

## ОЦЕНКА УСТАЛОСТНОГО И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ, ВКЛЮЧАЯ ПРОГНОЗ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА, ПО ИЗМЕРЕНИЯМ МАГНИТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ – КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ\*

Магнитометрические измерения, исторически составившие суть метода коэрцитивной силы (МКС), изначально выполнялись скорее всего для сугубо исследовательских целей в задачах, которые, по современным представлениям, отнесли бы наверное к фундаментальной науке. С появлением и развитием промышленности сфера применения метода распространилась на оценку рукотворного (технологического) разнообразия состояний и свойств новой металлопродукции и складывавшуюся параллельно с этим область прикладных задач. В течение последних тридцати лет мы осуществили расширение применения МКС на диагностические задачи оценки уже естественного эксплуатационного разнообразия состояний металла, возникающего в течение срока службы вследствие усталостной деградации. Тем самым инициирован скачок в развитии представлений самого МКС и уровня связанного с ним специфичного магнитоизмерительного приборостроения. А также – и это главное – обусловлен пока не очень осознанный специалистами рывок в развитии технической диагностики металлов, поскольку применение коэрцитиметрии для оценки состояния металла в течение эксплуатации позволило реализовать сразу и на практическом уровне недоступный до этого вообще контроль усталости конструкций и оборудования как локально, так и в целостном представлении. Причем, все это не только качественно, но и количественно. Не говоря об открывшемся потенциале возможностей уточнения на этой основе особенностей механики разрушения и процессов становления и развития усталостной деградации как в мо-

дельном, так и реальном эксплуатационном представлении.

Коэрцитивная сила показала высокую практическую, а особенно информационную эффективность в оценке уровня накопления усталостной микроповрежденности металла в течение эксплуатации. При продвижении металла от исходного состояния до усталостного разрушения (в конце срока службы) величина коэрцитивной силы  $H_c$  возрастает на сотни процентов (!) от некоторого исходного состояния  $H_{c_0}$  до соответствующего предельного состояния  $H_c^B$ . При этом величины  $H_{c_0}$  и  $H_c^B$  оказались своеобразными новыми граничными физическими константами для каждой марки металла или ее модификации. Эта замечательная особенность позволяет по текущим значениям коэрцитивной силы металла  $H_{c\text{текущ}}$  довольно точно оценить действительный отработанный ресурс по степени отдаления  $H_{c\text{текущ}}$  от начального граничного состояния  $H_{c_0}$  и также эффективно выполнить прогноз остаточного ресурса по степени и скорости приближения  $H_{c\text{текущ}}$  к граничной предельной величине-константе  $H_c^B$ , т.е. по реальному текущему физическому состоянию металла. В процессе обобщения практики диагностических коэрцитиметрических измерений созданы простые в работе автономные, портативные коэрцитиметры-структуроскопы серии КРМ-Ц с приставным преобразователем, фактически не требующие зачистки металла, нечувствительные к шероховатостям и кривизне поверхности, работающие через слой защитного покрытия порядка 6 мм и более. При этом измерения можно выполнять по металлу с температурой от любых природных отрицательных до горячих поверхностей в

\* Статья на правах рекламы

сотни градусов. А должным образом подготовленным прибором можно работать в воде.

Почти 30-летняя практика коэрцитиметрического усталостного контроля конструкций и оборудования в совокупности с многочисленными разнообразными стендовыми испытаниями образцов позволяет сегодня уже структурировать, представляющуюся до сих пор целостной, величину измеряемой коэрцитивной силы как совокупность составляющих, каждая из которых по-своему меняется в процессе срока службы в зависимости от сочетания эксплуатационных факторов и в зависимости от интенсивности усугубляющего влияния каждого из этих воздействий. Это улучшает понимание текущего состояния диагностируемого объекта, конкретизирует главенствующие факторы – причины этого состояния. А также делает еще более точным и изящным коэрцитиметрический эксплуатационный прогноз на последующую стадию срока службы. Зная весомость факторов деградации, мы учитываем в прогнозе не только совокупную динамику ухудшения механических свойств металла, но и действенность, и динамику отдельных причин усталостной деградации.

