

УДК 621.87:621.3.019.3

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ
ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН НА СТАДИИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТРЕЩИНЫ**

*канд. техн. наук, доц. А.Л. ЛИСОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)*

Применяемые методики оценки остаточного ресурса металлоконструкций грузоподъемных машин, даже утвержденных нормативными документами, не в полной мере учитывают процессы старения, возникающие при эксплуатации грузоподъемных кранов. Предлагается более четкая методика оценки остаточного ресурса металлических конструкций грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы. Показан расчет пороговых характеристик эволюции сформированной структуры с учетом влияния характера цикловой нагрузки на грузоподъемную машину. Приведены методики расчета предела выносливости с учетом диаграммы предельных напряжений цикла и критических характеристик металла в зависимости от срока службы и температуры эксплуатации. Оценив продолжительность стадии зарождения микротрещины с расчетом количества циклов развития микротрещины, можно рассчитать полный и остаточный ресурс работы металлоконструкции грузоподъемного крана. Предлагаемая методика позволяет с учетом структурных изменений в металле более точно оценивать остаточный ресурс грузоподъемных кранов, работающих на строительных объектах.

Введение. Износ парка грузоподъемных машин в Республике Беларусь составляет 70...80 %, в Витебской области – 80...90 %. Определение механических характеристик металла неразрушающим методом при оценке остаточного ресурса грузоподъемных кранов – важная народнохозяйственная задача, так как замена их, особенно в условиях мирового финансового кризиса, тяжелая для многих предприятий задача. Выпускаемая в Республике Беларусь номенклатура кранов крайне ограничена, закупка импортных – не рентабельна ввиду их дороговизны.

Аналитический обзор. Применяемые варианты оценки позволяют контролировать любые участки конструкций без их разрушения, в том числе в местах наибольших силовых воздействий, как в основном металле, так и в сварных швах без отбора проб металла и изготовления образцов для механических испытаний.

Определение расчетного сопротивления материала определяется по результатам измерения твердости. Твердость определяется твердомерами (например, ТЭМП-2), прошедшими метрологическую аттестацию соответствующих шкал измерения (например, по НВ). Поверхность контролируемого участка должна быть зачищена с обеспечением параметра шероховатости не более $Ra\ 2,5$ мкм. Для получения корректных результатов измерения твердости минимальное расстояние между точками измерений (отпечатками) должно быть не менее 3 мм. Повторные измерения в одной и той же точке не допускаются. На контролируемом участке должно быть не менее десяти стабильных измерений.

В зависимости от измеренной твердости материала на момент технического диагностирования выполняется сравнение результата с допустимым интервалом значений, оценивающих состояние материала, по формуле:

$$0,8 \leq \frac{R_{yn}^{insp}}{R_{yn}} \leq 1,2,$$

где R_{yn}^{insp} – усредненное значение предела текучести материала при диагностировании, взятое из наиболее стабильных ее показателей (не менее 10), определяемое неразрушающим способом по твердости; R_{yn} – предел текучести материала в исходном состоянии (ГОСТ, ТУ, сертификат или проектная марка исследуемой конструкции), МПа.

Дополнительные особенности оценки остаточного ресурса кранов мостового типа экспертным методом. При оценке остаточного ресурса кранов мостового типа экспертным методом руководствуются следующим [1]:

- для кранов групп классификации А1 – А2 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и сроке службы стальных канатов не менее 15 лет, средней периодичности замены (или капитального ремонта) узлов механизмов не менее 20 – 30 лет, при удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п. назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 25 лет;

- для кранов групп классификации А1 – А2 при невыработанном паспортном ресурсе крана (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не менее 10 лет, средней периодичности замены (или капитального ремонта) узлов механизмов не менее 10 – 15 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п. назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 15 лет;

- для кранов групп классификации А1 – А2 при превышении календарной наработки паспортного ресурса сверх установленной предельной нормы возможно назначить календарный остаточный ресурс экспертным методом до 15 лет;

- для кранов групп классификации А1 – А2 при превышении календарной наработки паспортного ресурса на 50 % и более сверх установленной предельной нормы возможно назначить календарный остаточный ресурс экспертным методом до 5 лет;

- для кранов группы классификации А3 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не менее 7,5 лет, средней периодичности замены (капитального ремонта) узлов механизмов не менее 10 – 15 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п. назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 20 лет;

- для кранов группы классификации А3 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не менее 5 лет, средней периодичности замены (капитального ремонта) узлов механизмов не менее 7,5 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п. назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 10 лет;

- для кранов группы классификации А3 при превышении наработки паспортного ресурса сверх установленной предельной нормы возможно назначение календарного остаточного ресурса экспертным методом до 15 лет, при условии подтверждения этого соответствующим усталостным расчетом;

- для кранов группы классификации А3 независимо от наработки при наличии отремонтированных трещин усталостного характера (новых или ранее обнаруженных) обязательна проверка конструкции с применением методов неразрушающего контроля, а также при подтверждении этого соответствующим усталостным расчетом. При положительных результатах проверки возможно назначение календарного остаточного ресурса экспертным методом до 7,5 лет;

- для кранов групп классификации А4 – А5 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не менее 3 лет, средней периодичности замены (капитального ремонта) узлов механизмов не менее 5 – 10 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п., назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом на момент проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 20 лет;

