

Анализ международного опыта оценки долговечности подкрановых балок

Ф. Абд Алвахед, А.В. Корнилова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье рассматриваются ключевые проблемы ресурса и повреждаемости подкрановых балок в течение продолжительного периода эксплуатации. Предлагается классификация наиболее опасных дефектов подкрановых балок, учитывающая не только местоположение дефекта, но и механизм его развития, а также возможные причины возникновения. Основное внимание уделяется воздействию периодических нагрузок на возникновение и рост усталостных трещин. Статья проводит анализ международных исследований с целью выявления методов и методологий, применяемых для обеспечения безопасности и надежной эксплуатации исследуемых объектов. Показано, что особое внимание должно уделяться периодическому обследованию с целью раннего обнаружения трещин различной этиологии и своевременному принятию необходимых мер. Выявлено, что наиболее эффективным подходом к обеспечению надежной и безопасной эксплуатации исследуемого объекта на всем протяжении его жизненного цикла является коллаборация современных расчетных методов, включая механику разрушения, и экспериментальных методик при проведении периодических обследований, что позволит ранжировать зоны подкрановой балки по вероятности возникновения дефекта и уменьшит риск внезапного хрупкого разрушения.

Ключевые слова: подкрановая балка, трещина, хрупкое разрушение, механика разрушения, деформация сдвига, нормальный отрыв, метод конечных элементов, ранжирование по опасности разрушения, техническое обслуживание, напряженно-деформированное состояние.

Подкрановые балки являются критическими компонентами в промышленных зданиях, обеспечивая структурную поддержку, необходимую для безопасной и эффективной работы кранов. Эти балки выдерживают огромные нагрузки, обеспечивая перемещение тяжелых грузов по производственным площадям. По ведомственным нормам (ОРД 00 000 89 Техническая эксплуатация стальных конструкций производственных зданий), минимальный срок службы подкрановой балки должен составлять 10 лет. По данным работ [1] установлено, что нарастание дефектности идет по параболическому закону с увеличением срока эксплуатации подкрановой балки. Монография [2] российских ученых Пензенской научной школы

посвящена расчёту и конструирования подкрановых балок, работающих в тяжелых режимах эксплуатации. Результаты исследований в 140 многопролетных цехах показали, что трещины в подкрановых балках обнаруживают повсеместно (рис. 1), особенно при работе кранового оборудования в тяжелых и особо тяжелых режимах.



а)

б)

Рис. 1 - Последствия внезапного выхода из строя подкрановых балок: обрушение крана в цехе в Новосибирске в 2021 году – *а*); обрушение крана в 2013 году на Арканзасской атомной электростанции в Лондоне – *б*) [3]

В работе [4] показаны все дефекты, которые могут снижать несущую способность металлоконструкций. Самыми опасными дефектами по опасности разрушения являются усталостные трещины [5]. Мониторинг трещин в строительных конструкциях, к которым относят и подкрановые балки, рассмотрен в [6], а вопросы технической экспертизы опасных объектов в [7]. Развитие усталостных трещин приводит к катастрофическим отказам, связанным с внезапным хрупким разрушением. Однако кроме сквозных усталостных трещин в подкрановых балках могут присутствовать эллиптические и полуэллиптические трещины, которые менее опасны, но при длительной эксплуатации перерастают в сквозные. На рис. 2 показана предлагаемая нами классификация трещин в подкрановых балках. В

классификации учтены все виды трещин, механизмы их роста и вероятные причины возникновения. Трещины группы 1 и группы 2 воспринимают силовой фактор от поперечного изгиба. Считается, что наличие трещин этих групп в подкрановых балках недопустимо. Декларируется, что при обнаружении трещин данных групп необходимо выполнить капитальный ремонт. Согласно СТО-22-05-04 и СНиП Ш-18-75 наличие трещин в принципе недопустимо. Но такое следование формальным правилам не всегда является экономически и логически оправданным действием.

