

УДК 621.873

Метод автоматизированного расчета крановых металлоконструкций с трещиноподобными дефектами

Нургужин Марат Рахмалиевич¹,
научный руководитель Национального центра
космических исследований и технологий,
д-р техн. наук, профессор

nurguzhin.m@spaceres.kz

Даненова Гульмира Тулендиевна²

g.danenova@ktu.edu.kz

¹ Акционерное общество «Национальный центр космических исследований и технологий», Алматы, Казахстан

² Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

Аннотация. В работе приведен метод автоматизированного расчета сварных крановых металлоконструкций на основе имитационного моделирования и механики разрушения. В основу оценки напряженно-деформированного состояния узлов крановых металлоконструкций в процессе термосилового нагружения было положено следующее: неизотермическая теория течения, модель степенного и билинейного упрочнения тела, удовлетворяющего критерию текучести Мизеса и метод конечных элементов. Расчет параметров трещиностойкости сварных соединений осуществлялся путем решения задач теории упругости и пластичности методами граничных и конечных элементов на основе энергетических подходов. Приведены результаты расчета фактических запасов прочности при действии статической нагрузки и остаточного ресурса при действии динамических нагрузок элементов металлоконструкции мостового крана.

Ключевые слова: механика разрушения, сварные конструкции, остаточные напряжения, распространение трещины, живучесть конструкции

Method of automated calculation of crane metal structures with crack-like defects

Nurguzhin Marat Rakhmalievich¹,
Scientific supervisor, Doctor of Technical Sciences,
Professor

nurguzhin.m@spaceres.kz

Danenova Gulmira Tulendievna²

g.danenova@ktu.edu.kz

¹ Joint Stock Company "National Center of Space Researches and Technologies", Almaty, Kazakhstan

² Karaganda Technical University named by Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan

Abstract. The paper presents a method for automated calculation of welded crane metal structures based on simulation modeling and fracture mechanics. The assessment of the stress-strain state of the components of crane metal structures in the process of thermal force loading was based on the following: a non-isothermal flow theory, a model of power-law and bilinear hardening of a body satisfying the Mises yield criterion, and the finite el-

ement method. The parameters of crack resistance of welded joints were calculated by solving problems in the theory of elasticity and plasticity using boundary and finite element methods based on energy approaches. The results of calculating the actual safety reserves under the action of static load and the residual resource under the action of dynamic loads of the elements of the bridge crane metal structure are presented.

Keywords: fracture mechanics, welded structures, residual stresses, crack propagation, structural survivability

Введение. Известно, что разрушение машиностроительных конструкций в процессе эксплуатации, связано (до 90%) с разрушением сварных соединений. В настоящее время сварка является доминирующим технологическим процессом в области производства металлоконструкций. Вместе с тем, использование сварочных технологий при производстве конструкций имеет ряд особенностей без учета которых не могут быть получены надежные и экономичные сварные конструкции. Это характерная форма сварных соединений, вызывающая концентрацию напряжений и деформаций, влияние термического цикла сварки на свойства основного металла, высокие сварочные остаточные напряжения, значительные пластические деформации, возможность образования при сварке дефектов.

Опыт эксплуатации сварных крановых металлоконструкций подтверждает выше сказанное [1–3]. Несмотря на большое разнообразие видов разрушения, систему их классификации можно сделать на учете трех составляющих: характер разрушения, причина разрушения, место разрушения [4–6]. Используя эту систему и опираясь на статистические данные [6–8], можно определить наиболее характерные виды разрушения сварных крановых металлоконструкций:

1. Упругая деформация, вызванная действием внешних нагрузок (расчет на прочность и устойчивость);
2. Пластическая деформация (потеря строительного подъема при длительной эксплуатации в процессе взаимодействия рабочих и остаточных напряжений и деформаций);
3. Хрупкое разрушение при низких температурах;
4. Малоцикловая и многоцикловая усталость;
5. Коррозия под напряжением и старение металла в зоне сварных соединений.

С учетом этого были выявлены основные факторы, снижающие несущую способность сварных крановых металлоконструкций. Необходимость учета указанных факторов, а также осознание того, что во всех реальных конструкциях изначально существует трещиноподобные дефекты требует разработки новых методов, позволяющих исследовать распространение трещин в условиях как монотонных, так и циклических нагружений с учетом влияния остаточных напряжений и деформаций.

Обзор существующих методов расчета показывает, что наиболее серьезное признание получила концепция «соответствие назначению» («fitness for

ригrose»), в рамках которой предложены процедуры анализа, основанные на сочетании численных расчетов и стандартных испытаний материалов с привлечением современных подходов механики деформирования и разрушения [3].

Материалы и методы. Предлагаемый в данной работе подход к оценке несущей способности крановых металлоконструкций базируется на следующих положениях.

1. Система «грузоподъемная машина — совокупность технологий» представляет собой многоуровневую систему, адекватный анализ которой достигается с помощью метода, основанного на понятии типовая Q — схема, реализующая особенности непрерывно-стохастического процесса обслуживания. В результате моделирования системы оценивается режим работы машины.