- для кранов групп классификации А4 – А5 при невыработанном паспортном ресурсе кранов (с учетом ранее назначенных продлений) и соответствии срока службы стальных канатов сроку не менее 1,5 лет, средней периодичности замены (капитального ремонта) узлов механизмов не менее 5 – 8 лет, удовлетворительном качестве технического обслуживания в эксплуатации механизмов, крановых путей и т.п. назначенный календарный остаточный ресурс экспертным методом с момента проведения оценки (по сравнению с установленным по данным паспорта кранов) должен быть до 10 лет;

- для кранов групп классификации А4 – А5 при превышении наработки паспортного ресурса сверх установленной предельной нормы возможно назначение календарного остаточного ресурса экспертным методом до 10 лет при условии подтверждения этого соответствующим усталостным расчетом;

- для кранов групп классификации А4 – А5 независимо от наработки при наличии отремонтированных трещин усталостного характера (новых или ранее обнаруженных) обязательна проверка конструкции с применением методов неразрушающего контроля, а также при подтверждении этого соответствующим усталостным расчетом. При положительных результатах проверки возможно назначение календарного остаточного ресурса экспертным методом до 5 лет.

Балльная методика определения остаточного ресурса кранов мостового типа. При определении остаточного ресурса несущих металлических конструкций кранов владелец сообщает комиссии ориентировочный срок, на время которого предполагается продолжить эксплуатацию кранов и который должен быть затем включен во все последующие расчеты. При отсутствии предложений со стороны владельца крана указанный срок назначает комиссия, выполняющая оценку остаточного ресурса.

Владелец кранов также обязан предоставить сведения об ожидаемых условиях использования кранов на назначенный срок последующей эксплуатации, в том числе: данные о загрузке кранов; сведения о

структуре типового цикла работы кранов; характеристику среды (степень агрессивного воздействия, температурные и другие условия). В соответствующих случаях предоставляются также сведения о возможном климатическом воздействии на металлические конструкции и о сейсмичности площадки установки кранов.

На основании данных технического диагностирования экспертным путем предварительно оценивают возможность продления срока службы кранов на назначенный период. В случае выявления такой возможности разрабатывают план проведения работ, который должен учитывать как фактическое состояние конструкций, так и предполагаемые условия эксплуатации кранов.

С учетом фактического состояния металлоконструкций выполняют проверку на сопротивление усталости на назначенный период. В том случае если определенный ресурс окажется недостаточным, допускается выполнить расчет с учетом возможности образования трещин. Эти расчеты следует вести с учетом данных о фактических характеристиках материала наиболее нагруженных элементов (возможным изменением свойств металла вследствие механических и химических воздействий).

Несущие элементы металлических конструкций (основные сечения **поясных листов и стенок коробчатых пролетных балок и/или стойки опор**, а также пояса решетчатых ферм), в которых выявлены усталостные повреждения, также рекомендуется проверять расчетом на трещиностойчивость. Ресурс элементов, напряженное состояние которых не может быть с достаточной степенью достоверности оценено с применением существующих нормативных методик, в случае необходимости допускается оценивать экспертным путем с использованием результатов оценки фактических свойств металла наиболее нагруженных участков элементов.

Для элементов кранов фактические величины возникающих при их работе напряжений могут быть также определены и экспериментальным путем.

При оценке величины остаточного ресурса следует учитывать также возможность роста остаточных деформаций (в элементах металлических конструкций, для которых предусмотрены соответствующие ограничения). В состав заключения об остаточном ресурсе кранов в необходимых случаях включают рекомендации как по проведению ремонта кранов, так и по выполнению мероприятий, направленных на ограничение нагружения элементов металлических конструкций кранов (оснащение кранов ограничителем грузоподъемности, приводами для более плавного регулирования скоростей и т.п.). В обоснованных случаях при состоянии крановых путей, близком к предельному, это влияние также должно быть учтено в оценке остаточного ресурса.

Для кранов мостового типа необходимость оценки остаточного ресурса по состоянию металлоконструкций допускается проводить по балльной системе. При этом каждый дефект в расчетных элементах металлоконструкций и основных сечениях поясных листов и стенок коробчатой пролетной балки и/или стойки опоры, а также на одном из поясов решетчатой фермы и в тех элементах, которые ранее подвергались ремонту, оценивается в баллах согласно таблице 1 и в зависимости от причины его возникновения может быть отнесен к одной из 3-х групп:

- 1) дефекты изготовления и монтажа (дефекты сварных швов, деформаций полученные при монтаже и др.);
- 2) дефекты, возникшие вследствие грубого нарушения нормальной эксплуатации (перегрузка, удар крана о какое-либо препятствие и т.п.);
- 3) дефекты, возникшие в условиях нормальной эксплуатации при отсутствии первоначальных недостатков изготовления и монтажа.

Таблица 1

Виды дефектов	Характеристика дефектов		
	Дефекты изготовления или монтажа	Дефекты, возникшие из-за грубого нарушения нормальной эксплуатации	Дефекты, возникшие при нормальной эксплуатации
	Количество баллов		
1. Нарушение лакокрасочного покрытия	0,5		
2. Коррозия ответственных элементов: до 5 % толщины элемента включительно; до 10 % толщины элемента включительно; свыше 10 % толщины элемента	Возникновение подобного дефекта маловероятно	0,214	
3. Трещины, разрывы в швах или в околошовной зоне	Возникновение больших трещин маловероятно	1	4
4. Трещины-разрывы в зонах, удаленных от сварных швов	Возникновение больших трещин маловероятно	1	5

Решение о необходимости оценки остаточного ресурса в условиях дальнейшей эксплуатации кранов по состоянию металлоконструкций принимает комиссия с учетом следующих рекомендаций:

- при суммарном числе баллов не более 3 остаточный ресурс может не оцениваться;
- при суммарном числе баллов более 3, но менее 5, кран после выполнения соответствующих оценок и проведения ремонта, как правило, может эксплуатироваться с паспортной грузоподъемностью в течение срока, на который оценивался его остаточный ресурс;
- при суммарном числе баллов от 5 до 10 включительно, в случае если имеются отдельные дефекты, оцененные не менее 3 баллами, грузоподъемность крана, как правило, должна быть снижена не менее чем на 25 %, а кран переведен в более низкую режимную группу;
- при суммарном числе баллов более 10 кран подлежит снятию с эксплуатации и списанию либо должен быть подвергнут ремонту с заменой дефектного узла.

