



О ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ ДЕТАЛЕЙ

И. Г. СОКОЛИНСКАЯ

Показаны преимущества использования метода магнитной структуроскопии для неразрушающего входного контроля качества ответственных и нагруженных деталей различных машин и механизмов, в том числе горношахтного оборудования. Установлено, что данным методом с вероятностью не менее 0,85 можно обнаруживать дефекты в деталях до сборки механизмов или их ввода в эксплуатацию и таким образом прогнозировать и повышать надежность используемого оборудования.

The paper demonstrates the advantages of applying the method of magnetic structural defectoscopy for NDT incoming inspection of the quality of critical and loaded parts of various machines and mechanisms, including mining equipment. It is found that this method allows, with not less, than 0.85 probability, detection of defects in parts prior to assembly of mechanisms or their putting into operation and, thus, forecasting and improving the reliability of the used equipment.

Надежность машин и механизмов определяется как функция вероятностей безотказной работы их составных частей в течение требуемых промежутка времени или наработки до отказа. В статье [1] справедливо указывается на необходимость исследования причин разрушений элементов машин и механизмов для снижения факторов случайности отказов и определения познания путей их предотвращения. Одним из наиболее эффективных способов повышения надежности является обеспечение качества материалов, из которых изготавливаются детали, и их термическая обработка, обеспечивающая соответствие структурно-механических свойств характеру и уровню нагрузок, воздействию которых детали подвергаются во время эксплуатации. Поэтому для обеспечения высокой надежности механизмов необходим полный и достоверный контроль качества изготовления деталей, в частности, их структурно-механических свойств. Этому могло бы способствовать широкое применение на заводах массового НК деталей, не допускающего попадание на сборку негодных по значимым параметрам. К сожалению, в машиностроении такой контроль не достиг должного уровня — это заметно влияет на надежность и конкурентоспособность его продукции.

В угольной промышленности проблема надежности горношахтного оборудования стоит особенно остро, так как разрушение его элементов может быть связано с безопасностью или, по крайней мере, с большой трудоемкостью восстановления работоспособности отказавшего механизма и связанными с этим значительными потерями добычи. Поэтому на передовых шахтах Украины нашел распространение входной НК качества деталей забойного оборудования и проходческой техники. Он проводится перед спуском в шахту комбайнов, конвейеров, секций механизированной крепи. Такому контролю подвергаются наиболее нагруженные и ответственные детали: зубчатые колеса, шестерни, валы, ведущие звезды, элементы цепей, штоки стоек крепей и домкратов и т. д. При этом применяется, в частности, метод магнитной струк-

туроскопии с помощью портативного структуроскопа СИЛА, который разработан и изготавливается Специализированным центром «Углейзотоп» и внесен в Госреестр Украины.

Действие прибора основано на локальном намагничивании до состояния, близкого к насыщению, участка на поверхности контролируемой детали с помощью мощного импульса тока (подается в соленоид в торце преобразователя). После затухания импульса производится измерения остаточной намагниченности этого участка феррозондовым преобразователем-градиентометром. Последний сконструирован таким образом, что с его помощью можно контролировать детали непосредственно в сборочных единицах, поскольку он защищен от влияния внешних магнитных полей [2, 3]. Размеры и форма преобразователя позволяют контролировать детали не только с плоской, но и с цилиндрической и эвольвентной поверхностью, в том числе на внутренней поверхности цилиндров и рабочей поверхности зубьев шестерен с модулем не менее 5 и т. д. Основное влияние на показания прибора оказывает поверхностный слой глубиной порядка 1 мм (в зависимости от электрических и магнитных свойств). Это позволяет контролировать качество цементированного слоя [4, 5], а цементация, как известно, наиболее часто применяется для поверхностного упрочнения деталей. Прибор изготавливается в разных модификациях по способу питания: автономное от батареи аккумуляторов напряжением 16 В, от сети 220 В и комбинированное, позволяющее работать по любому из названных вариантов. Масса прибора равна 2,0... 2,5 кг.

Проведенные исследования образцов и деталей из разных сталей, термообработанных по различным режимам, позволили нам установить корреляционные связи между показаниями прибора, с одной стороны, и химическим составом, структурой и механическими свойствами, с другой, для большего спектра сталей и деталей. На этом основании разработаны методики, устанавливающие критические границы годности с учетом необходимых эксплуатационных свойств деталей и позволяющие с высокой степенью достоверности (порядка 80... 90 %) разделить



контролируемые детали на удовлетворительные и неудовлетворительные.