2. Определение ожидаемых нагрузок на конструкцию осуществляется на основе анализа динамических процессов, протекающих в элементах конструкции, представленной как система с дискретно-распределенными параметрами.

3. Учет технологических факторов реализуется на основе описаний реальной геометрии сварного соединения и определении остаточных сварочных напряжений и деформаций.

4. Конструкционное соответствие реального изделия и его модели реализуются на основе применения метода конечных элементов (МКЭ).

5. Предельное состояние изделия в момент исчерпания несущей способности при действии статистических нагрузок оценивается на основе двухпараметрических критериев в терминах коэффициента интенсивности напряжений (КИН) для квазихрупких разрушений и J -интеграла для вязких состояний материалов.

Результаты. В основу оценки напряженно-деформированного состояния узлов крановых металлоконструкций в процессе термосилового нагружения было положено следующее.

1. Расчет напряжений и деформаций проводился на основе неизотермической теории течения, так как эта теория наиболее полно описывает процесс деформирования тел при сложном нагружении.

2. Принималась модель степенного и билинейного упрочнения тела, удовлетворяющего критерию текучести Мизеса.

3. Использовался МКЭ, как численный метод интегрирования дифференциальных уравнений неизотермической теории течения и нестационарной теплопроводности.

4. Расчет параметров трещиностойкости сварных соединений осуществлялся путем решения задач теории упругости и пластичности методами граничных и конечных элементов на основе энергетических подходов.

Вышеперечисленные методы легли в основу методики расчета характеристик живучести крановых металлоконструкций с трещиноподобными дефектами. В данной работе под живучестью будем понимать сохранение несущей способности элементами конструкции при возникновении в них трещин, размеры которых не превышают заданных значений. Основными характеристика-

ми живучести являются: остаточная прочность (разрушающее напряжение σ_c); длительность роста трещины T (остаточный ресурс) и периодичность осмотров $T_{осм}$. Числовые значения этих характеристик взаимосвязаны.

Металлоконструкции грузоподъемных машин проектировались, по существу, по принципу безопасности ресурса, в соответствии с которым в конструкциях практически не допускалось возникновение трещин за период проектного (назначенного) ресурса. Поэтому продление ресурса поврежденных трещинами конструкций за пределами проектного может быть обеспечено за счет их живучести при распространение трещин до безопасных размеров [6, 7].

При использовании критериальных подходов механики трещин прогнозирование ресурса может быть основано на детерминированных или вероятностных расчетах. В принципе для прогнозирования остаточного ресурса и анализа возможности продления проектного ресурса при наличии трещин целесообразно привлекать оба подхода с целью получения более корректного обоснования надежности полученных результатов прогнозирования. Однако при анализе остаточного ресурса крановых металлоконструкций в условиях недостатка статистических данных по параметрам моделей с доверительными границами, применяемыми в инженерных расчетах, по возможным сценариям аварий в силу сложности конструкций и редкости аварийных ситуаций детерминированные подходы представляются более перспективными [7, 8]. При этом детерминированная модель может служить основой для вероятностных расчетов.

Обсуждение. Для анализа возможности продления ресурса при сохранении требований к безопасности необходимо обоснование области безопасных состояний поврежденных трещинами конструкций по критериям механики разрушения и живучести. В рамках детерминированного подхода это достигается введением в критерий предельного состояния коэффициента запаса по трещиностойкости m_o и коэффициента живучести m_N .

В качестве примера использования предлагаемой методики расчета характеристик живучести крановых металлоконструкций приведены результаты расчета фактических запасов прочности при действии статической нагрузки и остаточного ресурса при действии динамических нагрузок элементов металлоконструкции мостового крана грузоподъемностью $Q = 12,5$ м, пролетом $L = 16,5$ м, эксплуатируемого в литейном цехе.

В соответствии с пунктами 1 и 2 методики были определены рабочие параметры крана, геометрия металлоконструкции, характеристики материалов, сформирована карта описания модели системы «машина совокупность технологий» и матрица одновременно невозможных событий. На основе визуального осмотра и дефектоскопии определены размеры дефектов, их местоположение [6, 7]. На основе метамоделирования определена группа режима работы крана 7К и величина коэффициента эквивалентности $\phi_э = 0,8$. При оценке статической трещиностойкости использовался двухпараметрический критерий в терминах КИН, при определении остаточного ресурса — модифицированное уравнение Элбера.

Заключение. Результаты расчета характеристик живучести металлоконструкции мостового крана представлены на рисунке. Рассмотрены два случая: *a* — трещина в нижнем поясе главной балки у стыкового шва; *б* — трещина в стенке главной балки в зоне приварки кронштейна крепления механизма подъема. Также рассмотрены следующие условия: 1 — с учетом остаточных напряжений; 2 — без учета остаточных напряжений.

