



## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ТВЕРДОМЕТРИИ ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

А. В. САДИЛО, В. Г. МАКАЦ, А. С. РАХМАННЫЙ

*Показана возможность применения метода твердометрии для определения механических свойств металла. Получены результаты контроля по каждому основному несущему элементу грузоподъемных механизмов с учетом факта изготовления различных элементов из сталей с разными механическими свойствами.*

*Applicability of hardness measurement method for determination of the metal mechanical properties is demonstrated. Testing results were obtained for each main load-carrying element of hoisting mechanisms allowing for the fact of various elements being made from steels with different mechanical properties.*

Возможность применения метода твердометрии для определения механических свойств металла рассмотрена рядом авторов [1, 2] и регламентирована соответствующей нормативной документацией [3–6] для ряда объектов повышенной опасности, в том числе: объектов атомной энергетики, сосудов, работающих под давлением, котлоагрегатов, трубопроводов, объектов нефтехимии. С начала 1970-х годов метод динамической твердометрии широко применяется при экспертном обследовании — для определения механических свойств металла (предела текучести и временного сопротивления на разрыв) как функции твердости по Бринеллю ( $HB$ ). В силу актуальности этот вопрос часто рассматривается в литературе [7].

При экспертном обследовании грузоподъемных механизмов (ГПМ) этот метод еще не нашел широкого применения, однако целесообразность его применения обоснована необходимостью:

получения информации о механических свойствах металла  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$  основных несущих металлоконструкций при определении возможности дальнейшей эксплуатации, реконструкции, модернизации эксплуатируемых ГПМ; входном контроле импортируемых ГПМ, механические свойства металла которых неизвестны или нуждаются в уточнении;

определения прочности и пригодности к дальнейшей эксплуатации ходовых колес кранов мостового и башенного типа, для которых нормативные значения изложены в работе [8] ( $HB = 320 \dots 390$  МПа) или согласно работе [12] могут быть рассчитаны по формуле:

$$[\sigma_0] = 3,92 HB e^{-HB/800}, \quad (1)$$

где  $[\sigma_0]$  — допустимое значение эффективных напряжений;  $e$  — основание натурального логарифма;

оценки прочности элементов (рельсов) надземных (наземных) подкрановых путей, необходимая

твердость поверхности которых регламентирована нормативными документами [2, 9], может быть рассчитана по формуле:

$$HB_p \geq HB_k \sqrt[9]{\frac{\pi D z}{L}}, \quad (1a)$$

где  $HB_p$ ,  $HB_k$ , МПа — поверхностная твердость рельса и колеса соответственно;  $D$  — диаметр колеса;  $z$  — количество ходовых колес на концевой балке;  $L$  — длина рабочего участка, м.

При проведении экспертного обследования определить твердость  $HB$  поверхности катания практически легче, чем измерить нормированные [10] геометрические браковочные показатели, для определения которых необходимо провести демонтаж колес.

Существующие технологии определения  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ] и  $\sigma_B$ , рекомендованные и нормированные [10, 11], имеют определенные недостатки.

### 1. Метод вырезания проб.

1.1. Необходимость проведения вырезки большого количества заготовок, необходимых для изготовления образцов, при этом их количество возрастает с учетом разных напряжений по сечениям; разные марки сталей, использованные для изготовления металлопроката; отсутствие фактических сведений о действительном (не минимально гарантированном) значении  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ], которое является основной расчетной величиной. Ориентировочно количество образцов, согласно требованиям [10] по разным типам ГПМ, приведено в табл. 1.

Меньшее количество образцов ведет к получению неполной информации о состоянии металла основных несущих металлоконструкций ГПМ в целом и увеличению возможной погрешности при проведении проверочных расчетов.