Магнитная структуроскопия разных деталей горношахтного оборудования с помощью приборов СИЛА и их более ранних предшественников проводится нами уже более 25 лет и отличается высокой эффективностью контроля. В те годы, когда он проводился регулярно, процент бракованных деталей уменьшился, благодаря обратной связи с заводами, с 40 до 15. А когда в начале 1990-х гг. контроль практически прекратился и стал возобновляться во второй половине 1990-х, количество бракованных деталей было на уровне 55... 60 %.

Кроме входного контроля, нами проводятся исследования деталей, вышедших из строя в период гарантийной эксплуатации, для установления причин отказов. Изучались отказы вследствие износа, смятия или хрупкого разрушения шестерен и валов, усталостного разрушения деталей редукторов, хрупкого, пластичного или усталостного разрушения звеньев цепей, разрушения и деформации штоков стоек крепей и демкратов, их коррозионного повреждения и т. д. Благодаря такому сочетанию работ нами накоплен большой информационный массив данных о связи магнитных свойств с работоспособностью и долговечностью различных деталей, дающих возможность с большой степенью достоверности прогнозировать их ресурс. Наиболее полный материал накоплен по шестерням, валам и звеньям цепей, поскольку эти детали чаще других приводят к отказам оборудования. В угольном машиностроении широко применяются шестерни, вал-шестерни, колеса и валы из сталей 20Х2Н4А, 12ХНЗА, 18-30ХГТ, цементированные на глубину 0,8... 1,6 мм, закаленные и низкоотпущенные. Виды отказов этих деталей можно разделить на три основные группы:

1) постепенный износ или смятие, если деталь плохо закалена или глубина упроченного слоя менее 0,5 мм, или (что реже) в структуре цементированного слоя избыточное содержание аустенита;

2) постепенное питтинговое разрушение контактной поверхности зубьев шестерен или шлицев из-

за избыточного содержания в цементированном слое карбидов;

3) внезапное хрупкое разрушение из-за некачественно проведенного низкотемпературного отпуска.

Опыт показывает, что, используя метод неразрушающей магнитной структуроскопии, детали с названными и другими менее характерными дефектами с вероятностью не менее 0,85 можно обнаружить до сборки механизма или ввода его в эксплуатацию. Особенно важно то, что этим методом выявляются дефекты, которые другими методами, например наиболее распространенной твердометрией, выявить практически невозможно. У цементированных деталей ими являются малая глубина слоя, повышенное содержание карбидов и, главное, качество низкотемпературного отпуска. Так, если в области температур 150... 200 °С твердость стали 20Х2Н4А изменяется на 2... 3 %, то коэрцитивная сила — на 18... 23 % [6]. Между тем такое изменение температуры отпуска, существенно влияя на уровень структурных напряжений, значительно сказывается на износостойкости (износ образцов изменяется от 9,0 до 4,5 г) и особенно на снижении предела усталости и склонности к хрупкому разрушению. Например, вал угольного комбайна, который по результатам магнитной структуроскопии оценили как «хрупкий», был тем не менее пущен в эксплуатацию и через 10 дней разрушился. На шестерне с высокими показаниями структуроскопа через 16 дней произошло хрупкое разрушение зубьев. Твердость обеих разрушенных деталей была в норме, «диагноз» — недоотпуск.

На рис. 1, а показана связь показаний магнитного структуроскопа с наработкой на отказ цементированных шестерен, вал-шестерен и валов, в том числе шлицевых, не отработавших гарантийный срок 12 мес. и попавших к нам на исследование. Очевидна высокая достоверность неразрушающего метода априорной оценки надежности деталей. Четко определяется снижение наработки тех деталей, на которых получены показания структуроскопа выше или ниже установленных контрольных границ удовлетворительного качества. Из 55 деталей

