МАШИНОСТРОЕНИЕ
MACHINE BUILDING

CC BY

Check for updates

УДК 620.179
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-29-38

Оригинальное эмпирическое исследование

Определение оптимального объема элементов строительных и машиностроительных конструкций при неразрушающем контроле их прочности

EDN: YIVEUL

Н.Л. Вернези
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ vernezin@mail.ru

Аннотация

Введение. Перед ремонтом или реконструкцией стальных сооружений необходимо получить информацию о прочностных возможностях металла. Расчетные сроки службы металлоконструкций составляют десятки лет, при этом известно, что механические характеристики исходного металла за это время претерпевают изменения. Кроме того, многие объекты работают с превышением этих сроков. Как отмечают некоторые исследователи, проблема получения таких характеристик связана с тем, что, во-первых, в большинстве случаев вырезание образцов из действующих конструкций невозможно, во-вторых, применение неразрушающих методов контроля должно обеспечить достаточную точность оценки, в-третьих, неразрушающий контроль из-за конструктивных особенностей объекта физически возможен не в любой точке, в-четвертых, обследовательские работы эксплуатируемой конструкции весьма трудоёмки, дороги и требуют снижения как объёмов, так и стоимости, в-пятых, при оценке механических характеристик исследуемого металла необходимо применение подхода, позволяющего обеспечить точность результатов с минимизацией объёмов работ за счет использования ранее полученной информации о характеристиках металла подобной конструкции. Вследствие изложенного возникает задача разработки методики, объединяющей методы неразрушающего контроля и учета априорной информации.

При неразрушающем контроле конструкций на практике применяются методы качественной оценки состояния металла или сварных соединений, такие как ультразвуковой, магнитный, радиационный и др. Также имеют место количественные методы оценки механических характеристик, например, с помощью переносных твердомеров. Однако приборное обеспечение большинства методов оценки прочностных характеристик (предела текучести, временного сопротивления разрыву) громоздко или ограничено лишь лабораторными рамками.

Методы уточнения экспериментальной информации на основе использования априорных данных специалистами условно разделены на три группы:

– по приоритету весов априорной и опытной информации;
– экстраполирование прошлых данных на будущие периоды;
– основанных на байесовских процедурах.

В статье описан метод неразрушающего контроля прочности на основе индентирования, разработанный при участии автора и многократно апробированный в реальных обследованиях. Цель данной статьи заключается в обосновании предложенной автором методики минимизации объема необходимой выборки при обследовательских работах, основанной на объединении методов неразрушающего контроля и байесовского учета доопытной информации.

Материалы и методы. План исследования включал в себя анализ доопытной информации о механических характеристиках металлов и разработку алгоритма минимизации объема выборки объектов контроля. Перед измерением металл конструкций зачищался ручной шлифовальной машиной. Использовался метод неразрушающего контроля оценки механических характеристик по параметрам ударного внедрения индентора в исследуемую поверхность. Для минимизации объема работ применялся байесовский подход к сокращению дисперсии апостериорных значений за счет использования доопытной информации о механических характеристиках подобных сталей. Исследовался материал Ст3 класса прочности КП 245 с пределом текучести 245 МПа и временным сопротивлением разрыву 412 МПА, по характеристикам которого на ранее исследованной аналогичной металлоконструкции имелась доопытная информация.

© Вернези Н.Л., 2024

Результаты исследования. Реализован метод неразрушающего контроля прочности металла трубной конструкции. При этом использована априорная информация, полученная при предыдущих обследовательских работах аналогичного материала. На основе байесовского подхода объединена опытная и доопытная информация, в частности, о значениях временного сопротивления разрыву. Предложена методика оценки минимально необходимого объема выборки обследуемых элементов конструкции при условии минимального риска от ошибки оценивания. В результате расчетов установлено, что применение такой методики возможно при объёме выборки в количестве двух-трех элементов.

Обсуждение и заключение. Предложенная методика явилась следствием анализа результатов более 20 проведённых обследовательских работ по оценке прочностных возможностей действующих металлических конструкций. На основе примененного метода неразрушающего контроля одномоментно определялись предел текучести, временное сопротивление разрыву, относительное удлинение и твердость. В статье приведены данные для значений временного сопротивления разрыву. Следует отметить, что даже при условии длительности одного измерения в 20–30 сек. в некоторых случаях на обследование крупных сооружений (например, мостов) требовалось значительное время, иногда измеряемое неделями. Выполненный расчет по предложенной методике, объединившей опытную и доопытную информацию об одной из прочностных характеристик стали, временном сопротивлении разрыву, показал высокую эффективность применения такого подхода и возможность дальнейшего его применения при обследовательских работах.

Ключевые слова: механические характеристики, временное сопротивление разрыву, неразрушающий контроль, байесовское оценивание, оптимальный объем выборки при испытаниях

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и благодарность А.Н. Бескопыльному и А.А. Веремеенко, принимавшим вместе с автором участие в обследовании металлоконструкций.

