтЗ, ВСтЗсп5, 09Г2С, Дс.

В практической диагностике НДС и остаточного ресурса конструкций, отработавших нормативный срок, наибольший интерес представляют объекты, у которых в зонах с повышенной концентрацией напряжений металл попал в пластику, т.е. $H_C > H_C^T$. Вероятность появления таких участков в несущих элементах можно оценить на основе распределения $e_T(H_C)$ в тонкостенных (t ✪ 20мм) конструкциях после 20 лет эксплуатации, рис.3. Для построения таких гистограмм был использован банк данных по подъёмным сооружениям и сосудам из сталей ВСтЗсп5, 09Г2С, Дс. Объём выборки составлял 300 единиц для каждой марки стали. Все распределения подчинялись закону Гаусса в области наиболее вероятного события (математического ожидания). А с ростом H_C в сторону критических значений - закону модуля разности, описывающему разупрочнение материала и снижение запаса прочности конструкции.

Используя данные таблицы магнитные и механические свойства сталей и номограммы для магнитного контроля напряжений (рис.2), были классифицированы режимы эксплуатации таких объектов и установлены критерии выбраковки как отдельных элементов конструкции, так и объектов повышенной опасности в целом.

По магнитному состоянию структуры металла были определены режимы эксплуатации металлоконструкций: «Надёжный», «Контролируемый», «Критический». Критериями браковки несущих элементов металлоконструкций стали следующие параметры коэрцитивной силы:

- для стали ВСтЗсп5 .....….. H_C^{KP} ¤ 6 А/см;

- для стали 09Г2С .....…..... H_C^{KP} ¤ 8 А/см;

- для стали марки Дс ..... H_C^{KP} ¤ 9 А/см.

При таком подходе к диагностике магнитный контроль обеспечивает возможность

выбраковки потенциально опасных объектов (например, кислородных баллонов), а также предупреждает о необходимости своевременного ремонта несущих элементов металлоконструкций подъёмных сооружений или котлов и сосудов, работающих под давлением.

Как показала практика, подъёмные краны с большим запасом прочности, которые 50 и даже 100 лет отработали на производстве, могут и сейчас работать в режиме надёжной эксплуатации ($H_C^O < H_C < H_C^T$). В тоже время , кислородные баллоны , изготовленные 15-20 лет назад с нарушениями технологии или условий эксплуатации, перешли в критическое состояние (H_C > 9 А/см) и взрываются не только при заправке и работе, но и при транспортировке или хранении. Поэтому так важно своевременно предупредить возможное разрушение и оценить остаточный ресурс потенциально опасных объектов.

В разработанных методиках ЗАО ИКЦ «Кран» 007-97 и 009-99 контроль остаточного ресурса металлоконструкций из традиционных сталей ВСт3сп5, 09Г2С, Дс, 10ХСНД и др. можно осуществлять на основе усталостных номограмм N - H_C, рис.4. Эти номограммы построены на основе циклических испытаний плоских образцов в условиях малоцикловой усталости (R=0) при режимах нагружения, моделирующих реальную работу конструкций.

Как следует из таблицы и рис.3, режим надёжной эксплуатации соответствует структурному состоянию металла, близкому к исходному. Режим контролируемой эксплуатации определяется переходом металла в упруго-пластическое состояние. Критический режим эксплуатации соответствует переходу элементов в пластику и такому накоплению повреждений в структуре металла, которое может вызвать хрупкое разрушение даже при номинальных нагрузках. Число циклов до разрушения сокращается до $5 \diamond 10^4$. И для предотвращения разрушения конструкции требуется 50% снижение номинальных нагрузок или ремонт с усилением в местах, где выявлена остаточная пластическая деформация или поверхностные микротрещины.

Принципиально важно при диагностировании магнитным методом выявить зоны металла, попавшие в пластику ($H_C > H_C^T$), и тем более участки, находящиеся в стадии упрочнения, когда H_C приближается к H_C^B. Таким образом, по данным магнитного метода в процессе контроля НДС и ОР можно объективно судить о целесообразности дальнейшего использования металлоконструкции в паспортном режиме и необходимости своевременного ремонта для продления срока эксплуатации.

В соответствии с требованиями Госгортехнадзора России по техническому заданию ЗАО ИКЦ «Кран» НПФ «Специальные научные разработки» и ЗАО МНПО «СПЕКТР» был

разработан портативный магнитный структуроскоп КРМ-Ц-К2М [12]. Автономное питание 12В, преобразователь на основе датчика Холла, возможность измерения коэрцитивной силы по полной петле гистерезиса в диапазоне 0-30 А/см, система отстройки от зазора, звуковая и световая сигнализация обеспечивают контроль за остаточными напряжениями и деформациями в течение всего периода эксплуатации металлоконструкции вплоть до разрушения. При наличии корреляционных зависимостей (номограмм), представленных в методических указаниях, разработанных ЗАО ИКЦ «Кран», ЗАО МНПО «СПЕКТР», НПФ «СНР» и ОАО УкрНИИхиммаш, коэрцитиметр КРМ-Ц-К2М позволяет вести оценку остаточого ресурса металлоконструкций и предупреждать аварии потенциально опасных объектов.

ВЫВОДЫ

1. На основе теории магнитных измерений и экспериментальных исследований корреляции коэрцитивной силы с напряжениями и деформациями в металле получены номограммы для контроля состояния и остаточного ресурса металлоконструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей.

2. В соответствии с требованиями Госгортехнадзора России ЗАО МНПО «СПЕКТР» и НПФ «СНР» налажен выпуск магнитных структуроскопов КРМ-Ц-К2М для диагностики состояния металлоконструкций из ферромагнитных сталей.