1.2. Изменение свойств металла в процессе его резки, механической обработки при изготовлении образцов с целью приведения их в соответствие с требованиями ГОСТ 1497;



**Т а б л и ц а 1. Ориентировочное количество образцов, необходимых для получения достоверных сведений о механических свойствах металла несущих металлоконструкций ГПМ**

| Тип крана  | Место вырезки согласно работе [10]   | Общее количество проб |
|--|--|-----------------------|
| Мостовой однобалочный  | Главная балка — 2 (по центру и место постоянного подъема–опускания груза)<br>Вертикальная ферма (при наличии) — 3<br>Концевая балка — 2            | 7                     |
| Мостовой двухбалочный с главными балками коробчатого сечения | Главная балка — 4 (по центру и место постоянного подъема–опускания груза)<br>Концевая балка — 2 (по центру, полка, стенка)<br>Тележка грузовая — 1 | 7                     |
| Мостовой двухбалочный ферменной конструкции                  | Главная балка — 4 (раскосы, пояс)<br>Концевая балка — 2<br>Тележка грузовая — 1  | 7                     |
| Козловой   | Главная балка (ригель) — 5...7 в зависимости от типа<br>Стойки — 4   | 11                    |

1.3. Возможность ошибки работника (человеческий фактор), проводящего вырезку металла, изготовление образцов, испытание, а также погрешность разрывной машины, невозможность точного определения площадки текучести.

Суммарная погрешность  $\gamma$  при определении  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ] этим методом математически не оценивалась в полном объеме, но по оценке работы [12] она достигает 10...12 % (данное значение — ориентировочное, так как невозможно точно определить погрешность, обусловленную п. 1.2. и 1.3.)

2. Метод магнитного контроля (коэрцитометрия) согласно работе [13] позволяет определять остаточный ресурс металла основных несущих металлоконструкций.

Метод не может быть использован для проведения проверочных расчетов, так как не определяет значения  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ], необходимые для определения возможности изменения грузоподъемности и других основных параметров, а значение зоны эксплуатации (состояния металла) определялось, исходя из гарантированного значения  $\sigma_T$  [ $\sigma_{0,2}$ ] согласно нормативной документации (например, для стали Ст3  $\sigma_T = 2300 \text{ кг/см}^2$  (230 МПа), хотя по графику (рис. 1) приведенное согласно работе [9] значение  $\sigma_T$  ( $\sigma_{0,2}$ ) достигает  $3300 \text{ кг/см}^2$  (330 МПа).

По экспериментальным данным, полученным авторами при механических испытаниях образ-

цов, вырезанных из 70 ГПМ мостового типа, эксплуатирующихся 20 лет и более, среднее значение составляет 454,0 МПа.

Преимуществами метода твердометрии являются:

- возможность получения результата по каждому основному несущему элементу ГПМ; при этом имеется возможность учитывать факт изготовления различных элементов из сталей с разными (отличными на величину до 20 %) механическими свойствами;

- возможность учета погрешности прибора при обработке результатов измерения нормативными методами.

Преимуществом этого метода является невозможность его использования при отклонении результата  $S/HB > 0,1$ , где  $S$  — среднее квадратичное отклонение следствий испытаний;  $HB$  — среднее арифметическое значение твердости (по Бринеллю).

Согласно работе [6], возможное минимальное среднее значение измеренной твердости будет

$$HB_0 = HB_{cp} - k_c \Delta_{cp} \tag{2}$$

где  $k_c$  — коэффициент, который определяется с помощью распределения Стюдента;  $\Delta_{cp}$  — среднее квадратичное отклонение величины  $HB_{cp}$

$$HB_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n HB_i \tag{3}$$

где  $HB_{cp}$  — среднее значение твердости элемента несущей металлоконструкции ( главная балка, концевая балка, элементы фермы–стойка, раскос, пояс).

