

УДК 621.19.24

## НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛА ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ТВЕРДОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ПЕРЕНОСНЫХ ТВЕРДОМЕРОВ

Е. Я. ВЕКСЛЕР, И. В. ЗАМЕКУЛА, В. Ю. ТОЛСТОВ, Е. В. СЕМЕШКО

*Рассмотрены неразрушающие методы определения механических свойств металла энергооборудования в процессе длительной эксплуатации. Описаны применяемые в практике неразрушающего контроля типы современных портативных твердомеров. Представлены способы расчета механических свойств металла по твердости. На основе анализа многолетнего опыта применения технологии неразрушающего контроля механических свойств в энергосистеме Киевэнерго показана возможность и перспективность использования технологии при комплексной оценке ресурса надежной эксплуатации оборудования, отработавшего нормативные сроки.*

*The paper deals with non-destructive methods of determination of mechanical properties of metal of power generation equipment during long-term operation. Types of modern portable hardness meters applied in NDT practical work are described. Methods of calculation of metal mechanical properties with regard to hardness are given. The possibility and prospects for using the technology in comprehensive evaluation of safe residual operating life of equipment which has operated past its specified life, are demonstrated based on analysis of many years of experience of application of the technology of NDT of mechanical properties in Kievenergo power system.*

Сложные проблемы обеспечения безаварийной работы металла энергооборудования связаны с его эксплуатацией при повышенных температурах (от 115 до 565 °С), повышенном рабочем давлении среды (от 0,07 МПа до неограниченного) и больших сроках службы (от 100 до 350 тыс. ч и более, или от 10 до 40 лет и более).

Наблюдение за металлом различных узлов энергооборудования в течение расчетных сроков службы и сроков, превышающих расчетные, показало, что используемые в теплоэнергетике стали в процессе эксплуатации претерпевают изменения микроструктуры, связанные с распадом основного твердого раствора, выделением избыточных фаз, их коагуляцией, перераспределением и накоплением микроповрежденности [1].

Развивающиеся в процессе эксплуатации структурные изменения закономерно приводят к изменению механических свойств стали. Таким образом, уровень механических свойств стали, оцененный после различных сроков эксплуатации, может считаться одним из критериев оценки ее работоспособности и остаточного ресурса.

Опыт эксплуатации энергооборудования высокого давления (котлов, турбин, паропроводов, тепломагистралей, сосудов) показывает, что особенностями поведения каждой детали в процессе длительной работы во многом обусловлены ее исходным состоянием и условиями службы. Следовательно, для получения достоверных сведений о поведении металла в течение длительного време-

ни и, в особенности, при решении вопроса о надежности дальнейшей эксплуатации оборудования, срок службы которого приближается к расчетному или превышает его, исследование только одной детали из всего комплекса узла оказывается недостаточным.

Для осуществления программы систематических массовых исследований металла деталей действующего оборудования были применены неразрушающие методы контроля металла, позволяющие проводить исследования по месту без вырезки специальных образцов [2, 3]. К ним относится определение механических свойств металла по твердости с помощью переносных твердомеров [4, 5].

На практике этот метод является наиболее доступным и распространенным в технологии контроля механических свойств и технической диагностики.

Механические свойства металла определяются, как известно, стандартными методами, требующими вырезки специальных образцов.

Особенно сложно определение механических свойств металла действующих паропроводов высокого давления. В этом случае проверка механических свойств связана с рядом громоздких, длительных и дорогостоящих операций. Кроме того, в результате такой проверки на паропроводе появляются дополнительные заварки и сварные швы, что безусловно снижает его эксплуатационную надежность.



В связи с этим большой практический интерес представляют способы определения свойств металла без вырезки, позволяющие проводить массовую проверку металла каждой детали энергостановки в исходном состоянии и после длительных сроков службы. В основу неразрушающего метода определения твердости и механических свойств стали положен принцип определения «нового» числа твердости  $H_d$ , независимого от нагрузки и диаметра шарика в большом интервале нагрузок [5]. Новое число твердости или пластическая твердость представляет собой модуль упругости материала при вдавливании в него сферического наконечника, в отличие от чисел твердости по Бринеллю, характеризующих условное напряжение на поверхности отпечатка.