Балльная методика определения остаточного ресурса стреловых самоходных кранов общего назначения. Остаточный ресурс должен определяться в зависимости от вида ведущего повреждения по критериям: усталости, коррозии, износа (если имеется). Остаточный ресурс по критерию усталости должен определяться при первичном и повторных технических диагностированиях. При этом на ограниченную усталость от действия нагрузок рабочего состояния должны быть проверены расчетным путем:

- основная стрела и элементы ее крепления;
- выносные опоры;
- другие узлы специальных шасси, на которые передаются нагрузки во время работы кранов.

Допускается для стреловых кранов грузоподъемностью до 50 т определять возможность их дальнейшей эксплуатации по состоянию металлоконструкций и производить это по балльной системе. Оцениваются лишь несущие металлоконструкции. Лестницы, площадки, ограждения и т.п. во внимание не принимаются. Каждый дефект, требующий ремонта, должен быть в зависимости от причины его возникновения отнесен к одной из трех групп:

- 1) дефекты изготовления и монтажа (дефекты сварных швов, деформации, полученные при монтаже и др.);
- 2) дефекты, возникшие вследствие грубого нарушения нормальной эксплуатации (перегрузка, удар грузом о стрелу, удар крана о какое-либо сооружение, опрокидывание крана и т.д.);
- 3) дефекты, возникшие в условиях нормальной эксплуатации при отсутствии недостатков изготовления и монтажа (к этой группе относятся все дефекты, не вошедшие в первые две группы, в том числе и дефекты, возникающие вследствие ошибок при проектировании).

Каждому дефекту соответствует определенное количество баллов, определяемое по таблице 2.

Таблица 2

Оценка дефектов в баллах [1]

Виды дефектов	Характеристика дефектов		
	Дефекты изготовления или монтажа	Дефекты, возникшие из-за грубого нарушения нормальной эксплуатации	Дефекты, возникшие при нормальной эксплуатации
	Количество баллов		
1. Нарушение лакокрасочного покрытия	0,5		
2. Коррозия ответственных элементов: - до 5 % толщины элемента включительно; - до 10 % толщины элемента включительно; - свыше 10 % толщины элемента	0,2 1 10		
3. Трещины, разрывы в швах или в околосшовной зоне	1	1	4
4. Трещины-разрывы в зонах, удаленных от сварных швов	1	1	5
5. Ослабление болтовых соединений, в которых болты работают на растяжение (а также износ резьбы винтовых опор)	0,5	0,5	1
6. Ослабление болтовых соединений, в которых болты работают на срез	2		
7. Деформации элементов решетчатых конструкций, превышающие предельные значения: пояса, элементов решетки	1 0,5	2,5 1	5 2
8. Деформации элементов листовых конструкций, превышающие предельные значения	1	1,5	5
9. Расслоение металла	5		
10. Смятие проушин и выработка отверстий в шарнирах, превышающие предельные значения	1	1,5	3
11. Любые дефекты, возникшие в месте предыдущего ремонта	1	2	5

Решение о возможности дальнейшей эксплуатации принимает комиссия с учетом следующих рекомендаций:

- при суммарном числе баллов менее 5 после ремонта кран может эксплуатироваться с паспортной грузоподъемностью;
- при суммарном числе баллов от 5 до 10 включительно в случаях, когда имеются дефекты не менее 3 баллов, грузоподъемность крана после ремонта на всех вылетах должна быть снижена не менее чем на 25 % (кран должен быть переведен в более низкую размерную группу) и к паспорту приложены соответствующие грузовые характеристики, а ограничитель грузоподъемности (ОГП) соответственно должен быть перенастроен (в необходимых случаях должен быть уменьшен противовес);
- при суммарном числе баллов более 10 кран подлежит снятию с эксплуатации и списанию либо должна быть произведена замена дефектного узла.

Однако методики оценки ресурса расчетом на трещиностойчивость методическими рекомендациями не предлагаются.

Прочность и надежность сварных конструкций в значительной степени зависят от особенностей технологического процесса сварки, которые проявляются в изменении физико-механических свойств определенных зон сварного соединения, в создании собственных полей напряжений и технологических концентраторов напряжений. Указанные факторы могут привести к существенной потере несущей способности сварных конструкций, а степень их негативного влияния определяется параметрами нагружения и условиями эксплуатации конкретных элементов конструкций. Поэтому при диагностировании кранов необходимо проводить расчетные оценки влияния технологической наследственности на ресурс тяжело нагруженных сварных объектов.

В [2] рассматриваются методы и алгоритмы расчета продолжительности стадии зарождения и стадии стабильного развития макротрещины при поличастотном нагружении. Обсуждаются вопросы взаимодействия собственных и рабочих напряжений при различных схемах нагружения, даются методы расчета концентрации напряжений и их влияние на различные стадии процесса разрушения.