3. Практическая легкость подготовки поверхности перед проведением испытаний. Нужно качество поверхности ( $R_a 2,5[R_z 20]$ ) легко достигается с помощью шлифовальной машинки с обычным кругом. При проведении работ авторами были проанализированы возможные причины по-

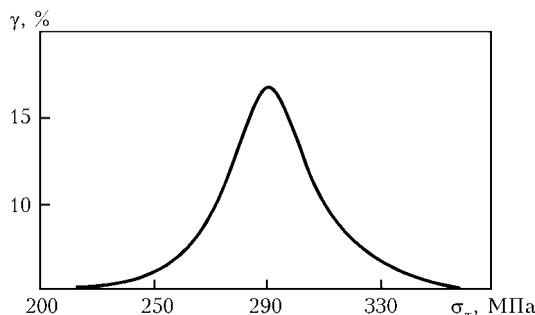


Рис. 1. Распределение значений  $\sigma_T$  ( $\sigma_{0,2}$ ) для стали Ст.3 по результатам экспериментальных испытаний



Таблица 2. Анализ возможных причин возникновения погрешностей при проведении твердомерии

| Источник погрешности | Проявление погрешности                | Причина  | Примечание   |
|----------------------|---------------------------------------|--|--|
| Испытанный объект    | Повышенный разброс значений твердости | Крупное зерно*   | —  |
|                      |                                       | Неплотное прилегание к опоре   | —  |
|                      |                                       | Степень и направление клеветы  | Устраняется шлифовальной машинкой  |
|                      |                                       | Значительная шершавость поверхности                                  |  |
|                      |                                       | Наличие окалины  |  |
| Прибор               | Повышенный разброс значений твердости | Низкое качество индентора  | Качество индентора, гарантированное изготовителем на определенное количество испытаний |
|                      |                                       | Отклонение действующей силы от нормали до контролируемой поверхности | Маловероятно в связи с прямолинейностью поверхности проката (кроме трубы)              |
| Наблюдатель          | Перекручивание результатов измерений  | Настройка прибора  | В связи с простотой настройки прибора — маловероятно                                   |
|                      |                                       | Вибрация прибора   | Маловероятно   |
|                      | Ошибка при отсчете на приборе         | Недостаточная подготовка наблюдателя                                 | Маловероятно в связи с простотой настройки прибора                                     |

\* Погрешность при измерении твердости по Бринеллю и Роквеллу для крупного зерна —  $M$ , в остальных случаях — не определено.

явления погрешностей согласно табл. 2.12 [14, 15]. Анализ представлен в табл. 2.

Таким образом, вероятность появления основных причин погрешности довольно мала, единственно возможным ее источником может быть непосредственно прибор. Но последние его модификации (например, ТДМ-1(2) производства НПФ «Ультраконсервис») значительно усовершенствованы и обеспечивают разброс значений твердости  $HB$  1...2 %, т. е. допустимый при практическом использовании.

С целью определения практической возможности применения метода твердомерии авторами проведены:

1. Сравнительные испытания результатов, полученных на стационарном твердомере ТШ-2М и приборах ТДМ-2 производства НПФ «Ультраконсервис».

Расхождение между результатами, полученными на стационарном твердомере ТШ-2М и с помощью ТДМ-2, составило, %:

низкоуглеродистая сталь Ст.3 (всех модификаций — сп, псп, кп) — 8;  
низколегированная сталь 09Г2С — 5.

2. Сравнительные испытания для определения  $\sigma_{0,2}[\sigma_T]$  методом твердомерии по схеме:

проведение поэлементной твердомерии приборами ТДМ-2 по схеме рис. 2, а;

определение среднего значения  $HB$  по каждому элементу несущей металлоконструкции;