Для цитирования. Вернези Н.Л. Определение оптимального объема элементов строительных и машиностроительных конструкций при неразрушающем контроле их прочности. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(4):29–38. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-29-38

Original Empirical Research

Determination of the Optimal Volume of Elements of Building and Engineering Structures by Non-Destructive Testing of Their Strength

Nikos L. Vernezi
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ vernezin@mail.ru

Abstract

Introduction. Before repairing or reconstructing steel structures, it is necessary to obtain information about the strength capacities of the metal. The estimated service life of metal structures is tens of years, but it is known that the mechanical properties of the original metal change over time. Additionally, many facilities operate beyond these anticipated lifespans. As some researchers have noted, the challenge of obtaining such information is due to several factors. Firstly, in most cases, it is impossible to cut samples from existing structures. Secondly, the use of non-destructive testing methods needs to ensure sufficient accuracy in assessment. Thirdly, non-destructive testing may not be physically possible due to the design features of the object. Fourthly, survey work on the operating structure can be very laborious and expensive, requiring a reduction in volume and cost. Fifthly, when assessing the mechanical characteristics of the metal, it is important to apply an approach that guarantees the accuracy of results while minimizing work by utilizing previously obtained information on similar metals. Given these challenges, the development of a methodology that combines non-destructive testing with prior information is crucial.

In non-destructive testing of structures, methods for qualitative assessment of the condition of metal or welded joints are used, such as ultrasonic, magnetic, and radiation techniques. There are also quantitative methods for evaluating mechanical characteristics, such as using portable hardness testers. However, most methods for assessing strength characteristics, such as yield strength and temporary tear resistance, are cumbersome and limited to laboratory settings.

The methods of clarifying experimental information using a priori data by experts are conventionally divided into three categories:

– according to the priority of the weight of a priori and experimental data;
– extrapolation of past data to future periods;
– based on Bayesian procedures.

This article describes a non-destructive strength testing method based on indentation developed with the author's participation and repeatedly tested in actual surveys. The aim of this article is to justify the author's methodology to minimize the amount of required samples during survey work by combining non-destructive testing methods and Bayesian accounting for experimental information.

Materials and Methods. The research plan involved analyzing experimental data on the mechanical properties of metals and developing an algorithm to minimize the number of samples of control objects. Before measuring, the metal of the structures was cleaned with a hand grinder. The method of non-destructive testing of the evaluation of mechanical characteristics according to the parameters of the impact insertion of the indenter into the surface under study was used. To minimize the amount of work, a Bayesian approach was used to reduce the variability of posterior values by utilizing additional experimental data on the mechanical characteristics of such steels. The material St3 of strength class KP 245 with yield strength of 245 MPa and tensile strength of 412 MPA was studied. Additional experimental data on this material's properties were available from a previously studied metal structure.

Results. The method of non-destructive testing of the strength of metal in pipe structures has been implemented. This method used prior information obtained from previous surveys of similar materials. Based on a Bayesian approach, experimental and previous information was combined, in particular, the values of time resistance to rupture. A method for estimating the minimum required sample size of the examined structural elements was proposed provided there was minimal risk from an estimation error. As a result of calculations, it was shown that the use of such a technique was possible with a sample size of 2–3 elements.

Discussion and Conclusion. The proposed methodology was developed based on an analysis of more than 20 surveys conducted to assess the strength of the existing metal structures. Using the non-destructive testing method, we were able to simultaneously determine the yield strength, tensile strength, elongation, and hardness. The article presents data on the values of tensile strength. It should be noted that although the duration of each measurement was 20–30 seconds, in some cases it took longer to inspect large structures, such as bridges, which could take weeks. The calculation performed using the proposed method, which combined experimental and pre-experimental information about one of the strength characteristics of steel, temporary tear resistance, showed the high efficiency and potential for further application in future surveys.

Keywords: mechanical characteristics, tensile strength, non-destructive testing, Bayesian estimation, optimal sample size during testing

Acknowledgements. The author would like to express his deepest appreciation and gratitude to A.N. Beskopylny and A.A. Veremeenko for their participation in the inspection of metal structures with the author.

For citation. Vernezi NL. Determination of the Optimal Volume of Elements of Building and Engineering Structures by Non-Destructive Testing of Their Strength. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(4):29–38. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-29-38

Введение. Проблема, рассматриваемая в данной статье, связана с тем, что в практике обследовательских работ, предшествующих ремонту или реконструкции стальных сооружений, есть ряд особенностей. К ним относят невозможность вырезания из действующих конструкций образцов для стандартных испытаний, необходимость обеспечения достаточной точности получаемых результатов при проведении неразрушающего контроля, невозможность проведения неразрушающего контроля во всех исследуемых местах конструкции из-за конструктивных особенностей объекта, высокая стоимость и большая трудоемкость обследования крупных сооружений (например, стальных мостов). По этой причине возникает необходимость в разработке такого подхода к исследованию конструкций, который позволил бы обеспечить необходимую точность результатов с минимизацией объёмов работ за счет использования ранее полученной информации о характеристиках металла подобной конструкции.

При разработке такого подхода следует ответить на три важных вопроса:

– как изменяются свойства металла в процессе эксплуатации конструкции;

– каким способом следует получать информацию;

– как ее дополнить известной доопытной информацией и минимизировать объём обследовательских работ.

Ответы на эти вопросы чрезвычайно важны, поскольку известно, что под воздействием различных факторов (температурного или силового в виде циклических нагружений) у металла возможны изменения прочностных характеристик.

