

К определению механических характеристик сталей по результатам испытаний на твердость

О. А. Каток^а, Н. П. Рудницкий^а, В. П. Швеца^а, В. В. Харченко^а, А. В. Бажуков^б, П. Е. Мельник^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б Южно-Украинская АЭС, Южноукраинск, Украина

Проведен сравнительный анализ величин твердости по Бринеллю, полученных с помощью различного испытательного оборудования, и методик определения механических характеристик сталей по результатам испытаний на твердость, применяемых в атомной энергетике, включая разработанные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины установку и методику.

Ключевые слова: твердость по Бринеллю, твердомеры, инструментированное индентирование, механические характеристики.

Введение. В настоящее время текущий контроль технического состояния работающего оборудования энергетических реакторов Украины проводится по типовой программе ТПМК-10-01 [1]. Согласно этому документу оценка характеристик механических свойств конструкционных материалов по результатам измерения твердости проводится в соответствии с требованиями инструкции [2]. Анализ исследований, связанных с совершенствованием существующих методов неразрушающего контроля, показывает, что особое внимание специалисты в данной области уделяют повышению достоверности корреляций чисел твердости с характеристиками других свойств материалов. Исходя из этого в России введена в пользование новая инструкция [3]. Кроме уточненных корреляционных зависимостей для оценки механических свойств металлов после различных сроков эксплуатации в ней предусмотрено применение метода инструментированного индентирования.

Важнейшим условием обеспечения стабильности и достоверности оценки характеристик механических свойств по данным измерения твердости является надежность и точность результата самого измерения твердости. В документах [1–3] для измерения твердости указаны отечественные приборы и их зарубежные аналоги. Основные методы, используемые для определения твердости: механический, контактно-импендансный (ультразвуковой), динамический, а также инструментированное индентирование. Полученные значения параметров с помощью указанных методов переводятся в числа твердости, и от корректного их перевода зависит точность результата измерения.

В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины (далее – ИПП НАН Украины) выполнен большой комплекс исследований, направленных на разработку и усовершенствование новых методов определения характеристик прочности по результатам испытаний на индентирование и измерений твердости, а также на создание оригинального оборудования для испытаний по методу инструментированного индентирования в лабораторных и промышленных условиях с использованием различных режимов статического и циклического нагружения в макродиапазоне усилий индентирования.

Целью данной работы является проведение сравнительных испытаний на твердость различными измерительными приборами для определения твердости по Бри-

неллю и анализ методик определения механических характеристик материала по результатам измерений твердости согласно документам, используемым в атомной энергетике, и по данным испытаний методом инструментированного индентирования, включая установку и методику, разработанные в ИПП НАН Украины.

Методика испытаний и оборудование. Для сравнительных испытаний на твердость по Бринеллю использовали рекомендуемые в документах [1–3] переносные приборы COMPUTEST SC (механический), M1C 10DL – прибор линейки Krautkramer (ультразвуковой), ТДМ-1 (динамический), стационарные твердомеры типа ТШ-2 и ХПО-250, а также разработанную в ИПП НАН Украины установку UTM-20 НТ [4] для испытаний методом инструментированного индентирования. Испытания проводили на образцовой мере твердости типа МТБ в виде прямоугольной плитки размером 120 × 75 × 16 мм с твердостью 182 НВ. При измерении твердости строго соблюдали все требования эксплуатационных документов на соответствующее испытательное оборудование.

Для определения характеристик механических свойств сталей использовали методики, указанные в [1–3] и разработанные в ИПП НАН Украины [5]. Объектом исследования служила сталь 10ГН2МФА, широко применяемая в атомном машиностроении для изготовления парогенераторов, компенсаторов давления, коллекторов и других изделий. С целью исключения влияния погрешностей самих приборов на результаты определения механических характеристик с использованием методик [1, 3, 5] испытания на твердость и инструментированное индентирование проводили на одной лабораторной установке UTM-20 НТ [4].

