

Способы определения остаточного ресурса конструкций грузоподъемных машин к воздействию эксплуатационных нагрузок циклического действия

Дана методика определения остаточного ресурса несущих металлоконструкций, позволяющего осуществлять их эксплуатацию при наличии дефектов усталостного характера, выявляемых современными методами неразрушающего контроля. Предложены методики учета влияния местных концентраторов и ремонтных мероприятий на оценку ресурсных характеристик критической металлоконструкции.

Ключевые слова: *циклические нагрузки, ресурс металлической конструкции, остаточный ресурс конструкции, методы оценки остаточного ресурса, функция стойкости конструкции к циклическим нагрузкам, стойкость конструкции к воздействию циклических нагрузок, оценка ресурса с учетом действия концентраторов, ресурс отремонтированной конструкции, оценка ресурса с учетом выполненных ремонтов.*

Любая грузоподъемная машина изнашивается и постепенно разрушается в процессе эксплуатации. Свойство грузоподъемной машины обеспечивать проектные характеристики в течение определенного периода проектной эксплуатации под воздействием расчетных эксплуатационных факторов и условий определяется в общем смысле как ее технический ресурс.

Обычно грузоподъемная машина состоит из несущих металлоконструкций, обеспечивающих восприятие механических нагрузок функционирования оборудования, обеспечивающего генерацию механической энергии с нужными характеристиками (механические лебедки, системы тормозов, гидравлическое оборудование, электромоторы и т.д.), систем управления и контроля, систем и оборудования защиты (безопасности). Каждый элемент перечисленных компонентов имеет характерные для него ресурсные характеристики. Однако чаще всего при обсуждении вопросов ресурса имеются в виду только ресурсные характеристики несущих элементов металлоконструкций, определяющих облик и назначение грузоподъемной машины. Ниже подобный подход сохранен, с тем чтобы ограничить круг рассматриваемых вопросов в рамках затронутой проблемы.

Ресурсные характеристики закладываются при проектировании конструкции, но могут изменяться, а иногда и определяться примененными процессами изготовления изделия, характеристиками исходных материалов и полуфабрикатов. Технический ресурс может изменяться под воздействием разнообразных внешних факторов, к которым можно отнести периодические обслуживания и ремонты, объемы и технологии их производства, применяемые материалы и т.д. Наконец, любую несущую конструкцию грузоподъемной машины можно отремонтировать, изменив тем самым ее ресурсные характеристики. Остаточный ресурс – это характеристика грузоподъемной машины, относящаяся к конкретному периоду ее состояния и эксплуатации и имеющая смысл только в условиях известной модели эксплуатации.

Потеря несущей способности элемента конструкции может быть вызвана появлением в нем разрушения или изменениями геометрических форм. Контроль соответствия общих геометрических форм изделия при производстве обследования со-

стояния объекта, как правило, не представляет особых трудностей. Диагностика производится в соответствии с предельными допусками отклонений контрольных характеристик, заданными в проектных или эксплуатационных документах. Обычно нормы допусков отклонений геометрических параметров построены по принципу «предельного состояния». Когда отклонение контрольного параметра укладывается в допуск, разрешается дальнейшая эксплуатация объекта (по этому параметру) с паспортными характеристиками без ограничений. Если же контрольные характеристики отклонений геометрических параметров превышают нормы допусков, дальнейшая эксплуатация объекта запрещается до устранения обнаруженного дефекта. Мониторинг дефектов формы и расчеты ресурсных оценок изделия по геометрическим параметрам производятся только по специальным запросам владельцев объекта с использованием специальных методов и программ. Ниже при оценке ресурсных характеристик конструкции учитываются лишь случаи потери ею своей несущей способности, связанные с появлением дефектов усталостного характера в результате многократных воздействий эксплуатационных нагрузок в условиях обычной, разрешенной всеми правилами эксплуатации.

В классической механике разрушения конструкционных материалов под воздействием нагрузок циклического характера выделяется три вида, формы или стадии разрушения, которые перечислены ниже. Различия обуславливаются характером поведения материала при разрушении и формой излома. Вид разрушения определяется уровнем соотношения амплитудной нагрузки цикла и предела прочности материала.

1. Разрушение от воздействия повторных нагрузок высокой интенсивности. Характерные разрушения этого вида появляются уже при малом числе циклов (условно принимается граница $N < 10^3$). При этом картина разрушения близка к той, что бывает при разрушениях от нагрузок статического характера.

2. Малоцикловая усталость. Характерные разрушения (сетка трещин) появляются при наработке 10^3 – 10^4 циклов.