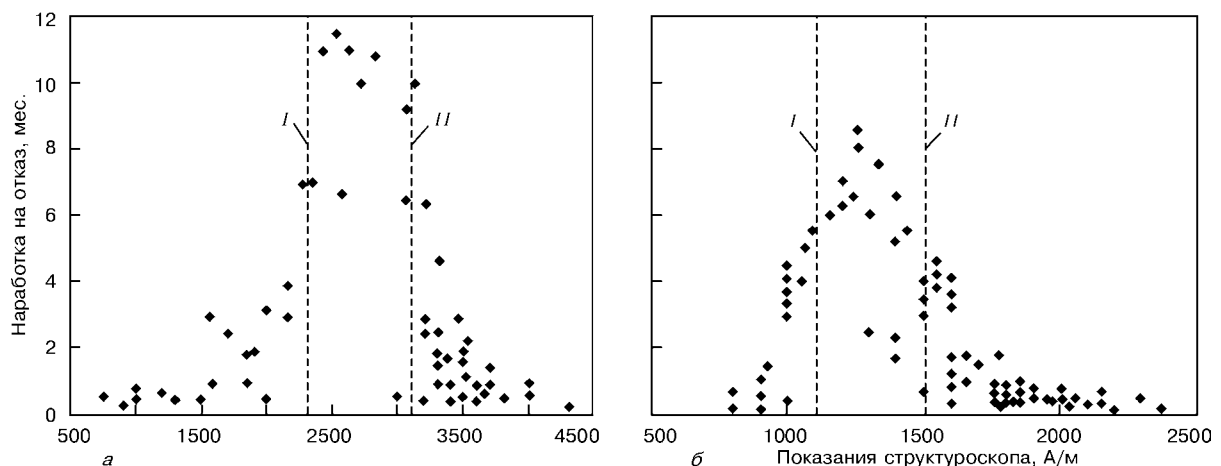


Рис. 1. Связь показаний магнитного структуроскопа с наработкой на отказ: а — цементированных шестерен и валов угольных комбайнов и контейнеров; б — соединительных звеньев конвейерной цепи; I, II — нижняя и верхняя границы удовлетворительного качества



четыре, оцененные как годные, отработали 6–9 мес., а одна — менее 1 мес. При формальном подходе к оценке результатов эти случаи принимаются за погрешность. Что касается деталей, отработавших 10...11 мес., то их неверно было бы считать негодными, так как их наработка близка к гарантийной. Грубой ошибкой при данном методе следовало бы считать деталь, которая принята как годная, но разрушилась в первые дни эксплуатации. Проведенное исследование не обнаружило отклонений ни в структуре, ни в режиме термообработки — причиной разрушения детали было, по-видимому, или нарушение режима эксплуатации, или некачественная сборка.

Следует, кроме того, учесть, что исследованные детали были изготовлены из разных сталей и эксплуатировались в разных условиях. Тем не менее приведенный график наглядно демонстрирует эффективность неразрушающего метода оценки надежности цементированных деталей: его ошибка составляет менее 10 %. При этом необходимо учесть, что здесь не рассматриваются детали, которые были правильно оценены как годные и не попали к нам на исследование, поскольку отработали гарантийный срок.

К числу наиболее ненадежных элементов горношахтного оборудования относятся соединительные звенья цепей скребковых конвейеров. Они изготавливаются из стали 35ХГСА, подвергаются закалке и отпуску при температуре 450 ± 20 °С. Звенья работают в условиях разного рода динамических нагрузок со значительными колебаниями их значений. Поэтому их основной эксплуатационной характеристикой является циклическая долговечность. Она должна контролироваться испытаниями на растяжение пульсирующей нагрузкой хотя бы на малой выборке из технологических партий. Однако на заводах-изготовителях для оценки качества термообработки звеньев применяются в лучшем случае испытания на статическое растяжение, причем, естественно, на чрезвычайно малопредставительной выборке. Такой контроль не только не может обеспечить требуемую надежность цепей, но даже вреден: получение высокой статической прочности приводит к ошибочным выводам о надежности звеньев, поскольку выявленная прочность может явиться результатом снижения температуры отпуска, что обязательно приводит к снижению циклической долговечности. Это утверждение, кроме того, что использован большой объем экспериментального материала, основано на следующих соображениях. Для стали 35ХГСА, которая приобретает отпускную хрупкость в области температур отпуска 300...400 °С, особенно важно не попасть в эту зону, так как с понижением вязкости металла возрастает роль концентраторов напряжений и скопления дислокаций, а следовательно, повышается скорость развития трещин технологического или эксплуатационного происхождения. Кроме того, со снижением температуры отпуска уменьшается соотношение между пределом прочности и пределом текучести металла, и звенья попадают в область циклического разупрочнения [7],

что также приводит к ускоренному усталостному разрушению. Так как в области температур отпуска до 500 °С наблюдается довольно хорошая корреляционная связь коэрцитивной силы с температурой отпуска и структурно-механическими характеристиками стали 35ХГСА, то для контроля качества этих свойств применили метод коэрцитиметрии. При этом фактически измеряли остаточную намагниченность звена или магнитного «пятна» на нем, а эти характеристики вследствие большого размагничивающего фактора пропорциональны коэрцитивной силе.

