УДК 621.81

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-4-251-60-63

*М. М. Матлин, В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина***НЕРАЗРУШАЮЩАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДОПУСКАЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ СМЯТИЯ СТАЛЕЙ*****Волгоградский государственный технический университет**

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

В работе описана методика неразрушающего определения допускаемых напряжений смятия сталей по результатам контроля контактного модуля упрочнения.

Ключевые слова: сферический индентор, неразрушающий контроль, пластическая твердость, напряжения смятия.

*М. М. Matlin, V. A. Kazankin, E. N. Kazankina***NON-DESTRUCTIVE TECHNIQUE FOR DETERMINING
THE ALLOWABLE CRUSHING STRAIN OF STEELS****Volgograd State Technical University**

The paper describes a technique for non-destructive determination of the permissible crushing strain of steels based on the results of monitoring the contact hardening module.

Keywords: spherical indenter, non-destructive testing, plastic hardness, crushing strain.

В процессе работы различных механизмов силовой поток передается от одной детали к другой через общую контактную поверхность (болтовые, заклепочные, шпоночные, шлицевые соединения, детали муфт и др.). В подобных случаях необходима оценка прочности деталей на смятие. Следует отметить, что в настоящее время стандартом регламентированы испытания на смятие только для полимерных композитов [1]. Для металлов наиболее близким, но далеко не тождественным, к этому виду нагружения является метод, описанный в ГОСТ 25.503–97 [2]. В связи с этим в справочной литературе [3] информация о допускаемых напряжениях смятия $[\sigma_{см}]$ содержится в табличной форме в зависимости от значений предела текучести или временного сопротивления сталей, полученных путем испытания на растяжение согласно стандарту [4]. Очевидно, что определение прочностных свойств при растяжении предусматривает изготовления специальных образцов, вырезанных из готовой детали или заготовки, что приводит к частичному или полному разрушению детали. Отметим, что прочностные свойства материала при растяжении можно определить и без разрушения путем индентирования поверхности готового изделия [5, 6]. В данной работе исследована возможность использования контактного модуля уп-

рочнения (пластической твердости НД [7]) для неразрушающего определения допускаемых напряжений смятия различных сталей.

Как известно, расчет на прочность многих деталей выполняют путем сопоставления максимальных напряжений, действующих в опасном сечении, с допускаемыми напряжениями. Действующие напряжения находят расчетом или экспериментально, а допускаемые определяют как отношение предельных (опасных) напряжений к коэффициенту запаса прочности n . Предельные напряжения выбирают в зависимости от вида нагружения (статическое, переменное, ударное) и материала детали (пластичный, хрупкий). Коэффициент запаса прочности n согласно [8] можно определить дифференциальным методом по формуле

$$n = n_1 \cdot n_2 \cdot n_3, \quad (1)$$

где n_1 – коэффициент запаса прочности, учитывающий погрешности расчетных формул ($n_1=1,2\dots1,5$); n_2 – коэффициент запаса прочности, учитывающий способ получения заготовки (отливка, прокат, штамповка и др.) и степень пластичности материала (табл. 1), определяемой отношением предела текучести σ_T к временному сопротивлению σ_B ; n_3 – коэффициент запаса прочности, вводимый для увеличения запаса прочности ответственных деталей (обычно $n_3=1,0\dots1,5$).

© 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 Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-48-340002, а также в рамках конкурса МК-2021 (грант Президента РФ № МК-84.2021.4).

Таблица 1

Значения коэффициента запаса прочности n_2 в зависимости от степени пластичности сталей в условиях статического нагружения

Степень пластичности σ_T/σ_B	Коэффициент запаса прочности n_2
0,45...0,55	1,20...1,50
0,55...0,70	1,40...1,80
0,70...0,90	1,70...2,20

Следует отметить, что обоснованное определение коэффициента запаса прочности, а затем и допускаемых напряжений существенно влияет как на надежность детали, так и ее габариты, вес и стоимость изготовления.

Для случая статического нагружения обычно принимают $n_1 = 1,2$, а $n_3 = 1,0$. В результате формулу (1) можно представить в виде [8]

$$n = 1,2n_2 = 0,23 + 2,65(\sigma_T/\sigma_B), \quad (2)$$

а допускаемые напряжения смятия для пластичных материалов в условиях статического нагружения

$$[\sigma_{см}] = 1,5 \frac{\sigma_T}{n}. \quad (3)$$

Методика неразрушающего определения предела текучести материалов, которая базируется на закономерностях деформационной теории пластичности, позволяет находить его по результатам упругопластического внедрения сферического индентора [6] по формуле

$$\sigma_T = \frac{0,955(1 - 2 \cdot \mu_2) \cdot F}{d_0^2 \cdot \left[78 \cdot \left(\frac{d_0}{D} - 9,43 \cdot k_1 \cdot \frac{F}{d_0^2} \right) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_2) \right]^{245/НД}}, \quad (4)$$

где F и D – соответственно нагрузка на сферический индентор и его диаметр; d_0 – диаметр остаточного отпечатка; НД – пластическая твердость [7]; $k_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi \cdot E_1}$; μ – коэффициент Пуассона (индексы 1 и 2 относятся к материалам индентора и детали); E_2 – модуль нормальной упругости материала детали.