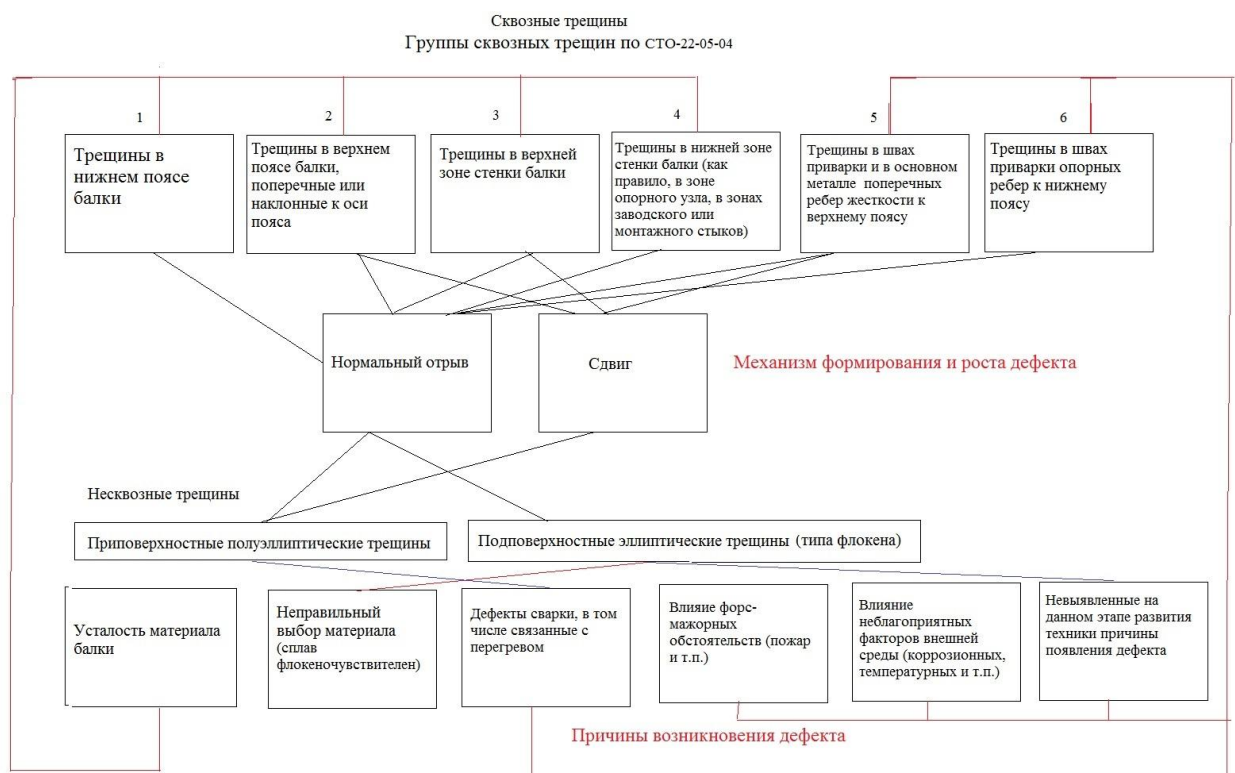


Рис. 2. – Классификация трещин в подкрановых балках

Современные методы и приборы для неразрушающего контроля, применяемые при техническом обследовании подкрановых балок, позволяют выявлять трещины достаточно малых размеров. Например, согласно ГОСТ 18442-80, капиллярный метод при классе чувствительности I обнаруживает дефект менее 1 мкм, при классе чувствительности IV – 0,5 мм. Ультразвуковой метод позволяет выявлять дефекты размером до 2 мм.