Испытания методом инструментированного индентирования осуществляли в соответствии с требованиями международного стандарта [6] при статическом и циклическом режимах нагружения шариком диаметром 2,5 мм прямоугольных образцов размером 40 × 60 × 10 мм. Твердость измеряли по Бринеллю [7].

Механические характеристики стали 10ГН2МФА по данным испытаний на растяжение определяли согласно ГОСТ 1484 [8] на установке Instron модели 8802. Скорость перемещения захвата составляла 0,01 мм/мин. Испытывали образцы IV типа с диаметром рабочей части 5 мм. Деформацию регистрировали установленным на рабочую часть образца тензорезисторным преобразователем с базой $l_0 = 12,5$ мм.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты измерения твердости на образцовой мере по Бринеллю с применением различного испытательного оборудования следующие: 180,7 МПа (ТШ-2); 183,2 МПа (ХПО-250); 185,1 МПа (M1C 10DL); 179,4 МПа (COMPUTEST SC); 192,4 МПа (ТДМ-1); 182,6 МПа (UTM-20 НТ). Видно, что разброс твердости составляет 8,3%. Наибольшее отклонение результатов измерения твердости от таковых на образцовой мере получено при использовании переносного прибора ТДМ-1 (5,7%), наименьшее – твердомеров ТШ-2, ХПО-250 и установки UTM-20 НТ (не более 1%). Следует отметить, что максимальное отклонение, регламентированное в технической документации на прибор ТДМ-1, равно 15%. Наибольший разброс результатов измерения твердости, полученный на переносных приборах, возможно, обусловлен тем, что из-за малой глубины вдавливания индентора измеряемая твердость характеризует в большей степени свойства поверхностного слоя металла, тогда как твердость, измеренная стационарными приборами, – материал в целом.

Проведенные сравнительные испытания свидетельствуют о следующем:

для достоверной оценки деградации металла исследования необходимо проводить на одном приборе. При использовании двух приборов следует указывать разброс измерения твердости, полученный на образцовой мере твердости этими приборами;

при выборе прибора для измерения твердости элементов конструкции необходимо исходить из объема деформированного металла, а именно: для определения

твердости поверхностного слоя металла применять приборы с малыми нагрузками, тогда как для измерения твердости материала в целом – приборы с большими нагрузками;

корректное измерение твердости зависит от точности применяемого прибора и количества измерений;

разработанные в ИПП НАН Украины методика и оборудование могут быть использованы для измерения твердости по Бринеллю методом инструментированного индентирования.

Значения механических характеристик, определенные по данным испытаний на твердость и методом инструментированного индентирования, а также их отклонение от результатов испытаний на растяжение приведены в таблице.

Значения механических характеристик стали 10ГН2МФА, полученные при испытаниях на одноосное растяжение и твердость, а также методом инструментированного индентирования

ГОСТ 1497-84 [8]	Испытание на твердость				Метод инструментированного индентирования			
	[1]		[3]		[3]		[5]	
σ_B , МПа	σ_B^{ind} , МПа	Δ , %	σ_B^{ind} , МПа	Δ , %	σ_B^{ind} , МПа	Δ , %	σ_B^{ind} , МПа	Δ , %
627,7	682,9	–8,8	611,8	2,5	730,3	16,3	662,0	–5,5
$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_{0,2}^{ind}$, МПа	Δ , %	$\sigma_{0,2}^{ind}$, МПа	Δ , %	$\sigma_{0,2}^{ind}$, МПа	Δ , %	$\sigma_{0,2}^{ind}$, МПа	Δ , %
528,0	639,0	21,0	480,9	8,9	434,2	17,8	522,5	1,0

Примечание. σ_B – предел прочности; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести; Δ – относительное отклонение механических характеристик, полученных методами неразрушающего контроля (твердость по Бринеллю и метод инструментированного индентирования), от таковых, полученных при испытаниях на растяжение.

