

УДК 620.179.1

ОЦЕНКА МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТВЕРДОСТИ

© 2011 г.

Д.А. Коновалов

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

konovalov@imach.uran.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Предложена новая методика определения кривой деформационного упрочнения, которая аппроксимируется трехпараметрической функцией по результатам испытаний на вдавливание трех инденторов с различными углами на вершине. Методика позволяет исследовать металлические материалы с выраженным пределом текучести. Методика прошла верификацию в лабораторных и полевых условиях и адаптирована для портативного твердомера.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, кинетическая твердость, кривая деформационного упрочнения.

Для определения механических свойств (кривой деформационного упрочнения) металлов в основном применяют три стандартизованных испытания: растяжение, сжатие и кручение образцов. Эти методы дают достоверную информацию о свойствах материалов. Для изготовления образцов необходимо вырезать часть материала из заготовки, изделия или элемента конструкции, поэтому данные испытания относятся к так называемым разрушающим методам. Однако в некоторых случаях изготовить образцы необходимых размеров или в необходимом количестве либо не представляется возможным, либо нецелесообразно по экономическим или техническим причинам. Это справедливо для конструкций и машин, находящихся в эксплуатации, когда необходимо сделать оценку текущего состояния технических объектов для определения возможности их дальнейшей эксплуатации. Оценка свойств материалов многих конструкций можно осуществить только с помощью неповреждающих методов проведения испытаний.

Перспективным является метод кинетического индентирования, основанный на внедрении в поверхность изделия конических инденторов, который использует диаграмму вдавливания $P(h)$, где P – нагрузка на индентор, h – глубина внедрения в поверхность исследуемого материала [1–4]. Эта зависимость хорошо аппроксимируется параболическим законом Кика:

$$P = ch^2, \quad (1)$$

где c – коэффициент, зависящий от угла индентора α и упругопластических свойств материала, в

который вдавливаются индентор, и практически не зависит от глубины вдавливания.

Кривые упрочнения металлов и сплавов аппроксимируют в основном степенными зависимостями. Для большинства металлов кривую упрочнения можно аппроксимировать трехпараметрической степенной зависимостью вида

$$\sigma_s = \sigma_0(1 + a_1\Lambda)^{a_2}, \quad (2)$$

где σ_0 – начальный предел текучести; Λ – степень деформации сдвига; a_1 и a_2 – коэффициенты.

Параметр c в уравнении (1) в общем случае зависит от коэффициентов σ_0 , a_1 , a_2 , кривой упрочнения (2), модуля Юнга E и угла конического индентора α . Исходя из анализа размерностей и П-теоремы [5], данную зависимость представим в виде:

$$c = E\Phi(a_0, a_1, a_2, \alpha), \quad (3)$$

где $a_0 = \sigma_0/E$, функция Φ и ее аргументы a_0 , a_1 , a_2 являются безразмерными величинами.

Для нахождения функции Φ многократно моделировали методом конечных элементов внедрение конического индентора с заданным углом α в упругопластическую среду для множества значений параметров a_0 , a_1 , a_2 . Модуль Юнга и коэффициент Пуассона для всех материалов положили равными соответственно 210 ГПа и 0.3. Расчеты выполнили для углов индентора 90°, 120° и 140°. Расчетную кривую вдавливания аппроксимировали законом Кика (1).

Значения функции Φ получили делением значения коэффициента c на модуль Юнга E . Расчетные данные аппроксимировали аналитической зависимостью вида

$$\Phi = \varphi a_1^n a_2^m, \quad (4)$$

где $\varphi(a_0) = b_0 + b_1 a_0$, $m(a_0) = -b_2 + b_3 a_0$, $n(a_2, a_0) = b_4 + (b_5 - b_6 a_0) a_2$, $b_i = d_i + g_i \alpha$ ($i=0, \dots, 6$), d_i, g_i – числовые коэффициенты.

В соответствии с (3) и (4) получаем систему трех нелинейных уравнений

$$u_i = \varphi_i a_1^{n_i} a_2^{m_i}, \quad i=1, 2, 3, \quad (5)$$

где $u_i = c_i/E$, индекс i определяет значения коэффициентов $b_0 - b_6$ для соответствующего угла конуса.

Находя из экспериментов по вдавливанию трех инденторов с различными углами значения коэффициента c_i ($i=0, 2, 3$, i – номер индентора) в законе Кика и подставляя их в уравнение (5), находим методом подбора значение параметров σ_0, a_1, a_2 . Поскольку уравнение (5) некорректно, то его решение находится методом подбора [6].

Методика была апробирована в лабораторных условиях для тестовых материалов сталей Ст3, 08X18H10T и меди М0. Кривые упрочнения из экспериментов на осадку цилиндрических образцов для тестовых материалов и диаграммы вдавливания для конических инденторов с углами 90, 120° и 140° получили на испытательной машине Instron 8801. В соответствии с методикой по диаграммам вдавливания были получены аппроксимации (2) кривых деформационного упрочнения, которые имели хорошее совпадение с кривыми, полученными на осадку. Поэтому методику можно использовать для приборов, которые позволяют записывать диаграмму вдавливания.

Для конструкций или деталей, находящихся в эксплуатации, невозможно применять оборудование с большими усилиями нагружения для получения кривой вдавливания. Для этого необходимо использовать портативные приборы. Одним из таких приборов является твердомер ТЕСТ-МИНИ-(УТ). Принцип работы твердомера, осна-

щенного статическим датчиком, состоит в непрерывной регистрации в процессе вдавливания индентора диаграммы вдавливания на стадиях активного нагружения, выдержки под нагрузкой и разгрузки. С помощью твердомера для тестовых материалов были получены диаграммы вдавливания для алмазных инденторов с углами 90°, 120° и одного пирамидального с углом между гранями 136°, который эквивалентен коническому индентору с углом 140°. По разработанной методике определили кривые упрочнения, которые также имели хорошее совпадение с кривыми, полученными из экспериментов на осадку. Таким образом, данная методика может быть использована для определения механических свойств металлических изделий, находящихся в эксплуатации.

Методика прошла апробацию в лабораторных условиях и использована для определения прочностных свойств фрагментов оболочек из сплава АМг6 на предприятии ФГУП ГРЦ «КБ им. академика В.П. Макеева».

Работа выполнена в рамках междисциплинарного проекта УрО РАН №09-М-13-2001.

Список литературы

1. Булычев С.И., Алехин В.П. // Физика и химия обработки материалов. 1978. №3. С. 134–138.
2. Булычев С.И., Алехин В.П. // Заводская лаборатория. 1987. №11. С. 76–79.
3. Смирнов С.В., Смирнов В.К., Солошенко А.Н., Швейкин В.П. // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. №8. С. 3–6.
4. Федосов С.А., Пешек Л. Определение механических свойств материалов микроиндентированием: Современные зарубежные методики. М.: МГУ, 2004. 100 с.
5. Седов Л.И. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1983. Т. 1. 528 с.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука, 1986. 288 с.

ESTIMATION OF MATERIAL MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL-WORK ELEMENTS USING THE KINETIC HARDNESS METHOD

D.A. Kononov

A new technique of constructing the deformation hardening curve approximated by a three-parametrical function based on test results for cave-in of three indentors with various corners at top is presented. The technique allows investigating metal materials with a pronounced yield stress. The technique has been tested in laboratory and field conditions and is adapted for a portable hardness-testing machine.

Keywords: nondestructive test, kinetic hardness, deform hardening curve.