



Научная статья

УДК 620.17

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-593-600>

Диагностика прочности деталей машин, нагруженных сдвигающими нагрузками

Михаил Маркович Матлин^{1✉}, Владимир Андреевич Казанкин²,
Елена Николаевна Казанкина³

¹⁻³Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

¹matlin@vstu.ru

²kazankin_vmr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7188-4219>

³kazankina_elena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9669-4315>

Резюме. Цель – разработка оперативного неразрушающего метода определения предела прочности на срез деталей из конструкционных углеродистых и легированных сталей. Для определения предела прочности при срезе использован метод индентирования контролируемых деталей. При этом предложена новая характеристика материала – модуль упрочнения при срезе. Экспериментальное исследование выполнено с помощью программно-технического комплекса для испытания металлов ИР 5143-200 и приспособления для испытания образцов на двойной срез. Были исследованы стали марок: сталь 10, сталь 20, сталь 35, сталь 45, сталь 20Х, сталь 40Х, сталь 25ХГТ, сталь 30ХГСА. В качестве характеристики прочностных свойств образцов использовали число пластической твердости, которая обладает рядом преимуществ перед другими числами твердости. Проведенные авторами исследования показали значительное расхождение между справочными значениями временного сопротивления при срезе и экспериментальными, полученными авторами, которое может достигать 20%. Получены зависимости для определения предела прочности на срез для образцов из конструкционных углеродистых и легированных сталей; показана их достаточная точность для инженерных расчетов как по экспериментальным данным авторов, так и при сравнении с литературными источниками. Погрешность определения предела прочности при срезе не превышает, как правило, $\pm 5\%$. В работе приведены некоторые виды предохранительных деталей, разрушающихся при воздействии срезающих нагрузок. Показано, что заниженные значения временного сопротивления, приводимые в справочниках, могут приводить к повышенным нереализуемым запасам прочности и, как следствие, увеличению металлоемкости соединений. Предложенный метод неразрушающего определения предела прочности материала на срез обладает достаточной для инженерной практики точностью и может быть использован в условиях изготовления, эксплуатации и ремонта различных деталей и узлов машин.

Ключевые слова: срез, модуль упрочнения при срезе, индентор, пластическая твердость, предел прочности при срезе

Финансирование: Работа выполнена в рамках конкурса МК-2021 (грант Президента России № МК-84.2021.4).

Для цитирования: Матлин М. М., Казанкин В. А., Казанкина Е. Н. Диагностика прочности деталей машин, нагруженных сдвигающими нагрузками // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 593–600. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-593-600>.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Shear strength diagnostics of machine parts

Mikhail M. Matlin^{1✉}, Vladimir A. Kazankin², Elena N. Kazankina³

¹⁻³Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹matlin@vstu.ru

²kazankin_vmr@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7188-4219>

³kazankina_elena@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9669-4315>

Abstract. This study presents an effective non-destructive method for determining the ultimate shear strength of parts made of structural carbon and alloy steels. The shear strength was determined using the method of controlled part indentation. In addition, a new material characteristic – a shear hardening modulus – is proposed. The experimental study was carried out using an IR 5143-200 software and hardware complex for metal testing and a double-shear testing device. Steel samples of the following grades were examined: steel 10, 20, 35, 45, 20Kh, 40Kh, 25KhGT and 30KhGSA. The value of plastic hardness was used as a strength characteristic due to its advantages over other hardness values. The conducted experiments found a significant discrepancy (up to 20%) between the reference and experimental values of shear strength. Dependencies for determining the shear strength of structural carbon and alloy steel samples were obtained. The accuracy of these dependencies was determined to be sufficient for engineering calculations both according to the obtained experimental results and literature sources. The error associated with shear strength determination does not exceed $\pm 5\%$. In addition, the paper provides some types of safety parts that can be destroyed by shear loads. The underestimated reference values of the ultimate strength can lead to increased unrealizable safety margins and, as a result, an increase in the specific metal amount of joints. The proposed non-destructive method for shear strength determination exhibits the accuracy sufficient for engineering practice and can be used when manufacturing, operating and repairing various machine parts and units.

