

(марки Alhua DH-HAC-HF3220EP), сигнал от которой передается на дисплей.

При постоянной рабочей частоте модулятора изменение разности начальных температур матрицы термооптического преобразователя и широкоапертурного резонатора будет приводить в конечном итоге к изменению величины переменного сигнала на осциллографе, что позволяет определить разность начальных температур  $\Delta T$ , которой соответствует максимальная чувствительность термооптического преобразователя при фиксированной температуре окружающей среды  $T_0$ . Уменьшение величины интенсивности ИК-излучения позволяет определить обнаружительную способность термооптического преобразователя. При воздействии на термооптического преобразователя периодических импульсов ИК-излучения (синусоидальной или прямоугольной формы) с постоянной амплитудой, формируемых за счет увеличения рабочей частоты модулятора, происходит уменьшение его чувствительности. Это позволяет определить постоянную времени

$\tau = 1/2\pi\nu_c$ . Граничная частота  $\nu_c$  соответствует спаду чувствительности на 3 дБ при увеличении частоты модуляции.

**Заключение.** В итоге на основании ГОСТ Р 59606–2021 была разработана оптическая схема лабораторного стенда для исследования основных параметров матричных термооптических преобразователей: обнаружительная способность, температурное разрешение и постоянная времени.

#### Литература

1. Перспективы применения микрорезонаторов Фабри-Перо для тепловизионной техники / В. М. Кравченко [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 280–286.
2. Исследование матрицы Фабри-Перо термооптического преобразователя / В. М. Кравченко [и др.] // Восьмой белорусский космический конгресс, 25–27 октября 2022 года, Минск: материалы конгресса: в 2 т. – Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2022. – Т.2. – С.130–133.
3. ГОСТ Р 59606–2021. Оптика и фотоника. Устройства фотоприемные второго и последующих поколений. Методы измерений фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М: БелГИСС, 2021. – 2021.

УДК 620.179

### ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТВЕРДОСТИ ЧУГУНА

Крень А. П.<sup>1</sup>, Кутепов А. Ю.<sup>1</sup>, Никифоров А. В.<sup>2</sup>, Турсунов Н. К.<sup>3</sup>, Уразбаев Т. Т.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь,

<sup>3</sup>Ташкентский государственный транспортный университет

Ташкент, Узбекистан

**Аннотация** Показаны возможности использования машинного обучения и стандартных библиотек языка программирования Python для оценки твердости чугунов различных марок, имеющих переменный модуль упругости. Установлено, что в случае применения метода микроударного индентирования это позволяет снизить погрешность до 10 единиц твердости по шкале Бринелля и отказаться от индивидуальных градуировок для различных чугунов при использовании портативных твердомеров.

**Ключевые слова:** твердость, модуль упругости, температура, металл, микроударное индентирование.

### APPLICATION OF MACHINE LEARNING FOR CAST IRON HARDNESS CONTROL

Kren A.<sup>1</sup>, Kutsepau A.<sup>1</sup>, Nikiforov A.<sup>2</sup>, Tursunov N.<sup>3</sup>, Urazbaev T.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University

Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Tashkent State University of Transport

Tashkent, Uzbekistan

**Abstract.** The possibilities of using machine learning and existing libraries of the Python programming language for assessing the hardness of cast irons of various grades with a variable modulus of elasticity are shown. It was established that in case of application of the microimpact indentation method this allows to reduce the error to 10 units of hardness on the Brinell scale and to refuse individual scaling for different cast irons when using portable hardness testers.

**Keywords:** hardness, elastic modulus, temperature, metal, micro-impact indentation.

Адрес для переписки: Крень А. П., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь  
e-mail: alekspk@iaph.bas-net.by

Чугун широко используется в машиностроении благодаря высоким механическим характеристикам и простоте выплавки. Одним из наиболее перспективных методов контроля механических характеристик является метод динамического ин-

струментального индентирования. Он подразумевает регистрацию всей диаграммы нагружения, когда индентор находится в контакте с испытуемым материалом. Эта диаграмма позволяет определить целый набор данных [1] и рассчитать динамиче-

скую твердость  $H_d$ . Однако, как показывают исследования, значение  $H_d$  плохо коррелирует со статической твердостью.

Целью данной работы является изучение возможности контроля твердости по Бринеллю  $H_B$  чугуна методом ударного микроиндентирования с использованием диаграммы нагружения материала и обработки данных с помощью такого инструмента искусственного интеллекта [2] как машинное обучение.

