

Обеспечение безопасности строительных металлоконструкций

А.И. Черняев, аспирант¹

В.А. Трефилов, заведующий кафедрой, д-р техн. наук, профессор¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет

e-mail: aichernyaev@yandex.ru

Ключевые слова:

долговечность,
безопасность,
вероятность безотказной работы,
структурно-энергетическая теория отказов,
томография,
внутренние дефекты металла.

Представленная работа демонстрирует оценку надежности стальных элементов с использованием структурно-энергетической теории отказов, основанной на обнаружении и исследовании внутренних дефектов образца. Основными целями были апробирование данной методики на образцах из конструкционной стали и определение характера разрушения в зависимости от внутренних трещин, пор, непроваров и т.д. Для этого были поставлены следующие задачи: изучение структурно-энергетической теории отказов; подготовка образцов для исследования; проведение томографического анализа до физического воздействия и после разрушения; расчет времени безотказной работы образцов при заданной нагрузке. В результате были подготовлены плоские образцы из стали Ст3, толщиной 4 мм, со сварным швом. Каждый образец был разрушен при нагрузке до 9000 кгс, после чего с помощью томографии были определены развитие внутренних трещин, их место и характер, также было рассчитано время безотказной работы образцов при заданных условиях.

1. Введение

В настоящее время безопасность населения в городах сильно зависит от надежности и долговечности строящихся объектов, будь то жилые здания, производственные помещения, торговые центры, аквапарки или кинотеатры. Высокие темпы строительства довольно часто приводят к снижению качества исполнения и, как следствие, к увеличению рисков разрушения выполняемых построек. Например, в 2013 г. в Бразилии при строительстве обрушились два стадиона в Сан-Паулу и один в Рио-де-Жанейро, в 2009 г. произошла авария на Саяно-Шушенской ГЭС, в 2005 г. произошло падение крыши аквапарка «Трансвааль-парк». Кроме того, часто падают краны, происходит обрушение стропильных ферм складских помещений, козырьков подъездов и др.

В подавляющем большинстве современных конструкций металл используется в качестве каркасов, связующих элементов и т.д., а благодаря разнообразию механических и эксплуатационных характеристик он стал одним из наиболее распространенных

и используемых материалов. Многообразие сплавов позволяет использовать его во всех промышленных отраслях, таких как строительство зданий и сооружений, двигателестроение, создание коммуникаций, путепроводов и т. д. Существует множество рекомендаций, ГОСТов, СНиПов и стандартов, которые определяют выбор металлов при производстве конкретных изделий. Несмотря на это, на практике часто можно встретить сообщения о его разрушении, более того известны примеры, когда причиной аварии каменных, бетонных, деревянных и других конструкций были дефекты металлических элементов, входящих в общий конструктивный комплекс [1].

Вязкое разрушение металла сопровождается развитием и увеличением количества микропор и микротрещин, относительный объем которых в единице объема металла характеризуется его поврежденностью [2]. Наличие концентраторов напряжений в виде внутренних дефектов, расположенных в местах и на участках с высокими местными напряжениями и ориентированных поперек направления

действующих растягивающих напряжений, могут привести к преждевременному разрушению элемента, а без должного контроля с помощью нормативных документов [3–5] к разрушению всей конструкции.

В процессе изготовления металлические изделия проходят сложный технологический цикл. Он включает следующие основные операции: плавка, вакуумирование, внепечная обработка, литье, обработка давлением, термическая обработка, механическая обработка, соединение с другими деталями. На этапах изготовления расплавленная сталь вступает в контакт с кислородом, расплавленным флюсом, раскислителями и инертными газами, вследствие чего при кристаллизации в ней образуются поры, пустоты, усадочные раковины, крупные неметаллические включения, которые при обработке давлением и изготовлении проката вытягиваются и расплющиваются, тем самым создавая трещины, расслоения, волосовины, становясь сильными концентраторами напряжений.

На производстве многие дефекты при малых размерах допускаются в изделия и не требуют исправления, тем не менее, их количество и расположение могут оказать решающее воздействие на надежность и долговечность ответственных металлических элементов.

