М. М. Матлин, В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина

**К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА
НА ИСТИННОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРЫВУ СТАЛЕЙ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: matlin@vstu.ru

В работе описано явление влияния размеров деталей на их прочностные свойства, в частности, на величину истинного сопротивления разрыву сталей. Использование полученной зависимости для масштабного коэффициента позволяет использовать разработанный авторами способ определения истинного сопротивления разрыву сталей для деталей различных размеров.

Ключевые слова: масштабный эффект, истинное сопротивление разрыву, внедрение, неразрушающий контроль.

M. M. Matlin, V. A. Kazankin, E. N. Kazankina

**TO THE PROBLEM OF THE INFLUENCE OF THE SCALE EFFECT
ON THE TRUE TEAR RESISTANCE OF STEELS**

Volgograd State Technical University

The paper describes the effect of the size of parts on their strength properties, in particular, on the value of the true tensile strength of steels. The use of the obtained dependence for the scale factor allows using the method developed by the authors for determining the true tensile strength of steels for parts of various sizes.

Keywords: scale effect, true tear resistance, indentation, non-destructive testing.

Для современной техники характерно создание как крупногабаритных изделий: надводные и подводные корабли, летательные аппара-

ты, мостовые переходы, газо- и нефтепроводы и т. п., так и миниатюрных изделий в различных механизмах. В то же время известно, что

© Матлин М. М., Казанкин В. А., Казанкина Е. Н., 2021.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00049, и при поддержке РФФИ и Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340002, а также в рамках конкурса МК-2021 (грант № МК-84.2021.4).

с изменением размеров металлоизделия значения механических характеристик также изменяются. Одна из первых гипотез, объясняющих это явление для хрупких материалов приведена в работе [1]. В настоящее время для объяснения причин уменьшения прочности материалов с увеличением размеров существуют различные подходы [2]: статистический (больше возможных дефектов в детали большего размера), структурно-механический (неоднородность структуры и распределения напряжений по сечению), энергетический (различие в запасе упругой энергии). Обзор исследований масштабного эффекта, в том числе и на микроуровне, приведен в работе [2]. Особенно заметно этот эффект уменьшения прочности проявляется в условиях воздействия переменных во времени напряжений, например, при увеличении диаметра вала с 10 до 200 мм масштабный коэффициент может изменяться до 50 % [3, 4]. Следует отметить, что и в условиях статического приложения нагрузки прочность деталей также снижается с увеличением их размеров. Истинное сопротивление разрыву является одной из важных характеристик (наряду с другими характеристиками прочности) металла. Эта характеристика позволяет, в частности, определять оптимальную глубину упрочненного слоя при поверхностном пластическом деформировании [5], пригодность материала к обработке давлением, например, к листовой штамповке. В конструкторских расчетах эта характеристика используется относительно редко, поскольку она является характеристикой физической прочности материала; при этом в процессе эксплуатации конструкции, как правило, не доводятся до разрушения. Методика определения истинного сопротивления разрыву на гладких образцах стандартизована [6]. Очевидно, что этот метод требует изготовления специальных образцов, вырезанных из готовой детали, что очевидно, приводит к частичному или полному разрушению испытываемой детали. В работах [7, 8] истинное сопротивление разрыву $S_{k,10}$ стандартных образцов [6] с рабочим диаметром 10 мм из конструкционных сталей предложено определять путем внедрения сферического индентора в испытываемый материал с последующим вычислением $S_{k,10}$ по формуле

$$S_{k,10} = 0,257 \cdot q + 635, \quad (1)$$

где q – истинное давление под нагрузкой на поверхности отпечатка.

Достоверность формулы (1) подтверждена экспериментально (путем растяжения согласно стандарту [6]) образцов с диаметром 10 мм, изготовленных из углеродистых и легированных конструкционных сталей различного уровня прочности. Для оценки возможности использования описанного метода на деталях иного поперечного сечения, чем стандартных образцов (то есть с диаметром больше или меньше 10 мм) было выполнено специальное экспериментальное исследование.