Согласно СТБ ЕН 1711-2006 минимальный размер дефекта, который можно выявить с помощью вихретокового контроля из ферромагнитного материала составляет по глубине 1 мм и по длине 5 мм при ширине раскрытия невидимой глазом. Это указывает на то, что при современном уровне развития НК необходимо пересмотреть ряд нормативных документов по допустимым дефектам в металлоконструкциях, в том числе, в подкрановых балках, в области нормирования параметров трещин в зависимости от месторасположения. А все зоны конструкции необходимо в процессе обследования ранжировать по критерию опасности хрупкого разрушения (с учетом напряженно-деформированного состояния, наличия накопленной повреждаемости, условий эксплуатации и т.п.). Такая работа в России начата. Этим вопросом занимались такие известные ученые, как Белый Г.И., Москвичев В.В., Махутов Н.А., Крылов И. И., Нежданов К.К., Чумаков В.А., Васюта Б.Н., Спирин Г.М., Зензинов В. Н., Кандаков Г. П., Конаков А. И., Липатов А. С., Сабуров В. Ф., Тиков А.В., Щербаков Е. А., Кубасевич А.Е. и др. Из последних статей следует выделить работу [8], авторы которой предлагают нормировать параметры трещин по критериям механики разрушения. Однако предлагаемая в [8] методика не учитывает механизм роста дефекта - нормальный отрыв, сдвиг или антиплоская деформация. Кроме того, при расчете по критериям механики разрушения аналитический подход к определению напряженно-деформированного состояния не вполне корректен.

Оценка усталостных трещин обычно проводится с учетом нескольких факторов, определяющих степень их опасности:

- Длина и глубина;
 - Местоположение: трещины, расположенные в критических зонах, таких, как сварные швы или зоны с высоким уровнем напряжений, являются более опасными из-за способности к быстрому распространению.
-

- Скорость роста: быстрое распространение трещин повышает риск возможного отказа [4].
- Форма и ориентация: разветвленные трещины могут распространяться непредсказуемо.
- Контекстуальные факторы: окружающие условия, форма и частота циклов нагружения и т.п. [9].

Были также проанализированы основные зарубежные публикации по исследуемой теме, показавшие схожесть подходов в мировой инженерной практике. В работе [10] проведен анализ срока службы подкрановых балок металлургического цеха, которые находятся в эксплуатации более 30 лет. Основной акцент исследования сосредоточен на выявлении причин наиболее частых отказов в конструкциях, а именно на усталости сварных соединений. В рамках исследования проведен первоначальный анализ для расчета оставшегося срока службы структуры с применением программного обеспечения ANSYS. Для калибровки модели было проведено полевое испытание с использованием тензометрирования. Анализ выявил наиболее критические точки, которые впоследствии были подвергнуты визуальному осмотру. Этот этап выявил наличие трещин, которые могли бы привести к хрупкому разрушению. С целью более детального понимания роста трещин был проведен процесс симуляции с использованием линейной механики разрушения. Отмечается, что такой подход ожидается привести к предсказанию момента хрупкого разрушения структуры. В работе [11] также применялся программный комплекс ANSYS, что позволило учесть различные нагрузки и выявить влияние этих нагрузок на образование трещин в области сварки. Также в работе были выявлены некоторые причины образования трещин в подкрановых балках. Работа [12] затрагивает область прогнозирования усталостной долговечности сварных соединений, в которых обнаружили трещины и которые были восстановлены путем наварки пластин

в зоне повреждения. Для оценки эффективности ремонтных работ прогнозировалась усталостная долговечность сварных конструкций с использованием международных стандартов проектирования, после чего проводилось сравнение с фактическим количеством циклов до отказа, зарегистрированным в процессе промышленной эксплуатации. Статья [13] рассматривает случай аварии кранового пути после длительного периода эксплуатации. Были проведены геодезические измерения расположения рельсов, показавшие превышение допустимых отклонений. Обнаружено, что усталостные дефекты при высоких скоростях работы крана вызывают существенные динамические взаимодействия и ударные нагрузки. Показано, что эти факторы должны учитываться на этапе проектирования, так как они могут привести к разрушению опор. Статья [14] посвящена анализу влияния периодического технического обслуживания и ремонта на надежность и безопасность металлических конструкций мостовых кранов. На текущий момент редко рассматривается влияние факторов обслуживания на усталостную надежность мостовых кранов в процессе эксплуатации. Проведен качественный анализ влияния обслуживания на параметры надежности. В начальном и среднем периоде эксплуатации мостового крана из-за медленного распространения трещин влияние обслуживания на усталостную надежность невелико. С увеличением времени эксплуатации мостового крана интервалы технического обслуживания уменьшаются, а количество обслуживаний увеличивается. В конечном периоде службы принятие решения о продолжении технического обслуживания необходимо измерять с точки зрения эффективности производства, экономической целесообразности и безопасности. В статье принимается, что порог обнаружения трещин составляет 2,5 мм, и как только трещина обнаружена, проводится ремонт. Если порог обнаружения трещин задать меньше, то

эффект восстановления усталостной надежности будет выше. Однако это также означает увеличение затрат на техническое обслуживание.