Расчет пороговых характеристик. Конструктивные критерии прочности разделяются на пороговые (пороговые коэффициенты интенсивности напряжений K_{thR} , K_{thRr} , предел усталости σ_{FR}) и критические (K_{IC} , σ_{IC} – критическое раскрытие трещины).

$$K_{th} = \sqrt{\frac{R_{MSe} \cdot D \left(\frac{1}{m}\right)^{4\pi d_{cmp}}}{\sigma_T \left(\frac{1}{m}\right)^{1,7}}}, \quad (1)$$

где d_{cmp} – это структурный параметр, определяющий свойства пластически сформированной структуры. Величина этого параметра зависит от эволюции структуры в процессе деформирования и механизма микроскола.

Для малоуглеродистых сталей при зеренном механизме микроскола $d_{cmp} \approx d_3 / 2,7$. При цементитном микромеханизме скола d_{cmp} имеет порядок характерного размера блока перлитной колонии, у которой кристаллографическая направленность цементитной и ферритной фазы совпадает.

Коэффициент перенапряжения D , учитывающий повышение σ_1 , в случае сложного напряженного состояния рассчитывается по формуле:

$$K_{th} = \frac{(1+m) \cdot (1-2\mu)}{2}. \quad (2)$$

Коэффициент упрочнения m рассчитывается по зависимости:

$$m = 0,75 \left\{ \frac{\lg \left[\frac{\sigma_e}{\sigma_{02}} + 1,4\varphi_k \right]}{\lg \left[\left(10^5 \ln \frac{1}{1-\varphi_k} \right) / 200 + 0,5\sigma_{02} \right]} \right\},$$

где φ_k – поперечное сужение.

Известно, что для материалов, обладающих большим запасом пластичности, в вершине трещины развиваются значительные деформации. Поэтому в зоне предразрушения образуется фрагментированная структура, наиболее вероятный размер которой в 2,6...2,8 раза меньше размера зерна. Эти размеры фрагментированной структуры согласуются с экспериментальными данными работы по определению сопротивляемости микросколу для гомогенных материалов [3; 4].

Максимальное значение сопротивления разрыву R_{MCe} для указанных материалов примерно в 1,6...1,65 раза больше временного сопротивления разрыву R_{MC} недеформированного металла.

Так как для сталей, которые ведут себя как гомогенные материалы, $R_{MC} = 5,7d_3^{-1/2}$, где d_3 – размер зерна, то, принимая $d_{cmp} = d_3' / (2,6...2,8)$, получим

$$R_{MCe} \approx 1,6...1,7 .$$

Эксперименты на большой группе углеродистых и малолегированных сталей позволили установить взаимосвязь между R_{MC} и относительным поперечным сужением в виде:

$$R_{MC} = \sigma_{sp} \frac{1}{1 - \phi^2} .$$

Результаты многочисленных экспериментов [3] показывают, что коэффициент асимметрии цикла и пороговый размах коэффициента интенсивности напряжений связаны линейной зависимостью до значений $r = 0,8$. При $r > 0,8$ пороговые значения ΔK_{thr} практически остаются постоянными. Поэтому указанная зависимость аппроксимируется выражением:

$$\Delta K_{thr} = K_{th0} + r/0,8 \cdot \Delta K_{th0,8} - K_{th0} , \quad (3)$$

где

$$\Delta K_{th0,8} = 3 \left[\text{МПа} \cdot m^{1/2} \right] - 0,0008 \left[m^{1/2} \right] \cdot \sigma_T . \quad (4)$$

Расчет предела выносливости. Возможность аналитических оценок предела выносливости металла σ_{Fr} обеспечивает его теоретическое определение при любых параметрах цикла нагружения:

$$\sigma_{Fr} = \sigma_{fc} \left[\pi l \frac{\sigma_{fc}^2}{K_{thr}^2} + 1 - \mu + \mu^2 \right]^{-0,5} , \quad (5)$$

где G_{Fr} – предел выносливости; l – длина трещины; σ_{fc} – циклический предел текучести ($\sigma_{fc} = 0,7\sigma_T$); μ – коэффициент Пуассона; K_{thr} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений при соответствующей асимметрии цикла.

Модифицируем уравнение (5), подставив в него вместо K_{thr} выражение

$$K_{thr} = \frac{\Delta K_{thr}}{1 - r} , \quad (6)$$

где ΔK_{thr} – предельный размах коэффициента интенсивности напряжений, получим

$$\sigma_{Fr} = 0,7\sigma_{fc} \left[\pi l \frac{0,49 \cdot \sigma_T^2 (1 - r)^2}{\Delta K_{thr}^2} + 1 - \mu + \mu^2 \right]^{-0,5} . \quad (7)$$

Так как ΔK_{th0} при отнулевом цикле ($r = 0$) согласно (6) равен K_{th0} , а K_{thr} рассчитывается по формуле (1), то используя (1), (5), (3) и (4), можно рассчитать предел выносливости для любой асимметрии цикла.

При изменении параметров нагружения – среднего напряжения (σ_m) и коэффициента асимметрии цикла (Ra), например, при переходе от симметричного цикла к отнулевому становятся иными пределы выносливости и пределы ограниченной выносливости. Зависимость пределов выносливости от среднего напряжения цикла и коэффициента асимметрии цикла обычно отражается графически в виде диаграммы.