Новое число твердости определяется по глубине восстановленного отпечатка из соотношения:

$$H_d = \frac{P}{\pi D h}, \quad (1)$$

где  $P$  — «эффективная нагрузка»;  $D$  — диаметр шарика;  $h$  — глубина восстановленного отпечатка.

Поскольку при испытаниях по месту глубину отпечатка с необходимой точностью измерить невозможно, твердость  $H_d$  определяется по диаметру восстановленного отпечатка.

Установлена аналитическая зависимость между числом твердости  $H_d$  и твердостью по Бринеллю для  $HB \leq 300$ :

$$HB = 0,82H_d, \quad (2)$$

Как показано в работах [2, 5], новое число твердости  $H_d$  связано с основными механическими характеристиками следующими эмпирическими зависимостями:

предел прочности

$$\sigma_B = 0,37H_d(1 - 10^{-3}H_d), \text{ кгс/мм}^2; \quad (3)$$

предел текучести

$$\sigma_T = 0,185H_d, \text{ кгс/мм}^2; \quad (4)$$

относительное сужение

$$\psi_K = 0,36S_K(0,6 + \frac{170}{H_d})10^{-2}, \% \quad (5)$$

Установленные зависимости использованы для косвенного определения механических свойств теплоустойчивых сталей по твердости.

Проведены сравнительные исследования точности определения прочностных и пластических свойств металла стандартными методами и по твердости. В качестве материала исследования выбраны вырезки из труб паропроводов, в исходном состоянии и после различных сроков эксплу-

атации. В общей сложности было проведено сравнительное определение твердости и свойств более 200 деталей из сталей марок 20, 12МХ, 12Х1МФ и 15Х1М1Ф. Механические свойства, рассчитанные по твердости, сравнивались с данными стандартных испытаний исследованного металла на растяжение по ГОСТ 1497.

Анализ полученных данных показал следующее.

Зависимости (3, 4) для расчета предела прочности и предела текучести по твердости имеют общий характер и справедливы для всех исследованных сталей. В интервале величин  $\sigma_B$  50...55 кгс/мм<sup>2</sup> погрешность определения предела прочности составляет 15 %, а  $\sigma_B$  55...65 кгс/мм<sup>2</sup> — 6 %. Погрешность определения предела текучести  $\sigma_T$  несколько выше и составляет в среднем 17 %.

Как показывают данные расчета величины относительного сужения  $\psi_K$ , зависимость (5) не может считаться справедливой для исследованной группы сталей. Определение  $\psi_K$  по описанной методике нецелесообразно.

Наиболее распространенными в практике неразрушающего контроля твердости металла энергооборудования являются портативные электронные приборы динамического действия.

К ним в первую очередь относятся приборы типа ТЭМП, ТДМ, ТД-003, работающие по принципу упругого отскока бойка (принцип Шора) [7].

Принцип действия отечественного твердомера ТД-003 (производство НПП «Машиностроение», г. Днепропетровск) основан на измерении скорости отскока твердосплавного шарика диаметром 2,5 мм, служащего ударным элементом, и скорости его падения (рис. 1).

Допустимый диапазон измерений на приборе в единицах  $HB$  90...470, в единицах  $HRC$  20...70. При этом абсолютная погрешность определения твердости по Бринеллю в диапазоне  $HB$  90...150 составляет 10 % и  $HB$  150...470 составляет 15 %.



Рис. 1. Твердомер ТД-003 (датчик с индентором в виде шарика и дисплей прибора)

Прибор позволяет измерять твердость подповерхностных слоев исследуемой детали глубиной до 1 мм.