определение  $\sigma_{0,2}$  по формулам:

$$\sigma_{0,2} = 0,37HB - 240 \text{ при } HB > 1500 \text{ МПа,} \quad (4)$$

$$\sigma_{0,2} = 0,2HB \text{ при } HB < 1500 \text{ МПа,} \quad (5)$$

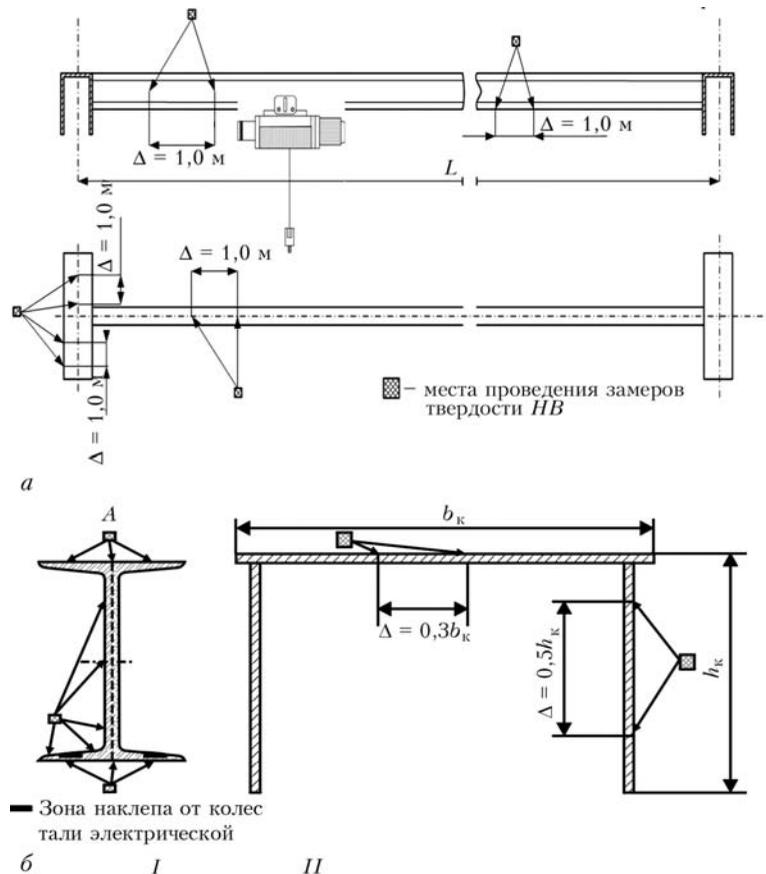


Рис. 2. Схема измерения твердости на мостовом однобалочном кране (а) и по перерезам мостового однобалочного крана (б): I — главная балка (в зоне наклепа измерения не проводились); II — концевая (опорное сечение)

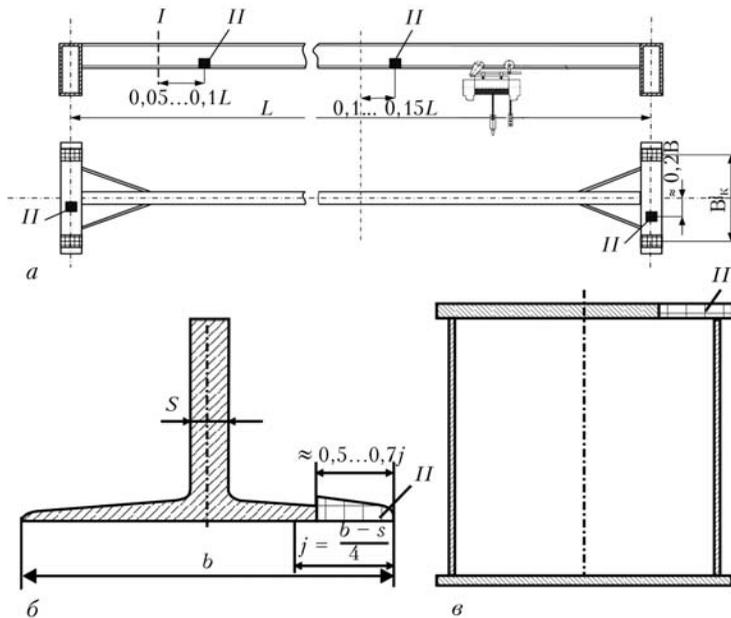


Рис. 3. Место фиксированного подъема–опускания груза (I) и места отбора проб (II) на мостовом кране (а), из главной балки (монорельса) (б) и концевой (в)