Выводы

1. Показано, что проблема долговечности и надежности подкрановых балок актуальна во всем мире. Принципиально близки подходы к продлению ресурса исследуемых конструкций. В настоящее время прогнозирование остаточного ресурса во всем мире становится все более наукоемким и включает в себя конечно-элементные расчеты с применением базовых подходов линейной механики разрушения. Показано, что особое внимание должно уделяться периодическому обследованию с целью раннего обнаружения трещин различной этиологии и своевременному принятию необходимых мер.
2. Предложена классификация трещин в подкрановых балках, включающая все виды трещин, механизмы их роста и вероятные причины возникновения.
3. Показана необходимость нормирования параметров сквозных, полуэллиптических и эллиптических трещин. При современном уровне развития НК необходимо пересмотреть ряд нормативных документов по допустимым дефектам в металлоконструкциях, в том числе, в подкрановых балках, по части нормирования параметров трещин в зависимости от месторасположения. А все зоны конструкции необходимо в процессе обследования ранжировать по критерию опасности хрупкого разрушения (с учетом напряженно-деформированного состояния, наличия накопленной повреждаемости, условий эксплуатации и т.п.).

Литература

1. Махутов Н.А., Еремин К.И., Нащекин М.В., Березкина Ю. В. Остаточный ресурс циклически нагруженных строительных металлоконструкций. Магнитогорск: Велд, 2014. 133 с.
-



2. Нежданов К.К., Нежданов А.К. Решение проблемы выносливости подкрановых балок при тяжёлом режиме эксплуатации. Пенза: ПГУАС, 2015. 124 с.

3. Бабкин Владимир Ильич Оценка циклической трещиностойкости сварных подкрановых балок тяжелого режима работы: диссертация ... канд. техн. наук: 05.23.01: защищена 15.10.1986: утв. 25.06.1986/ Бабкин В.И., М., 1986. - 163 с.

4. Васин О.Е., Югай В.М., Садртдинов Р.А., Подмогаев В.А., Гейцман В.Б., Кареев Н.К., Селиванов А.А. Атлас дефектов. Научно-технический сборник. Екатеринбург, 2008. 56 с.

5. Фролова О.А. Особенности разрушения конструкционных материалов при различных условиях нагружения: Учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2019. 91 с.

6. Шарапов Р. В., Лодыгина Н. Д. Мониторинг трещин в строительных конструкциях // Инженерный вестник Дона, 2023, № 3. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_54__3_sharapov_lodigina_1.pdf_405c0e38e1.pdf

7. Гарькин И.Н., Гарькина И.А, Поляков Л. Г. Техническая экспертиза: идентификация опасных производственных объектов // Инженерный вестник Дона. 2023. №2. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_81__1__Garkin_Garkina_Polakov_1_.pdf_c319bc5089.pdf

8. Корнилова А. В., Сафина Л.Х. К вопросу о допустимости дефектов в нижнем поясе подкрановых балок // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 6. С. 23-28.

9. Richard H., Sander M.: Crack initiation under cyclic loading. In: Fatigue Crack Growth. Solid Mechanics and Its Applications, vol. 227. Springer, Cham (2016). pp. 239–250.

10. Yossef N.M., Elboghdady A., El-Boghdadi M.H., M. A. Dabaon M.A. Synthetic SN Curve of Steel Beams // Arabian Journal for Science and Engineering. 2023 V. 48, pp. 5525–5548. URL: link.springer.com/article/10.1007/s13369-022-07450-9
11. Shi-er Dong., Qian Chen. Probe on the Stress of the Support Crack of Welded Crane Beams// Applied Mechanics and Materials. V. 502-504. pp. 710-716. URL: scientific.net/AMM.501-504.710
12. Kastro ZH. T, Freyre ZH. L. Fatigue life prediction of repaired welded structures // Journal of Constructional Steel Research. 1969. V. 28. №2. Pp. 187-195.
13. Kossakovskiy P., Nazhmlik V., Bakalarzh M. Failure of the overhead crane runway // MATEC Web of Conferences, 2019. V. 284, p. 09001.
14. Zhang Y., Wang H., Li X., Li X., Ren Y., Feng Y., Xue X. Fatigue reliability analysis of bridge crane metal structure considering maintenance // Journal of Physics. Conference Series. 2022. V. 2383(1) p. 012060. URL: researchgate.net/publication/366210860_Fatigue_reliability_analysis_of_bridge_crane_metal_structure_considering_maintenance#fullTextFileContent