Первый вопрос (как изменяются свойства металла в процессе эксплуатации конструкции) в литературе имеет различное толкование. В.И. Брюшко в работе [1] указывает на увеличение прочностных характеристик и уменьшение пластичности сталей 20, 15Х5М, 19Г. В работе [2] приведены сведения об увеличении прочностных характеристик в течение первых 20 лет эксплуатации трубы из стали 17Г, в последующие 10 лет неуклонном снижении прочности и пластичности. В работе И.В. Горынина и Б.Т. Тимофеева [3] отмечается стабильность механических характеристик металла у конструкций атомной энергетики и трубной стали 17Г1С за 25–40 лет эксплуатации. Автор работы [4] В.В. Киселев обращает внимание на то, что характер изменения прочностных и пластических характеристик сталей главным образом зависит от температурного влияния и параметров нагружения, в первую очередь, циклического. Вследствие этого ориентироваться на значения характеристик исходного материала, указанных в технической документации, не совсем правильно. Более того, такая документация за длительное время эксплуатации может быть попросту утрачена. Поэтому для получения объективной оценки изменений характеристик материала необходимо проводить периодический или постоянный мониторинг состояния конструкций. На сегодняшний день такая практика является крайне редкой.

Решение проблемы получения информации о действующей конструкции, особенно если иметь в виду мониторинг, связано исключительно с неразрушающим контролем. В настоящее время при неразрушающем контроле конструкций применяются методы качественной оценки состояния металла, основанные на использовании ультразвука, акустической эмиссии, радиационной дефектоскопии для металла [5, 6], сварных соединений [7, 8] или в труднодоступных местах [9]. Эти методы дают возможность определять наличие дефектов в металле, но не позволяют количественно охарактеризовать способность материала сопротивляться внешнему воздействию.

Существуют методики и переносные приборы для оценки твердости. Отметим методы для определения механических характеристик построением диаграмм растяжения на основе результатов вдавливания индентора, например, индентированием [10]. В статье [11] рассматривается вопрос оценки механических характеристик пластичных материалов методом индентирования шариком на основе применения конечно-элементной модели. В работе [12] проблема вдавливания пластичных материалов шариковыми инденторами рассматривается с помощью численного моделирования. Исследуется чувствительность численных результатов к упругости индентора. Однако приборное обеспечение в методах количественной оценки механических характеристик, как правило, громоздко или применяется только в лабораторных условиях, а при обследовательских работах не имеет широкого распространения.

Часто подконтрольные места конструкции, о которых необходимо получить информацию, труднодоступны, в связи с чем чрезвычайно важно иметь инструмент, позволяющий минимизировать объем выборки при обследовательских работах. В настоящее время круг методов, позволяющих производить совместную обработку априорных и опытных данных, достаточно ограничен. Собственно, это три основные группы: методы приоритета весов априорной и опытной информации в апостериорных оценках, методы экстраполяции прошлых данных на будущие и методы на основе байесовских процедур.

Авторы статьи В.Н. Арсеньев и П.В. Лабецкий [13] отмечают, что проблема выбора критерия для определения коэффициента значимости априорной информации до сих пор не решена.

Байесовские процедуры позволяют сократить апостериорную дисперсию исследуемой случайной величины за счет объединения опытной и доопытной информации. Доопытная информация может выражаться, например, в знании о виде распределения случайной величины или одного из ее параметров.

Методики, основанные на применении байесовских процедур, сегодня имеют весьма широкое применение. Они используются при описании возможности системного подхода к принятию решений на большом числе примеров, разработанных авторами работы [14]. Авторы статьи [15] применяют байесовский анализ для оценки меры экономической неопределенности при прогнозировании поведения инвесторов. В работе [16] отмечается, что применение байесовских параметрических моделей для оценки выживаемости в медицине не уступает традиционным подходам, но требует меньшей настройки параметров и повышает возможности статистических выводов и прогнозов. В [17] предлагается методология разработки классификатора распространенных стоматологических заболеваний на основе байесовских статистических процедур.

В целом стоит отметить, что методы неразрушающего контроля, как и методы учета априорной информации, освещены и подробно описаны многими авторами. Однако очевидно, что разработка методического подхода к решению вопроса минимизации объема выборки обследуемых элементов проработана не в полной мере, особенно это касается метода, основанного на синтезе неразрушающего контроля механических характеристик путем индентирования и байесовского учета априорной информации.

Таким образом, чрезвычайно необходимым является развитие систем мониторинга состояния металлоконструкций на основе неразрушающего контроля механических характеристик методом индентирования. При этом для снижения материальных и временных затрат следует осуществлять такой мониторинг, используя возможности учета доопытной информации о других подобных объектах.

Цель данной статьи заключается в обосновании предложенной автором методики, заключающейся в синтезе применения оригинального метода неразрушающего контроля и байесовского подхода к расчету минимально необходимого объема обследуемых элементов, осуществленном на конкретном примере.

Материалы и методы. По заказу строительной организации обследовались металлические трубные шпунтовые конструкции при строительстве здания по ул. Горсоветской, 51, в г. Ростове-на-Дону. Большая часть трубных конструкций была уже погружена в грунт, и нужно было провести обследование еще не погруженного небольшого числа труб для оценки их механических характеристик. При этом важно было иметь минимально необходимое их количество из условия минимизации погрешности результата такой оценки.

Для этого была использована доопытная информация о прочности 11 трубных элементов из низкоуглеродистой стали, полученная с помощью неразрушающего контроля при строительстве здания по ул. Суворова, 23, в г. Ростове-на-Дону, а также байесовской оценки оптимального числа элементов, необходимых при данном опытном обследовании трубных элементов аналогичного класса прочности.