Для измерения твердости более тонких подповерхностных слоев детали (глубиной до 0,5 мм) применяется динамический твердомер ТДУ-005М отечественного производства (НПП «Машиностроение», г. Днепропетровск), работающий по принципу качающегося индентора.

В качестве индентора в приборе используется алмазная пирамидка, которая под действием пьезопластины колеблется на резонансной ультразвуковой частоте.

Допустимый диапазон измерений на приборе в единицах *HB* 95...470, в единицах *HRC* 20...70. При этом абсолютная погрешность определения твердости по Бринеллю в диапазоне *HB* 95...150 составляет 10 % и *HB* 150...300 — 15 %, *HB* 300...470 — 20 %.

К преимуществам описанных приборов прежде всего относятся их мобильность, малогабаритность, портативность, что позволяет проводить измерения твердости на действующем оборудовании различных параметров в труднодоступных участках на большом количестве деталей.

Поскольку инденторы приборов достаточно малы и работают в динамических режимах, на точность измерений в значительной степени влияют условия, при которых эти измерения проводятся. Достоверность результатов снижается при выполнении измерений в условиях тепловых цехов с естественной вибрацией работающего оборудования. При этом ошибка измерений проявляется при выполнении контроля тонкостенных труб пароперегревателей, экранов, гибов водопускных и пароперепускных труб с толщиной стенки менее 10 мм. Кроме того, недостоверные результаты могут быть получены при контроле твердости литых деталей оборудования (корпуса арматуры паропроводов, корпусные детали турбин и т. п.) за счет скрытых литейных дефектов типа пор и раковин.

В последнее время для повышения точности измерений твердости в различных производственных условиях получили распространение динамические ударные твердомеры, которые базируются на методе двойного ударного отпечатка [8].

К ним относится серия приборов ударного действия ВПИ Волгоградского политехнического института [5, 9].

Ударный твердомер ВПИ-1 (рис. 2) со сферическим индентором служит для определения твердости по *HB* методом ударного внедрения стального шарика диаметром 5 мм. Для проведения испытаний в окно бойка прибора вставляется эталон, твердость которого известна. При ударном нагружении под действием пружины происходит одновременное вдавливание шарика в поверхность



Рис. 2. Твердомер ВПИ-1 с индентором в виде шарика для двойного отпечатка с эталоном

эталона и испытуемого образца. Твердость определяют по отношению диаметров отпечатков на эталоне  $d_1$  и образце  $d_2$ .

Погрешность определения числа твердости *HB* по Бринеллю с помощью прибора ВПИ-1 не зависит от твердости эталона и не превышает 6 %.

Для оценки возможности определения механических свойств стали стандартными методами и по твердости *HB*, определенной с помощью ВПИ-1, были проведены сравнительные испытания металла 20 труб.

Ошибка в определении предела прочности и текучести по числу *HB*, определенному с помощью ВПИ-1, составляет 12 и 10 % соответственно. В интервале величин  $\sigma_B$  50...65 кгс/мм<sup>2</sup> погрешность определения предела прочности составляет только 6 %. Расчет величины относительного сужения по числу *HB* (ВПИ-1) не представляется возможным.

В мировой практике широкое применение получил переносной портативный ударный твердомер Польди-Хютте нового поколения, работающий по методу двойного отпечатка. В комплект прибора входят патентованные эталоны и оптическое устройство для измерения диаметров отпечатков.

Изложенные методы определения твердости и механических свойств теплоустойчивых сталей получили широкое распространение в энергосистеме Киевэнерго при проведении неразрушающего контроля свойств металла энергооборудования в процессе монтажа и длительной эксплуатации.

К объектам контроля в первую очередь относятся оборудование сверхвысокого, высокого, среднего и низкого давления, отработавшее расчетный или парковый ресурс, а также вспомогательное оборудование, отработавшее более 20 лет:

- блоки мощностью 100 и 300 МВт с наработкой соответственно до 260 и 220 тыс. ч;
- паровые и водогрейные котлы различной паропроизводительности с наработкой до 60 лет;
- тепломагистральные трубопроводы с наработкой до 45 лет;
- сосуды с наработкой до 50 лет.