Keywords: shear, shear hardening modulus, indenter, plastic hardness, shear strength

Funding: The work was carried out within the framework of the MK-2021 competition (grant of the President of Russia No. MK-84.2021.4).

For citation: Matlin M. M., Kazankin V. A., Kazankina E. N. Shear strength diagnostics of machine parts. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):593-600. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-593-600>.

ВВЕДЕНИЕ

В машинах и механизмах многие детали в процессе работы находятся под действием сдвигающих (срезающих) нагрузок (заклепки, болты, угловые сварные швы, шпонки, штифты и др.).

Прочность указанных деталей определяется прочностью материала на срез, в связи с этим важно иметь данные о пределе прочности при срезе. Известные эмпирические формулы, определяющие предел прочности на срез, обладают низкой точностью, а прямые испытания образцов достаточно трудоемки, поскольку предусматривают изготовление таких образцов, в том числе вырезаемых из готовых деталей. Это исключает 100% контроль деталей.

В справочнике В. И. Анурьева⁴ приведена эмпирическая зависимость для определения предела прочности материала при срезе:

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

где σ_B – предел прочности материала на растяжение, МПа; K – экспериментальный коэффициент, значение которого выбирается из справочной 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 – $K = 0,75 \dots 0,81$). Таким образом, для использования указанной зависимости требуется

определить (экспериментально согласно ГОСТу или из справочных данных) предел прочности материала на растяжение и вязкость материала. Кроме того, широкий диапазон значений коэффициента K приводит к погрешности определения предела прочности при срезе, достигающей 18%.

Также следует отметить, что результаты экспериментальных исследований, выполненных авторами, показывают значительно более высокие значения временного сопротивления срезу, чем данные справочников⁴. Так, например, для стали 10 экспериментальное значение составило $\tau_B = 304$ МПа, при этом значение из справочника⁴ $\tau_B = 250$ МПа. Таким образом, в детали может быть заложен нереализуемый повышенный запас прочности, который лишь увеличивает металлоемкость детали.

Очевидно, что более достоверные результаты можно получить путем непосредственного проведения испытаний образцов на срез, например, согласно стандарту ОСТ 190148-74 «Металлы. Метод испытания на срез»⁵. Однако при этом потребуется изготовить соответствующие образцы, вырезав их из материала готовой детали, что, очевидно, приводит к частичному или полному разрушению исследуемой детали; метод невозможно использовать при необходимости стопроцентного контроля деталей, а также при малых размерах контролируемых деталей.

Более рациональными являются неразрушающие методы контроля. Среди неразрушающих видов контроля согласно ГОСТ-Р 56542-2015⁶ можно выделить акустический, виброакустический, вихретоковый, магнитный, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический и др. В качестве примера можно привести метод [1, 2] ультразвуковой спектроскопии сдвиговых волн для оценки напряжений в стальных деталях. Следует подчеркнуть, что названные методы оценивают объемные свойства материала. Для определения прочностных свойств материала в конкретном месте детали целесообразно использовать неразрушающие методы определения, основанные на методе индентирования. Среди различных методов неразрушающего контроля физико-механических свойств материала методы индентирования занимают одно из ведущих мест, поскольку зависят от целого комплекса механических свойств материала. Основа таких методов была заложена в работах Н. Н. Давиденкова, С. Е. Беляева, М. П. Марковца. Дальнейшее развитие эти методы в последние годы получили в работах отечественных и зарубежных исследователей [3–8] и многих других ученых.

Методы неразрушающего контроля прочностных свойств материалов путем вдавливания индентора применяются также на микро- и наноуровнях. Так, например, в работе [9] приведена методика автоматического внедрения шарика для измерения текучести материала. Результаты исследований включают в себя зависимости нагрузки от вдавливания, определение предела текучести и предела прочности при растяжении.

