

В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОВ ИНДЕНТИРОВАНИЯ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ РАСТЯЖЕНИЯ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: kazankin_vmr@mail.ru, kazankina_elena@mail.ru

Приведено обобщение работ авторов, а также основателей научной школы кафедры, посвященных разработке методик неразрушающего определения механических свойств материалов. Приведенные методики позволяют без разрушения детали построить диаграмму растяжения в координатах истинные напряжения – относительное сужение.

Ключевые слова: сферический индентор, неразрушающий контроль, пластическая твердость, диаграмма растяжения, истинные напряжения, относительное сужение

V. A. Kazankin, E. N. Kazankina

**ON THE USE OF INDENTATION METHODS
FOR CONSTRUCTING A TENSION DIAGRAM**

Volgograd State Technical University

The paper provides a summary of the works of the authors, as well as the founders of the scientific school of the department, devoted to the development of methods for non-destructive determination of the mechanical properties of materials. The presented methods allow, without destroying the part, to construct a tension diagram in the coordinates of true stresses - relative contraction.

Keywords: spherical indenter, non-destructive testing, plastic hardness, tension diagram, true stresses, relative contraction

Стандартными методами определения механических свойств испытаний является испытание образцов на растяжение [1]. Для проведения таких испытаний необходимо специальное оборудование, например, программно-технический комплекс для испытания металлов ИР 5143-200, имеющийся на кафедре «Динамика и прочность машин». Кроме того стандартные испытания проводятся на стандартных образцах, изготовленных из материала детали, что исключает возможность проведения стопроцентного контроля деталей, а для некоторых особо ответственных деталей вообще не могут быть проведены. В таких случаях следует использовать неразрушающие методы контроля, в том числе методы индентирования.

Одними из наиболее известных авторов в этой области являются М. П. Марковец, А. Ю. Ишлинский, В. М. Матюнин, М. С. Дрозд, В. К. Григорович, Ю. И. Славский, Д. Тейбор, К. Л. Джонсон.

Особенностью научной школы, созданной М. С. Дроздом, является использование при исследованиях контактного модуля упрочнения материала – пластической твердости [2]. Преимуществом пластической твердости является постоянство ее значения и отсутствие зависи-

мости значений пластической твердости от условий испытаний.

Важной задачей неразрушающего контроля является задача построения диаграммы растяжения по параметрам упругопластического внедрения индентора. Это позволяет значительно сократить затраты на проведение испытаний по определению механических свойств материалов, а также определять эти свойства на готовых деталях.

В 90-е годы XX века была поставлена задача определения характерных точек на диаграмме растяжения, построенной в координатах истинные напряжения – относительное сужение. Эта задача с различными перерывами решалась коллективом кафедры на протяжении тридцати лет. Следует отметить, что истинные напряжения, учитывающие действительную площадь сечения при растяжении, имеют больший физический смысл, хотя и используются при проектировании реже условных напряжений. В то же время, при значительных деформациях и расчета работоспособности деталей наибольшую значимость имеют именно истинные напряжения.

На рисунке 1 показана схема диаграммы растяжения для истинных напряжений.

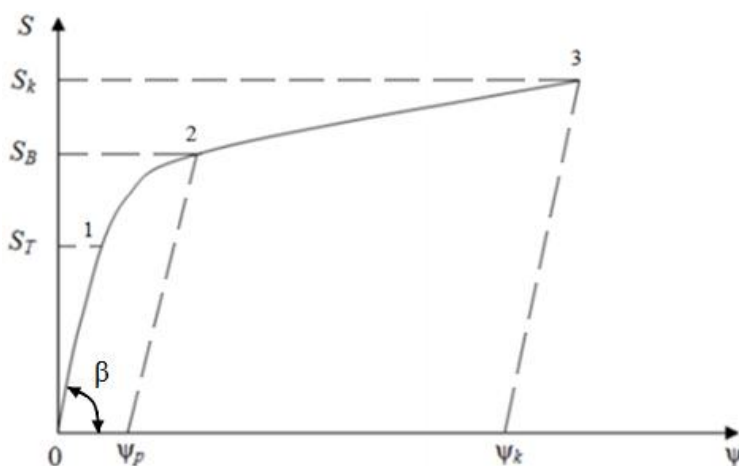


Рис. 1. Схематизированная диаграмма истинных напряжений при растяжении

Первый участок диаграммы характеризуется модулем упругости материала, который равен тангенсу угла наклона линии. Методика определения модуля упругости неразрушающим методом описана в работах [3, 4]. Следует отметить, что указанная методика определения модуля упругости подразумевает использование именно упругопластического внедрения индентора. Для определения модуля упругости