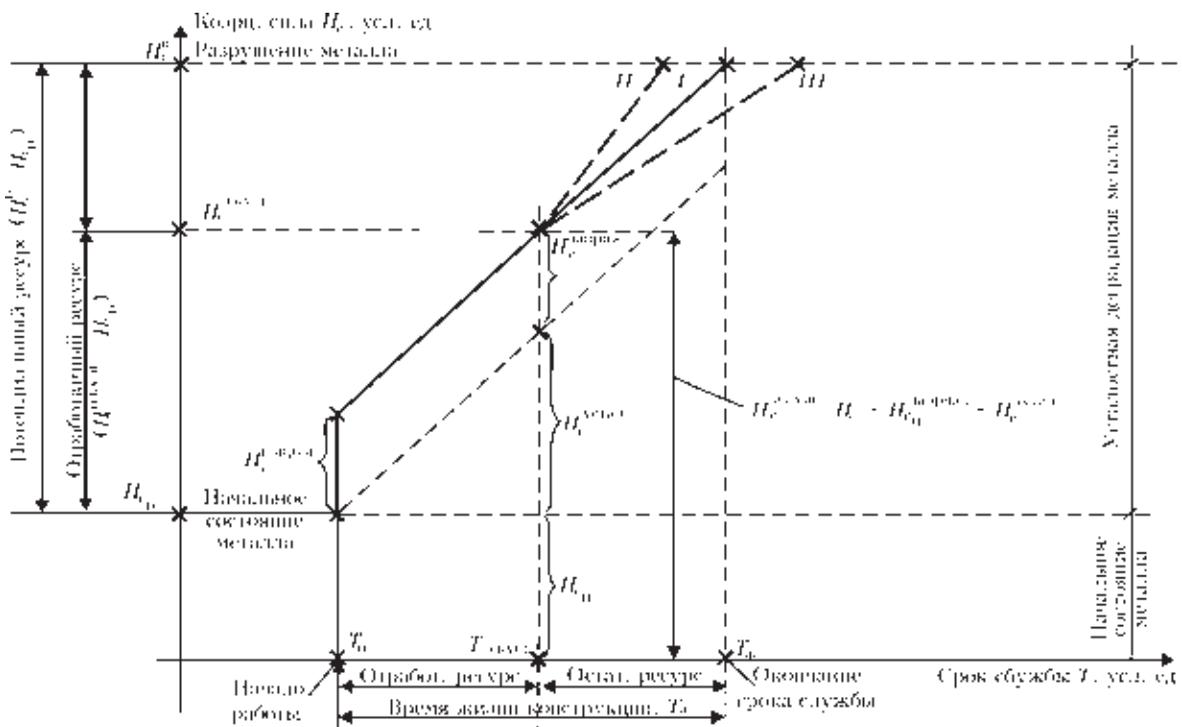
Текущее значение величины коэрцитивной силы  $H_c^{текущ.}$  можно условно представить суммой нескольких основных составляющих. Это исходная величина  $H_{c0}$ , зависящая от химического и фазового состава, а также структурного состояния металла. И две компонен-

ты, зависящие, соответственно, от величины внутренних напряжений  $H_c^{напряж.}$  и от уровня накопленной необратимой микроповрежденности металла в процессе его деградации по усталостному типу  $H_c^{устал.}$ :

$$H_{c0} \leq H_c^{текущ.} = (H_{c0} + H_c^{напряж.} + H_c^{устал.}) \leq H_c^B. \quad (1)$$

Это выражение по сути описывает область определения значений коэрцитивной силы данной марки металла  $[H_{c0}, H_c^B]$ . На рисунке показано, как изменяются составляющие  $H_c^{текущ.}$  в процессе срока службы.

Величина  $H_{c0}$  является физически наименьшей из тех значений  $H_c$ , которые природно могут быть у металла данной марки. В первом приближении можно считать, что в процессе срока службы составляющая  $H_{c0}$  остается неизменной. Составляющая  $H_c^{напряж.}$  зависит от совокупности эксплуатационных нагрузок, собственных конструкционных нагрузок и монтажных напряжений, а также фазовой нестабильности металла в процессе службы. При устоявшемся режиме работы эта компонента у правильно спроектированной в прочностном плане конструкции колеблется около некоторого установившегося уровня в пределах упругих (обратимых) деформаций. Величина  $H_c^{устал.}$  нарастает от нулевого значения в процессе нормативной эксплуатации в течение всего срока службы неуклонно и постоянно, чаще линейно как результат постоянно