В работе [10] описаны исследования по определению взаимосвязи прочности с твердостью с помощью испытаний на микрорастяжения и наноиндентирования.

Следует отметить, что индентирование шариком используется не только в машиностроении, но и в других отраслях. Так,

например, в работе [11] описана методика определения прочности на сдвиг для мерзлых грунтов, основанная на внедрении сферического индентора.

В работе [12] приведено сравнение методов определения остаточных напряжений путем инструментального внедрения и дифракции рентгеновских лучей. Авторы делают вывод о том, что методика инструментального вдавливания измеряет остаточное напряжение в более глубоких участках поверхности материала, чем глубина проникновения индентора.

Эти методы позволяют определять механические свойства конкретной детали, а при необходимости обеспечить и 100% контроль деталей. Целью данного исследования является разработка оперативного неразрушающего метода определения предела прочности на срез материала деталей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления взаимосвязей предела прочности при срезе с параметрами индентирования было выполнено экспериментальное исследование. Образцы изготавливались из углеродистых и легированных конструкционных сталей различного уровня прочности и пластичности. Свойства их материалов приведены в таблице.

Механические свойства испытанных материалов
 Mechanical properties of tested materials

Номер образца	Марка стали, пластическая твердость НД, МПа	Предел прочности при срезе (по ОСТ 1 90148-74 ⁵) $\tau_{B, срез}$, МПа
1	Сталь 10, 1487	304
2	Сталь 20, 1570	325
3	Сталь 35, 2158	468
4	Сталь 45, 2590	523
5	Сталь 20Х, 5297	840
6	Сталь 40Х, 1089	712
7	Сталь 25ХГТ, 5433	835
8	Сталь 30ХГСА, 3950	629

⁴Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И. Н. Жестковой. М.: Изд-во «Машиностроение», 2006. Т. 1. 928 с., Т. 2. 960 с.

⁵ОСТ 190148-74. Металлы. Метод испытания на срез. Введ. 01.07.1975.

⁶ГОСТ-Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Введ. 01.06.2016.

⁷ГОСТ 18835-73. Металлы. Метод измерения пластической твердости. Введ. с 01.01.1974 до 01.01.1979.

В качестве характеристики прочностных свойств образцов использовали число пластической твердости НД (НД – единицы измерения твердости, определяемой дюрометром – Durometer Hardness) относительно ГОСТ 18835-73 «Металлы. Метод определения пластической твердости»⁷. Как известно [3], значительным преимуществом пластической твердости является независимость ее величины от условий испытания (контактной нагрузки и диаметра сферического индентора) и, таким образом, пластическая твердость является константой для данного материала. Также пластическая твердость НД позволяет создать единую шкалу твердости для широкого ряда материалов – от мягких до самых твердых. При этом для определения твердости в последнем случае (при твердости большей НД 4500 МПа) следует использовать индентор из твердого сплава с твердостью не меньше HV 12000 МПа.

При измерении пластической твердости в качестве индентора использовали стальной закаленный шарик диаметром 5 мм, а для сталей с твердостью большей, чем 4500 МПа – сферический индентор из карбида титана. Для измерения твердости непосредственно на цилиндрической поверхности детали использовали цилиндрический индентор [3]. Отметим, что использование цилиндрического индентора позволяет измерять твердость материала на поверхности цилиндрических образцов или готовых цилиндрических деталей, в том числе малого диаметра, избегая необходимости точного центрирования, возникающей при внедрении сферического индентора. Для измерения твердости использовали пресс Бринелля. Предел прочности при срезе $\tau_{B, \text{счт}}$ определяли по стандарту ОСТ 190148-74⁵ на цилиндрических образцах диаметром 5 мм при их двойном срезе; нагружение проводили с помощью программно-технического комплекса для испытания металлов ИР 5143-200 (электрохимическая машина универсального назначения для испытания образцов материалов и изделий (например, труб) на растяжение, сжатие и изгиб). Для оценки предела прочности при срезе была предложена новая характеристика материала – модуль упрочнения материала при срезе, МПа [13],

который может быть определен по следующей зависимости:

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

где ε_p – предельная равномерная деформация при статическом растяжении образца из испытуемого материала (безразмерная величина); F – контактная нагрузка на сферический индентор, Н; d – диаметр остаточного отпечатка, мм; D – диаметр сферического индентора, мм.