В сварных конструкциях при разрушении достаточно трудно восстановить ее целостность, а заменить поврежденный узел не всегда представляется возможным. Актуальность данной проблемы возрастает при увеличении габаритов конструкций, а как следствие — и толщины применяемого при их изготовлении металла. Чтобы решить эту проблему, необходимо более тщательно подходить к оценке состояния, используя при этом современные технологии, а также усовершенствовать существующие методы прогнозирования надежности стальных конструкций и элементов.

2. Структурно-энергетическая теория отказов

В настоящее время существует методика оценки вероятности отказа элемента, надежности и долговечности, основанная на структурно-энергетической теории отказов [6]. Представляемая методика качественно отличается от большинства используемых. Так, в отличие от статистической методики она более точная. Недостаток аналитической методики оценки надежности заключается в трудоемкости расчета, как и в случае воздействия на систему большого числа факторов, в модели «нагрузка — несущая способность» [7].

Структурно-энергетическая теория отказов позволяет легко оценить влияние структурных факторов (количества и размеров чувствительных структур материалов) на форму кривой функции распределения энергии разрушения (рис. 1), а, следо-

вательно, на надежность элементов и на этой основе разработать конкретные рекомендации по технологическому обеспечению заданного уровня надежности и качества элементов.

Зависимость вероятности отказа от величины энергетического воздействия будет простой экспонентой:

$$q(e) = 1 - \exp(-be),$$

где: b — вариация размеров чувствительных структур; e — величина энергетического воздействия.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ будет обратной величиной вероятности отказа и определяется следующим образом:

$$P(t) = 1 - q(e).$$

Используя следующее уравнение, можно определить время безотказной работы детали:

$$P(t) = \exp\left(-\alpha \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(-It)^i}{i!}\right),$$

где: I — величина энергетического воздействия; α — коэффициент перехода из одного состояния в другое; t — время работы элемента.

Коэффициент перехода α определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{t_{cp} - t_0}{I \cdot \sigma_t^2},$$

где: t_{cp} — среднее время работы элементов до отказа; t_0 — гарантированное время работы элемента; σ — дисперсия энергии возникновения отказа.

Представленная методика оценки была разработана и опробована на тонкостенных образцах толщиной

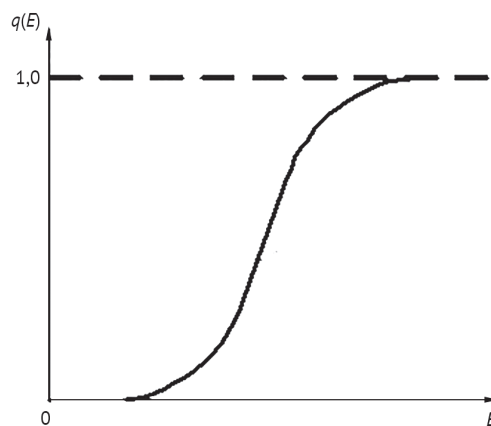


Рис. 1. Функция распределения энергии разрушения

0,1–0,5 мм. По нашему мнению, ее применение возможно и на более габаритных деталях и элементах, испытывающих значительно большие нагрузки. Исходя из этого, для оценки возможности ее использования в строительстве была сформулирована и поставлена задача по проведению экспериментов на образцах из конструкционных сталей, а именно по поиску внутренних дефектов и оценке их влияния на характер разрушения.

3. Проведение и результаты экспериментов

Для решения поставленной задачи были подготовлены образцы — сварные пластины из стали Ст3, толщиной 4 мм (рис. 2). В связи с тем, что наиболее слабой зоной полученного элемента является сварное соединение, максимально допустимая нагрузка до разрушения была рассчитана исходя из его предела прочности и составила от 6536 до 8434 кгс.

Для оценки и анализа внутренних дефектов на подготовленных образцах были проведены томографические исследования с использованием промышленного компьютерного томографа для рентгеноскопии на основе рентгеноскопической системы ХТН 450 LC. Результаты анализа позволили обнаружить поры и трещины в сварных швах и основном металле, пример полученных изображений представлен на рис. 3.

Далее был выполнен анализ полученных снимков внутренних дефектов и проведен расчет вероятности безотказной работы с помощью структурно-энергетической теории отказов, при действующей нагрузке 4000 кгс и заданной надежности 95%. После определения вероятности безотказной работы было рассчитано время, гарантирующее работу детали, по истечении которого возникает необходимость обслуживания элемента либо его замены. Полученные значения представлены в табл. 1.