Сравнение результатов исследований с использованием разных методик определения характеристик прочности по данным испытаний на твердость показывает, что приведенные в [1–3] корреляционные зависимости для стали 10ГН2МФА в общем справедливы при условии относительного отклонения характеристик прочности, определенных по методикам измерения твердости, от таковых, полученных при испытаниях на растяжение, не превышающего 10%. Исключение составляет корреляционная зависимость для оценки предела текучести [2], при использовании которой отклонение достигает 21%. Следует заметить, что более достоверные результаты определения механических характеристик по данным измерения твердости получены при использовании инструкции [3].

Анализ результатов исследований, полученных методом инструментированного индентирования по различным методикам (таблица), свидетельствует о том, что отклонение механических характеристик исследуемой стали, определенных по методике [3], от таковых, полученных при испытаниях на растяжение, превышает 10%. В то же время значения пределов прочности и текучести, определенные по методике ИПП НАН Украины, находятся в пределах отклонений, регламентированных согласно действующему нормативному документу [1].

Сравнительный анализ показывает:

приведенные в [1] корреляционные зависимости для определения характеристик прочности стали 10ГН2МФА с учетом указанного отклонения (не более 10%) справедливы для предела прочности, тогда как для предела текучести их необходимо корректировать;

результаты определения механических характеристик методом инструментированного индентирования по методике ИПП НАН Украины достовернее, чем полученные по методике [3]. Отклонение значений предела прочности, полученных по методике ИПП НАН Украины, от таковых, полученных при испытаниях на растяжение, не превышает 5,5%, предела текучести – 1%.

Выводы

1. Проведены сравнительные испытания различных измерительных приборов для определения твердости по Бринеллю. Показано, что разброс величины твердости по Бринеллю, полученный разными приборами на образцовой мере, составляет 8,3%.

2. Наилучшие результаты определения механических характеристик стали 10ГН2МФА получены при использовании методики ИПП НАН Украины. Отклонение значений предела прочности, полученных по методике ИПП НАН Украины, от таковых, полученных при испытаниях на растяжение, не превышает 5,5%, предела текучести – 1%.

3. Экспериментально подтверждено, что установка UTM-20 НТ может быть использована для измерения твердости и оценки характеристик прочности согласно действующей в Украине инструкции [1].

Резюме

Проведено порівняльний аналіз величин твердості по Брінеллю, одержаних за допомогою різного випробувального обладнання, і методик визначення механічних характеристик сталей за результатами випробувань на твердість, що використовуються в атомній енергетиці, включаючи розроблені в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України установку і методику.

1. *ТПКМ-10-01*. Типовая программа периодического контроля механических свойств металла трубопроводов АЭС с реакторами ВВЭР 1000. – Киев, 2001. – 69 с.
2. *РД ЭО 0027-94*. Инструкция по определению характеристик механических свойств металла оборудования атомных электростанций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. – М.: Концерн Росэнергоатом, 1994. – Т. 1, 2. – 40 с.
3. *РД ЭО 0027-2005*. Инструкция по определению механических свойств металла оборудования атомных станций безобразцовыми методами по характеристикам твердости. – М.: Концерн Росэнергоатом, 2006. – 52 с.
4. Харченко В. В., Рудницкий Н. П., Каток О. А. и др. Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2007. – Вып. 27. – С. 140 – 147.
5. Харченко В. В., Каток О. А., Панасенко А. В. и др. Исследование прочностных характеристик сварного шва парогенератора после эксплуатационной наработки методом инструментированного индентирования // Пробл. прочности. – 2013. – № 3. – С. 58 – 65.

6. *ISO 14577-1:2002. Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters. Test Method.*
7. *ГОСТ 9012-59. Металлы. Метод измерения твердости по Бринеллю. – Введ. 01.01.60.*
8. *ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.86.*

Поступила 10. 09. 2012