В статье изложен оригинальный метод неразрушающего контроля, разработанный при участии автора, позволяющий одномоментно получать значения временного сопротивления разрыву, предела текучести, твердости и относительного удлинения на локальном участке любой эксплуатируемой металлической конструкции. Метод особенно эффективен при обследовании металла одного класса прочности однотипных элементов конструкций машин (секций башенного крана), например, при необходимости проведения экспертизы состояния грузоподъемного крана[1], отслужившего срок службы, или при обнаружении деформаций, вызывающих сомнения. При этом нередко обследование элементов металлоконструкции даже неразрушающими методами весьма затруднительно из-за того, что технически сложно подобраться к таким элементам. Вследствие этого возникает вопрос обоснованной минимизации объема выборки увеличением ее информативности априорным знанием.

Примененный метод неразрушающего контроля основан на ударном внедрении конического индентора в испытуемый металл [18] и реализован в системе «Прочность». Она включает в себя пружинный ударный механизм с индукционным датчиком регистрации скорости перемещения индентора, аналого-цифровой преобразователь и ноутбук. Получаемый при ударном внедрении график скорости дифференцируется и интегрируется для построения соответственно графиков ускорения и перемещения. Экстремальные значения трех графиков представляют собой образ металла. Ранее проведенные эксперименты с различными марками стали позволили получить и завести в компьютер корреляционные зависимости между стандартными пределами текучести и временным сопротивлением разрыву, твердости, относительным удлинением, с одной стороны, и максимальными и минимальными значениями скорости и ускорения, глубиной внедрения индентора, с другой. Измерение многократно апробированной системой «Прочность» возможно на участке элемента диаметром более 3 см. Суммарная погрешность приборного обеспечения ± 4 %.

С помощью системы «Прочность» по заказам производственных предприятий обследовались десятки конструкций, таких как стрелы, ходовые колеса, рамы строительных и дорожных машин, различные строительные металлоконструкции трибун стадионов, ферм покрытия, опор линий электропередачи, мостов, труб и др. [19]. В объемных конструкциях с большим числом однотипных элементов предполагается в соответствии, например, с СП 13–102–2003[2] обследовать не менее 10 % таких элементов от их общего числа. И это для строительной конструкции может составлять несколько десятков элементов, что определяет весьма значительные объем, трудоемкость, стоимость производимых работ.

При обследовании, например, стрелы грузоподъемного крана, в конструкции которой может быть до 100 и более однотипных деталей, также актуальным представляется вопрос объема принимаемой выборки.

Однако, когда в труднодоступных местах бывает сложно произвести даже один-два измерения, оказывается актуальным вопрос минимизации числа обследуемых элементов.

Для решения этого вопроса применен метод байесовского учета априорной информации.

Пусть необходимо получить информацию о механических характеристиках металла конструкции, которая эксплуатируется длительное время (с целью диагностики, мониторинга или последующей реконструкции

[1] РД 10–112–2–09. *Краны стреловые общего назначения и краны-манипуляторы грузоподъемные,* ч. 2. URL: https://meganorm.ru/Data2/1/4293828/4293828984.pdf (дата обращения: 15.05.2024).

[2] СП 13–102–2003. *Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.* URL: https://docs.cntd.ru/document/1200034118 (дата обращения: 15.05.2024).

в условиях ограниченного доступа к контролируемым однотипным элементам), когда обследование проводится методом неразрушающего контроля. Для обоснования необходимого объема выборки n обследуемых однотипных элементов используется доопытная информация. При этом будут иметь место среднее значение $\sigma_{вт\ ср}$ измеряемой величины характеристики, дисперсия S^2 ее опытных значений и априорная информация об этой характеристике металла подобного класса прочности.

В доопытном (априорном) знании о распределении $\sigma_в$ есть параметр μ, выражающий математическое ожидание значения временного сопротивления разрыву $\sigma_в$. Из предыдущего опыта известна плотность $H(\mu)$ распределения этого параметра. Пусть $(\sigma_{вт} \mid \mu)$ представляет собой плотность распределения значений $\sigma_{вт}$, полученных в результате настоящего измерения, при условии, что математическое ожидание $\sigma_{вт}$ действительно есть μ. Тогда апостериорная плотность $K(\mu \mid \sigma_{вт})$ распределения параметра μ измеряемой случайной величины характеристики $\sigma_в$, в соответствии с теоремой Байеса выразится следующим образом:

$$K(\mu \mid \sigma_{вт}) \sim H(\mu) g(\sigma_{вт} \mid \mu), \tag{1}$$

где $K(\mu \mid \sigma_{вт})$ — плотность апостериорного распределения параметра μ, синтезирующая опытную и априорную информацию, при условии реализации опытных значений $\sigma_{вт}$. В выражении для этой плотности под параметром μ будем понимать математическое ожидание значения временного сопротивления разрыву $\sigma_в$ после реализации измеренных текущих значений $\sigma_{вт}$.

Главное условие практического применения формулы (1) состоит в сопряжённости плотностей распределения $H(\mu)$ и $g(\sigma_{вт} \mid \mu)$ (т. е. в возможности получения удобного результата).