Применительно к сварным конструкциям наибольшее распространение получила диаграмма, отражающая зависимость между значениями предельных напряжений σ_{max} , σ_{min} и значениями средних напряжений цикла σ_m (рис. 1). По оси ординат диаграммы откладывают значения предельных максимальных и минимальных напряжений цикла, а по оси абсцисс – соответствующие средние напряжения цикла. На схематизированной диаграмме это точки A и B и C и D . Соединяя их, получим ветви диаграммы предельных напряжений, которые сходятся в точке F , отвечающей прочности при однократном статическом нагружении. Часто строят только верхнюю ветвь диаграммы, которая характеризует изменение пределов выносливости σ_{FR} от среднего напряжения цикла σ_m . Точки, лежащие ниже кривой ABC , характеризуют те сочетания напряжений σ_m и σ_{max} , которые не вызывают разрушений образцов до базового числа циклов N_0 . Выше кривой $ABCD$ разрушение происходит при $N < N_0$. Соответственно, точки A и A^* ,

B и B^* , C и C^* равноудалены от луча OF , проведенного из начала координат под углом 45° . Ординатами этого луча являются средние напряжения цикла. Расстояние между ветвями диаграммы равно предельным размахам напряжений, а отрезки по вертикали между лучом AF и ветвью диаграммы – предельным амплитудам циклов. Луч, проходящий через начало координат диаграммы, является геометрическим местом точек, характеризующих циклы с одинаковыми коэффициентами R_a , причем $tg\beta = \sigma_{max} / \sigma_m = 2 / (R_a + 1)$. Нанесение лучей, отвечающих различным R_a , облегчается, если в верхней части диаграммы провести дополнительную горизонтальную ось. Ее отрезок от оси ординат до луча OF может служить шкалой значений коэффициента асимметрии цикла напряжений от -1 до $+1$.

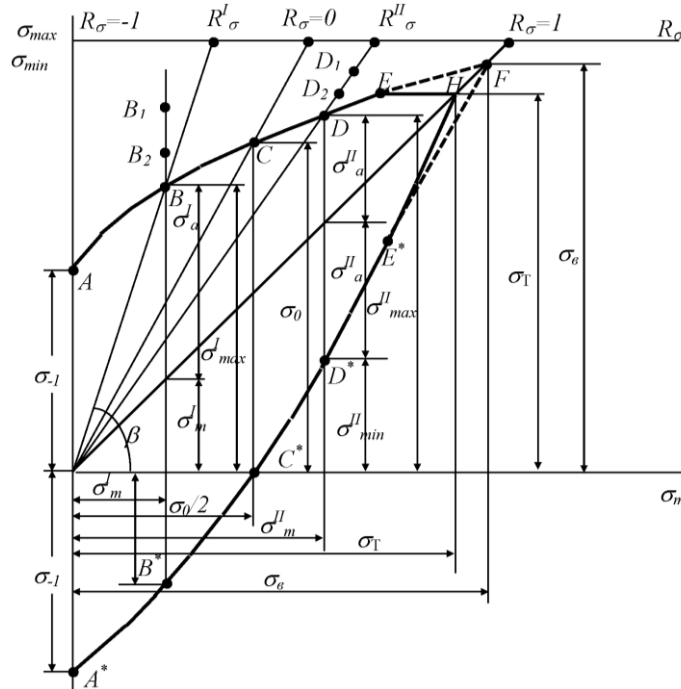


Рис. 1. Диаграмма предельных напряжений цикла

Диаграмму можно строить различными способами. Если имеются заранее построенные кривые усталости, отвечающие различным значениям R_σ (или σ_m), то установленные при этом значения пределов выносливости наносят на диаграмму (точки A, B, C, D). Предельные значения σ_{min} (для нанесения точек A^*, B^*, C^*, D^*) получают умножением σ_{max} на R_σ . При статическом нагружении предельным состоянием обычно принимают предел текучести материала, поэтому верхнюю часть диаграммы ограничивают отрезками EH и E^*H .

Без предварительного построения отдельных кривых усталости величины амплитуд каждого испытанного образца σ_a откладывают непосредственно на диаграмме от луча OF по вертикали, абсцисса которой равна среднему напряжению цикла. Таким образом получают точки B_1, B_2, B_n , отвечающие разрушенным образцам, и точку B , характеризующую амплитуду σ_a^I , при которой не наблюдалось разрушение образцов до заданной базы испытаний при среднем напряжении цикла σ_m^I .

При другом способе испытаний, основанном на сохранении неизменным значения коэффициента асимметрии цикла (R''_σ), точки, отвечающие максимальным напряжениям цикла σ_{max} (D_h, D_2, D_n), наносятся на луч R''_σ . Диаграммы, построенные рассмотренными способами, не отличаются друг от друга.

Построение диаграммы предельных напряжений связано обычно с выполнением большого объема экспериментальных исследований. И поэтому на практике для их построения часто ограничиваются определением пределов выносливости только при двух значениях коэффициента асимметрии цикла (например, при -1 и 0 , или -1 и $+1$), полагая, что при других его значениях пределы выносливости изменяются, следуя линейному закону. Это обстоятельство естественным образом снижает точность инженерных расчетов, особенно при расчетах, связанных с реальными сварными конструкциями. Кроме того, традиционные способы построения рассматриваемых диаграмм требуют вырезки образцов из реальных конструкций, что в большинстве случаев недопустимо. Аналитический метод расчета предела выносливости, изложенный нами в настоящем разделе, позволяет выполнить построение полных диаграмм предельных напряжений и предельных амплитуд расчетным путем.