3. ЗАО ИКЦ «Кран» совместно с ОАО УкрНИИхиммаш собран банк данных и проведен статистический анализ по магнитной диагностике подъёмных сооружений и сосудов, работающих под давлением. Критериальный подход к режимам эксплуатации позволяет обеспечить надёжный контроль металла и предупредить разрушение объектов повышенной опасности.

4. Для технического диагностирования при проведении экспертизы промышленной безопасности объектов Госгортехнадзора России ЗАО ИКЦ «Кран» подготовлены методические указания по магнитной структуроскопии подъёмных сооружений-(007-97) и сосудов, работающих под давлением - (009-99).

Дата представления 11.09.01

Б.Е. Попов — к.т.н., начальник отдела

В.Ф. Мужицкий — д.т.н., зам.директора, зав.отделом, 119048, Москва, ул Усачева, 35, стр.1, тел 245-56-18, факс 246-88-88

Г.Я. Безлюдько — к.т.н., с.н.с.

В.М. Долинский — к.т.н., с.н.с.

Е.А. Левин — начальник отдела

ЛИТЕРАТУРА

1. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы неразрушающего контроля структурного состояния и прочностных характеристик термически обработанных изделий - Обзор. Дефектоскопия, 1985, N3, с.3-21.

2. Мужицкий В.Ф., Попов Б.Е., Безлюдько Г.Я. и др. Дефектоскопия, 1996, N2, с.12-19.

3. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Крутикова Л.А. Контроль горячекатаного проката сталей 3сп и 10сп с помощью приборов типа ИМА-5А - Заводская лаборатория, 1988, N4, с.65-68.

4. Горкунов Э.С., Федотов В.П., Бухвалов А.Б. и др. Дефектоскопия, 1997, N4, с.87-96.

5. Попов Б.Е., Мужицкий В.Ф., Безлюдько Г.Я., Левин Е.А., Белослюдов А.Б. Контроль. Диагностика, 1998, N 3, с.40-44.

6. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. - РАН Уральское отд. ИФМ, Екатеринбург, 1996, с.158-170.

7. Takahashi S., Echigoya J., Motoki Z. Magnetization Curves of Plastically Deformed Fe metals and Alloys - J. Appl. Phys, V.87, N2, 2000.

8. Lo C.C, Taug F. Shi Y. Jiles D.C. Biner B.B. Monitoring Fatigue Damage in Materials Using Magnetic Measurement Techniques - J. Appl. Phys., V.85, N8, 1999.

9. Межгосударственный стандарт ГОСТ 30415-96. Сталь. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом.

10. Кулеев В. Г., Горкунов Э.С. Механизмы влияния внутренних и внешних напряжений на коэрцитивную силу ферромагнитных сталей - Дефектоскопия, 1997, N11, с.3-18.

11. Muzhitsky V.F., Popov B.E., Bezludko *G*.Y. Magnetic Methods and Instrumentation for Inspection of the Ferromagnetic Steel Shattering Process for the Metallic Structures Residual Resource Evaluation of Machines and Vessel Working Under Pressure, 15-th World Conference on Non-Destructive Testing. Rome (Italy), 15-21 October 2000, p.435.

12. Безлюдько Г.Я., Мужицкий В.Ф., Попов Б.Е. Заводская лаборатория, 1999, N9, с.53-57.

ПЕРЕЧЕНЬ ИЛЛЮСТРАЦИЙ

К статье Попова Б. Е. Мужицкого В.Ф. и др. "Теория и практика магнитной диагностики стальных металлоконструкций"

ТАБЛИЦА. Магнитные и механические свойства листов толщиной 5-15мм из конструкционных сталей.

Рис.1. Корреляция магнитных и механических свойств в металле при испытании на разрыв образцов и баллонов из стали марки Дс.

Рис.2. Номограммы для магнитного контроля напряжений в конструкциях из сталей : Ст3, ВСт3сп5, 09Г2С, 17Г1С, Дс.

Рис.3. Распределение значений коэрцитивной силы H_C в тонкостенных конструкциях из сталей ВСт3сп5, 09Г2С и Дс после 30 лет эксплуатации.

Рис.4. Номограммы для магнитного контроля остаточного ресурса конструкций из сталей марок: ВСт3сп5, 09Г2С.

МАГНИТНЫЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ЛИСТОВ ТОЛЩИНОЙ 5 … 15 мм
ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

ТАБЛИЦА

МАРКА СТАЛИ	**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**			**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА, H_c А/см**			
	σ_B кг/мм^2	**$\sigma_{0.2}$ кг/мм^2**	**δ, %**	**H_C^0**	**H_C^T**	**H_C^B**	**$H_C^{уст.}$**
СтЗ	**35**	**21**	**22**	**2,5**	**5,0**	**6,0**	**5,8**
ВСтЗсп5	**40**	**24**	**25**	**3,0**	**5,5**	**6,5**	**5.9**
09Г2С	**45**	**31**	**20**	**4,0**	**7,8**	**9.5**	**9,5**
10ХСНД	**54**	**40**	**19**	**5,0**	**11,5**	**13,5**	**13.5**
Ст20	**42**	**26**	**24**	**4,5**	**10,5**	**13,5**	**13**
Ст Дс	**60-65**	**35-40**	**15**	**5,0-6,0**	**8,0-8,5**	**10,0-11,0**	**9,5-10,5**
17Г1С	**52**	**35**	**23**	**4,0**	**10,0**	**11,0**	**11,0**