Усталостная деградация металла в течение срока службы в коэрцитиметрическом отображении

накапливающейся усталостной микрповрежденности металла. Больше, чем  $H_c^B$ , величина коэрцитивной силы  $H_c^{\text{текущ.}}$  у данной марки металла быть не может. Это физическая предельная константа, соответствующая разрушению металла. Она своя для каждой марки металла, равно как и минимальное (исходное) значение  $H_{c_0} = H_{c_{\text{мин}}}^{\text{текущ.}}$ . Разность  $\Delta H_c^{\text{потенц.}} = H_c^B - H_{c_0}$  характеризует начальный (потенциальный) ресурс. В течение жизни конструкции  $T_{\text{ж}}$  величина  $H_c^{\text{текущ.}}$  в зонах концентрации напряжений увеличивается от минимального своего значения  $H_{c_0}$  до максимального  $H_c^B$ . Этот рост  $H_c^{\text{текущ.}}$  происходит за счет появления составляющих  $H_c^{\text{напряж.}}$  и  $H_c^{\text{устал.}}$ , а также непрерывного эксплуатационного роста последней. Слагаемое  $H_c^{\text{напряж.}}$  отображает упругие (обратимые) изменения в металле на фоне непрерывно накапливающейся усталостной поврежденности.

По мере накопления пластических деформаций и микрповрежденности металла составляющая  $H_c^{\text{устал.}}$  растет до своего возможного гипотетического наибольшего значения  $H_c^{\text{устал. макс}} = \Delta H_c^{\text{потенц.}} = H_c^B - H_{c_0}$ . Такое значение параметр  $H_c^{\text{устал.}}$  принимает в полностью разгруженном металле с максимальным уровнем накопленной микрповрежденности во всем его объеме, но при отсутствии напряжений в нем. Такой и совсем не виртуальный металл не способен выдерживать даже незначительные механические нагрузки, и, что важно, при этом он безупречен для любого современного дефектоскопического метода, так как поврежден на микроуровне, неподконтрольном дефектоскопии.

В результате такого коэрцитиметрического отображения усталостных процессов в течение срока службы металла реализуется возможность технического диагностирования металла по его реальному текущему состоянию, а не по результатам теоретического расчета прочности, который всегда есть и будет в разной степени субъективно-абстрактным, поскольку отображает только относительный уровень наших знаний из области теоретической механики, механики разрушения и сопротивления материалов. В величину  $H_c^{\text{текущ.}}$  вносит свой вклад магнитный момент каждого атома контролируемого металла в зависимости от его состояния, определяемого текущей нагруженностью и накопленной усталостью. Поэтому из всех НК-методов коэрцитиметрия

более адекватно отображает механическое состояние металла реальной конструкции. И поправки в текущие прочностные расчеты, сделанные на основе коэрцитиметрической оценки состояния металла, сделают такие расчеты более адекватными его реальным механическим свойствам.

При этом важно понимать, что значения  $H_c^{\text{текущ.}}$ , превышающие величину  $H_c^T$ , вовсе не означают, что в конструкции действуют напряжения выше предела текучести. Как следует из выражения (1) и особенно из рисунка, в таких зонах могут быть практически нулевые напряжения. Но при высоком уровне накопленной усталостной поврежденности эксперт всегда получит здесь высокие значения  $H_c^{\text{текущ.}}$  (причем необратимого характера) даже при гипотетически нулевых внутренних напряжениях в металле за счет составляющей  $H_c^{\text{устал.}}$ . Металл,  $H_c^{\text{текущ.}}$  которого почти равно  $H_c^B$ , способен разрушиться при напряжениях в нем много меньших его предела текучести  $\sigma^T$ , как это видно из (1) и как это следует из современных представлений механики разрушения и усталости металлов, потому что его основа – кристаллическая решетка – в значительной мере повреждена или изменена усталостными микродефектами.