Наилучшим образом сопрягаются плотности двух нормально распределенных случайных величин. Однако многочисленными исследованиями установлено, что распределение механических характеристик наиболее достоверно описывается законом Вейбулла, поскольку он располагает параметром сдвига распределения или минимальным значением характеристики уже не в выборке, а в генеральной совокупности. Это неудобство можно устранить, если принять в качестве $\sigma_{вт}$ не мгновенное, а его среднее значение $\sigma_{вт_ср}$, тогда в соответствии с центральной предельной теоремой $H(\mu)$ и $g(\sigma_{вт_ср} \mid \mu)$ можно принять нормально распределенными, а апостериорная плотность распределения параметра μ выразится как:

$$P(\mu \mid \sigma_{вт_ср}, S) \sim P(\mu) \cdot g(\sigma_{вт_ср} \mid \mu, S), \tag{2}$$

где $\sigma_{вт_ср}$ — не текущие, а средние значения измеряемой опытной величины $\sigma_{вт}$, а μ; S — соответственно их математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение.

При этом $P(\mu \mid \sigma_{вт_ср}, S)$ будет также иметь нормальный вид, а апостериорная оценка дисперсии $D[\mu]$ примет вид [20]:

$$D[\mu] = \frac{\dfrac{S_a^2 S_t^2}{n}}{S_a^2 + \dfrac{S_t^2}{n}}, \tag{3}$$

где S^2_t и S^2_a — соответственно среднеквадратичные отклонения среднего значения случайной измеряемой величины от μ и μ от μ_a; μ_a — математическое ожидание μ; n — необходимое число опытных данных или достаточное число опытных измерений из условия минимального риска от ошибки оценивания. Отсюда

$$n = \frac{S_t^2 \left(S_a^2 - D[\mu]\right)}{S_a^2 \cdot D[\mu]}. \tag{4}$$

Заметим, что в формуле (4) априорную информацию содержат S^2_t *и* S^2_a, апостериорная информация выражена в апостериорной дисперсии $D[\mu]$ и количестве необходимых опытных измерений n.

В работе исследовался материал трубной стали, предназначенной для устройства шпунтового ограждения строительного котлована.

Результаты исследования. Предложенная выше процедура была применена на основе использования аналогичной информации о механических характеристиках шпунтовых труб, полученная при обследовании подобных стальных свай-труб ограждающего ряда. При первичном обследовании выяснилось, что временное сопротивление разрыву ориентировочно материала труб шпунтового ограждения на Горсоветской, 51, составило 418 МПа.

Среднее значение временного сопротивления разрыву металла партии труб, обследованных ранее (на Суворова, 23) составляла 405 МПа, что свидетельствовало о принадлежности обеих партий труб приблизительно к одному классу прочности. Эта информация была использована в качестве априорной. В таблице 1 приводятся ранжированные по возрастанию значения временного сопротивления разрыву металла ранее обследованных 11 труб.

https://bps-journal.ru

Таблица 1

Значения временного сопротивления разрыву, полученные измерением на 11 трубах, МПа

393	399	402	408	417
394	399	402	408	418
394	399	402	409	418
394	399	402	411	418
395	400	403	411	419
396	400	403	411	420
396	400	404	412	420
396	400	405	412	421
396	400	405	412	425
396	400	405	412	426
396	400	405	412	426
396	400	405	412	427
397	400	406	413	427
397	401	406	413	430
397	401	406	414	430
397	401	407	414	435
398	401	407	415	436
398	401	407	416	436
398	402	407	416	
398	402	407	416	

На рис. 1 представлена частота $n_{зн}$ значений временного сопротивления разрыву со среднеквадратичным отклонением $S\sigma_в$ = 11,3 МПа и дисперсией $S^2\sigma_в$ = 110 МПа^2.