Данные для машинного обучения были получены с помощью прибора ИФМХ-Ч [3] с тремя датчиками, которые отличались между собой массой, радиусом и скоростью подлета индентора. Измерения проводились на 79 образцах чугуна: высокопрочном, сером, передельном, с вермикулярным графитом. В качестве признаков использовались следующие величины: максимальное усилие  $P_{max}$ , максимальная глубина внедрения  $h_{max}$ , глубина отпечатка  $h_p$ , упругая составляющая глубины вдавливания индентора  $h_e$ , контактный диаметр  $d_c$ , энергия упругого деформирования  $W_y$ , модуль упругости  $E$ , динамическая твердость  $H_d$ , скорость отскока индентора  $v_{min}$ , время активного этапа удара  $t_a$ , коэффициент восстановления скорости  $e$ , пластичность  $\delta$ .

Для создания, выбора и обучения моделей был использован язык программирования Python. Помимо признаков, перечисленных выше, часть моделей была реализована с использованием полиномиальных признаков, которые получают из дополнительных признаков, формируемых путем различных математических операций.

Для каждого датчика обучение выполнялось индивидуально. Все этапы автоматизированной обработки данных осуществлялись с использованием библиотеки PyCaret. Сравнительный анализ моделей проводился на основе таких метрик, как MAE (средняя абсолютная ошибка), MSE (среднеквадратичная ошибка), RMSE (корень среднеквадратичной ошибки),  $R^2$  (коэффициент детерминации), RMSLE (среднеквадратичная логарифмическая ошибка), MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка) и TT (время обучения). В результате сравнения ряда моделей, оптимальной оказалась линейная регрессия.

В результате оптимизации, наименьшее значение  $MAE = 13,3$  и наибольшее  $R^2 = 0,924$  были получены при использовании следующих шести признаков:  $P_{max}$ ,  $h_p$ ,  $d_c$ ,  $v_{min}$ ,  $\delta$ ,  $e$ . Из рисунка 1 видно, что невязка – разница между измеренной и предсказанной моделью твердостью  $\Delta H_B$  – не зависит от значения абсолютного значения  $H_B$ .

С целью возможного улучшения точности модели были сконструированы дополнительные признаки (2 вариант обучения), а также полиномиальные признаки 2 степени, которые формировались из основных и дополнительных (3 вариант). Признаки были получены при помощи мо-

дуля PolynomialFeatures. Дополнительные и полиномиальные признаки генерировались на основании полного набора признаков. Стоит отметить, что разные дополнительные признаки были подобраны для разных датчиков. Это означает, что при создании дополнительных признаков для каждого отдельного датчика можно добиться некоторого улучшения точности модели.

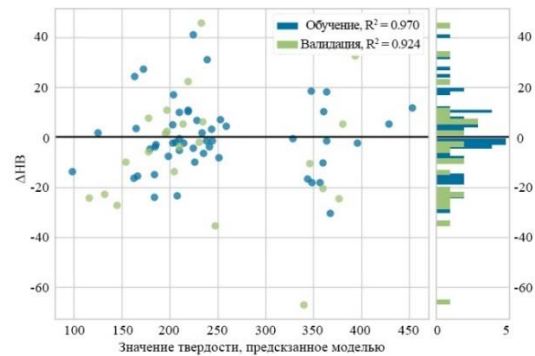


Рисунок 1 – Разница между измеренным и предсказанным значением твердости  $\Delta H_B$  для модели, использующей линейную регрессию

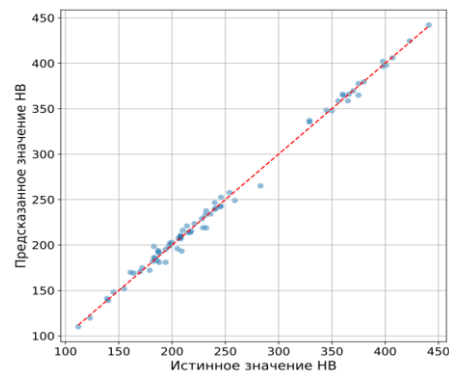


Рисунок 2 – График зависимости предсказанного значения  $H_B$  от истинного для модели с полиномиальными признаками

