

УДК 629.01

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДДЕФЕКТНОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ПРИ УСТАЛОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

Ю.И. Матяш¹, Ю. М. Сосновский¹, А.В. Колтышкин²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Россия, г. Омск;

²Омское пассажирское вагонное депо ЛВЧД-1, Россия, Омск.

Аннотация. В статье показано, что в процессе эксплуатации, под воздействием статических или знакопеременных нагрузок происходит изменение физико-химических свойств стали, которое приводит к повышению хрупкости. Предлагается новый подход для оценки преддефектного состояния деталей и узлов на основе изменения структурной рыхлости. На основе контроля структурных изменений металлов в процессе их эксплуатации может быть создана эффективная система оценки остаточного ресурса.

Ключевые слова: циклическая нагрузка, структура, гистерезис, диффузия, диагностика.

Введение

Проблема оценки остаточного ресурса стальных узлов и деталей не является новой. Вместе с тем, она не теряет актуальности и в настоящее время. Более того, поскольку темпы технического перевооружения промышленного оборудования отстают от темпов его старения, актуальность развития достоверных методов оценки остаточного ресурса повышается.

Анализируя существующие на сегодняшний день методы оценки остаточного ресурса, главным образом можно выделить два подхода:

1. Вероятностные методы, в основу которых заложена статистика отказов.

2. Технические методы, в основе которых лежат способы разрушающего и неразрушающего контроля.

Очевидно, что зоны повышенной концентрации напряжений являются наиболее вероятными областями разрушений. Именно в них начинают происходить преддефектные изменения структуры. По мнению профессора Дубова А.А., именно игнорирование структурных изменений является одним из существенных недостатков существующих методов оценки остаточного ресурса [1].

Существующие методы, основанные на анализе кинетической диаграммы усталостного разрушения [2], теряют свою актуальность, в связи с тем, что динамика развития усталостных трещин чаще всего имеет "взрывной" характер. Проведенное диссертационное исследование по прогнозированию усталостного ресурса стальных деталей тележек грузовых вагонов, также не учитывает активизацию физико-химических процессов вызванных внешним нагружением [3]. Вместе

с тем, именно со структурными изменениями связаны изменения физических и химических свойств стали. В данной работе, мы акцентировали внимание на усталостных нагружениях, которым подвержены стальные детали изготовленные из стали марки 20ГЛ при нормальных условиях (комнатные температуры и нормальное атмосферное давление).

Основные закономерности усталостных разрушений

Большая часть стальных узлов и деталей в промышленности и на транспорте работает в условиях статических или циклических нагружений в области упругой деформации. При этом, к основным закономерностям процесса усталостного разрушения металлов при циклических нагружениях можно отнести следующее.

1. Циклическая нагрузка вызывает разрушение металлов при напряжении не только меньшем предела прочности, но и меньшем предела текучести и предела упругости. Чем ниже напряжение, тем больше нужно приложить смен (циклов) напряжений, чтобы вызвать разрушение образца. Зависимость между напряжением и числом циклов, вызывающим разрушение образца изображается в виде усталостной кривой (кривая Велера) [4].

2. Разрушение металла под действием циклической нагрузки носит локальный характер.

3. Способность металла сопротивляться повторным знакопеременным нагрузкам характеризуется циклической вязкостью металла. Она характеризует способность металлов поглощать энергию в необратимой форме. Кривые деформации при нагружении и разгрузке не совпадают между собой, а образуют петлю гистерезиса. Площадь петли гистерезиса характеризует ту работу, которую

металл способен поглотить в необратимой форме за один цикл.

4. Согласно теории кинетической прочности [5] процесс разрушения на начальной стадии следует рассматривать как процесс, в котором вследствие тепловых флуктуаций преодолевается энергетический барьер U_0 , величина которого может быть уменьшена в результате действия внешних напряжений σ .

$$t = t_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

здесь t – время между двумя последовательными флуктуациями, t_0 – период собственных тепловых колебаний атома, γ – структурный фактор, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, σ – внешнее напряжение. Как видно из приведенной формулы (1) внешняя нагрузка σ и повышение температуры приводит к повышению вероятности флуктуационного перехода.