Расчет критических характеристик. Критический коэффициент концентрации напряжений вычисляется по формуле:

$$K_{1C} = \sqrt{\frac{R_{Mce} \cdot D^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \cdot \pi \cdot 6,18d_3}{q^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \cdot \sigma_T^{\left(\frac{1}{m}+1\right)}}, \quad (8)$$

где $q = 1 - \frac{2}{\sqrt{3}} D$.

При оценке прочностных свойств материалов, либо элементов конструкций часто используют критерий σ_{1C} (критическое раскрытие трещины – КРТ). Критерий КРТ связан с K_{1C} известной в механике разрушения зависимостью

$$\delta_{1C} = \lambda \frac{K_{1C}^2}{E\sigma_T}. \quad (9)$$

Для определения δ_{1C} по (9) необходимо найти коэффициент λ . Учитывая приведенные выше результаты, примем, что критический скачок трещины равен $0,618d_3$. Кроме того, воспользуемся известным постулатом о том, что размеры зоны максимального повреждения материала в направлении раскрытия трещины приблизительно одного порядка. Тогда для критической ситуации в точке $0,618d_3$ от вершины трещины можно записать

$$\frac{D^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} R_{Mce}^{\left(\frac{1}{m}+1\right)}}{q^{\left(\frac{1}{m}+1\right)}} = \frac{\sigma_T^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \cdot (1-2\mu)^2}{2\pi \cdot 0,618\delta_{1C}} \cdot K_{1C}. \quad (10)$$

Из (9) и (10) получим

$$\lambda = \frac{q^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \cdot \sigma_T^{\frac{1}{m}} \cdot (1-2\mu)^2 E}{R_{Mce}^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \cdot 1,24\pi D^{\left(\frac{1}{m}+1\right)}}. \quad (11)$$

При проведении обследования напряженных конструкций важно оценить степень изменения основных механических характеристик металла в зависимости от срока службы и температуры эксплуатации. Особенно это касается сварных металлоконструкций теплоэнергетического оборудования, работающих при высоких температурах, и других объектов, долгое время находящихся в эксплуатации.

Ленинградской школой С.Н. Журкова развита кинетическая теория прочности твердых тел, которая основывается на зависимости, связывающей долговечность материала под нагрузкой τ , величину растягивающих напряжений σ и температуру T :

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{u_0 - \gamma\sigma}{RT}\right), \quad (12)$$

где τ_0 , u_0 и $\gamma\sigma$ – постоянные коэффициенты, определяющие прочностные свойства данного материала; R – универсальная газовая постоянная.

Величина u_0 выступает в роли активационного барьера, преодоление которого необходимо для разрыва колеблющимся в решетке атомом связи с соседями, u_0 – исходный барьер. Феноменологический параметр γ несет всю информацию о структуре материала, константа $m = 10^{13}$ близка к периоду тепловых колебаний атомов в твердых телах.

Из (12) выразим σ_p в явном виде

$$\sigma_p = \frac{1}{\gamma} \left(u_0 - RT \ln \frac{\tau}{\tau_0} \right). \quad (13)$$

Согласно (13) прочность твердых тел должна убывать с увеличением времени нагружения по логарифмическому закону. С использованием (13) предложена формула, с помощью которой, не определяя параметра γ (который определить весьма сложно), можно оценить понижение сопротивления микросколу для сплавов железа. Если принять временную базу равной 10^{10} с, то можно записать

$$\frac{R_{MC} 10 - R_{MC} 10^{10}}{R_{MC} 10} = \frac{RT \ln 10^{10} - \ln 10}{u_0 - RT \ln \frac{10}{10^{-13}}} = \frac{2,3 \cdot 9RT}{u_0 - 2,3RT \ln 10^{14}} = \frac{20,7RT}{u_0 - 32,2RT}. \quad (14)$$

Вместо u_0 надо подставить значение энергии сублимации железа $Q_0 = 407400$ Дж/моль. Для комнатной температуры ($T = 300$ К) получаем

$$\frac{\Delta R_{MC}}{R_{MC} 10} = \frac{20,7 \cdot 8,4 \cdot 300}{407400 - 32,2 \cdot 84 \cdot 300} \approx 0,16. \quad (15)$$

Иначе говоря, за время 10^{10} с (300 лет) R_{MC} стали уменьшилось на 16 %. Как следует из (14), температура весьма сильно влияет на изменение R_{MC} . Температура 470...570 К (которая является рабочей для котлов высоких параметров) существенно изменяет R_{MC} даже за 30...50 лет эксплуатации.

Взаимосвязь между временным сопротивлением разрыву R_{MC} и относительным поперечным сужением в виде

$$R_{MC} = \sigma_{ep} \frac{1}{1 - \varphi^2}, \quad (16)$$

или

$$\sigma_e = R_{MC}(1 - \varphi^2). \quad (17)$$

Согласно (17) временное сопротивление зависит от двух параметров: от R_{MC} и φ , которые могут меняться в течение срока эксплуатации. Изменение можно оценить, используя зависимость (14). Тенденцию изменения определим из следующих соображений. В процессе эксплуатации идет накопление повреждений, которые представляют собой микрополости, способные снижать подвижность дислокаций, так как являются для них непреодолимыми барьерами. Поэтому показатель относительного сужения у работающего длительное время металла должен уменьшаться или, по крайней мере, не увеличиваться. Если в (17) принять, что φ не изменяется, а вместо R_{MC} подставить значение $(R_{MC} - A \cdot R_{MC})$, то снижение σ_e можно будет оценить по зависимости:

$$\sigma_e \tau, T = \left[R_{MC} - \frac{R_{MC} RT \ln 10^x}{U_0 - 32,2 RT} \right] \cdot (1 - \varphi^2), \quad (18)$$

где $\ln 10^x$ – время наработки.