При обучении моделей с полиномиальными признаками с помощью библиотеки PyCaret оптимальное количество признаков для обучения повысилось до 13 ( $P_{max}$ ,  $h_{max}$ ,  $h_p$ ,  $h_e$ ,  $d_c$ ,  $W_y$ ,  $H_d$ ,  $v_{min}$ ,  $t_a$ ,  $\delta$ ,  $e$ ,  $H_d^{1/2} \cdot h_{max}$ ,  $v_{min} \cdot \log(e)$ ), из которых далее формировались полиномиальные 2 степени. На рисунке 2 представлен график зависимости предсказанного значения от истинного. Как можно заметить, для модели с полиномиальными признаками не свойственны наличие выбросов, нелинейность в предсказании, сильное смещение.

Для анализа и сравнения линейной и полиномиальной моделей был использован двухсторонний критерий Колмогорова-Смирнова. Рассчитанное значение величины  $D$  составило 0,42, а значение  $P$  составило менее 0,0001. Как результат, можно заключить, что выборки, полученные при помощи данных моделей, являются статистически различными, причем стандартное отклоне-

ние выборки, полученной при помощи модели с полиномиальными признаками меньше, чем в случае линейной модели – 4,48 против 10,48 соответственно. Аналогичный результат наблюдается и для выборки, полученной при помощи прибора, стандартное отклонение которой равно 12,51.

Таким образом, было показано, что использование инструментов машинного обучения с использованием библиотек языка Python для прогнозирования значений статической твердости по Бринеллю по данным динамического индентирования позволяет устранить грубые ошибки измерения и снизить погрешность косвенного определения твердости в 2 раза и более. При этом в большинстве случаев эта погрешность не превышает 10 НВ, что является труднодостижимым результатом при использовании обычных эмпирических зависимостей между динамической и статической твердостью.

УДК 004.056.53

### КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ АКУСТИЧЕСКИХ СЕЙФОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ СМАРТФОНОВ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОЙ АКТИВАЦИИ

Кудина А. В.<sup>1</sup>, Франко Е. П.<sup>1</sup>, Денскевич А. Д.<sup>1</sup>, Есьман Г. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Представлены результаты расчетов комплексных показателей качества акустических сейфов. Показана диаграмма распределения этих показателей, позволяющая выбрать наиболее оптимальную модель акустического сейфа для смартфона.

**Ключевые слова:** защита информации, акустические сейфы, технические параметры, комплексные показатели качества.

### COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF ACOUSTIC SAFES TO PROTECT SMARTPHONES FROM UNAUTHORIZED ACTIVATION

Kudina A.<sup>1</sup>, Franko E.<sup>1</sup>, Dzenskevich A.<sup>1</sup>, Esman G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

**Abstract.** The results of calculations of complex quality indicators of acoustic safes are presented. A diagram of the distribution of these indicators is shown, which allows you to choose the most optimal model of an acoustic safe for a smartphone.

**Key words:** information protection, acoustic safes, technical parameters, comprehensive quality indicators.

Адрес для переписки: Денскевич А. Д., ул. Барыкина, 95, г. Червень 223232, Республика Беларусь  
e-mail: denskevichad@gmail.com

**Введение.** Акустические сейфы являются сложными техническими средствами, предназначенными для защиты информации по акустическим каналам и создания защищенной зоны. Применяя направленные акустические волны, они подавляют звуковые колебания и предотвращают несанкционированное прослушивание смартфонов. Основой их работы служат передовые алгоритмы и технологии звуковой обработки, позволяющие фильтровать нежелательные аудиосигналы.

В настоящее время на рынке представлено множество моделей таких сейфов, что затрудняет выбор

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке БРФФИ. Проект T23УЗБ-035.

#### Литература

1. Rudnitsky, V. A., Determining yield strength of metals by microindentation with a spherical tip / V. A. Rudnitsky, A. P. Kren, G. A. Lantsman // Russian Federation Journal of Nondestructive Testing. – 2019. – V. 55, – P. 162–168.
2. Ben Chaabene, W. Machine learning prediction of mechanical properties of concrete: Critical review / W. Ben Chaabene Construction and Building Materials. – 2020. – T. 260. Elsevier BV. – P. 119889.
3. Крень, А. П. Контроль физико-механических характеристик чугуна прибором ИФМХ-Ч / А. П. Крень, В. А. Рудницкий, Г. А. Ланцман. // Литье и металлургия. – 2019. – №3. – С. 65–69.