5. Период зарождения усталостных трещин, согласно [4] можно разделить на три основные стадии: стадия циклической микротекучести, стадия циклической текучести и стадия циклического упрочнения (разупрочнения). Склонность металлов к циклическому упрочнению или разупрочнению определяется отношением предела прочности σ_B к условному пределу текучести $\sigma_{0,2}$. Если отношение $\sigma_B / \sigma_{0,2} \leq 1.2$, то происходит разупрочнение, при $\sigma_B / \sigma_{0,2} \geq 1.4$ происходит упрочнение, при $1.2 \leq \sigma_B / \sigma_{0,2} \leq 1.4$ может происходить как упрочнение, так и разупрочнение. На первых двух стадиях, хотя и происходят изменения в структурном состоянии, механические свойства при этом практически не меняются. На стадии же циклического упрочнения или разупрочнения происходит интенсивное изменение механических свойств.

Влияние углерода на физико-механические свойства стали

В настоящее время, например, для производства боковых рам тележек грузовых вагонов используется сталь марки 20ГЛ. Согласно ГОСТ 21357-87 основной химический состав стали (в %) приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав стали 20ГЛ

C	Si	Mn	S	P
0,15 – 0,25	0,2 – 0,4	1,2 – 1,6	до 0,04	до 0,04

Режимы термической обработки стали при производстве включают нормализацию (880 – 900°C, отпуск 600 – 650°C) или закалку (870 – 890°C, отпуск 620 – 650°C).

При нормальных условиях, углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения – цементита (Fe_3C). Увеличение процентного содержания C в стали, приводит к росту карбидной фазы, следовательно, к увеличению твердости и прочности и, как следствие, снижению пластичности и вязкости стали. С физической точки зрения увеличение доли углерода приводит к увеличению электросопротивления и коэрцитивной силы, снижается магнитная проницаемость.

Согласно [6], количественная мера упрочнения феррита при легировании различными химическими элементами может быть найдена из выражения:

$$\sigma_{TP} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot C_i, \quad (2)$$

здесь σ_{TP} – вклад легирующих элементов, k_i – коэффициент упрочнения феррита при растворении в нем i – легирующего элемента, C_i – концентрация i – легирующего элемента растворенного в феррите. Значения коэффициентов упрочнения k_i приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов упрочнения феррита различными растворенными в нем элементами

Элемент	C	P	Si	Mn	Cr	Mo
k_i , МПа/%	4670	690	86	33	31	11

Как видно из таблицы 2, наибольший упрочняющий эффект связан с углеродом.

С точки зрения физики, растворенные в феррите элементы, в исходном состоянии, приводят к тому, что образуется неравновесная термодинамическая система, которая постепенно стремится перейти в равновесное состояние. Основным механизмом такого перехода является диффузия легированных элементов. Скорость диффузии в этом случае будет определяться выражение (1) и существенно зависеть от внешнего напряжения, понижающего потенциальный барьер и температуры.

Возможны два механизма выхода углерода:

1. Диффузия атомов углерода к дислокациям и границам зерен.
2. Образование и рост карбидов.

Диффузия атомов углерода к дислокациям приводит к разупрочнению феррита, он становится «мягче», сталь становится пластичнее. Рост карбидов, напротив, приводит к тому, что доля «жесткой» фазы в стали увеличивается, повышается суммарная твердость, происходит охрупчивание. Именно это состояние является наиболее опасным и критическим. Вероятность хрупкого разрушения становится наибольшей. Дополнительным фактором влияющим на диффузионный процесс является размер зерна. Чем меньше размер зерна, тем быстрее идет процесс диффузии. Углероду надо пройти меньший путь для выхода на границу зерен. Соответственно, концентрация углерода, также оказывает определенное влияние. Чем больше углерода, тем быстрее идет процесс диффузии. Косвенным подтверждением выше сказанного предположения являются результаты диссертационного исследования приведенные в [7]. Автор исследовал и проанализировал разрушение более 300 деталей автосцепных устройств вагонов изготовленных из стали марки 20ГЛ. В частности, было установлено, что:

1. Процесс деградации (охрупчивания) прочностных свойств материала (та же сталь марки 20ГЛ) весьма стабилен и устойчив.

2. Степень деградации (охрупчивания) прочностных свойств материала можно оценивать по изменению его твердости.