Изменение пороговых и критических характеристик в процессе эксплуатации можно оценить, используя соответственно зависимости (1), (5), (8), (9) и формулу (14). Отметим, что в указанных формулах в качестве одного из определяющих параметров выступает предел текучести. Поэтому следует обсудить тенденции изменения предела текучести при различных режимах нагружения. Известно, что при многоциклового усталости предел текучести практически не изменяется. Это связано с тем, что при многоциклового усталости не происходит макродеформаций, охватывающих конгломераты зерен. Накопление повреждений при напряжениях ниже предела текучести происходит в локальных областях, примыкающих к границам зерен, поэтому статистические характеристики средних размеров зерен при многоциклового нагружении практически не изменяются, что объясняет незначительные изменения предела текучести.

Используя (1), запишем выражение для оценки величины изменения K_{th} в зависимости от температуры и времени работы:

$$K_{th} \tau, T = \sqrt{\frac{\left\{ 1,62 \left[R_{MC} - \frac{R_{MC} RT \ln 10^x}{U_0 - 32,2 RT} \right] \cdot D \right\}^{\left(\frac{1}{m} + 1\right)} \cdot 4\pi d_{cmp}}{1,7 \cdot \sigma_T^{\left(\frac{1}{m} - 1\right)}}}. \quad (19)$$

Для K_{1C} можно записать аналогичную зависимость:

$$K_{1C} \tau, T = \sqrt{\frac{\left\{ 1,62 \left[R_{MC} - \frac{R_{MC} RT \ln 10^x}{U_0 - 32,2 RT} \right] \cdot D \right\}^{\left(\frac{1}{m} + 1\right)} \cdot 6,18\pi d_3}{\sigma_T^{\left(\frac{1}{m} - 1\right)} \cdot q^{\left(\frac{1}{m} + 1\right)}}}. \quad (20)$$

Таким образом, полученные зависимости характеризуют закономерности снижения сопротивляемости металла разрушению в процессе работы. Отметим, что при малоциклового нагрузке, когда амплитудные напряжения σ_a выше предела текучести σ_T , последний у многих материалов существенно изменяется и зависимости (19), (20) надо модифицировать, вводя в них текущее значение σ_T .

Оценка продолжительности стадии зарождения макротрещины. Процесс усталостного разрушения обычно разделяют на две стадии, продолжительность которых является основными составляющими ресурса изделия: образование макротрещины и устойчивое ее развитие до критических размеров.

Первая стадия процесса усталостного разрушения характеризуется накоплением рассеянных по множеству микроскопических объемов повреждений, приводящих к развитию системы микротрещин, которая в конечном счете образует одну или несколько макротрещин в наиболее опасных сечениях. Описать коллективное развитие системы микротрещин с помощью структурно-физических моделей чрезвычайно сложно. Вследствие этого для оценки продолжительности первой стадии целесообразно использовать полуэмпирические модели, параметры которых можно рассчитать по сведениям о фактической поврежденности металла обследуемого элемента конструкции объекта. Основу предлагаемого расчетного метода составляет гипотеза накопления повреждений, предложенная Генри, согласно которой поврежденность при усталости может быть определена как отношение величины уменьшения предела выносливости к пределу выносливости исходного материала:

$$D = \sigma_{Fr}^0 - \sigma_{Fr} / \sigma_{Fr}^0, \quad (21)$$

где D – поврежденность; σ_{Fr} , σ_{Fr}^0 – пределы выносливости исходного и поврежденного металла соответственно.

При формулировке гипотезы Генри предполагается также, что кривая усталости может быть аппроксимирована выражением:

$$N = \frac{k}{\sigma - \sigma_{Fr}^0}, \quad (22)$$

где σ – амплитуда приложенного напряжения; k – постоянная материала; N – количество циклов до появления макротрещины. При накоплении повреждений форма кривой усталости не меняется

$$N = \frac{k'}{\sigma - \sigma_{Fr}}, \quad (23)$$

где N_r – оставшееся количество циклов до разрушения.

Отсюда соотношение N_r/N , определяющее долю остаточного ресурса

$$\frac{N_r}{N} = \frac{\sigma_{Fr}(\sigma - \sigma_{Fr}^0)}{\sigma_{Fr}^0(\sigma - \sigma_{Fr})}. \quad (24)$$

Рассчитав количество циклов развития макротрещины от своего минимального размера до критического и используя (24), можно рассчитать полный и остаточный ресурс элементов конструкций при любых параметрах нагружения и для любой поврежденности металла, полученной на первой стадии. При расчете полного ресурса вместо N_r , подставив количество циклов развития макротрещины N_{II} , получим

$$N_I = \frac{N_{II} [\sigma_{Fr}^0 \cdot (\sigma - \sigma_{FrL}) - \sigma_{FrL} \cdot (\sigma - \sigma_{Fr}^0)]}{\sigma_{FrL} \cdot (\sigma - \sigma_{Fr}^0)}, \quad (25)$$

где N_I , N_{II} – ресурс первой и второй стадий разрушения соответственно; σ_{Fr} – предел выносливости металла с трещиной, равной минимальному размеру макротрещины. При наличии поврежденности металла остаточный ресурс для первой стадии рассчитывается по зависимости:

$$N_r = \frac{N_{II} [\sigma_{Fr} \cdot \sigma - \sigma_{FrL} - \sigma_{FrL} \cdot \sigma - \sigma_{Fr}]}{\sigma_{FrL} \cdot \sigma - \sigma_{Fr}}. \quad (26)$$

Расчет пределов выносливости σ_{Fr} для различных параметров нагружения осуществляется в соответствии с формулами (3) – (7). Как следует из указанных зависимостей, для определения σ_{Fr} необходимо знание длины микротрещины, которая влияет на предел выносливости.