используют формулу Г. Герца для определения упругого сближения, в которую внесена поправка на упругопластический контакт. Анализ публикаций М. С. Дрозда и М. М. Матлина, в которых используется эта поправка, показывает, что теоретическая основа поправки описана крайне мало, в связи с чем авторы данной работы посчитали необходимым привести вывод поправки.

На рисунке 2 показана схема контакта сферического индентора с упругопластически деформируемым плоским телом. Исходя из геометрических параметров контакта, выразим квадрат радиуса отпечатка как:

$$a^2 = 2R_0h - h^2 \quad (1)$$

$$a^2 = \left(h + \frac{\alpha_y}{2}\right) \left(2R - \left(h + \frac{\alpha_y}{2}\right)\right). \quad (2)$$

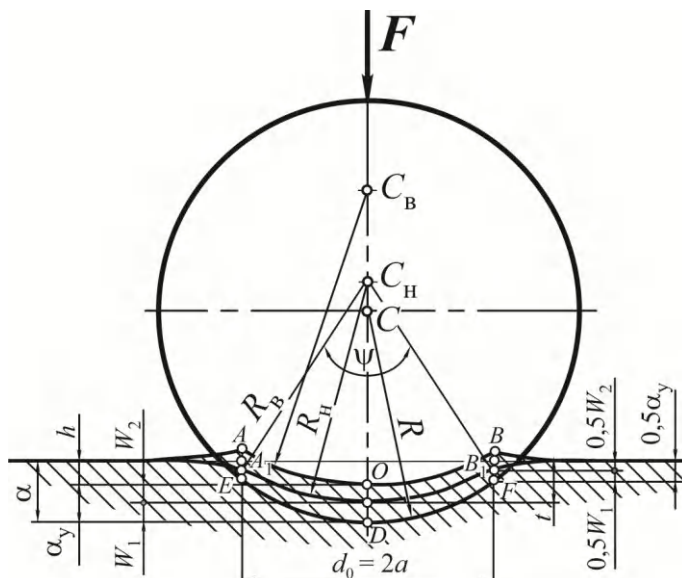


Рис. 2. Схема упругопластического внедрения упругого индентора в плоскую поверхность контртела:

F – контактная нагрузка; R, R_B, R_H – радиус индентора и радиусы кривизны поверхности вмятины под нагрузкой и после разгрузки; h – глубина остаточного отпечатка (остаточное сближение); W_1 и W_2 – упругое смятие сферы под нагрузкой и упругое восстановление полупространства в центре контакта после разгрузки; t – полная глубина отпечатка под нагрузкой; α_y – упругое сближение контактирующих тел; α – полное сближение в контакте; d_0 – диаметр остаточного отпечатка

Решая совместно уравнения (1) и (2), получим выражение для радиуса кривизны поверхности вмятины после снятия нагрузки

$$R_B = R \left(1 + \frac{\alpha_y}{2h}\right) - \frac{\alpha_y}{2} \left(1 + \frac{\alpha_y}{4h}\right). \quad (3)$$

Следует отметить, что справедливость использования поправки для металлов была неоднократно доказана [5]. Авторами экспериментально была проверена справедливость использования поправки и для неметаллов. Используя экспериментальные данные М. С. Дрозда, М. М. Матлина, Ю. И. Сидякина, а также данные авторов работы для неметаллов, можно