Технология неразрушающего контроля включает массовые экспрессные измерения твердости деталей узла с помощью портативных электрон-

ных твердомеров. В случаях, когда результаты измерений не удовлетворяют нормативному уровню, проводится контрольная проверка твердости приборами ВПИ или Польди-Хютте, что обеспечивает более высокую точность.

Многолетний опыт использования неразрушающих методов контроля твердости и механических свойств металла энергооборудования показывает перспективность метода и возможность его применения при комплексном решении задач оценки ресурса надежной эксплуатации энергооборудования, отработавшего нормативный срок.

Измерение твердости по месту с помощью портативных динамических твердомеров позволяет получать достоверные результаты определения прочностных свойств металла, что значительно сокращает, а в ряде случаев исключает объем трудоемких, дорогостоящих прямых испытаний образцов металла на вырезках.


1. Векслер Е. Я., Гинзбург Э. С. Изменение структуры и свойств в стали 12Х1МФ в процессе эксплуатации

Энергоналадка Киевэнерго,  
Киев

энергооборудования // Электрические станции. — 1971. — № 4. — С. 28-31.

2. Векслер Е. Я., Славский Ю. И., Чайковский В. М. Оценка механических свойств металла энергооборудования неразрушающим методом // Энергетика и электрификация. — 1984, — № 4. — С. 8-11.
3. Векслер Е. Я., Славский Ю. И., Чайковский В. М. Оценка механических свойств металла энергооборудования неразрушающим методом // Там же. — 1984. — № 4. — С. 9-11.
4. ГОСТ 22761 — Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия.
5. Гудков А. А., Славский Ю. И. Методы измерения твердости металлов и сплавов. — М.: Металургиздат, 1982. — 164 с.
6. ГОСТ 18835 — Металл. Метод измерения пластической твердости.
7. ГОСТ 23273 — Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка (по Шору).
8. ГОСТ 18661 — Сталь. Измерение твердости методом ударного отпечатка.
9. Векслер Е. Я., Чайковский В. М. Современные методы контроля структуры и свойств металла энергооборудования. — Издание Укр. республ. правления науч.-техн. об-ва энергетика и электротехнической пром-ти. — Киев, 1982. — С. 62.

Поступила в редакцию  
28.01.2008



**HERVICON • 2008**

**9-12 сентября 2008 г. в г. Перемышль (Польша) состоится очередная XII Международная научно-техническая конференция «Герметичность, виброненадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования» — «ГЕРВИКОН-2008»**

**Тематика конференции**

Проблемы снижения стоимости жизненного оборудования  
 Вопросы динамики системы «ротор-опоры-уплотнения» центробежных машин  
 Снижение шума и вибрации насосов и компрессоров, вибродиагностика и прогнозирование остаточного ресурса  
 Повышение надежности и эффективности уплотнительных устройств насосов и компрессоров  
 Вопросы трибологии и метрологии опор и уплотнений  
 Экологически безопасная эксплуатация насосного и компрессорного оборудования, проблемы энерго- и ресурсосбережения

По инициативе фирмы «ТРИЗ» (г. Сумы, Украина) в рамках конференции состоится специализированный семинар «Проблемы безопасной эксплуатации компрессорного и насосного оборудования в химической промышленности» — «ЭККОН-08».

**Организационный комитет конференции «ГЕРВИКОН-2008»**

Сумский государственный университет ул. Римского-Корсакова, 2 г. Сумы, 40007, Украина тел./факс: +38 (0542) 33-35-94 E-mail: marts@omdm.sumdu.edu.ua	Politechnika Swietokrzyska Al. 1000-lecia PP7 25-314, Kielce, Poland тел./факс: +48(41) 342-45-16; +48 (41) 344-86-98 в г. Кельце, Польша E-mail: kundera@tu.kielce.pl
--	--