References

1. Mahutov N.A., Eremin K.I., Nashchekin M.V., Berezkina Yu. V. Ostatochnyj resurs ciklicheski nagruzhennyh stroitel'nyh metallokonstrukcij [Residual life of cyclically loaded building metal structures]. Magnitogorsk: Veld, 2014. 133 p.
2. Nezhdanov K.K., A.K. Nezhdanov. Reshenie problemy vynoslivosti podkranovyh balok pri tyazhyolom rezhime ekspluatatsii [Solving the problem of endurance of crane beams under severe operating conditions]. Penza: PGUAS, 2015. 124 p.
3. Babkin Vladimir Il'ich Ocenka ciklicheskoj treshchinostojkosti svarnyh podkranovyh balok tyazhelogo rezhima raboty [Evaluation of cyclic crack

resistance of welded heavy-duty crane beams]: dissertaciya ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01: zashchishchena 15.10.1986: utv. 25.06.1986/ Babkin V.I., M., 1986. 163 s.

4. Vasin O.E., Yugaj V.M., Sadrtidinov R.A., Podmogaev V.A., Gejcman V.B., Kareev N.K., Selivanov A.A. Atlas defektov. Nauchno-tekhnicheskij sbornik [Atlas of defects. Scientific and technical collection]. Ekaterinburg, 2008. 56 p.

5. Frolova O.A. Osobennosti razrusheniya konstrukcionnyh materialov pri razlichnyh usloviyah nagruzheniya: Uchebnoe posobie [Features of destruction of structural materials under various loading conditions: Textbook]. Orenburg: OGU, 2019. 91 p.

6. Sharapov R. V., Lodygina N. D. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 3. URL: vdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_54__3_sharapov_lodygina_1.pdf_405c0e38e1.pdf

7. Gar'kin I.N., Gar'kina I.A, Polyakov L. G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 2. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_81__1__Garkin_Garkina_Polakov_1_.pdf_c319bc5089.pdf

8. Kornilova, A. V., Safina L.H. Bezopasnost' truda v promyshlennosti, 2023, № 6. Pp. 23-28.

9. Richard H., Sander M.: Crack initiation under cyclic loading. In: Fatigue Crack Growth. Solid Mechanics and Its Applications, vol. 227. Springer, Cham (2016). pp. 239–250.

10. Yossef N.M., Elboghdady A., El-Boghdadi M.H., M. A. Dabaon M.A. Synthetic SN Curve of Steel Beams. Arabian Journal for Science and Engineering. 2023 V. 48, pp. 5525–5548. URL: link.springer.com/article/10.1007/s13369-022-07450-9

11. Shi-er Dong., Qian Chen. Probe on the Stress of the Support Crack of Welded Crane Beams. Applied Mechanics and Materials.V. 502-504. pp. 710-716. URL: scientific.net/AMM.501-504.710



12. Kastro ZH. T, Freyre ZH. L. Journal of Constructional Steel Research. 1969. V. 28. №2. Pp. 187-195.
13. Kossakovskiy P., Nazhmlik V., Bakalarzh M. MATEC Web of Conferences, 2019. V. 284, p. 09001.
14. Zhang Y., Wang H., Li X., Li X., Ren Y., Feng Y., Xue X. Journal of Physics. Conference Series. 2022. V. 2383(1) p. 012060. URL: researchgate.net/publication/366210860_Fatigue_reliability_analysis_of_bridge_crane_metal_structure_considering_maintenance#fullTextFileContent

Дата поступления: 3.01.2024

Дата публикации: 11.02.2024