Обобщенное аналитическое представление зарождения, развития, накопления усталостных изменений металла в коэрцитиметрическом отображении наглядно иллюстрируется его графической аналогией на рисунке. В момент времени начала срока службы  $T_0$  величина коэрцитивной силы минимальна и равна  $H_{c_0}$ . В этот момент появляются эксплуатационные нагрузки, дающие прирост, обозначенный как  $H_c^{\text{напряж.}}$ . Одновременно начинаются необратимые усталостные изменения  $H_c^{\text{устал.}}$ . Измерения текущей величины коэрцитивной силы  $H_c^{\text{текущ.}}$  в некоторой промежуточной точке срока службы  $T_{\text{ж}}$  представляются выражением (1), как  $H_c^{\text{текущ.}}(T) = H_{c_0} + H_c^{\text{напряж.}}(T) + H_c^{\text{устал.}}(T)$ , что хорошо видно из рисунка. Если режим нагружения с какого-то промежуточного момента  $T_{\text{текущ.}}$  останется прежним, то и дальнейшая деградация по усталостному типу будет продолжаться с имевшейся до этого интенсивностью по типу I. При более тяжелом режиме – по типу II, и по типу III – при менее тяжелом режиме нагружения. Графическое линейное представление усталостной

диаграммы  $H_c(T)$  на рисунке, включая разновидности II и III – достаточно условно, но это эффективнее, чем все, что имеется до сих пор в практическом контроле усталости. Если проводить в течение срока службы систематический периодический мониторинг, то вид характеристики  $H_c(T)$  будет существенно ближе к реальному в сравнении с принятым на рисунке линейным приближением.

Соответственно уточнится и прогноз остаточного ресурса. Если же разместить на контролируемом объекте систему датчиков коэрцитиметрического мониторинга металла в зонах концентрации напряжений, то погрешность прогнозирования остаточного ресурса будет минимально возможная (с позиций вероятностного статистического оценивания). Из рисунка хорошо видно, как скорость накопления усталостных изменений в металле влияет на срок службы. И как знание предыдущей скорости деградации в момент времени  $T_{\text{текущ}}$  позволяет выполнить прогноз остаточного ресурса по фактическому состоянию металла на этот момент, а не по абстрактным расчетным соображениям. Металл с величиной коэрцитивной силы, равной  $H_{c0}$  всегда можно найти в ненагружаемой части конструкции, а с величиной  $H_c^B$  – в зонах с признаками усталостного разрушения или на образце металла, нагруженном на стенде растяжением до предела прочности.

Уточним также, что коэрцитиметрическое отображение усталости безоговорочно эффективно для режимов эксплуатации, характерных для малоциклового и статической усталости. Многоцикловая усталость сквозь призму МКС оценивается столь же очевидно только на конечной стадии, а все предыдущие ее фазы классифицируются этим методом по несколько иным критериям, что требует отдельного обсуждения.

Простота аналитического (1) и графического (рисунок) представлений зарождения и

развития усталости металла в течение срока службы в коэрцитиметрическом отображении является еще одним практическим достоинством для пользователей. В то же время физическая глубина этих представлений объективно бесконечна, но основные проявления проверены практической диагностикой многих типов объектов в течение нескольких десятилетий. А также большим объемом стеновых испытаний многих образцов конструкционных марок сталей широкого и специального назначения. Эти две стороны целостной коэрцитиметрической трактовки процесса деградации металла по усталостному типу – только начальный, но эффективный и хорошо проверенный шаг в постановке усталостного контроля на широком практическом уровне как неотъемлемой, а в будущем, и главенствующей составляющей технической диагностики.

Современная техническая диагностика и неразрушающий контроль вместо декларируемой оценки работоспособности собственно металла, в действительности занимаются оценкой уровня отдельно взятых эксплуатационных факторов. Тогда как текущее состояние металла зависит от совокупности всего множества усугубляющих эксплуатационных воздействий.

Из всего набора параметров и методов контроля состояния металла коэрцитивная сила сегодня по своей физической сути представляется наиболее обобщающим интегральным параметром оценки именно совокупной поврежденности металла на микроуровне, т. е. диагностические возможности этого параметра существенно шире усталостного контроля. Поэтому дальнейшая и растущая востребованность коэрцитиметрии объективна и обещает только развитие понимания текущего состояния металла, но никак не его консервацию на очередном уровне.

Более подробно см. сайт [www.snr-ndt.com](http://www.snr-ndt.com).

*Г. Я. Безлюдько, Б. Е. Попов, Р. Н. Соломаха  
ООО «Специальные Научные Разработки»*