Дополнительным подтверждением являются результаты, приведенные в [8]. Объектом исследования в этой работе являлась реакционная колонна одного из нефтехимических заводов, изготовленная из углеродистой стали 20 с антикоррозийным медным покрытием. Рабочие параметры эксплуатации колонны составили: давление - 8 МПа, температура - 300°C. В частности, было отмечено, что под воздействием эксплуатационных факторов происходит изменение структуры и механических свойств материала (охрупчивание). Приведенный пример показывает, что изменение структуры и механических свойств материала (охрупчивание) происходит не только при знакопеременных нагрузках, но и при воздействии статических нагрузок.

Рыхлость, как объективный критерий остаточного ресурса.

Создание объективного контроля, за техническим состоянием стальных узлов и деталей предполагает разработку методики оперативного и достоверного диагностирования. Одним из вариантов такого контроля может быть метод, основанный на изменении физи-

ко-химических свойств металлов, в частности, на характере изменения структурной рыхлости стали, являющейся показателем ее термодинамической стабильности.

Рыхлость косвенно характеризует энергию межатомного взаимодействия. Чем прочнее химические межатомные связи и больше их энергия, тем более отчетливо проявляется эффект «стягивания» атомов в компактную кристаллическую решетку (структуру) и тем меньше будет соответствующая величина ее структурной рыхлости [9]. Слабые химические связи соединения говорят о меньшей энергии их соединения и, следовательно, о большей структурной рыхлости. Очевидно, что рыхлость является величиной обратной энергетической плотности вещества.

В научной литературе и, в частности в работе [9] представлено достаточно большое количество корреляционных зависимостей физических параметров от структурной рыхлости.

Формула структурной рыхлости ω кристаллического вещества имеет вид [9]:

$$\omega = \frac{M}{n \cdot \rho}, \quad (3)$$

где M – молекулярная масса, n – число структурных узлов (атомов, ионов, комплексов) в формульной единице соединения, ρ – плотность вещества.

В качестве примера приведем расчет структурной рыхлости карбида железа Fe_3C .

$$\omega_1 = \frac{55,849 \cdot 3 + 12,011}{4 \cdot 7,86} = 5,74 \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{атом}}. \quad (4)$$

Для феррита, у которого в ОЦК решетке находится, например, один атом углерода рыхлость можно рассчитать так:

$$\omega_2 = \frac{55,849 + 12,011}{2 \cdot 7,86} = 4,32 \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{атом}}. \quad (5)$$

Если в ОЦК решетке феррита находятся два атома углерода, то:

$$\omega_3 = \frac{55,849 + 2 \cdot 12,011}{3 \cdot 7,86} = 3,39 \frac{\text{см}^3}{\text{г} \cdot \text{атом}}. \quad (6)$$

Интегрированная рыхлость стали в общем случае может быть найдена по формуле:

$$\omega = x_1 \omega_1 + x_2 \omega_2 + \dots, \quad (7)$$

где x_1 – доля карбида железа в стали, x_2 – доля феррита с растворенным в решетке одним атомом углерода, ω_1 и ω_2 рыхлость соответствующей фазы. В принципе сумма (7) может быть дополнена другими включениями.

При диффузии углерода доля карбида x_1 может меняться в сторону увеличения, а доля x_2 легированного феррита в сторону уменьшения. В зависимости от того, какое слагаемое в выражении (7) растет быстрее, так будет изменяться и общая структурная рыхлость. При охрупчивании стали рыхлость уменьшается.

Выбор параметра рыхлости был обусловлен, прежде всего, тем, что в работе [9] представлено достаточно большое количество корреляционных зависимостей физических параметров от структурной рыхлости: 1) температуры плавления, 2) относительной твердости, 3) абсолютной твердости по Викерсу, 4) поверхностной энергии, 5) модуля Юнга, 6) модуля сдвига, 7) модуля всестороннего объемного сжатия, 8) коэффициентов теплового линейного и 9) объемного расширений, 10) объемной сжимаемости, 11) скорости распространения звука, 12) показателя преломления, 13) трещиностойкости, 14) эффективной энергии разрушения, 15) пограничной межатомной электронной плотности, 16) кристаллических электроотрицательностей, 17) работы выхода электрона, 18) теплопроводности, 19) максимальных частот колебания атомов, 20) теплоемкости. Не исключено, что приведенный список физических параметров может быть расширен с выводом соответствующей зависимости.