Затем было выполнено нагружение образцов на установке УМЭ-10ТМ, которая позволяет плавно уве-

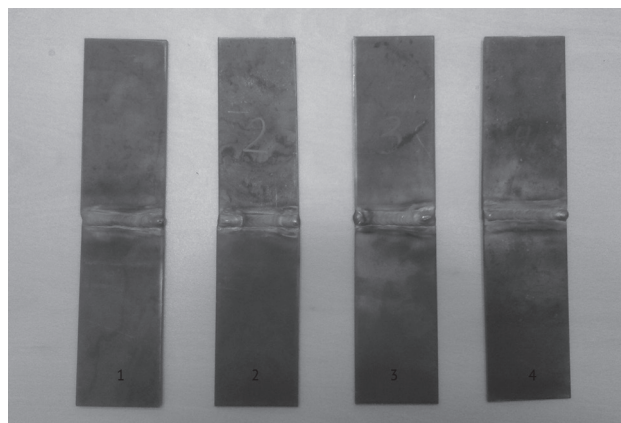


Рис. 2. Исследуемые образцы

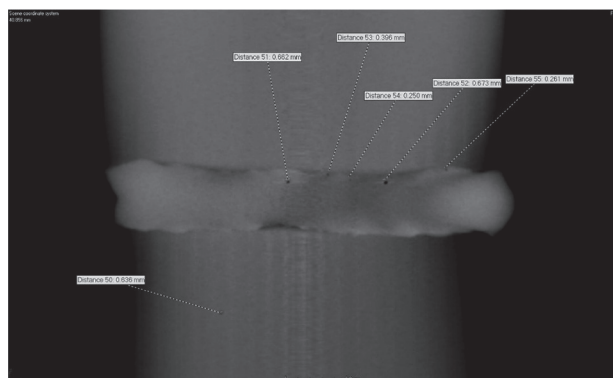


Рис. 3. Результаты проведенных томографических исследований

личивать нагрузку от 0 до 10 т. Установка УМЭ-10ТМ предназначена для статических и циклических испытаний растяжением-сжатием при одновременной регистрации диаграммы деформирования [8]. Для определения перемещения был использован индикатор часового типа с ходом 50 мм. Нагрузка увеличивалась до разрушения образцов, результаты испытаний представлены в табл. 2.

Для определения характера разрушения и поведения внутренних дефектов вновь были выполнены исследования на томографе, примеры полученных результатов представлены на рис. 4.

4. Заключение

Проведенные исследования подтвердили зависимость надежности от объема внутренних дефектов, эта зависимость прослеживается в образцах с разным уровнем загрязненности. На основе этого была рассчитана вероятность безотказной работы каждого образца при заданном объеме внутренних дефектов b_1 , а

Таблица 1
Рассчитанное гарантированное время работы элементов до нагружения

Номер образца	1	2	3	4
Общий объем внутренних дефектов, мм ³	32,001	5,96	19,348	17,752
Гарантированное время работы, ч	22000	267000	46000	53000

Таблица 2
Рассчитанное гарантированное время работы элементов после нагружения 8 т

Номер образца	1	2	3	4
Усилие, при котором образец был разрушен, кгс	8840	8560	8820	7920
Усилие начала пластической деформации, кгс	5970	6230	6010	5880
Остаточное удлинение после снятия нагрузки, мм	18	19	27	29