Для заводов-изготовителей звеньев были созданы стационарные установки для массовой автоматической разбраковки звеньев по коэрцитивной силе [8, 9]. На них с достоверностью 85 % звенья разделяют на 3 группы:

удовлетворительные, т. е. обладающие статической разрывной нагрузкой и циклической долговечностью не ниже требуемых чертежом и ТУ;

неудовлетворительные с коэрцитивной силой меньше нижней контрольной границы, обладающие низкой статической прочностью (как правило, плохо закаленные);

неудовлетворительные с коэрцитивной силой выше верхней контрольной границы, обладающие низкой циклической долговечностью и наиболее часто разрушающиеся в самом начале эксплуатации. При этом, что важно, выбраковываются звенья, которые подвергались отпуску при пониженной, а также при требуемой температуре, но меньшее время (один час вместо двух), — их твердость и статическая прочность в норме, а циклическая долговечность снижена на 15...30 %.

Применение такого контроля на заводе снижает аварийность выпускаемых им конвейеров на 25...30 %. Но в связи с тем, что заводы это делают далеко не всегда, на ряде шахт применяется ручной НК звеньев цепи в сборе до ее спуска в шахту. Это позволяет выбраковывать и изымать из цепи не менее 90 % таких звеньев, которые могли разрушиться уже с первых дней эксплуатации. Для такого контроля нами также разработана методика, устанавливающая контрольные границы отбраковки звеньев.

На рис. 1, б показана связь показаний магнитного структуроскопа с наработкой на отказ звеньев, которая также иллюстрирует высокую достоверность прогнозирования долговечности звеньев по результатам НК. Из 77 приведенных на нем результатов 3 звена, попавшие в зону удовлетворительного качества, проработали меньше 4 мес., поэтому можно оценивать погрешность контроля (риск потребителя) как близкую к 4 %. Все забракованные звенья проработали не более 5,5 мес., причем наработка была тем ниже, чем больше показания прибора отличаются от контрольных границ. Следует также учитывать, что вероятно разрушение и годных звеньев из-за перегрузки конвейера, «заедания» цепи на стыках направляющих, некачественной сборки цепи и т. д. Поэтому эффективность НК становится еще более очевидной.

В последнее время участились случаи отказов подшипников: разрушение обойм, износ или де-



формация их или роликов, задиры на контактных поверхностях. Хотя нами пока не накоплен необходимый для окончательных выводов информационный массив, но уже можно видеть, что методом магнитной структуроскопии можно обнаруживать негодные подшипники. Хрупкому разрушению подвергаются обоймы, показания структуроскопа на которых высокие, хотя твердость и остается в норме. Эти обоймы, видимо, подверглись некачественному отпуску: для стали ШХ15 снижение температуры отпуска с 200 до 100 °С приводит к незначительному, практически не определяемому повышению твердости и к существенному, порядка 15 % повышению коэрцитивной силы [10]. В нашей практике были также случаи, когда низкие показания структуроскопа при контроле роликов соответствовали их ускоренному износу или низкие показания структуроскопа, полученные для обойм, сочетались с их износом и деформацией смятия роликами на дорожке качения. Это позволяет говорить о хороших перспективах применения НК подшипников на машиностроительных заводах перед их установкой в ответственных узлах машин, поскольку уровень контроля на подшипниковых заводах в последнее время, видимо, значительно снизился, и это существенно влияет на надежность машин и механизмов. В некоторых случаях пренебрежение НК приводит даже к трагическим последствиям: использование магнитной структуроскопии могло бы выявить и не допустить к применению, например, маховик шахтного гирозова, не подвергшийся требуемой термообработке, в результате чего он разорвался на куски при раскрутке, смертельно травмировав машиниста.