3. Разрушения типично усталостного вида. Обычно характеризуется $N > 10^5$.

Спецификой разрушений усталостного характера является то, что они захватывают целые зоны большой протяженности в элементах конструкции, и по этой причине такие разрушения плохо поддаются ремонту. Кроме того, нагрузки циклического характера, вызвавшие разрушение в некоторой части контрольной конструкции, действовали и на соседние области этого узла и смежных конструкций. Поэтому усталостные разрушения условно называются ограниченно ремонтпригодными и поэтому прогноз их массового появления в конструкции так важен для владельца.

Существует несколько основных подходов в решении задачи оценки остаточного ресурса.

В первом случае ресурсные характеристики определяются путем полного последовательного расчета с использованием исчерпывающих данных о фактических характеристиках использованных материалов, примененных технологий, фактических нагрузках, геометрии конструкций, параметров климата, сейсмике и иных влияющих условий эксплуатации, характерных для конкретной конструкции. Некоторые методики оценки ресурсных характеристик с использованием подобных подходов широко представлены в специальной литературе. Эти методы применяются преимущественно на этапе проектирования машин, когда можно оперировать с упрощенными условными моделями эксплуатационных параметров и уже имеется на-

бор стандартных прочностных расчетов. Для практической работы по конкретному объекту эти методики, как правило, непригодны из-за отсутствия необходимой базы данных надлежащего качества о характеристиках материалов, нагрузках и условиях эксплуатации, а также большого объема необходимых расчетных работ и неопределенности получаемых результатов.

В ином случае, например, как рекомендовано в действующих частях РД 10-112 РТН РФ, предлагаются упрощенные методики оценки вероятности наступления предельного состояния грузоподъемной машины, при котором ее дальнейшая эксплуатация потенциально опасна. Понятно, что порожденная рекомендациями РД 10-112 ситуация является вынужденной полумерой, ибо такая оценка в основе своей не является оценкой остаточного ресурса грузоподъемной машины. Она разработана и в какой-то степени позволяет рассчитать вероятность наличия предельного состояния конструкции, но не больше.

Основы расчетно-эмпирической методики оценки остаточного ресурса конструкций, позволяющих осуществлять эксплуатацию с усталостными дефектами, обнаруживаемыми методами неразрушающего контроля

Предварительные замечания к расчету:

1. Считается, что для рассматриваемой конструкции известны:
 - геометрические характеристики элементов;
 - марки материалов, из которых изготовлены детали конструкций;
 - параметры типовых эксплуатационных циклов нагрузки (хотя бы приблизительно);
 - полные данные по выполненным ремонтам и заменам элементов конструкции;
 - характеристики концентраторов напряжения, имевших место в зонах разрушений конструктивных элементов.
2. Дальнейшая эксплуатация грузоподъемной машины будет проходить при эксплуатационных условиях, характерных для момента производства оценки, или в иных известных условиях.
3. В конструкциях расчетных элементов использованы однотипные материалы (преимущественно конструкционные стали) и отсутствуют нетрадиционные материалы.
4. У конструктивных элементов отсутствуют локализованные зоны, подвергшиеся воздействию сильного пламени (после пожара), химически активных и радиоактивных материалов, новых (ранее неизвестных или неисследованных) технологий.

Из анализа данных испытаний образцов материалов на стойкость к воздействию нагрузок циклического характера известно, что в общем случае зависимость между амплитудным значением цикла нагрузки и числом циклов этой нагрузки, которое способен воспринять образец до его разрушения, описывается соотношением

$$\sigma^m N = \text{const.} \quad (1)$$

На различные части расчетного элемента действует нагрузка, различающаяся по амплитудному значению, но имеющая одинаковую форму цикла N_k . Для такой ситуации выражение (1) позволяет получить характеристику стойкости сечений расчетного элемента к воздействию нагрузок циклического характера различной амплитуды:

$$(\sigma_i)^m N_i = (\sigma_k)^m N_k, \text{ или } (\sigma_i / \sigma_k)^m = N_k / N_i, \quad (2)$$

где N_i – количество циклов определенной амплитуды.

То есть соотношение стойкости (числа циклов до разрушения) различных частей конструкции, подвергающихся воздействию однотипной по форме нагрузки различного уровня (амплитудного значения), пропорционально соотношению амплитудных значений этой нагрузки в степени m , где m – коэффициент кривой выносливости материала. Значения коэффициентов m приводятся в справочниках стандартных характеристик конструкционных материалов. Для гладких (без концентраторов) образцов конструкционных материалов стандартной формы значение коэффициента m колеблется в пределах 3,2–4,8. Для большинства конструкционных сталей значение этого коэффициента лежит в пределах 3,5–3,7. Как правило, несущие элементы конструкции изготавливаются из однотипного материала и зачастую из материала одной плавки. В этих условиях с высокой достоверностью можно предположить, что значение m для всех деталей конструкции будет одинаковым. В противном случае эта разница свойств должна учитываться в расчетах.

