ПРОЧНОСТЬ И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.81

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-10-245-35-38

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

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ СРЕЗЕ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: detmash@vstu.ru, matlin@vstu.ru

В работе описана методика неразрушающего определения предела прочности металла при срезе, основанная на упругопластическом внедрении индентора в испытуемый материал.

Ключевые слова: сферический индентор, неразрушающий контроль, внедрение, пластическая твердость, предел прочности.

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

NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF THE TENSILE STRENGTH OF THE METAL IN SHEARING

Volgograd State Technical University

The paper describes a technique for non-destructive determination of the tensile strength of a metal in shearing based on elastic-plastic introduction of an indenter into a test material.

Keywords: spherical indenter, non-destructive testing, introduction, plastic hardness, tensile strength.

В процессе эксплуатации многие детали машин подвергаются срезающим нагрузкам: шпонки, шлицы, заклепки, штифты предохранительных муфт, угловые сварные швы и др. Кроме того, закономерности среза используются в различных устройствах, например, для определения нагрузки на индентор портативного твердомера [1] по силе перерезания специального стержня, заданного поперечного сечения. Аналогичная конструкция использована в работе [2] в гайковерте, обеспечивающим контролируемый предельный момент завинчивания до среза шпоночного элемента. Для оценки прочности таких деталей используют предел прочности материала при срезе. Эта характеристика может быть найдена экспериментально, согласно стандарту [3]. Очевидно, что этот метод предусматривает изготовления специальных образцов, вырезанных из готовой детали, что очевидно, приводит к частичному или пол-

ному разрушению испытуемой детали. В работе [4] описан метод, следуя которому предел прочности при срезе можно определить по формуле

$$\tau_B = K \cdot \sigma_B \quad (1)$$

где σ_B – предел прочности материала на растяжение; K – экспериментальный коэффициент, значение которого выбирается из таблицы в зависимости от диаметра срезаемой детали и вязкости ее материала: для сталей средней вязкости – $K = 0,68 \dots 0,80$, для сталей большей вязкости $K = 0,75 \dots 0,81$. Для практической реализации этого метода необходимо располагать данными о пределе прочности материала на растяжение и его вязкости. Эти параметры можно определить экспериментально путем испытания образцов на растяжение [5]. Такой метод невозможно использовать при необходимости стопроцентного контроля деталей, а также при малых размерах деталей. Следует

© Матлин М. М., Казанкин В. А., Казанкина Е. Н., Капиносова Е. В., 2020.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00049, и при поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340002, а также в рамках конкурса СИ-2018 (СИ-253.2018.1).

отметить, что предел прочности на растяжение σ_B можно определить и без разрушения, согласно работе [6], но при этом остается заметный разброс (до 18 %) значений коэффициента K в формуле (1).

В данной работе для определения предела прочности при срезе использовали закономерности упругопластического внедрения сферического индентора в испытываемую поверхность детали [7]. Разработанный метод заключается в том, что в испытываемый материал внедряют сферический индентор нагрузкой, находящейся в диапазоне, соответствующем измерению твердости, определяют предельную равномерную деформацию материала, вычисляют модуль упругости материала при срезе по формуле

$$M_{cp} = \frac{F}{d^2 \left(0,19 \frac{d}{D \cdot \varepsilon_p} \right)^{\varepsilon_p}}, \quad (2)$$

по которому определяют предел прочности испытываемого материала при срезе по следующей зависимости

$$\tau_{cp} = V \cdot M_{cp} - W, \quad (3)$$

где ε_p – предельная равномерная деформация при статическом растяжении образца из испытываемого материала; F – нагрузка на сферический индентор; d – диаметр остаточного отпечатка; D – диаметр сферического индентора; V и W – коэффициенты предела прочности при срезе, зависящие от химического состава испытываемого материала.

Указанные параметры в формулах (2) и (3) позволяют одновременно учесть комплекс основных параметров: силовых (F), деформационных (ε_p), геометрических (d и D), а также химический состав испытываемого материала (V и W), что дает возможность выявить количественные взаимосвязи между закономерностями протекания пластической деформации при срезе и контактной деформацией при внедрении индентора.

Экспериментальную проверку описанного метода определения предела прочности материала при срезе провели на образцах, изготовленных из углеродистых и легированных конструкционных сталей различного уровня прочности и пластичности. В табл. 1 представлены механические свойства испытанных материалов.

Таблица 1

Механические свойства испытанных материалов

Номер образца	Марка стали	Пластическая твердость, НД, МПа	Предельная равномерная деформация, ε_p	Предел прочности при срезе $\tau_{cp, ост}$, МПа
1	Сталь 10	1487	0,165	304
2	Сталь 20	1570	0,156	325
3	Сталь 35	2158	0,114	468
4	Сталь 45	2590	0,095	523
5	Сталь 20Х	5297	0,046	840
6	Сталь 40Х	1089	0,058	712
7	Сталь 25ХГТ	5433	0,045	835
8	Сталь 30ХГСА	3950	0,062	629

При этом пластическую твердость НД испытываемого материала определяли по стандарту [8] (в качестве индентора использовали стальной закаленный шарик диаметром 5 мм, а для сталей с твердостью большей, чем 4500 МПа – сферический индентор из твердого сплава или цилиндрический индентор [7] также с диаметром 5 мм из соответствующего материала). Отметим, что твердость НД можно предварительно измерять шариком на заготовках, предназначенных для изготовления образцов для испытания на срез, а можно измерять твердость

и непосредственно на поверхности цилиндрических образцов или готовых цилиндрических деталей малого диаметра с использованием цилиндрического индентора [7, 9]. При использовании цилиндрического индентора с диаметром 5 мм для определения твердости материала цилиндрического образца также с диаметром 5 мм приведенный диаметр составит 5 мм [7]. Для измерения твердости использовали пресс Бринелля при нагрузке $F = 7557,5$ Н (750 кгс). Предел прочности при срезе $\tau_{cp, ост}$ определяли по стандарту [3] на цилиндрических образцах

диаметром 5 мм при их двойном срезе; нагружение проводили с помощью программного комплекса для испытания металлов ИР 5143-200. Предельную равномерную деформацию испытуемого материала вычисляли по формуле

$$\varepsilon_p = \frac{245}{\text{НД}}, \quad (4)$$

которая, как показано в работе [10], обладает достаточной для практики точностью.