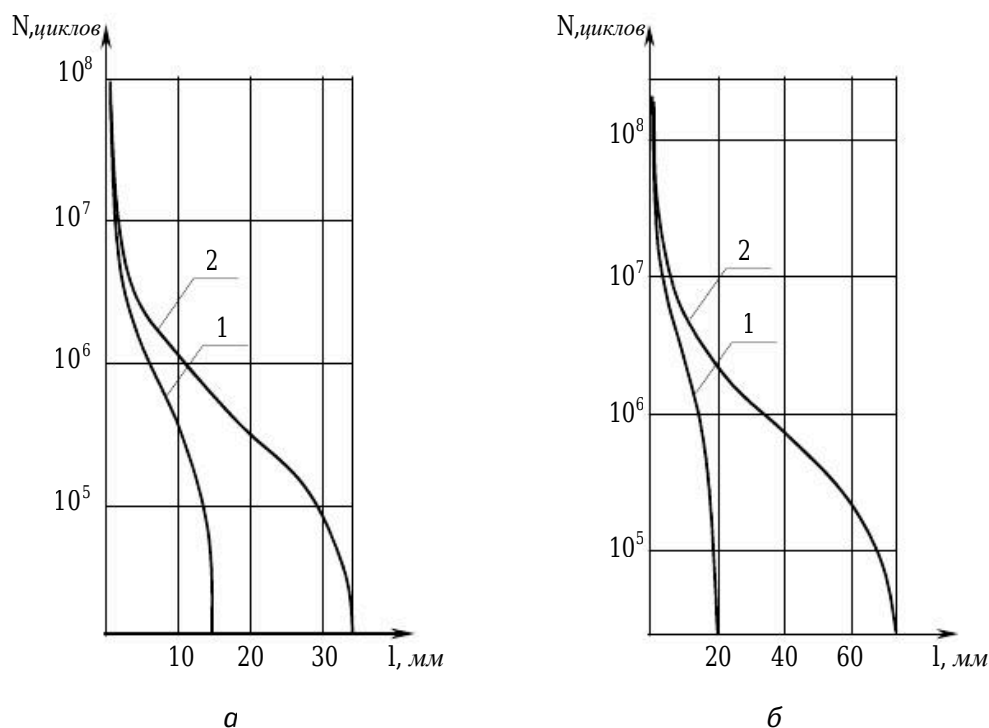


Диаграмма живучести

Полученные данные позволяют заключить.

1. Учет остаточных напряжений приводит к существенному уточнению характеристик живучести: разрушающего напряжения σ_c и остаточного ресурса N . Так, например, для случая, когда трещина в нижнем поясе главной балки у стыкового шва, величина разрушающих напряжений при учете остаточных напряжений уменьшилась на 14,3 % ($\sigma_c = 244$ МПа, $\sigma_c^r = 209$ МПа), фактический коэффициент запаса составил $n_o = 1,34$, остаточный ресурс 42913 циклов.

2. Сверхнормативный срок службы крана в годах определяется случаем, когда трещина в нижнем поясе главной балки у стыкового шва, и составляет 2,3 года при односменной работе, ($N_r=18000$ циклов).

3. Повторное обследование следует проводить через два года и число межинспекционных осмотров принять равным 8.

Список источников

- [1] Richard H., Sander M., Fulland M., Kullmer G. Development of fatigue crack growth in real structures. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, vol. 75, pp. 331–340.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.01.017>
- [2] Ghosh A., Barman N., Chattopadhyay H., Hloch S. A study of thermal behaviour during submerged arc welding, *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 59 (5), pp. 333–338.
<https://doi.org/10.5545/sv-jme.2012.775>
- [3] Zhu M.-L., Xuan F.-Z., Tu S.-T. Effect of load ratio on fatigue crack growth in the near-threshold regime: A literature review, and a combined crack closure and driving force approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, vol. 141, pp. 57–77.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.05.005>
- [4] Besel M., Breitbarth E. Advanced analysis of crack tip plastic zone under cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, 2016, vol. 93 (1), pp. 92–108.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.08.013>
- [5] Lopez-Crespo P., Shterenlikht A., Patterson E.A., Yates J.R., Withers, P.J. The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2008, vol. 43 (8), pp. 769–780. <https://doi.org/10.1243/03093247JSA419>
- [6] Нургужин М.Р., Даненова Г.Т. *Основы расчета характеристик живучести сварных металлоконструкций*. Караганда, Изд-во КарГУ, 2021, 133 с.
- [7] Нургужин М.Р., Даненова Г.Т. *Моделирование тепловых процессов в сварных соединениях*. Караганда, Изд-во НАО КарГУ имени Абылкаса Сагинова, 2023, 83 с.
- [8] Нұрғожин М.Р., Даненова Г.Т., Сайлауқызы Ж. Қалдық дәнекерлеу кернеулеріне және деформацияға механикалық әсердің әсерін компьютерлік модельдеу. *Республиканский научно-технический журнал «Труды Университета КарГТУ»*, 2020, т. 3 (80), с. 19–24.