В исследовании были использованы десятикратные образцы с номинальными диаметрами от 3 до 20 мм, а также литературные данные [9, 10] для образцов с большими диаметрами.

Материалы исследованных образцов и их пластическая твердость НД [11]: сталь 45 (НД 2250), сталь 30ХГСА (НД 2100), сталь 40ХНМФА (НД 2530).

Для устранения влияния ряда факторов на масштабный эффект для каждой из трех испытанных сталей образцы разного диаметра изготавливали из металла одной плавки (исключение влияния металлургического фактора), рабочие поверхности образцов обрабатывали многопроходной обточкой с постепенным уменьшением глубины резания и подачи и последующей полировкой (исключение влияния технологического фактора – наклепа поверхности). Указанная подготовка образцов позволила оценить преимущественное влияние статистического фактора (количество дефектов) на прочностные свойства. Испытания на растяжение образцов с диаметром от 3 до 12 мм проводили с помощью программно-технического комплекса для испытания металлов ИР 5143-200, а образцов с диаметром 12...20 мм – с помощью гидравлической разрывной машины ГРМ-1.

На рисунке показаны графики зависимости масштабного коэффициента K_d истинного сопротивления разрыву от диаметра d рабочей части образца

$$K_d = \frac{S_k}{S_{k,10}}, \quad (2)$$

где дополнительно S_k – истинное сопротивление разрыву образца с произвольным диаметром d .

Как видно из рисунка, с ростом диаметра образца масштабный коэффициент K_d уменьшается, а следовательно, снижается и величина истинного сопротивления разрыву S_k . Отметим, что изменение истинного сопротивления разрыву при варьировании диаметра от 3 до 40 мм (то есть в 13 раз) составляет более 20 %.

Графики зависимости масштабного коэффициента истинного сопротивления разрыву K_d от диаметра образца d для углеродистых и легированных конструкционных сталей: линия – расчет по формуле (3); значки: 1 – сталь 45; 2 – сталь 30ХГСА; 3 – сталь 40ХНМФА; 4–7 – данные [9]; 8 – данные [10]

Приведенные экспериментальные результаты могут быть аппроксимированы следующей зависимостью (с коэффициентом корреляции 0,9)

$$K_d = \frac{1,15}{d^{0,06}}, \quad (3)$$

Из рисунка также видно, что полученные результаты соответствуют и экспериментальным данным, приведенным в работах [9, 10].

Таким образом, метод оперативного неразрушающего контроля истинного сопротивления разрыву [7] можно использовать для деталей с большими или меньшими размерами, чем стандартные образцы для испытаний на растяжение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, А. П. Явление хрупкого разрыва / А. П. Александров, С. Н. Журов. – Гос. техн.-теорет. изд-во, 1933. – 53 с. (Проблемы новейшей физики / Под общ. ред. акад. А. Ф. Иоффе и др. Вып. 9).
2. Матюнин, В. М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов / В. М. Матюнин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2015. – 288 с.
3. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин : справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М. : Машиностроение, 1993. – 640 с.

4. Серенсен, С. В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.

5. А. с. 1400862 РФ, МПК В24В39/00. Способ упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / Дрозд М. С., Лебский С. Л. Матлин М. М., Сидякин Ю. И. – Опубл. 07.06.1988. Бюл. № 21.

6. ГОСТ 1497–84. Металлы. Метод испытания на растяжение. – Взамен 1497–73. – Введ. 01.01.85. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 40 с. – (Межгосударственный стандарт).

7. Патент 2680111 РФ, МПК G01N3/42. Способ определения истинного сопротивления разрыву / Матлин М. М., Мозгунова А. И., Казанкина Е. Н., Казанкин В. А. – Опубл. 15.02.2019. Бюл. № 5.

8. 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.

9. Потак, Н. М. Хрупкие разрушения сталей и стальных деталей / Н. М. Потак. – М. : Оборонгиз, 1955. – 390 с.

10. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : справочник / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.

11. 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.).