В качестве примера на рисунке 1 приведен график зависимости модуля Юнга от структурной рыхлости, построенный по корреляционной зависимости (8):

$$\ln E = -1,86 \cdot \ln \omega + 8,81. \quad (8)$$

Из рисунка 1 видно, что при уменьшении рыхлости модуль Юнга увеличивается (хрупкость увеличивается).

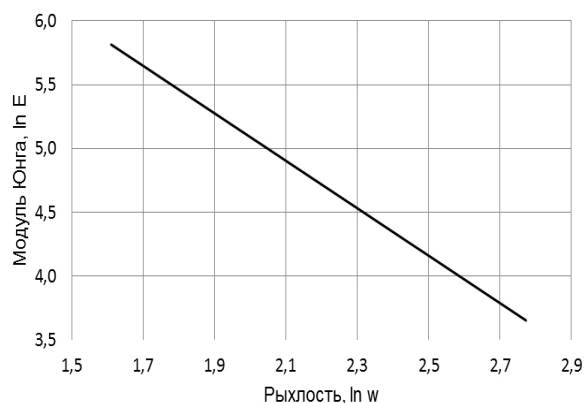


Рис. 1. Зависимость модуля Юнга кристаллического вещества от структурной рыхлости

Кроме этого, при уменьшении рыхлости увеличивается относительная и абсолютная твердость, поверхностная энергия, модуль сдвига, скорость звука, уменьшается коэффициент теплового линейного расширения и теплоемкость и т.д. На базе таких изменений мы имеем возможность оперативно производить оценку преддефектного состояния деталей, сравнивая текущие показатели с показателями контрольных деталей. Для выбора предельных критических значений физических параметров и соответствующих им критических значений рыхлости, необходимо провести дополнительные теоретические и экспериментальные исследования для каждой марки стали.

Выводы

1. Теоретически показано, что рыхлость может быть положена в основу разработки способа оценки остаточного ресурса.

2. С практической точки зрения существует принципиальная возможность разработки приборов, основанных на тех или иных закономерностях физических свойств металлов от рыхлости, которые наиболее оптимально подходят для реальных узлов и деталей и условий при эксплуатации.

На основе вышеизложенного, возможно создание эффективной методики контроля и диагностики остаточного ресурса стальных деталей и узлов, которая позволит существенно повысить эффективность работы промышленной отрасли и избежать аварий и крупномасштабных катастроф.

Библиографический список

1. Дубов, А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А.А. Дубов // Арматуростроение. Методы контроля и диагностики. – 2012. – №3 (78). – С. 74-78.
2. Матвиенко, Ю.Г. Модели и критерии механики разрушений / Ю.Г. Матвиенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
3. Якушев, А.В. Прогнозирование усталостного ресурса литых деталей тележки грузового вагона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург.: УрГУПС, 2007. – 16 с.
4. Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. Пособие / В.Ф. Терентьев, А.А. Оксогоев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
5. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел: Монография / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский – М.: Наука, 1974. – 560 с.
6. Чувильдеев, В.Н. Вирясова Н.Н. Деформация и разрушение конструкционных материалов: проблемы старения и ресурса. Учебное пособие / Под общей ред. В.Н. Чувильдеева. – Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2010. – 67 с.

7. Левкович, Т.И. Прогнозирование вероятности опасных хрупких разрушений корпусов автосцепок вагонов: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Брянск.: БГТУ, 2000. – 22 с.

8. Закирничная, М.М. Охрупчивание стали 20 в процессе длительной эксплуатации / М.М. Закирничная, И.П. Кузеев, В.К. Бердин, Н.Ю. Кириллова // Нефтегазовое дело, Машины и аппараты. – 2006. – Т. 4, №1. – С. 207–214.

9. Зуев В.В. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов (включая магнезиальные цементы) / В.В. Зуев, Л.Н. Поцелуева, Ю.Д. Гончаров. – СПб.: Изд-во завода «Альфapol», 2006. – 139 с.

PHYSICAL AND CHEMICAL BASES OF ESTIMATION PREVIOUS TO DEFECT STATES STEEL COMPONENTS AT FATIGUE LOADING

YU.I. Matyash, Yu. M. Sosnovsky, A.V. Koltyskin

Abstract. The article demonstrates that during operation under the influence of static or alternating loads is changed physical and chemical properties of the steel, which leads to increased fragility. A new approach to assess of previous to defect the state steel components on the basis of changes in the structural looseness. On the basis of monitoring structural changes in metals during their operation may be effective system of residual life assessment.

