

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИНДЕНТИРОВАНИЕМ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

М.М. МАТЛИН, д-р техн. наук, В.А. КАЗАНКИН, канд. техн. наук,
Е.Н. КАЗАНКИНА, канд. техн. наук

Волгоградский государственный технический университет,
400005, Волгоград, пр-т Ленина, 28, e-mail: matlin@vstu.ru

© Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н., 2022

В работе описаны методы оперативного контроля прочностных свойств сталей в различных условиях нагружения по результатам измерения пластической твердости. В частности, показаны методы определения предела текучести при растяжении, срезе, смятии, изгибе, кручении. В качестве примера использования разработанных методов приведена оценка равной прочности элементов резьбы.

Ключевые слова: индентор, пластическая твердость, предел текучести, растяжение, срез, смятие, изгиб, кручение.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-1-22-27

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение диктует необходимость повышения качества продукции. Работоспособность изделия во многом определяется главным критерием – прочностью. Оценку прочности материала выполняют при входном контроле, в процессе изготовления, а также на готовом изделии. Для оперативного неразрушающего определения прочностных свойств материала на всех этапах его жизненного цикла широко используют контроль твердости [1, 2]. В настоящее время расчет большинства деталей машин на прочность выполняют по допускаемым напряжениям. Величину допускаемых напряжений, как известно, определяют как отношение предельных напряжений к расчетному коэффициенту запаса прочности. Последний устанавливают табличным или дифференциальным методом. Предельное напряжение определяют в зависимости от вида нагружения, характера изменения нагрузки во времени и свойств материала детали. Так, например, если материал детали пластичный, а нагрузка статическая, то предельным напряжением является предел текучести материала.

В сертификате на свойства материала обычно указывают его свойства, полученные при стандартных испытаниях образцов на растяжение [3]. В то же время материал детали может одновременно испытывать различные виды нагрузок: растяжение, смятие, срез, изгиб, кручение и т.п. Например, резьба болта в контакте с гайкой одновременно испытывает напряжения смятия, среза, изгиба, а также напряжения растяжения стержня болта; шпонки испытывают напряжения смятия и среза; микронеровности шероховатой поверхности могут как срезаться, так и сминаться и т.п. В этих случаях необходимо либо проводить дополнительные испытания [4–7], либо использовать известные эмпирические зависимости [8, 9]. В связи с этим целесообразно иметь возможность оперативно и с единых позиций оценивать указанные прочностные свойства. Отметим, что в России действует национальный стандарт [11], который содержит описание методов для оперативной неразрушающей диагностики свойств материала деталей, а стандарт [12] описывает неразрушающий контроль физико-механических свойств материалов и покрытий методом

динамического индентирования. Эти документы соответствуют тенденциям мирового развития науки и техники в области неразрушающего контроля.

Цель работы состоит в выборе единого критерия для оценки прочностных свойств материалов деталей в различных условиях нагружения. В качестве такого критерия в работе использован контактный модуль упрочнения материала (пластическая твердость НД) [10]. Как известно [13], пластическая твердость является постоянной величиной для данного материала в широком диапазоне контактных нагрузок и глубин внедрения сферического индентора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [14] описана аналитическая методика определения предела текучести и временного сопротивления при растяжении, базирующаяся на взаимосвязях параметров упругопластического контакта сферического индентора (в том числе и пластической твердости НД) с кривой деформирования исследуемого материала при растяжении. На этой основе авторами выполнено экспериментальное исследование, а также изучены данные справочной литературы [8, 15], в результате чего были установлены зависимости ряда прочностных свойств углеродистых и легированных конструкционных сталей различного уровня прочности и твердости от величины пластической твердости.