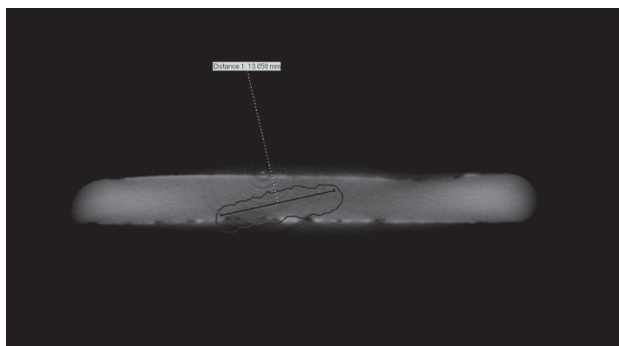


Рис. 4. Результаты томографии образцов после их разрушения

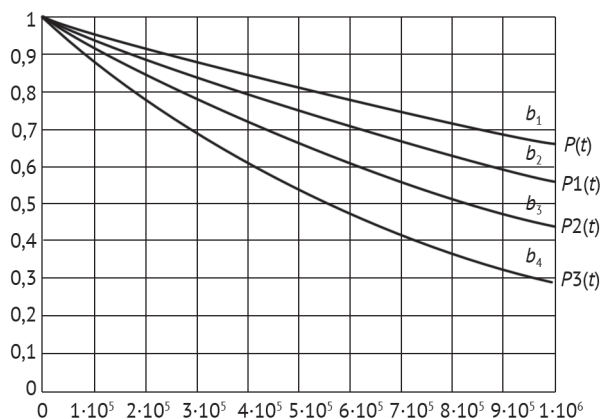


Рис. 5. Зависимость надежности и вероятности безотказной работы от объема внутренних дефектов; b_1 – начальный объем внутренних дефектов; $b_2 = 125\%$ от b_1 ; $b_3 = 150\%$ от b_1 ; $b_4 = 175\%$ от b_1

также в случае его увеличения на $b_2 = 125\%$, $b_3 = 150\%$ и $b_4 = 175\%$, и построен график их зависимости (рис. 5).

Анализ полученных результатов позволил подтвердить предположение о зарождении и развитии трещин в местах крупного скопления внутренних пор и непроваров как в основном металле, так и в сварном

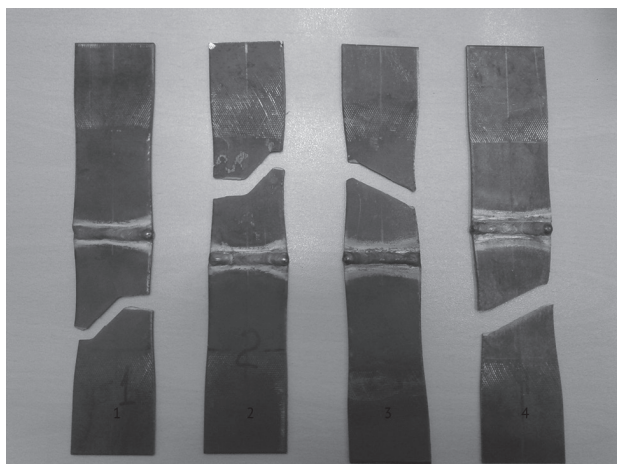


Рис. 6. Разрушение образцов в области основного металла

шве. При проведении представленного эксперимента разрушение происходило не по сварному шву, как предполагалось, а в области основного металла (рис. 6). Объяснить это можно большей толщиной сварного шва по сравнению с основным металлом и соответственно большим сопротивлением текучести.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черняев А.И., Трефилов В.А. Оценка надежности и обеспечение долговечности тяжело нагруженных элементов // Научные исследования и инновации. 2013. Т. 7, № 1–4. С. 95–101.
2. Дубинина С.В. Прогнозирование разрушения металла в процессе интенсивной пластической деформации цилиндрической заготовки равноканальным угловым прессованием // Сб. трудов II международной научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники-2010». УФА: УГНТУ, 2010. С. 7–10.
3. ГОСТ 23118–99. Конструкции стальные строительные. Общие технические условия. Введ. 2001–01–01. Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2001.
4. СНиП 3.03.01–87. Несущие и ограждающие конструкции. Введ. 1988–01–07. Госстрой СССР. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989.
5. СП 53–101–98. Изготовление и контроль качества стальных строительных конструкций. Введ. 1999–01–01. Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 1999.
6. Деев В. С., Трефилов В.А. Надежность технических систем и техногенный риск. Часть 3: Структурно-энергетическая теория отказов: учеб. пособие. Пермь: издательство ПНИПУ, 2012. С. 167.
7. Острейковский В.А. Теория надежности: Учеб. для вузов. — М.: Высш. шк., 2003.
8. Машина испытательная специальная УМЭ-10ТМ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. — Министерство приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР. 1976.