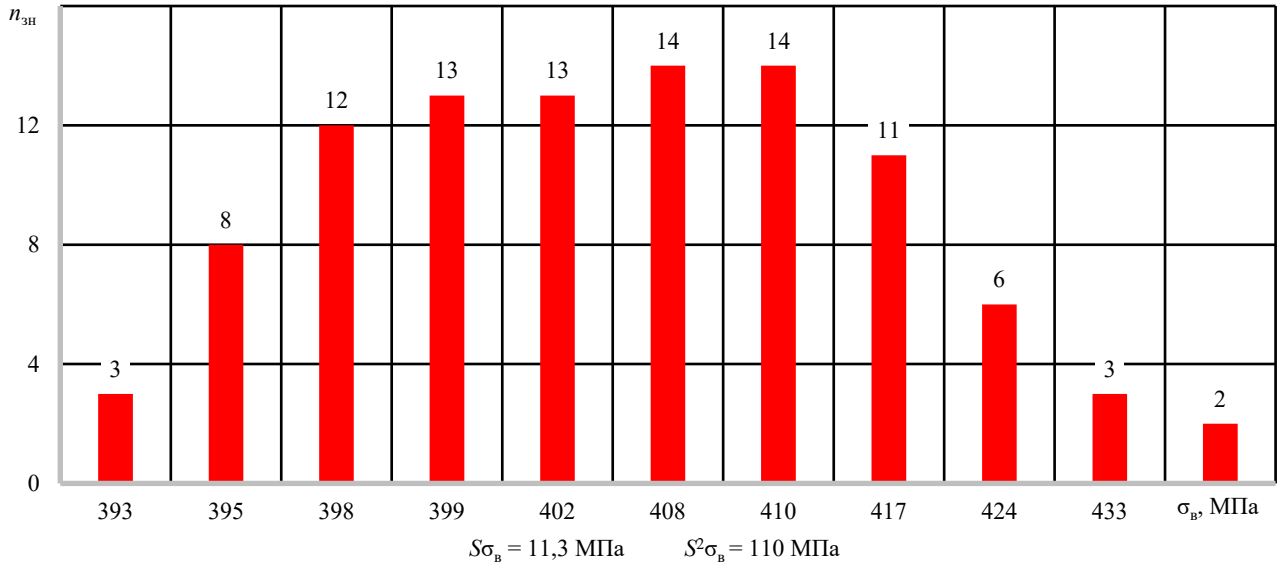


Рис. 1. Распределение значений временного сопротивления разрыву металла свай-труб шпунтового ограждения по ул. Суворова, 23 в Ростове-на-Дону

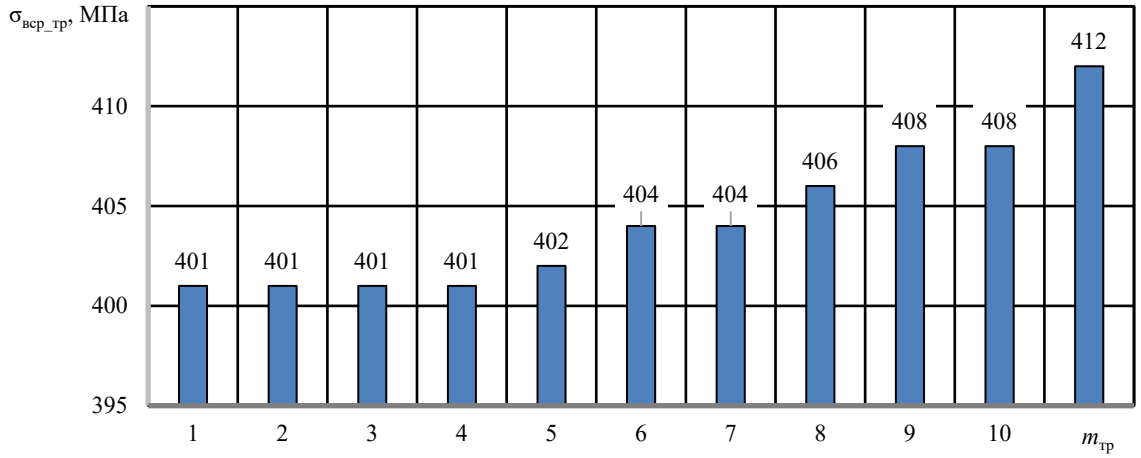
Средние значения временного сопротивления разрыву $\sigma_{вср_тр}$ по каждой из $m_{тр}$ труб представлены на рис. 2, а на рис. 3 — их распределение со средним значением $\sigma_{вср}$ = 405 МПа, среднеквадратичным отклонением $S\sigma_в$ = 3,6 МПа и дисперсией $S^2\sigma_в$ = 14 МПа^2.

Для расчета достаточного объёма выборки по формуле (4) апостериорная дисперсия $D[\mu]$ определена следующим образом. Для стали Ст3 классов прочности С255–С275, из которой изготовлена труба, предусмотрен диапазон возможных значений временного сопротивления разрыву[3] от 380 до 400 Мпа, т. е. исходя из правила трёх сигм нормально распределенной случайной величины допускаемый размах в 20 МПа приблизительно соответствует шести среднеквадратичным отклонениям.

[3] ГОСТ 27772–88. *Прокат строительных стальных конструкций*. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200003192 (дата обращения: 15.05.2024).

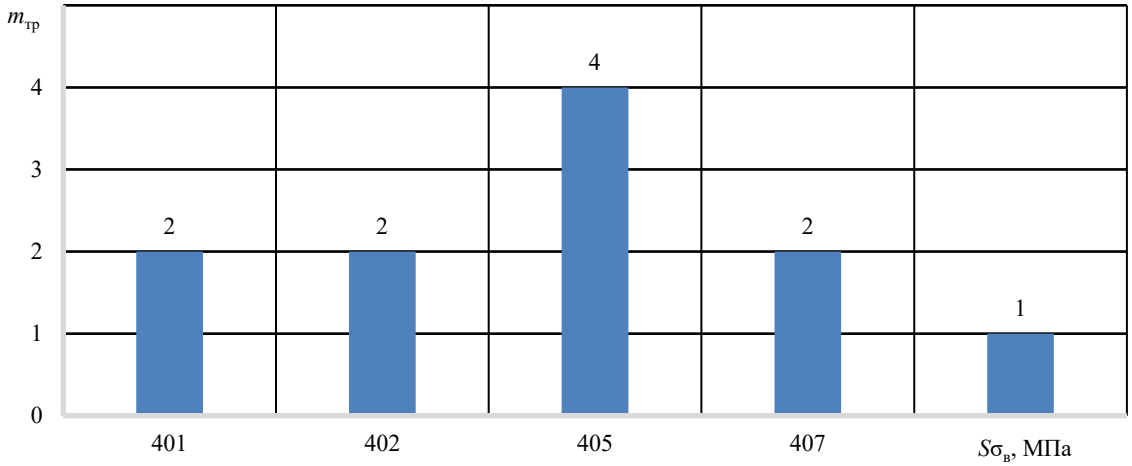
Тогда апостериорное среднеквадратичное отклонение выразится как (20/6) = 3,33 (МПа).

