УДК 621.81

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-10-257-37-39

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

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ВАЛОВ НА КРУЧЕНИЕ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: matlin@vstu.ru

В работе приведена зависимость для определения предела выносливости материала валов, основанная на определении величины пластической твердости материала.

Ключевые слова: предел выносливости, пластическая твердость, неразрушающие методы.

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

OPERATIONAL CONTROL OF SHAFT TORSIONAL ENDURANCE LIMIT

Volgograd State Technical University

The paper presents a dependence for determining the endurance limit of the material of the shafts, based on the determination of the value of the plastic hardness of the material.

Keywords: endurance limit, plastic hardness, non-destructive methods.

Быстроходные валы машин и механизмов проверяют на усталостную прочность по напряжениям изгиба и кручения. Основными параметрами в этих расчетах являются пределы выносливости материала вала по напряжениям изгиба и кручения. Методика неразрушающего определения предела выносливости на изгиб описана в работе [1]. Что же касается оперативного определения предела выносливости на кручение, то этот вопрос нуждается в дополнительном исследовании. Как известно, предел выносливости на кручение материала можно определить экспериментально на специальных образцах согласно стандарту [2], однако это требует значительных затрат средств и времени, а также не позволяет проводить сплошной контроль готовых деталей. Кроме того, для испытаний на усталость характерен большой разброс экспериментальных значений, что диктует необходимость использования большого количества образцов с последующей статистической обработкой результатов. В связи с этим в ряде случаев для определения предела выносливости при кручении используют эмпирические формулы [3]:

для углеродистых сталей

$$\tau_{-1} = (0,55 \dots 0,65) \sigma_{-1}, \quad (1)$$

для легированных сталей

$$\tau_{-1} = (0,50 \dots 0,65) \sigma_{-1}, \quad (2)$$

где τ_{-1} и σ_{-1} – пределы выносливости материала на кручение и изгиб соответственно.

Следует отметить, что физико-механические свойства металлов можно оперативно контролировать по параметрам упругопластического внедрения индентора [1, 4, 5]. Предлагаемый метод неразрушающего определения предела выносливости при кручении предусматривает измерение пластической твердости НД [6] материала вала. Выбор в качестве числа твердости именно пластической твердости обоснован тем, что НД не зависит (в широком диапазоне отношений глубины h остаточного отпечатка к радиусу R сферического индентора: $h/R = 0,02 \dots 0,16$) от величины нагрузки F и радиуса R сферического индентора (то есть не зависит от условий испытания на твердость) и, таким образом, является константой для данного материала. Существенно, что с использованием цилиндрического индентора и понятия приведенного радиуса кривизны [1] возможен контроль пластической твердости непосредственно на цилиндрической поверхности вала. При контроле деталей, твердость которых не превышает 450 единиц по Бринеллю, в качестве материала индентора может быть использована термически обработанная сталь с твердостью не менее HV 8500 МПа (например, шарики или ролики, обычно используемые в подшипниках качения). При испытании деталей большей твердости необходимо использовать индентор из твердого сплава (например, из сплава карбида вольфрама типа ВК-3) с твердостью не менее HV 12000 МПа.

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

* Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00049 и в рамках конкурса МК-2021 (грант Президента России № МК-84.2021.4).

Для большинства валов применяют [7] углеродистые стали: ст. 5, стали 20, 45, а также легирование стали 20Х, 40Х. Для высоконагруженных валов ответственных машин применяют легированные стали 40ХН, 40ХН2МА, 30ХГТ, 30ХГСА и др.