REFERENCES

1. Chernyaev A.I., Trefilov V.A. Otsenka nadezhnosti i obezpechenie dolgovechnosti tyazhelo nagruzhennykh elementov [Evaluation of reliability and durability of heavily-loaded elements]. *Nauchnye issledovaniya i innovatsii* [Research and Innovation]. 2013, V. 7, I. 1–4, pp. 95–101. (in Russian)
2. Dubinina S.V. Prognozirovaniye razrusheniya metalla v protsesse intensivnoy plasticheskoy deformatsii tsilindricheskoy zagotovki ravnokanal'nym uglovym pressovaniem [Predicting failure of the metal in the process of severe plastic deformation of the cylindrical workpiece equal channel angular pressing]. *Sb. trudov II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh "Aktual'nye problemy nauki i tekhniki-2010"* [Coll. works of the II International Scientific and Practical Conference of Young Scientists "Actual Problems of Science and Technology 2010"]. UFA, UGNTU, 2010, pp. 7–10. (in Russian)
3. GOST 23118–99. *Konstruktsii stal'nye stroitel'nye. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Vved. 2001–01–01. Gosstroy Rossii.* [GOST 23118–99. Construction steel building. General specifications. Introduced. 2001–01–01. Gosstroy of Russia]. Moscow, GUP TsPP Publ., 2001. (in Russian)
4. SNiP 3.03.01–87. *Nesushchie i ograzhdayushchie konstruktsii. Vved. 1988–01–07. Gosstroy SSSR.* [SNIP 3.03.01–87. Bearing and enclosing structures. Introduced. 01/07/1988. USSR State Building]. Moscow, TsITP Gos-stroya SSSR Publ., 1989. (in Russian)
5. SP 53–101–98. *Izgotovlenie i kontrol' kachestva stal'nykh stroitel'nykh konstruktsiy. Vved. 1999–01–01. Gos-stroy Rossii.* [SP 53–101–98. Production and quality control of steel building structures. Introduced. 1999–01–01]. Moscow, GUP TsPP Publ., 1999. (in Russian)
6. Deev V. S., Trefilov V. A. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk. Chast' 3 [Reliability of technical systems and technological risks. Part 3]. *Strukturno-energeticheskaya teoriya otkazov* [Structural and energy failure theory]. Perm', PNIPU Publ., 2012, p. 167. (in Russian)
7. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti* [Reliability theory]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 2003. (in Russian)
8. *Mashina ispytatel'naya spetsial'naya UME-10TM. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii* [Testing machines special VME-10TM. Technical description and user ekspluatatsii]. Ministry of instrumentation, automation and control systems of the USSR Publ., 1976. (in Russian)

Ensuring Safety of Metal Structures

A.I. Chernyaev, Post-graduate Student, Safety Department, Perm State Technical University

V.A. Trefilov, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of Safety Department, Perm State Technical University

Presented paper demonstrates the assessment of the steel samples' reliability using structure-energy theory of failure, which is based on detection and investigation of internal defects in the sample. The main objective was to test this technique on samples of structural steel, and to determine the nature of destruction depending on internal cracks, pores, lacks of fusion, etc. To achieve this goal, the following tasks were assigned: studying structure-energy theory of failure; preparing test samples; conducting tomographic analysis before physical impact and after destruction; calculating samples' guaranteed time till fracture.

Keywords: durability, safety, probability of failure, probability of failure-free operation, structure-energy theory of failure, guaranteed uptime, tomographic analysis, internal defects of metal.

Универсальная десятичная классификация (УДК) и ее использование в статьях

Уважаемые авторы, подготовка статей для публикации в журнале предусматривает указание кода УДК, соответствующего тематике статьи. УДК — это система классификации информации, широко используемая во всём мире для систематизации произведений науки, литературы и искусства, периодической печати, различных видов документов и организации картотек. От кода УДК зависит, правильно ли будет расположена ваша статья в библиотечном каталоге, а значит, как быстро и сколько заинтересованных читателей ознакомятся с ней. От правильности указанного кода во многом зависит расположение статьи в том или ином реферативном журнале или его рубрике. От этого зависит и цитирование статьи.

К сожалению, авторы не всегда внимательно указывают коды УДК. Конечно, редакция журнала старается внести правки, но все же авторам лучше определить, каким рубрикам классификатора соответствует содержание статьи.

Рекомендуем для определения УДК использовать следующие сайты: <http://udc.biblio.uspu.ru/>; <http://legacy.uspu.ru/udc/>.

Просьба также правильно использовать в кодах знаки присоединения (+), распространения (/), простого отношения (:), закрепления последовательности (::), группирования ([]). С правилами их использования также можно ознакомиться в интернете.

Редакция