Предельную равномерную деформацию испытуемого материала можно вычислить по формуле:

$$\varepsilon_p = \frac{245}{H_D}, \quad (3)$$

которая обладает достаточной для практики точностью [3].

Экспериментально установлено, что предел прочности испытуемого материала при срезе можно описать следующей зависимостью:

$$\tau_B = V \cdot M_{cp} - W, \quad (4)$$

где V и W – коэффициенты предела прочности при срезе, зависящие от химического состава испытуемого материала.

В результате проведенного авторами экспериментального исследования установлено, что формулу (4) можно представить в виде (для углеродистых и легированных сталей, соответственно)

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

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

В результате сравнительного анализа значений, полученных описанным методом и по стандарту ОСТ 190148-74⁵, установлено, что погрешность при использовании формул (5) и (6), определяющих предел прочности при срезе, не превышает, как правило, $\pm 5\%$. Удовлетворительные результаты получены при сопоставлении описанного метода с экспе-

риментальными данными работы [14], а также со справочными данными работы⁴ при коэффициенте $K = 0,68$.

Дополнительно отметим, что в некоторых случаях, когда являются известными другие числа твердости, величину пластической твердости НД можно определить с помощью эмпирических формул, связывающих ее с другими числами твердости, и приведенных в работе [3].

Полученные результаты предназначены в первую очередь для проектирования срезных штифтов или шпонок, которые являются предохранительными устройствами при механической перегрузке, позволяющими сохранить более дорогие или труднозаменяемые детали. Отметим, что указанные срезные детали имеют низкую стоимость, просты в изготовлении, не требуют технического обслуживания и постоянно эксплуатируются в течение многих лет. Естественно, что после срабатывания они требуют замены. Очевидно, что их вводят в конструкцию механизма в тех редких случаях, когда возникает перегрузка и является по существу аварийной ситуацией.

Предохранительные элементы, разрушающиеся от среза и защищающие механизм от разрушения, очень широко используются в современной технике. Так, например, в работе [15] описано устройство, защищающее шнековый конвейер срезанной шпонкой при заклинивании механизма. В работе [16] предложена предохранительная муфта с разрушающимися элементами в виде листового материала. В работе [17] представлен амортизатор, содержащий как минимум два предохранительных штифта. В работе [18] дана приводная муфта аварийного разъединения, которая содержит разрывной замок с вилкой с предохранительным штифтом. Патент [19] содержит описание устройства для крепления и отделения всплывающего буя на подводной

лодке, которое содержит предохранительный штифт, разрушающийся при необходимости пиропатроном. Согласно [20], головной обтекатель ракеты также сбрасывается путем разрушения предохранительного штифта при срабатывании пиропатрона. Патент РФ № 2644200 описывает конструкцию срезанного при перегрузке предохранительного штифта-шпонки для соединения гребного винта с гребным валом, которая используется в лодочных моторах. Срезаемые предохранительные штифты применяются в сельскохозяйственной технике (патент РФ № 2046579), в устройстве для измельчения материалов (патент РФ № 2435664), в муфте предельного момента листопрямильной машины (патент РФ № 73706), в устройстве для герметичного перекрытия ствола нефтяной скважины (пат. РФ № 2092675), в приводе колеса обозрения (пат. РФ № 2236885), для защиты привода шнековых конвейеров (пат. РФ № 2451239) и многих других устройствах.