Рис. 4. Прибор ТДМ-2

либо по имеющимся справочным таблицам (например, табл. 13 [17], ГОСТ 22761) с последующим переводом  $\sigma_B$  в  $\sigma_{T(0,2)}$ ;

– определение  $\sigma_{0,2}$  классическим способом (вырезка проб), которое было проведено по 70 объектам-кранам мостового типа. Вырезка осуществлена по схемам, приведенным на рис. 2, 3.

При сравнительном анализе результатов испытания образцов на разрывной машине УГ-20 и результатов твердометрии по каждому элементу (главная и концевые балки по каждому ГПМ отдельно) среднее отклонение составило 7,3 % или  $\Delta\sigma_{0,2\text{ ср}} = 14$  МПа.

На взгляд авторов, это расхождение является удовлетворительным и результаты твердометрии могут быть использованы в реальной инженерной практике.

Сейчас авторами готовится и проводится повторный эксперимент с использованием усовершенствованного прибора ТДМ-2 2008 г. выпуска (рис. 4), который включает:

– сравнительные испытания с определением  $\sigma_{0,2}$  как функции твердости *НВ* на основных эле-

ментах, применяемых в конструкциях ГПМ металлопроката (двутавр, швеллер, уголок, труба) указанным выше прибором и стационарным твердомером ТШ-2М;

– повторную твердометрию металлоконструкций кранов, по которым проведено определение  $\sigma_{0,2}$  классическим способом со сравнительным анализом значений  $\sigma_{0,2}$ , полученных ранее на разрывной машине УГ-20 и описанным зависимостями (4), (5).

### Выводы

1. Суммарная погрешность при определении  $\sigma_{0,2}$  методом динамической твердометрии не превышает 10 % результатов, полученных классическим методом согласно требованиям ГОСТ 1497, что делает возможным применение значений, полученных этим методом, в инженерных расчетах при определении возможностей

дальнейшей эксплуатации, а также модернизации и реконструкции ГПМ (с изменением основных параметров). При вычислении  $\sigma_{0,2}$  как функции *НВ* получены меньшие значения, чем классическим способом, и таким образом, определение прочности, полученное с применением динамических твердомеров, идет «в запас».

2. Для окончательного определения возможностей метода твердометрии при определении значения  $\sigma_{0,2}$  необходимо проведение дополнительных испытаний:

– по каждому из основных типов проката отдельно (швеллер, двутавр, уголок, замкнутое трубчатое сечение, листовой прокат);

– на ферменных конструкциях отдельно для растянутых (сжатых) стрел;ней;

– прочности ходовых колес, элементов (рельсов) подкрановых путей, в том числе при предельных отклонениях их геометрических параметров для определения возможности дальнейшей эксплуатации.

3. Возможности последней версии прибора ТДМ-2 производства ООО «Промприлад» при некоторой его доработке позволяют получить достаточно точный результат, который может быть применен для проведения расчетов при модернизации (реконструкции) ГПМ, а также при проведении расчетно-аналитической процедуры с целью определения возможности их дальнейшей безопасной эксплуатации; входном контроле металлоконструкций импортируемых ГПМ.

4. Наличие отработанного в производстве и эксплуатации парка приборов, низкая трудоемкость, возможность применения методов математической статистики для обработки результатов делает этот метод возможным для легитимизации и применения при:



– проведении расчетов, выполняемых для определения возможности реконструкции (модернизации), в том числе с изменением основных параметров;

– определении возможности дальнейшей безопасной эксплуатации, в том числе в случаях уменьшения толщины прокатных элементов вследствие равномерной коррозии — в соответствии с требованиями [10] и других методических документов;

– определение возможности дальнейшей безопасной эксплуатации колес кранов, элементов (рельсов) подкрановых путей;

– входном контроле импортруемых ГПМ;

– входном контроле металлопроката на предприятиях краностроения и организациях, которые выполняют работы по ремонту и реконструкции ГПМ.