Отметим, что для сталей зависимость между НД и пределом текучести σ_T может быть представлена в простой форме

$$\sigma_T = (0,2 \dots 0,22) \cdot НД, \quad (5)$$

где меньшие значения применяются для углеродистых, а большие – для легированных сталей.

Степень пластичности также может быть определена по результатам измерения пластической твердости [6]

$$\sigma_T/\sigma_B = (0,022 \cdot 10^{-3} \cdot НД)^{245/НД}. \quad (6)$$

С учетом формул (2), (5) и (6) зависимость (3), определяющая допускаемые напряжения смятия для сталей принимает вид

$$[\sigma_{см}] = \frac{(0,3 \dots 0,33) \cdot НД}{0,23 + 2,65 \cdot (0,022 \cdot 10^{-3} \cdot НД)^{245/НД}}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), допускаемые напряжения смятия сталей однозначно определяются уровнем пластической твердости НД. Это подтверждает и рисунок. При этом результаты, показанные на рисунке, могут быть аппроксимированы следующей зависимостью

$$[\sigma_{см}] = 0,79 \cdot НД^{0,79}. \quad (8)$$

В табл. 2 сопоставлены допускаемые напряжения смятия $[\sigma_{см}]$, определенные по формуле (8) и справочные данные [3]. При этом величину пластической твердости НД находили (согласно [6]) по приведенным в справочных таблицах [3] значениям предела текучести или твердости по Роквеллу.

Зависимость допускаемых напряжений смятия $[\sigma_{см}]$ от пластической твердости НД углеродистых и легированных сталей различного уровня прочности:
 линия 1 – расчет по формуле (7), линия 2 – расчет по формуле (8); значки – справочные данные [3]; номера 1–4 – углеродистые стали со следующими видами термической обработки соответственно: нормализация, улучшение, закалка с охлаждением в воде, закалка с нагревом ТВЧ; номера 5–10 – легированные стали со следующими видами термической обработки соответственно: закалка с охлаждением в масле, нормализация, улучшение, закалка с нагревом ТВЧ, цементация с последующей закалкой с охлаждением в масле, отжиг

Таблица 2

Сопоставление допускаемых напряжений смятия, определенных по описанному методу ($[\sigma_{см}]$) и справочными данными ($[\sigma_{см}]_{спр}$)

Марка стали	Термообработка	НД, МПа	$[\sigma_{см}]_{спр}$, МПа [3]	$[\sigma_{см}]$, МПа (форм. (8))	Погрешность $\frac{[\sigma_{см}]_{спр} - [\sigma_{см}]}{[\sigma_{см}]_{спр}} \cdot 100 \%$
20	Нормализация	1250	210	221	-5,24
40	Закалка с охлаждением в воде	3250	500	470	6,00
45	Закалка с охлаждением в масле	2250	340	351	-3,24
40Х	Нормализация	1590	300	267	11,00
18ХГТ	Цементация, закалка с охлаждением в масле	3640	490	514	-4,88
12ХН3А	Закалка с нагревом ТВЧ	3870	510	539	-5,77
30ХГТ	Закалка с охлаждением в масле	4780	640	637	0,41
50ХФА	Закалка с охлаждением в масле	5000	660	660	0
ШХ-15	Отжиг	1730	300	286	4,81
ШХ-15	Закалка с охлаждением в масле	9820	1100	1126	-2,36

Из рисунка и табл. 2 видно, что погрешность определения допускаемых напряжений смятия $[\sigma_{см}]$ для 40 различных сталей по формуле (8) в большинстве случаев не превышает (5...6) %. Следует отметить, что приведенные значения допускаемых напряжений смятия пригодны только для расчетов неподвижных соеди-

нений. При расчетах специальных соединений (шпоночных, шлицевых и др), особенно подвижных, допускаемые напряжения смятия существенно снижают для уменьшения износа, предотвращая задира и заедания [8]. Так, по данным [3] при спокойном режиме работы шпоночных соединений принимают $[\sigma_{см}] = \text{от } 60 \dots 90$

до 150 МПа; для неподвижных шлицевых соединений в легких условиях эксплуатации $[\sigma_{см}] = 80...120$ МПа, а в тяжелых условиях – 35 МПа; для подвижных шлицевых соединений в легких условиях эксплуатации $[\sigma_{см}] = 10...20$ МПа, а в тяжелых условиях – 3...10 МПа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 33498–2015. Композиты полимерные. Метод испытания на смятие. Введ. 01.01.2017.
2. ГОСТ 25.503–97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. Введ. 01.06.1999 (дата актуализации описания 01.06.2019).
3. *Анурьев, В. И.* Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. / В. И. Анурьев ; под ред. И. Н. Жестковой ; 9-е изд. перераб. и доп. – М : Машиностроение, 2006. – Т. 1. – 928 с. Т. 2. – 960 с.
4. ГОСТ 1497–84. ИСО 6892–84. Металлы. Метод испытания на растяжение. – Введ. 01.01.85.
5. *Матюнин, В. М.* Индентирование в диагностике механических свойств материалов / В. М. Матюнин. – М. : Издательский дом МЭИ, 2015. – 288 с.
6. *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.
7. 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.).
8. *Горский, А. И.* Определение допускаемых напряжений при расчетах на прочность / А. И. Горский, Е. Б. Иванов-Эмин, А. И. Кореновский. – М. : НИИМАШ, 1974. – 79 с.