Из условия недопустимости оптимистичного прогноза, когда разрушение по факту наступит раньше истечения срока, определенного прогнозом, следует принять для работы по оценке ресурсных характеристик наименьшее значение коэффициента m .

По статистическим данным это значение $m = 3,0$.

$$(\sigma_i / \sigma_k)^3 = N_k / N_i. \quad (3)$$

Таким образом, если определить характеристики напряженно-деформированного состояния материала конструкции для случая действия максимальных нагрузок рабочего цикла и выполнить нормирование результатов расчета значением напряжения, вызванного рабочим циклом в критическом сечении (сечении, где напряжение имеет максимальную величину), то можно получить характеристику относительной стойкости контрольных сечений конструкции к воздействию нагрузки рабочего цикла. Проведя эту работу для всех несущих элементов конструкции, получим функции распределения относительной стойкости сечений конструкции к воздействию нагрузки рабочего цикла.

Если теперь для какой-нибудь точки (сечения) определить характеристику полного ресурса (число рабочих циклов до появления разрушения или срок эксплуатации в конкретных характерных условиях до появления разрушения), то будут очевидными ресурсные характеристики любого расчетного сечения контрольного элемента конструкции.

$$N_i = N_k(\sigma_k / \sigma_i)^3. \quad (4)$$

В выражении (4) под N_i и N_k можно понимать как количество циклов эксплуатации, так и календарное время эксплуатации при неизменных параметрах модели эксплуатации.

Полный ресурс контрольного сечения – это количество эксплуатационных циклов, которое сечение вынесет до появления дефекта (разрушения, трещины), или период эксплуатации, по истечении которого в контрольном сечении появится дефект.

Выявив по данным обследований и эксплуатационным документам время появления первого усталостного разрушения в критическом сечении, получим оценку полного ресурса критического сечения в реальных условиях эксплуатации, характерных для конкретной конструкции с набором ее специфических характеристик. А с использованием полученной оценки и условия (4) можно оценить ресурсные характеристики любого сечения для соответствующих условий эксплуатации конструкции. Полученные оценки будут косвенно учитывать влияние всех возможных эксплуатационных факторов и специфических характеристик конкретной конструкции.

Оценка относительной стойкости контрольного сечения к воздействию эксплуатационных нагрузок циклического характера получается путем деления расчетных оценок напряжений, действующих в критическом и контрольном сечениях от

одной и той же нагрузки. Поэтому метод имеет невысокую чувствительность к точности выполнения расчетной оценки напряжений характерного эксплуатационного цикла (учета масштабного фактора, характера обработки поверхностей, влияния технологий изготовления и т.д.).

Остаточный ресурс контрольного сечения конструкции можно определить как разность полного ресурса этого сечения и текущей наработки на момент исследований.

Оценка остаточного ресурса ремонтных конструкций

Ремонт зоны усталостного дефекта заключается в частичном восстановлении несущей способности материала в месте непосредственного расположения дефекта и выполнении усиления. При этом внутри ремонтной зоны (при рационально выполненном ремонте) имеет место снижение уровня действующих напряжений. Для грубой оценки ресурсных характеристик достаточно принять условие о том, что материал дефектной зоны исключен из работы и не несет эксплуатационных нагрузок. Восприятие нагрузки в зоне ремонта полностью обеспечивается элементом усиления конструкции. В случае рационального ремонта критической с позиции ресурса оказывается зона крепления конструкции усиления. Ресурсные характеристики материала этой зоны рассчитываются с учетом имеющей место наработки и влияния концентратора, появившегося в результате крепления ремонтной детали, начальный (до производства ремонта) и остаточный ресурс конструкции сокращаются в результате ремонта пропорционально $(k_m)^3$. Расчет напряжений ремонтной детали усиления, вызванных рабочим циклом нагрузки, выполняется традиционными для материала, не имеющего повреждений, способами.

Если ремонт выполняется без усиления, то для оценки остаточного ресурса необходимо каким-либо методом оценить остаточную несущую способность материала в зоне дефекта, рассчитать значение k_m и по полученным данным вычислить остаточный ресурс.