Необходимо подчеркнуть, что при расчете прочности на срез деталей, разрушение которых недопустимо (штифты, шпонки, болты, заклепки и др.), следует использовать допускаемые напряжения $[\tau_{ср}]$. Однако для расчета предохранительных деталей, разрушение которых предотвращает разрушение механизмов и машин, следует использовать значения предела прочности при срезе τ_b . В противном случае предохранительные детали не будут выполнять свою функцию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, описанный метод неразрушающего определения предела прочности материала на срез обладает достаточной для инженерной практики точностью и может быть использован в условиях изготовления, эксплуатации и ремонта деталей и узлов машин.

Список источников

1. Матлин Ю. А., Казанкина Е. Н., Казанин В. А. Обзор методов неразрушающего контроля физико-механических свойств материалов деталей трибопроводов // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2020. № 13. С. 64–69.

2. Liu Diankun, He Jingbo, Li Zuohua, Teng Jun. Non-destructive evaluation of absolute stress in steel members using shear-wave spectroscopy // Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. 2018. Vol. 35. Iss. 2. P. 236–243. <https://doi.org/10.16356/j.1005-1120.2018.02.236>.

3. Матлин М. М., Мозгунова А. И., Казанкина Е. Н., Казанкин В. А. Методы неразрушающего контроля прочностных свойств деталей машин: монография. М.: Изд-во «Инновационное машиностроение», 2019. 247 с.
4. Матюнин В. М. Индентирование в диагностике механических свойств материалов. М.: ИД МЭИ, 2015. 288 с.
5. Ghosh A., Arreguin-Zavala J., Aydin H., Goldbaum D., Chromik R., Brochu M. Investigating cube-corner indentation hardness and strength relationship under quasi-static and dynamic testing regimes // *Materials Science and Engineering A*. 2016. Vol. 677. P. 534–539. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.067>.
6. Qing-ya Ma, Zhang Ya. Study of the relation between tensile strength and hardness for low-carbon steel based on least squares support vector machine // *Journal University China National Science Education*. 2016. Iss. 3. P. 258–278. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3193.2016.03.010>.
7. Tiryakioğlu M. On the relationship between Vickers hardness and yield stress in Al-Zn-Mg-Cu Alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 633. P. 17–19. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.073>.
8. Kyung Woo Lee, Jae Choi Min, Young Kim Ju, Il Kwon Dong, Ho Kim Kwang. Instrumented indentation technique: new nondestructive measurement technique for flow stress-strain and residual stress of metallic materials // *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*. 2005. Vol. 26. Iss. 5. P. 306–314.
9. Ammar H. R., Haggag F. M., Alaboodi A. S., Al-Mufadi F. A. Nondestructive measurements of flow properties of nanocrystalline Al-Cu-Ti alloy using Automated Ball Indentation (ABI) technique // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 729. P. 477–486. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.089>.