Поскольку детали работают в механизме, оказывая взаимное влияние друг на друга, то по результатам контроля отдельных деталей можно прогнозировать работу механизма в целом, влияя на его надежность. Например, обнаруженная по низким показаниям структуроскопа некачественно термообработанная ведущая звезда привода цепи могла бы существенно снизить наработку последней цепи, так как износ ложа звена на звезде приводит к изменению значения и перераспределению нагрузки на звенья и вследствие этого — к их ускоренному разрушению.

Мы работаем в основном в угольной промышленности. Однако наш опыт применения магнитной структуроскопии деталей в других отраслях показал эффективность ее применения для прогнозирования и повышения надежности автомобилей, дизельных двигателей, любых редукторов и т. д. Например, внедренный в транспортном цехе одного из горнорудных карьеров неразрушающий отбор шестерен для редукторов мотор-колес карьерных самосвалов позволил существенно повысить их наработку на отказ. Магнитный НК качества термообработки клапанов для дизельных двигателей (сталь 40X10C2M) позволяет прогнозировать их износостойкость с достоверностью до 90 %, в то

время как применявшийся на заводе метод контроля клапанов по твердости и неточен, и малопродуктивен, а значит, проводится на малых выборках. Следовательно, он не может гарантировать повышение долговечности клапанов.

Наш опыт показал, что даже на предприятиях с хорошо отлаженной технологией и высокой культурой производства количество негодных деталей, поступающих на сборку, всегда достигает нескольких процентов, если не применяются методы массового НК. При этом необходимо учитывать, что такой контроль эффективен только тогда, когда он основан на тщательно и квалифицированно разработанной методике, учитывающей выявление всех факторов, влияющих на надежность объектов контроля.

Таким образом, одним из наиболее эффективных средств повышения надежности и конкурентоспособности продукции отечественного машиностроения является широкое применение высокодостоверного, высокопроизводительного, дешевого неразрушающего магнитоструктурного контроля наиболее ответственных и нагруженных деталей машин и механизмов.

1. Комаровский А. А. Физика отказов конструкционных материалов // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 1. — 3–7.
2. А. с. 1260831 СССР, МКИ⁴ G 01 N 27/90 // Способ неразрушающего контроля физико-механических характеристик изделий из ферромагнитных материалов / И. А. Афанасенко, Л. И. Лумировская, И. Г. Соколинская, Л. П. Яйленко. — Опубл. 30.09.86; Бюл. № 36.
3. А. с. 1385053 СССР, МКИ⁴ G 01 N 27/80 // Способ неразрушающего контроля физико-механических характеристик изделий из ферромагнитных материалов и устройство для его осуществления / И. А. Афанасенко, Л. И. Лумировская, И. Г. Соколинская, Л. П. Яйленко. — Опубл. 30.03.88; Бюл. № 12.
4. Соколинская И. Г., Лумировская Л. И. О неразрушающем контроле твердости и микроструктуры цементированного слоя шестерен из стали 20X2H4A // Дефектоскопия. — 1982. — № 2.
5. Лумировская Л. И., Соколинская И. Г. Неразрушающий контроль структурно-механических свойств поверхностно-упрочненных слоев // Сб. докл. XII Всесоюз. конф. «Неразрушающие физические методы и средства контроля».
6. Соколинская И. Г., Лумировская Л. И. Применение магнитной структуроскопии для контроля материалов и изделий при технической экспертизе разрушенных деталей // Матер. науч.-техн. конф. «ЛЕОТЕСТ-98», Киев-Львов, 1998.
7. Циклические деформации и усталость металлов // В. Т. Трошенко, Л. А. Хамаза, В. В. Покровский и др. — Киев: Наук. думка, 1985. — Т. 2.
8. Прибор для магнитного автоматического контроля соединительных звеньев тяговых цепей шахтных скребковых конвейеров / И. А. Афанасенко, Г. Ф. Ванда, Л. И. Лумировская, И. Г. Соколинская // Сб. матер. Всесоюз. науч.-техн. конф. «Современные методы и средства контроля качества материалов и изделий без разрушения». — Минск, 1970.
9. Магнитный автоматизированный контроль качества термообработки звеньев цепей скребковых конвейеров с помощью установки УМКА. — Донецк, 1985. — (Информ. листок / ДонЦБНТИ).
10. Мельгуи М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей. — Минск: Наука и техника, 1980.