Поскольку рассуждения касаются средних значений временного сопротивления разрыву, можно воспользоваться соотношением априорных среднеквадратичных отклонений текущих (110 МПа) и средних (14 МПа) значений временного сопротивления разрыву в предположении, что их соотношение в апостериорной оценке останется приблизительно тем же.



$\sigma_{вср} = 405$ МПа $S\sigma_в = 11{,}3$ МПа $S^2\sigma_в = 110$ МПа^2

Рис. 2. Средние значения временного сопротивления разрыву металла 11 свай-труб шпунтового ограждения по ул. Суворова, 23 в Ростове-на-Дону



$S\sigma_{вср} = 3{,}6$ МПа $S^2\sigma_{вср} = 14$ МПа

$\sigma_{вср} = 405$ МПа, среднеквадратичным отклонением $S\sigma_в = 3{,}6$ МПа и дисперсией $S^2\sigma_в = 14$ МПа^2

Таким образом, апостериорную дисперсию среднего значения временного сопротивления разрыву можно определить:

$$D[\mu] = \frac{11 \cdot 14}{110} = \frac{11}{7{,}86} = 1{,}4 \text{ МПа}^2.$$

Априорная дисперсия среднего значения временного сопротивления разрыву:

$$S^2_t = S^2\sigma_{вср} = 14 \text{ МПа}.$$

Априорная дисперсия параметра μ распределения среднего значения временного сопротивления разрыву S^2_a принимается также в предположении, что отношение S^2_t к S^2_a останется таким же (7,86). Таким образом, в результате исследования определилось минимально необходимое количество обследуемых элементов — две–три трубы-сваи.

$$S^2_a = \frac{14}{7{,}86} = 1{,}78 \text{ МПа},$$

$$n = \frac{S^2_t\left(S^2_a - D[\mu]\right)}{S^2_a \cdot D[\mu]} = \frac{14(1{,}78 - 1{,}4)}{1{,}78 \cdot 1{,}4} = 2{,}13.$$

https://bps-journal.ru

Обсуждение и заключение. При решении задачи минимизации выборки опытной партии труб-свай был применен оригинальный метод неразрушающего контроля на основе индентирования. При этом в качестве априорной информаций были использованы механические характеристики, ранее полученные при обследовании 11 труб-свай аналогичной шпунтовой конструкции. В опытной партии количество возможных к обследованию труб-свай было ограничено, и использование байесовских процедур позволило существенно снизить их необходимое число до трех. При этом риск от неточности оценивания был минимизирован.

Рассмотренные в статье стали для изготовления труб относятся к классу прочности КП 245, в соответствии с ГОСТ 54157–10[4] имеют значение предела текучести 245 МПа и временного сопротивления разрыву 412 МПА. Преимущественно они изготавливаются из стали 3сп и 3пс. Эти же стали широко используются при изготовлении машиностроительных конструкций в грузоподъемных кранах, в рамах тракторов, прицепов, полуприцепов и др., для которых изложенный в статье подход также актуален и возможен. Таким образом, использование априорной информации на основе байесовских процедур при неразрушающем контроле механических характеристик низкоуглеродистых сталей, применяемых в конструкциях строительного и машиностроительного назначения, позволяет обосновать минимально необходимое число элементов объекта обследования, существенно сократить объемы, сроки, трудоёмкость и стоимость работ.

Список литературы / References

1. Брюшко В.И. *Оценка состояния металла магистральных и технологических трубопроводов.* Автореф. дис. канд. техн. наук. Тольятти; 2006. 19 с.

Bryushko VI. *Assessment of Metal Condition of Main and Technological Pipelines.* Author's abstract. Tolyatti; 2006. 19 p. (In Russ.)

2. Никифорчин Г.Н., Цирульник О.Т., Звирко О.И., Гредиль М.И., Волошин В.А. Оценка деградации физико-механических свойств сталей длительно эксплуатируемых магистральных газопроводов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2013;79(9):48–55.

Nikiforchin GN, Tsirul'nik OT, Zvirko OI, Gredil' MI, Voloshin VA. Degradation of the Physical and Mechanical Properties of Steels in Long-Run Gas Pipelines. *Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials.* 2013;79(9):48–55. (In Russ.)

3. Горынин И.В., Тимофеев Б.Т. Деградация свойств конструкционных материалов при длительном воздействии эксплуатационных температур. *Вопросы материаловедения.* 2011;1(65):41–59.

Gorynin IV, Timofeev BT. Degradation of Properties of Structural Materials at Long Time Influence of Operational Temperatures. *Voprosy Materialovedeniya.* 2011;1(65):41–59. (In Russ.)

4. Киселев В.В. Влияние высоких температур на прочностные свойства металлоконструкций. *NovaInfo*. 2018;(82):9–12. URL: https://novainfo.ru/article/14859 (дата обращения: 15.05.2024).

Kiselev VV. Influence of High Temperatures on the Strength Properties of Metal Structures. *NovaInfo*. 2018;(82): 9–12. (In Russ.) URL: https://novainfo.ru/article/14859 (accessed: 15.05.2024).