10. Kwak K., Mine Y., Morito S., Ohmura T., Takashima K. Correlation between strength and hardness for substructures of lath martensite in low- and medium-carbon steels // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 856. P. 144007. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144007>.
11. Qingfei Yun, Chunlei Xie, Ze Zhang, Youqian Liu, Jun-song Fu, Qi Liu. The solution of the double-sphere model and experimental research of the long-term shear strength of frozen sand based on spherical template indenter test // *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022. Iss. 2. P. 485–494. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0053>.
12. Okano S., Kanamaru D., Ihara R., Mochizuki M. On the distinction between instrumented indentation technique and X-ray diffraction method in nondestructive or semi-nondestructive surface stress measurement // *Journal of the Society of Materials Science*. 2016. Vol. 65. Iss. 4. P. 319–324. <https://doi.org/10.2472/jsms.65.319>.
13. Пат. № 2740634, Российская Федерация, МПК G01N3/40. Способ определения предела прочности при срезе / М. М. Матлин, В. А. Казанкин, Е. Н. Казанкина; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. Заявл. 15.06.2020; опубл. 18.01.2021. Бюл. № 2.
14. Густов Ю. И., Воронина И. В., Аллаттуф Х. Л. Взаимосвязь напряжений среза и предела выносливости металлических материалов // *Вестник Московского государственного строительного университета*. 2013. № 4. С. 32–37. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2013.4.31-37>.
15. Пат. № 204286, Российская Федерация, F22B 35/18. Устройство автоматического контроля и управления твердотопливным котлом / И. А. Подшивалов, А. Г. Ту-маниян; заявитель и патентообладатель И. А. Подшивалов. Заявл. 22.01.2021; опубл. 18.05.2021. Бюл. № 14.
16. Пат. № 173549, Российская Федерация, F16D 9/06. Предохранительная муфта с разрушающимися элементами / М. Н. Казанцев, И. А. Флегентов, С. Н. Зо-зуля; заявитель и патентообладатель ПАО «Транс-нефть». Заявл. 01.03.2017; опубл. 30.08.2017. Бюл. № 25.
17. Пат. № 192168, Российская Федерация, A62B 1/10. Амортизатор на срезаемых штифтах для средств защиты втягивающего типа / С. Е. Курьез, А. П. Тюрин, С. С. Гаврюшин; заявитель и патентообладатель ООО «Сейф ТЕК». Заявл. 26.04.2019; опубл. 05.09.2019. Бюл. № 25.
18. Пат. № 2779806, Российская Федерация, F16L 29/00. Приводная муфта аварийного разъединения / В. В. Вакулов; заявитель и патентообладатель В. В. Вакулов. Заявл. 22.12.2021; опубл. 13.09.2022. Бюл. № 26.
19. Пат. № 2214340, Российская Федерация, B63B 22/08. Устройство крепления и отделения всплывающего буя на подводном техническом средстве / А. Г. Дун, М. В. Савенков; заявитель и патентообладатель ФГУП «Малахит». Заявл. 17.12.2001; опубл. 20.10.2003. Бюл. № 29.
20. Пат. № 2492413, Российская Федерация, F42B 10/46. Сбрасываемый головной обтекатель летательного аппарата / Н. А. Васильев, В. А. Ефремов, В. И. Злобин, А. А. Федоров; заявитель и патентообладатель ОАО «Корпорация тактическое ракетное вооружение». Заявл. 05.03.2012; опубл. 10.09.2013. Бюл. № 25.