В случаях, когда деталь ремонтного усиления не рассчитана на восприятие всей эксплуатационной нагрузки, следует использовать комбинацию упомянутых расчетных приемов. Необходимо рассчитать напряжения, вызванные действием эксплуатационного цикла, для каждой характерной зоны (отремонтированная зона дефекта, конструкция ремонтного усиления, зона крепления конструкции усиления к материалу ремонтируемой конструкции) с учетом действия характерных коэффициентов концентрации. По полученным данным следует рассчитать оценки остаточного ресурса для каждой зоны. Номинальной характеристикой остаточного ресурса отремонтированного сечения конструкции следует принять наименьшую из полученных оценок остаточного ресурса.

В заключение отметим, что в формулировках этой статьи использовано условие пессимистического прогноза, позволяющего определить минимальные вероятные значения ресурсных характеристик. При наличии исчерпывающих данных по геометрии, наличию и параметрам концентраторов в расчетных сечениях несущих элементов, необходимых характеристик материала конструкции изложенный подход позволяет получить более точную оценку ресурса критических сечений с использованием фактического значения кривой выносливости материала (m) данных трещиностойкости, влияния концентраторов напряжений, масштабного фактора и т.д.

Принятый подход позволяет прогнозировать последовательность появления разрушений усталостного характера в эксплуатации и выделять участки конструкции, где эти разрушения наиболее вероятны, прогнозировать время появления множественных усталостных разрушений, когда любой ремонт окажется не эффективным.

Позитивной особенностью этой методики, помимо относительной простоты, является возможность получения оценки остаточного ресурса конкретной грузоподъемной машины с особенностями ее конструкции и материалов в конкретных специфических условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справ. М.: Машиностроение, 1979. 704 с.
2. Кагаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчет деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справ. М.: Машиностроение, 1985. 223 с.
3. Коротких Ю.Г., Городов Г.Ф., Панов В.А., Бурмистров И.В., Пичков С.Н. Оценка выработанного и прогноз остаточного ресурса крановых конструкций с учетом усталостных повреждений // Безопасность труда в промышленности. 2002. № 12. С. 37–39.
4. Методические указания по определению остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов. Краны мостового типа. Проект документа / ЗАО ИЭП «Ратте», ЗАО «ТЭК СПб.». СПб., 2002. 40 с.
5. МР 108-7-86. Методические рекомендации. Оборудование металлургическое. Расчеты и испытания на прочность. Расчет коэффициентов интенсивности напряжений / ЦННИИТМАШ. М., 1986. 30 с.
6. Нейберг Г. Концентрация напряжений. М.; Л.: Гостехиздат, 1977. 204 с.
7. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. М.: Мир, 1977. 302 с.
8. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета на трещиностойкость металлоконструкций мостовых кранов при статическом и циклическом нагружении / РТМ Минтяжмаш-КОДАС. Л., 1999. 203 с.
9. РД 09-102-95. Методические указания по определению остаточного ресурса потенциально опасных объектов, поднадзорных Госгортехнадзору России / ПИО ОБТ. М., 1996. 32 с.
10. РД 24-112-5Р. Руководящий документ по оценке остаточного ресурса кранов мостового типа / ВНИИПТМАШ. М., 2002. 32 с.
11. СТО 24.09-5821-01-93. Краны грузоподъемные промышленного назначения. Нормы и методы расчета элементов стальных конструкций.

R.V. Puchnin, A.Ya. Kolmakov. Methods for Predicting the Remaining Life of Lifting Facilities Exposed to Cyclic Working Loads. A method for predicting the remaining life of metal carrier structures with fatigue defects revealed by advanced non-destructive control method is described. Methods that enable taking into account the impact of local stress concentrators and performed repairs on estimated resource characteristics of a critical metal structure are proposed.

Keywords: *cyclic loads, resource of a metal structure, remaining life of a structure, methods of remaining life assessment, function of a structure's resistance to cyclic loads, resistance of a structure to cyclic loads, resource assessment with allowance for the impact of stress concentrators, resource of repaired structure, resource assessment with allowance for made repairs.*

Пучнин Роман Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика», эксперт по грузоподъемным машинам ИПТТиПК. Область научных интересов: механика и прочность машин, экспертиза опасных производственных объектов, проектирование машин и оборудования, математика и математическое моделирование. E-mail: roman@stu.ru

Колмаков Анатолий Яковлевич – эксперт по грузоподъемным машинам ИПТТиПК. Область научных интересов: механика и прочность машин; экспертиза опасных производственных объектов; проектирование машин и оборудования, разработка датчиков, измерительных и контрольных систем.