Прямое экспериментальное определение различных прочностных свойств сталей (в процессах среза, смятия, изгиба и кручения) при статическом нагружении проводили (согласно стандартам [4–7]) с помощью программно-технического комплекса для испытания металлов ИР 5143-200 и испытательной машины для испытания на кручение КМ-50-1. Для измерения твердости использовали пресс Бринелля. В качестве индентора при пластической твердости НД испытуемого материала до 4 500 МПа применяли стальной закаленный шарик диаметром 5 мм; при большей твердости – твердосплавный шарик диаметром 5 мм. Сравнение результатов определения указанных прочностных свойств в зависимости от уровня пластической твердости с прямым экспериментом показало, что максимальная погрешность не превышает 10 % (как правило, составляет 5...6 %) и имеет характер двустороннего разброса. Полученные расчетные зависимости (установленные как в ходе экспериментального исследования, так и при анализе справочных данных [8, 15] для более чем 30 сталей) для пределов текучести при различных видах нагружения представлены в таблице.

Прочностные свойства
углеродистых и легированных конструкционных сталей
в различных условиях статического нагружения
в зависимости от пластической твердости НД

№ п/п	Вид нагружения	Расчетная зависимость
1	Растяжение	$\sigma_T = (0,2 \dots 0,22) \cdot \text{НД}$
2	Срез	$\tau_{\text{ср,Т}} = 0,15\text{НД} + 50$
3	Смятие	$\sigma_{\text{см,Т}} = (0,3 \dots 0,33) \cdot \text{НД}$
4	Изгиб	$\sigma_{\text{из,Т}} = 0,265\text{НД} - 50$
5	Кручение	$\tau_{\text{кр,Т}} = 0,158\text{НД}$

Примечание. Меньшие числовые значения указаны для углеродистых сталей, а большие – для легированных.

В качестве примера проиллюстрируем использование полученных зависимостей для оценки равной прочности элементов резьбы. Известно [16], что если резьба равнопрочная, то при одной и той же силе затяжки F нормальные напряжения растяжения σ_p в стержне болта достигнут предельных значений (т.е. предела текучести σ_T); при этом и напряжения среза $\tau_{ср}$ в резьбе также достигнут предельных значений, равных пределу текучести на срез $\tau_{ср, T}$:

$$\sigma_p = \sigma_T = \frac{4F}{\pi d_1^2}; \quad (1)$$

$$\tau_{ср} = \tau_{ср, T} = \frac{F}{\pi d_1 k p Z K_m}, \quad (2)$$

где d_1 – внутренний диаметр резьбы; k – коэффициент полноты резьбы (для крепежной метрической резьбы $k = 0,87$); p – шаг резьбы; Z – число витков гайки ($pZ = H$ – высота гайки); K_m – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между витками резьбы (обычно $K_m = 0,6 \dots 0,7$).

Выражая силу затяжки F из формул (1) и (2) и приравнивая эти уравнения, получим

$$\frac{\pi d_1^2}{4} \sigma_T = \pi d_1 k H K_m \cdot \tau_{ср, T}. \quad (3)$$

Из формулы (3) с учетом зависимостей 1 и 2 (см. таблицу) определим высоту гайки, обеспечивающую равную прочность резьбы на срез и стержня болта на разрыв:

$$H = \frac{d_1}{4kK_m} \frac{\sigma_T}{\tau_{ср, T}} = \frac{d_1 \cdot (0,2 \dots 0,22) \text{НД}}{4 \cdot 0,87 \cdot 0,6 \cdot (0,15 \text{НД} + 50)}. \quad (4)$$

Для болта из углеродистой стали с классом прочности 5.6 предел текучести на растяжение $\sigma_T = 300$ МПа, что соответствует величине пластической твердости НД = 1 500 МПа; при этом из расчета высоты гайки по формуле (4) получим $H = 0,52d_1$. Аналогично можно оценить необходимую высоту гайки из условий равной прочности стержня болта на разрыв, а резьбы – на изгиб или смятие. Следует отметить, что, учитывая сложность напряженного состояния резьбы, а также возможность снижения ее прочности из-за износа, высоту стандартных крепежных гаек принимают $H = 0,8d$, где d – наружный диаметр резьбы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты апробации методики оперативного контроля прочностных свойств сталей позволяют получить достаточно точные для решения инженерных задач значения пределов текучести в различных условиях нагружения. При этом исключается необходимость в полном или частичном разрушении детали, чтобы изготовить образцы для испытания. Отметим, что для измерения пластической твердости непосредственно на поверхности заготовок или готовых деталей (в том числе и крупногабаритных) в процессе изготовления, эксплуатации и ремонта можно использовать как стационарные, так и различные переносные приборы статического и ударного действия, подробный обзор которых приведен в статье [17]. Следует также иметь в виду, что приведенные результаты справедливы для стандартных образцов,

используемых при испытании на прочность. Очевидно, что для деталей с иными размерами нужно учитывать известными методами (например, приведенными в книге [18]) влияние масштабного фактора.