References

1. Matlin M. M., Kazankina E. N., Kazankin V. A. Review of methods for nondestructive testing of physical and mechanical properties of tribopipe part materials. *Mekhanika i fizika processov na poverhnosti i v kontakte tverdykh tel, detaley tekhnologicheskogo i energeticheskogo oborudovaniya*. 2020. No. 13, pp. 64–69. (In Russ.).
2. Liu Diankun, He Jingbo, Li Zuohua, Teng Jun. Non-destructive evaluation of absolute stress in steel members using shear-wave spectroscopy. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*. 2018;35(2):236-243. <https://doi.org/10.16356/j.1005-1120.2018.02.236>.
3. Matlin M. M., Mozgunova A. I., Kazankina E. N., Kazankin V. A. *Methods of non-destructive testing of strength properties of machine parts*. Moscow: Innovacionnoe mashinostroenie; 2019, 247 p. (In Russ.).

4. Matyunin V. M. *Indentation in material mechanical properties diagnostics*. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2015, 288 p. (In Russ.).
51. Ghosh A., Arreguin-Zavala J., Aydin H., Goldbaum D., Chromik R., Brochu M. Investigating cube-corner indentation hardness and strength relationship under quasi-static and dynamic testing regimes. *Materials Science and Engineering: A*. 2016;677:534-539. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.067>.
6. Qing-ya Ma, Zhang Ya. Study of the relation between tensile strength and hardness for low-carbon steel based on least squares support vector machine. *Journal University China National Science Education*. 2016;3:258-278. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3193.2016.03.010>.
7. Tiryakioğlu M. On the relationship between Vickers hardness and yield stress in Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2015;633:17-19. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.073>.
8. Kyung Woo Lee, Jae Choi Min, Young Kim Ju, Il Kwon Dong, Ho Kim Kwang. Instrumented indentation technique: new nondestructive measurement technique for flow stress-strain and residual stress of metallic materials. *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*. 2005;26(5):306-314.
9. Ammar H. R., Haggag F. M., Alaboodi A. S., Al-Mufadi F. A. Nondestructive measurements of flow properties of nanocrystalline Al-Cu-Ti alloy using Automated Ball Indentation (ABI) technique. *Materials Science and Engineering: A*. 2018;729:477-486. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.05.089>.
10. Kwak K., Mine Y., Morito S., Ohmura T., Takashima K. Correlation between strength and hardness for substructures of lath martensite in low- and medium-carbon steels. *Materials Science and Engineering: A*. 2022;856:144007. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144007>.
11. Qingfei Yun, Chunlei Xie, Ze Zhang, Youqian Liu, Jun-song Fu, Qi Liu. The solution of the double-sphere model and experimental research of the long-term shear strength of frozen sand based on spherical template indenter test. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2022;2:485-494. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0053>.
12. Okano S., Kanamaru D., Ihara R., Mochizuki M. On the distinction between instrumented indentation technique and X-ray diffraction method in nondestructive or semi-non-destructive surface stress measurement. *Journal of the Society of Materials Science*. 2016;65(4):319-324. <https://doi.org/10.2472/jms.65.319>.
13. Matlin M. M., Kazankin V. A., Kazankina E. N. *Determination method of the shear strength limit*. Patent RF, no. 2740634; 2021. (In Russ.).
14. Gustov Yu.I., Voronina I.V., Lattouf A.L. Relationship between shear stress and fatigue strength of metallic materials. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta. = Vestnik Monthly Journal on Construction and Architecture*. 2013;4:32-37. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2013.4.31-37>.
15. Podshivalov I. A., Tumanyan A. G. *Device for automatic control and monitoring of a solid fuel boiler*. Patent RF, no. 204286; 2021. (In Russ.).
16. Kazantsev M. N., Flegentov I. A., Zozulya S. N. *Overload release clutch with destructive elements*. Patent RF, no. 173549; 2017. (In Russ.).
17. Curiosity S. E., Tyurin A. P., Gavryushin S. S. *Shock-absorber on sheared pins for retractable type protection devices*. Patent RF, no. 192168; 2019. (In Russ.).
18. Vakulov V. V. *Emergency disconnect drive clutch*. Patent RF, no. 2779806; 2022. (In Russ.).
19. Dong A. G., Savenkov M. V. *A device for connecting and disconnecting a pop-up buoy on an underwater engineering facility*. Patent RF, no. 2214340; 2003. (In Russ.).
20. Vasiliev N. A., Efremov V. A., Zlobin V. I., Fedorov A. A. *Resettable fairing tip of an aircraft*. Patent RF, no. 2492413; 2013. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матлин Михаил Маркович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Динамика и прочность машин»,
Волгоградский государственный технический
университет,
400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, Россия

Казанкин Владимир Андреевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Динамика и прочность машин»,
Волгоградский государственный технический
университет,
400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail M. Matlin,
Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Machine Dynamics and
Strength,
Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

Vladimir A. Kazankin,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Machine
Dynamics and Strength,
Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russia

Казанкина Елена Николаевна,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Динамика и прочность машин»,
Волгоградский государственный технический
университет,
400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28, Россия

Elena N. Kazankina,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Machine
Dynamics and Strength,
Volgograd State Technical University,
28 Lenin Ave., Volgograd 400005, Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.12.2022; одобрена после рецензирования 06.12.2022; принята к публикации 21.12.2022.

Information about the article

The article was submitted 01.12.2022; approved after reviewing 06.12.2022; accepted for publication 21.12.2022.