Как видно из рисунка, построенного по данным справочников [3, 7], значения предела выносливости при кручении сталей различного уровня прочности хорошо коррелируются с величиной пластической твердости НД. Отметим, что в справочных таблицах [3], построенных на основе работы [8], приведены значения допускаемых напряжений $[\tau_1]$, а величины предела выносливости при кручении при этом определяются как $\tau_1 = [\tau_1]n$, где n – коэффициент за-

паса прочности, равный 2 [8] для симметричного цикла изменения напряжений. Результаты, показанные на рисунке, аппроксимированы авторами следующей зависимостью

$$\tau_1 = 0,803 \cdot \text{НД}^{0,714}. \quad (3)$$

При этом величину пластической твердости НД находили (согласно [1]) по приведенным в справочных таблицах [3, 7] значениям предела текучести при растяжении.

Из рисунка видно, что погрешность определения предела выносливости при кручении τ_1 по формуле (3) для более чем 30 различных сталей в подавляющем большинстве случаев не превышает (5...10) %.

Зависимость предела выносливости при кручении τ_1 от пластической твердости НД углеродистых и легированных сталей различного уровня прочности: сплошная линия – расчет по формуле (3); пунктирные линии $\pm 10\%$ отклонение от зависимости (3); значки 1–7 – справочные данные [3]; номера 1–3 – углеродистые стали со следующими видами термической обработки соответственно: нормализация, улучшение, объемная закалка; номера 4–7 – легированные стали со следующими видами термической обработки соответственно: объемная закалка, нормализация, улучшение, отжиг; значки 8 – углеродистые и легированные стали по справочным данным [7]

В таблице расчеты по формуле (3) сопоставлены с экспериментальными данными, приведенными в работе [9]; видно, что совпадение достаточно удовлетворительное: наибольшая погрешность, как правило, не превышает 12 % и имеет характер двустороннего разброса.

Отметим, что на величине предела выносливости при кручении τ_1 , определяемой по твердости не может быть учтен масштабный эффект, приводящий к снижению характеристик прочности при увеличении диаметра вала. Корректировка значений τ_1 , с целью учета мас-

штабного эффекта может быть выполнена по зависимостям, приведенным в работе [10].

Дальнейший расчет вала на усталостную прочность заключается в определении действительного коэффициента запаса прочности по касательным напряжениям кручения в опасных сечениях вала (с учетом коэффициентов концентрации напряжений, масштабного фактора, шероховатости поверхности, асимметрии цикла изменения напряжений) по известным зависимостям, приведенным, например, в работе [7].

Сопоставление предела выносливости при кручении τ_{-1} , определенного по описанному методу, с экспериментальными результатами $\tau_{-1,э}$ [9]

Марка стали	Термообработка	НД, МПа	$\tau_{-1,э}$, МПа [9]	τ_{-1} , МПа (форм.3)	Погрешность $\frac{\tau_{-1,э} - \tau_{-1}}{\tau_{-1,э}} \cdot 100 \%$
20	Нормализация	1100	120	119	0,7
30	Нормализация	1300	120	134	-11,9
45	Нормализация	1600	175	156	10,9
40ХН	Закалка в масле (830–840)°, отпуск (500–550)°	3410	240	267	-11,3
12ХН3А	Закалка в масле 850°, отпуск 560°	3190	240	255	-6,3
18ХНВА	Закалка 950°, затем 850° в масле, отпуск 200°	3860	345	292	15,4
25ХНВА	Закалка в масле 85° отпуск 560°	4320	295	316	-7,1

Таким образом, предложенный метод оперативного определения предела выносливости при кручении непосредственно на готовых деталях по величине пластической твердости материала пригоден для практического использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. ГОСТ 25.502–79. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. – Введ. 01.01.1981 (ограничение срока действия снято по протоколу № 2-92 Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации ИУС 2-93).
3. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т./В. И. Анурьев; 9-е изд. перераб. и доп. / Под ред. И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 1. – 928 с.

4. Марковец, М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
5. Матюнин, В. М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов / В. М. Матюнин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 288 с.
6. 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.).
7. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин. Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1993. – 640 с.
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.
9. Серенсен, С. В. Динамическая прочность в машиностроении / С. В. Серенсен, И. М. Тетьябаум, Н. И. Пригоровский. – М.: Машгиз, 1945. – 332 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.