БЛАГОДАРНОСТИ

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).

ЛИТЕРАТУРА

1. Матюнин В.М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. М.: МЭИ. 2015. 288 с.
2. Матлин М.М., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А. Обзор методов неразрушающего контроля физико-механических свойств материалов деталей трибосопряжений // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2020. № 13. С. 64–69.
3. ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84). Металлы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартиформ. 2008. 22 с.
4. ГОСТ 33498-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на смятие. М.: Стандартиформ. 2016. 18 с.
5. ГОСТ 1 90148-74. Металлы. Метод испытания на срез. М.: Изд-во стандартов. 1975. 7 с.
6. ГОСТ Р ИСО 7438-2013. Материалы металлические. Испытание на изгиб. М.: Стандартиформ. 2014. 9 с.
7. ГОСТ 3565-80. Металлы. Метод испытания на кручение. М.: Изд-во стандартов. 1980. 15 с.
8. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / под ред. И.Н. Жестковой. М.: Машиностроение. 2006. Т. 1. 928 с.
9. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / под ред. И.Н. Жестковой. М.: Машиностроение. 2006. Т. 2. 965 с.
10. ГОСТ 18835-73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. М.: Изд-во стандартов. 1975. 9 с.
11. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартиформ. 2019. 10 с.
12. ГОСТ Р 56474-2015. Системы космические. Контроль неразрушающий физико-механических свойств материалов и покрытий космической техники методом динамического индентирования. М.: Стандартиформ. 2019. 23 с.
13. Дрозд М.С. Определение механических свойств металла без разрушения. М.: Металлургия. 1965. 171 с.
14. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Казанкина Е.Н., Казанкин В.А. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин: монография. М.: Инновационное машиностроение. 2019. 247 с.
15. Горский А.И., Иванов-Эмин Е.Б., Кореновский А.И. Определение допускаемых напряжений при расчетах на прочность. М.: НИИМАШ. 1974. 79 с.
16. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: учебник для вузов. М.: Юрайт. 2020. 409 с.
17. Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н., Костюков В.А. Контроль твердости крупногабаритных металлоизделий (обзор публикаций) // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2020. № 10. С. 30–33.

18. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник. М.: Машиностроение. 1985. 224 с.

Для цитирования: Матлин М.М., Казанкин В.А., Казанкина Е.Н. Прогнозирование технического состояния деталей индентированием в различных условиях нагружения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2022. № 1 (13). С. 22–27.

PREDICTION OF THE TECHNICAL CONDITION OF PARTS BY INDENTING IN DIFFERENT LOADING CONDITIONS

M.M. MATLIN, Dr. Sc., V.A. KAZANKIN, Cand. Sc.,
E.N. KAZANKINA, Cand. Sc.

Volgograd State Technical University, 28, Lenin av., 400005, Volgograd,
Russian Federation, e-mail: matlin@vstu.ru

The paper describes the methods of nondestructive control of the strength properties of steels under various loading conditions based on the results of measuring the plastic hardness. In particular, methods for determining the yield strength in tension, shear, crushing, bending, torsion are given. As an example of using the developed methods, an assessment of the equal strength of thread elements is given.

Keywords: indenter, plastic hardness, yield point, tension, shear, crushing, bending, torsion.