5. Pullin R, Holford KM, Lark RJ, Eaton MJ. Acoustic Emission Monitoring of Bridge Structures in the Field and Laboratory. *Journal of Acoustic Emission.* 2008;26:172–181. URL: https://www.ndt.net/article/ewgae2008/papers/136.pdf (accessed: 15.05.2024).

6. Anastasopoulos AA, Kourousis DA, Cole PT. Acoustic Emission Inspection of Spherical Metallic Pressure Vessels. In: *The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT.* Tehran, Iran: 2008. URL: http://www.ndt.net/article/tindt2008/papers/177.pdf (accessed: 15.05.2024).

7. Gongtian Shen, Zhanwen Wu. Study on Spectrum of Acoustic Emission Signals of Bridge Crane. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring.* 2010;52(3):144–148. URL: http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_07_08.pdf (accessed: 15.05.2024).

8. Aljets D, Chong A, Wilcox S, Holford K. Acoustic Emission Source Location in Plate-Like Structures using a Closely Arranged Triangular Sensor Array. In: *Proceedings of the 29th European Conference on Acoustic Emission Testing EWGAE.* Vienna, September; 2010. P. 85–98.

9. Rhys P, Baxter M, Eaton M, Holford K, Evans S. Novel Acoustic Emission Source Location. *Journal of Acoustic Emission.* 2007;(25):194–214.

10. Rong Chen, Xiao Yang Li, Lin Lin Zhang, Xiang Yu Wang. Numerical Simulation of Spherical Indentation Method to Identify Metal Material Properties. *Advanced Materials Research.* 2015;(1119):779–782. http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1119.779

11. Syngellakis S, Habbab H, Mellor BG. Finite Element Simulation of Spherical Indentation Experiments. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements.* 2018;6(4):749–763. http://doi.org/10.2495/CMEM-V6-N4-749-763

[4] ГОСТ 54157–10. Трубы стальные профильные для металлоконструкций. URL:https://docs.cntd.ru/document/1200084959 (дата обращения: 15.05.2024).

12. Matyunin VM, Marchenkov AYu, Karimbekov MA, Demidov AN, Volkov PV, Abusaif N, et al. Express Evaluation of Welded Joints Cool Resistance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;759:012016 http://doi.org/10.1088/1757-899X/759/1/012016

13. Арсеньев В.Н., Лабецкий П.В. Метод апостериорного оценивания характеристик системы управления летательного аппарата. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение.* 2014;57(10):23–28. URL: https://pribor.ifmo.ru/ru/article/10855/metod_aposteriornogo_ocenivaniya_harakteristik_sistemy_upravleniya_letatelnogo_apparata_.htm (дата обращения: 15.05.2024).

Arseniev VN, Labetsky PV. A Method of Posterior Estimation of Characteristics of Flying Vehicle Control System. *Journal of Instrument Engineering.* 2014;57(10):23–28. (In Russ.) URL: https://pribor.ifmo.ru/en/article/10855/metod_aposteriornogo_ocenivaniya_harakteristik_sistemy_upravleniya_letatelnogo_apparata_.htm (accessed: 15.05.2024).

14. Kjærulff UB, Madsen AL. Bayesian. *Networks and Influence Diagrams: A Guide to Construction and Analysis.* Latest edition. New York: Springer VS; 2013. 382 p.

15. Boubekeur Baba, Güven Sevil. Bayesian Analysis of Time-Varying Interactions between Stock Returns and Foreign Equity Flows. *Financial Innovation.* 2021;7:51.https://doi.org/10.1186/s40854-021-00267-9

16. Paolucci I, Yuan-Mao Lin, Silva JAM, Brock KK, Odisio BC. Bayesian Parametric Models for Survival Prediction in Medical Applications. *BMC Medical Research Methodology.* 2023;23:250. https://doi.org/10.1186/s12874-023-02059-4

17. Chattopadhyay S, Davis RM, Menezes DD, Singh G, Acharya RU, Tamura T. Application of Bayesian Classifier for the Diagnosis of Dental Pain. *Journal of Medical Systems.* 2012;36:1425–1439. https://doi.org/10.1007/s10916-010-9604-y

18. Belen'kii DM, Vernezi NL, Cherpakov AV. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. Welding International. 2004;18:213–215. https://doi.org/10.1533/wint.2004.3268

19. Вернези Н.Л. Коэффициент вариации предела текучести металла новых и долгое время эксплуатировавшихся строительных конструкций. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(3):44–54. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54

Vernezi NL. Variation Coefficient of Metal Yield Strength in New and Long-Used Building Structures. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(3):44–54. (In Russ.) https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-3-44-54

20. Вернези Н.Л. Метод оценки прочности металла неразрушающим способом с использованием априорной информации. *Инженерный вестник Дона.* 2013;3(26):133. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1898 (дата обращения: 15.05.2024).

Vernezi NL. Method of an Assessment of Durability of Metal in the Nondestructive Way with Use of Aprioristic Information. *Engineering journal of Don.* 2013;3(26):133. (In Russ.) URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1898 (accessed: 15.05.2024).

Об авторе:

Никос Леонидович Вернези, кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код, ORCID, vernezin@mail.ru

Конфликт интересов: **автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.**

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Nikos L. Vernezi, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), SPIN-code, ORCID, vernezin@mail.ru

Conflict of Interest Statement: **the author does not have any conflict of interest.**

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.09.2024
Поступила после рецензирования / Revised 04.10.2024
Принята к публикации / Accepted 15.10.2024