сделать вывод о том, что слагаемое $\frac{\alpha_y}{2} \left(1 + \frac{\alpha_y}{4h}\right)$ обычно составляет менее двух процентов от величины R_B . В связи с этим при определении радиуса кривизны остаточного отпечатка можно пренебречь этой величиной, тогда

$$R_B = R \left(1 + \frac{\alpha_y}{2h}\right) \quad (4)$$

Таким образом, преобразование формулы Г. Герца с поправкой на упругопластическое внедрение индентора позволяет получить зависимость для определения модуля упругости материала [3]:

$$E_2 = \frac{1 - \mu_2^2}{1,34(\alpha - h) \sqrt{R(\alpha + h)} - \frac{1 - \mu_1^2}{E_1}}, \quad (5)$$

где дополнительно E_1 – модуль нормальной упругости материала индентора, $\mu_{1,2}$ – коэффициент Пуассона (индексы 1 или 2 относятся к материалам индентора и испытуемого материала соответственно).

Следующей точкой на диаграмме растяжения является точка S_T , которая фактически соответствует пределу текучести, так как площадь поперечного сечения образца на этой части нагружения меняется незначительно. Определение величины S_T проводят согласно [4]:

$$S_T = \sigma_{0,2} = \frac{0,955(1 - 2\mu_2)F}{d^2 (78u)^{245/HD}}, \quad (6)$$

где
$$u = \left(\frac{d}{2R} - 9,43K_1 \frac{F}{d^2} \right) (1 - \mu_2), \quad (7)$$

$$K_1 = (1 - \mu_1^2) / \pi E_1, \quad (8)$$

где d – диаметр остаточного отпечатка.

Далее на диаграмме необходимо определить истинное временное сопротивление S_B , которое связано с условным временным сопротивлением формулой [4]

$$S_B = \frac{\sigma_B}{1 - \psi}, \quad (9)$$

$$\psi = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad (10)$$

где ψ – относительное сужение, ε – допуск на остаточную деформацию относительного удлинения.

Величину условного временного сопротивления можно определить согласно [6]:

$$\sigma_B = \frac{0,955(1 - 2\mu_2)F}{d^2 (0,0017u \times \text{НД})^{245/\text{НД}}}. \quad (11)$$

Последняя точка на диаграмме растяжения соответствует истинному сопротивлению разрыву S_k , которое определяют согласно [7]:

$$S_k = 0,18\text{НД} + 700. \quad (12)$$

При этом пластическую твердость НД определяют путем упругопластического внедрения индентора согласно [2].

Определение абсцисс точек диаграммы растяжения, то есть предельного равномерного относительного сужения ψ_p и относительного сужения после разрыва ψ_k описано в работе [8].

Таким образом, в работе описаны результаты работ авторов и коллектива кафедры по определению характерных точек на диаграмме

растяжения материала путем упругопластического внедрения индентора в испытуемый материал. Использование приведенных методик позволит по результатам однократного внедрения индентора прогнозировать механические свойства материалов, используя при этом только приборы для определения твердости, в том числе портативные. В свою очередь использование портативных твердомеров открывает перспективы к автоматизации определения механических свойств материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 1497–84, ИСО 6892–84. Металлы. Методы испытания на растяжение.
2. ГОСТ 18835–73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. – Введ. 01.01.74 (ограничение срока действия снято Межгосударственным Советом стандартизации, метрологии и сертификации, протокол № 3-93, ИУС № 5/6, 1993 г.).
3. А.с. 1147951 СССР, МКИ⁴ G01N3/40. Способ определения физико-механических свойств материалов / М. С. Дрозд, М. М. Матлин. – Оpubл. 30.03.85, Бюл. № 12.
4. Матлин, М. М. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин / М. М. Матлин, А. И. Мозгунова, Е. Н. Казанкина, В. А. Казанкин. – М. : Инновационное машиностроение, 2019. – 247 с.
5. Дрозд, М. С. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин. – М. : Машиностроение, 1986. – 224 с.
6. Патент 2011182 РФ, МКИ G01N 3/40. Способ определения предела прочности материалов / Ю. И. Славский, М. М. Матлин. – Оpubл. 15.04.94, Бюл. № 7.
7. Казанкин, В. А. Оперативный контроль величины истинного сопротивления разрыву сталей / В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (293) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 43–45. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-10-293-43-45.
8. Матлин, М. М. Инженерные решения контактных задач в машиностроении : монография / М. М. Матлин, В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина. – Москва, 2020. – 246 с.