Предварительно для углеродистых и легированных сталей определили коэффициенты V и W по формуле (3), используя вспомогательные образцы с известными значениями M_{cp}

и τ_{cp} , найденными экспериментально. Для углеродистых сталей это образцы № 1 и № 4, а для легированных сталей образцы № 5 и № 8 в табл. 1. В результате формула (3) примет вид:

$$\tau_{cp} = 0,315 \cdot M_{cp} - 70, \quad (5)$$

для легированных сталей

$$\tau_{cp} = 0,305 \cdot M_{cp} - 135, \quad (6)$$

В табл. 2 приведены результаты определения модуля упрочнения испытуемого материала при срезе и предела прочности при срезе описанным способом.

Таблица 2

Модуль упрочнения испытуемого материала и его предел прочности при срезе

Номер образца	Диаметр остаточного отпечатка d , мм	Модуль упрочнения материала при срезе M_{cp} , МПа (по форм. 4)	Предел прочности материала при срезе τ_{cp} , МПа (по форм. 5 или 6)
1	2,628	1189	304
2	2,521	1283	334
3	2,187	1638	446
4	2,024	1882	523
5	1,528	3202	841
6	1,665	2712	691
7	1,519	3239	852
8	1,732	2510	630

Результаты сравнительных испытаний приведены в табл. 3. Как видно из табл. 3, при использовании предлагаемого способа погреш-

ность определения, предела прочности при срезе не превышает 5 % и имеет характер двухстороннего разброса.

Таблица 3

Значения предела прочности при срезе, определенные по предлагаемому способу (τ_{cp}) и найденные экспериментально ($\tau_{cp, \text{ост}}$) по ОСТ 1 90148–74

Номер образца	Предел прочности при срезе τ_{cp} , МПа (табл. 2)	Предел прочности при срезе $\tau_{cp, \text{ост}}$, МПа (табл. 1)	Погрешность $\frac{\tau_{cp, \text{ост}} - \tau_{cp}}{\tau_{cp, \text{ост}}} \cdot 100 \%$
1	304	304	0
2	334	325	-2,77
3	446	468	4,70
4	523	523	0
5	841	840	-0,12
6	691	712	2,95
7	852	835	-2,04
8	630	629	-0,16

Зависимость предела прочности при срезе от предела прочности при растяжении для сталей различного уровня прочности:

линии 1 и 2 – расчет по формулам (5) и (6) для углеродистых и легированных сталей соответственно; значки 1 и 2 – опыты авторов для углеродистых и легированных сталей соответственно; значки 3 и 4 – опыты работы [9] для углеродистых и легированных сталей соответственно; значки 5 – расчет по формуле (1) при коэффициенте $K = 0,68$ (для образца диаметром 5 мм [2])

На рисунке результаты определения предела прочности при срезе сталей по разработанному методу с использованием формул (2), (3) и данными, представленными в табл. 2, сопоставлены с литературными данными. При этом значения предела прочности при растяжении σ_b , необходимые для построения графика, определяли по величине пластической твердости испытанных материалов по методике, приведенной в работе [7]. Как видно из рисунка, значения предела прочности при срезе, определенные описанным методом и литературные данные достаточно близки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 2411495 РФ, МПК G01N3/40. Карманный твердомер Колесникова / В. М. Колесников. – Оpubл. 10.02.2011. Бюл. № 4.
2. Патент 2658103 РФ, МПК G01L 5/24. Способ контроля натяжения высокопрочных болтов / С. Ю. Каптелин. – Оpubл. 19.06.2018. Бюл. № 17.
3. ОСТ 1 90148–74 Металлы. Метод испытания на срез. Введ. 01.07.1975.

4. Ануриев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3т. / В. И. Ануриев ; под ред. И. Н. Жестковой. – М. : Машиностроение, 2006. – Т. 2. – 965 с.
5. ГОСТ 1497–84. Металлы. Метод испытания на растяжение. – Введ. 01.01.85.
6. Патент РФ 2011182. G01N3/40. Способ определения предела прочности материала / Ю. И. Славский, М. М. Матлин. Оpubл. 15.04.94. Бюл. № 7.
7. 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.
8. ГОСТ 18835–73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. Введ. 01.07.75 (ограничение срока действия снято Межгосударственным Советом стандартизации, метрологии и сертификации, протокол № 3-93, ИУС №5/6, 1993 г.).
9. А.с. 1062560 СССР. МКИ⁴ G01N3/40. Способ определения твердости материалов / М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидякин, А. Н. Волюнов. – Оpubл. 23.12.83. Бюл. № 12.
10. Дрозд, М. С. Определение механических свойств металла без разрушения / М. С. Дрозд. – М. : Metallurgia. 1965. – 172 с.
11. Густов, Ю. И. Взаимосвязь напряжений среза и предела выносливости металлических материалов / Ю. И. Густов, И. В. Воронина, Х. Л. Аллатту // Вестник МГСУ. – 2013. – № 4. – С. 32–37.