При этом необходима разработка и согласование с надзорными инстанциями соответствующей нормативной документации.

5. Применение твердометрии в комплексе с другими современными методами неразрушающего контроля (в том числе коэрцитометрией [13]) позволяет получить полнообъемную информацию о состоянии металла основных несущих металлоконструкций.

1. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: ИНД-ПРОМ, 1998. — 620 с.
2. ДСТУ 2484–94. Рельсы крановые. Технические требования.
3. Инструкция по экспертному обследованию (техническому диагностированию). Котлы паро- и водогрейные про-

мышленных предприятий / Мин-во пром. политики Украины. — Утв. Приказом № 87 от 09.03.2006 г. — Харьков, 2006.

4. Инструкция по экспертному обследованию (техническому диагностированию). Трубопроводы пары и горячей воды промышленных предприятий / Мин-во пром. политики Украины. — Утв. Приказом № 87 с 09.03.2006 г. — Харьков, 2006.
5. Инструкция по экспертному обследованию (техническому диагностированию). Сосуды, которые работают под давлением на промышленных предприятиях / Мин-во пром. политики Украины. — Утв. Приказом № 87 с 09.03.2006 г. — Харьков, 2006.
6. ДСТУ 4046–2001. Оборудование технологическое нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. Техническое диагностирование. Общие технические требования.
7. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. — Киев: Наук. думка, 1988. — 700 с.
8. ГОСТ 28648–90. Колеса крановые. Технические условия.
9. Гайдамака В. Ф. Грузоподъемные машины. — Киев: Вища шк., 1989. — 320 с.
10. ОМД 001.20253.01–2005. Методика проведения экспертного обследования кранов мостового типа.
11. НПАОП 0.00-1.01–07. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов.
12. Ярошевич В. Д., Рывкина Д. Г. Влияние способа получения проб для механических испытаний на их результаты // Физика металлов и металловедение. — 1958. — № 2.
13. МВ 0.00-7.01–05. Методические указания для проведения магнитного контроля напряженно-деформированного состояния металлоконструкций подъемных сооружений.
14. Должанский П. Р. Контроль надежности металла объектов котлонадзора. Справ. пособие. — М.: Недра, 1985. — 380 с.
15. Неразрушающие методы контроля механических свойств металла энергооборудования в процессе длительной эксплуатации по твердости с использованием современных переносных твердомеров / Э. Я. Векслер, И. В. Замекула, В. Ю. Толстов, Э. В. Семешко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2008. — № 1. — С. 39–42.

Дорожний експертно-техн. центр ЮЖД, Харьков  
НТУ «ХПИ»

Поступила в редакцию  
02.10.2008

## 15-а Міжнародна науково-технічна конференція ЛЕОТЕСТ-2010

### ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ТА АКУСТИЧНІ МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ

15–20 лютого 2010 р.

с. Славське

#### Тематика конференції:

- теорія і практика методів неруйнівного контролю матеріалів та виробів;
- діагностичні аспекти застосування методів неруйнівного контролю відповідальних конструкцій в експлуатації;
- електромагнітні та акустичні первинні перетворювачі та методи обробки сигналів, питання метрологічного забезпечення методів НК;
- автоматичні системи та прилади контролю якості виробів;
- науково-організаційні та економічні проблеми, питання акредитації лабораторій, сертифікації продукції, підготовки та атестації персоналу з методів НК.

Тел.: (032) 275-08-69, моб.: 067-9998834 (Учанін Валентин Миколайович).  
E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua або leotest@org.lviv.net.