REFERENCES

1. Matyunin V.M. Indentirovanie v diagnostike mekhanicheskikh svoystv materialov [Indentation in the diagnosis of mechanical properties of materials] Moscow: Izdatelskiy dom MEI. 2015. 288 p.
2. Matlin M.M., Kazankina E.N., Kazankin V.A. Review of methods for non-destructive testing of physical and mechanical properties of materials of parts of tribocouplings. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdyh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2020. No. 13, pp. 64–69. (In Russian).
3. GOST 1497-84. ISO 6892-84. Metally. Metod ispytaniya na rastyazhenie [Metals. Tensile test method]. Moscow: Standartinform. 2008. 22 p. (In Russian).
4. GOST 33498-2015. Komposity polimernye. Metod ispytaniya na smyatie [Polymer composites. Collapse test method]. Moscow: Standartinform. 2016. 18 p. (In Russian).
5. GOST 1 90148-74. Metally. Metod ispytaniya na srez [Metals. Shear test method]. Moscow: Izd-vo standartov. 1975. 7 p. (In Russian).
6. GOST R ISO 7438-2013. Materialy metalicheskie. Ispytanie na izgib [Metallic materials. Bending test]. Moscow: Standartinform. 2014. 9 p. (In Russian).
7. GOST 3565-80. Metally. Metod ispytaniya na kruchenie [Metals. Torsion test method]. Moscow: Izd-vo standartov. 1980. 15 p. (In Russian).
8. Anuriev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya: v 3 t. [Handbook of the constructor-machine builder: in 3 v.]. Pod red. I.N. Zhestkovoy. Moscow: Mashinostroenie. 2006. V. 1. 928 p.

9. Anuriev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya: v 3 t. [Handbook of the constructor-machine builder: in 3 v.]. Pod red. I.N. Zhestkovoy. Moscow: Mashinostroenie. 2006. V. 2. 965 p.

10. GOST 18835-73. Metally. Metod izmereniya plasticheskoy tverdosti [Metals. Method for measuring plastic hardness]. Moscow: Izd-vo standartov. 1975. 9 p. (In Russian).

11. GOST R 56542-2019. Kontrol nerazrushayuschiy. Klassifikatsiya vidov i metodov [Non-destructive testing. Classification of types and methods]. Moscow: Standartinform. 2019. 10 p. (In Russian).

12. GOST R 56474-2015. Sistemy kosmicheskoye. Kontrol nerazrushayuschiy fiziko-mekhanicheskikh svoystv materialov i pokrytiy kosmicheskoye tehniki metodom dinamicheskogo indentirovaniya [Space systems. Non-destructive control of physical and mechanical properties of materials and coatings of space technology by the method of dynamic indentation]. Moscow: Standartinform. 2019. 23 p. (In Russian).

13. Drozd M.S. Opredelenie mekhanicheskikh svoystv metalla bez razrusheniya [Determination of the mechanical properties of metal without destruction]. Moscow: Metallurgiya. 1965. 171 p.

14. Matlin M.M., Mozgunova A.I., Kazankina E.N., Kazankin V.A. Metody nerazrushayushego kontrolya prochnostnykh svoystv detaley mashin: monografiya [Methods for non-destructive testing of strength properties of machine parts: monograph]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroenie. 2019. 247 p.

15. Gorskiy A.I., Ivanov-Emin E.B., Korenovskiy A.I. Opredelenie dopuskaemykh napryazheniy pri raschetakh na prochnost [Determination of permissible stresses in strength calculations]. Moscow: NIIMASH. 1974. 79 p.

16. Ivanov M.N., Finogenov V.A. Detali mashin: uchebnyy dlya vuzov [Machine parts: a textbook for universities]. Moscow: Yurayt. 2020. 409 p.

17. Matlin M.M., Kazankin V.A., Kazankina E.N., Kostuykov V.A. Hardness control of large-sized metal products (review of publications). *Himicheskoye i neftegazovoye mashinostroenie*. 2020. No. 10, pp. 30–33. (In Russian).

18. Kogaev V.P., Mahutov N.A., Gusenkov V.P. Rashety detaley mashin i konstruktsii na prochnost i dolgovechnost. Spravochnik [Calculations of machine parts and structures for strength and durability. Handbook]. Moscow: Mashinostroenie. 1985. 224 p.

Поступила в редакцию/received: 08.12.2021; после рецензирования/reviced: 10.01.2022;
принята/accepted: 27.01.2022