Keywords: cyclic loading, structure, hysteresis, diffusion, diagnostics.

References

1. Dubov A.A. *Problemy ocenki ostatochnogo resursa starejushhego oborudovaniya* [Problems of assessing aging equipment residual life. Valve. Quality monitoring and diagnostics]. St. Petersburg: 2012. no. 3 (78). pp.74-78.

2. Matvienko Y.G. *Modeli i kriterii mehaniki razrushenij* [Models and criteria of fracture mechanics]. Moscow, FIZMATLIT, 2006. 328 pp.

3. Yakushev A.V. *Prognostirovanie ustalostnogo resursa lityh detalej telezhki gruzovogo vagona: avtoref. dis. kand. tehn. nauk* [Prediction of cast parts of freight car bogie's fatigue life: the thesis abstract. PhD tehn. sciences]. Yekaterinburg: USURT 2007. 16 p.

4. Terentyev V.F., Oksogoev A.A. [Cyclic strength of metallic materials: Textbook]. Novosibirsk: Publishing house of the NSTU, 2001. 61 p.

5. Regel V.R., Slutsker A.I., Tomashevsky E.E. *Ciklicheskaja prochnost' metallicheskih materialov* [The kinetic nature of the strength solids: Monograph]. Moscow, Science, 1974. 560 p.

6. Tchuveldeev V.N. Viryasova N.N. *Deformacija i razrushenie konstrukcionnyh materialov:*

problemy starenija i resursa [Deformation and fracture of structural materials: the problem of aging and life. Textbook]. Nizhny Novgorod: Publishing house of the NNSU, 2010. 67 pp.

7. Levkovich L.I. *Prognostirovanie verojatno-sti opasnyh hrupkih razrushenij korpusov avto-scepok vagonov: avtoreferat dissertacii na so-iskanie uchjonoj stepeni kandidata tehniceskix nauk* [Predicting the probability of dangerous brittle fractures of bodies cars' autohitches: the thesis abstract on scientific degree of technical sciences candidate's competition]. Bryansk: BSTU, 2000. 22 p.

8. Zakirnichnaya M.M., Kuzeev I.R., Berdin V.K., Kirillova N.U. *Ohrupchivanie stali 20 v processe dlitel'noj jekspluatacii* [Steel 20 embrittlement during long operation. Petroleum Engineering, Machinery and apparatus]. Ufa:2006. vol. 4, no. 1. pp. 207–214.

9. Zuev V.V., Potselueva L.N., Goncharov Y.D. *Kristallojenergetika kak osnova ocenki svojstv tverdotel'nyh materialov (vklju-chaja magnezial'nye cementy)* [Crystal energetics as a basis for evaluation of solid materials properties (including magnesia cement) St. Petersburg: Publishing House of plant "Alfapol"], 2006. 139 pp.

Матяш Юрий Иванович (Россия, Омск) – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры Вагоны и вагонное хозяйство ФГБОУ ВПО «ОмГУПС». (644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, e-mail: matiash41@mail.ru).

Сосновский Юрий Михайлович (Россия, Омск) – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры Физика и химия ФГБОУ ВПО «ОмГУПС». (644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, e-mail: sosnovskyy@mail.ru).

Колтышкин Андрей Валерьевич (Россия, Омск) – инженер путей сообщения, Омское пассажирское депо ЛВЧД-1. (644121, г. Омск, ул. Леконта, 30, e-mail: kav-91-07-28@mail.ru).

Yury I. Matyash (Russian Federation, Omsk) – doctor of technical science, professor «Carriage and carriage sector» department, Omsk State Transport University (OSTU). (644046, Omsk, 35 Marksa pr., e-mail: matiash41@mail.ru).

Yury M. Sosnovsky (Russian Federation, Omsk) – candidate of physico-mathematical sciences, assistant professor «Physics and chemistry» department, Omsk State Transport University (OSTU). (644046, Omsk, 35 Marksa pr., e-mail: sosnovskyy@mail.ru).

Andrey V. Koltyskin (Russian Federation, Omsk) – railway engineer, Omsk Passenger Depot. (644121, Omsk, Lekonta st., 30, e-mail: kav-91-07-28@mail.ru).