В области малых трещин существует такой размер микротрещины (l_0), меньше которого трещины не влияют на предел выносливости. Для различных гипотез текучести при многоосном нагружении:

$$l_0 = (0,03 \dots 0,1) \cdot (K_{th} / \sigma_T)^2, \quad (27)$$

где 0,03 и 0,1 – коэффициенты для гипотез Хубера – Мизеса и Сен-Венана – Треска соответственно.

Так как трещина размером l_0 не изменяет предел выносливости, то можно принять, что такие трещины имеют место в исходном материале, и предел выносливости неповрежденного металла нужно вычислять по формуле (5), подставляя вместо l значение l_0 , рассчитанное по (27). При повреждении металла развивается система микротрещин, которая характеризуется определенным законом распределения. Функцию распределения l для поврежденного металла необходимо находить экспериментально, используя неразрушающие металлографические и капиллярные методы обнаружения поверхностных трещин. Определив функцию распределения размеров микротрещин для обследуемого элемента и назначив точность оценки, можно найти искомый размер L , определяющий значение предела выносливости поврежденного материала.

Величину макротрещины, которая соответствует окончанию первой стадии, можно определить из аналитической зависимости (1), в которой надо вместо K_{th} подставить выражение:

$$K_{th} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi L} \cdot M, \quad (28)$$

где σ_{\max} – максимальное напряжение в цикле нагрузки; L – минимальная длина макротрещины; M – коэффициент поправки на форму трещины.

Тогда

$$L = \frac{R_{MSe} \cdot D^{\left(\frac{1}{m}+1\right)} \cdot 2,35 d_{cmp}}{\sigma_T^{\left(\frac{1}{m}-1\right)} \cdot \sigma_{\max}^2 \cdot M^2}. \quad (29)$$

Отсюда следует, что минимальный размер макротрещины определяется не только структурой материала, но и величиной нагрузки. Причем чем выше нагрузка, тем меньше длина указанной трещины, то есть тем меньше продолжительность первой стадии. Зависимость (29) справедлива только в том случае, когда внешние условия нагружения обеспечивают возможность использования концепции коэффициента интенсивности нагружения.

Таким образом, мы имеем возможность выполнить оценку остаточного ресурса стадии зарождения макротрещины на базе сведений о фактической поврежденности металла и простых полуэмпирических моделей, если расчетным путем определим стадию стабильного развития макротрещины (26).

Оценка продолжительности стадии развития макротрещины. Продвижение трещины на дискретном шаге будет определяться на основании деформационного критерия, включающего усталостное повреждение от размаха интенсивности пластической деформации и накопление односторонней пластической деформации в структурном элементе в вершине трещины:

$$\frac{\Delta e_i^p \cdot N^m}{c} + \frac{\varepsilon_i^p}{\varepsilon_f^p} = 1, \quad (30)$$

где Δe_i^p – размах интенсивности пластических деформаций в вершине трещины; N – количество циклов, необходимых для продвижения трещины на шаг ΔL ; c и m – коэффициенты уравнения Коффина – Мэнсона ($m = 0,5$ для сталей $\sigma_s < 700$ МПа, $c = 0,5 \ln(1 - \psi^{-1})$, где ψ – относительное сужение); ε_i^p – интенсивность пластических деформаций; $\varepsilon_f^p = \ln(1 - \psi)^{-1}$ – критическая пластическая деформация.

Исходя из (30) число циклов нагружения, необходимых для разрушения первого структурного элемента в упругопластической зоне, обратно пропорционально повреждаемости этого элемента:

$$N d_{cmp} = \left(\frac{\Delta e_i^p}{c} \right)^{1/m}, \quad (31)$$

где Δe_i^p – размах интенсивности пластической деформации в центре структурного элемента. Тогда повреждаемость элемента за цикл будет определяться выражением

$$P d_{cmp} = \frac{1 - \frac{\varepsilon_i^p}{\varepsilon_f^p}}{\left[\frac{\Delta e_i^p}{c} \right]^{1/m}}. \quad (32)$$

По мере продвижения трещины каждый структурный элемент в упругопластической зоне претерпевает свой путь упругопластического деформирования до разрушения и получает на каждом шаге определенное повреждение. Поэтому повреждаемость последующих структурных элементов, находящихся в

упругопластической зоне, в момент разрушения будет определяться на основе критериев деформационного повреждения. В соответствии с этим количество циклов, необходимых для разрушения каждого структурного элемента, будет определяться по зависимости, учитывающей суммарный размах интенсивности пластической деформации при двухчастотном спектре цикла нагружения:

$$N_{kj} = \frac{1 - \frac{\varepsilon_i^p}{\varepsilon_j^p} - \sum_{j=1}^{k-1} P_{kj}}{\left[\frac{\Delta e_i^p}{c} \cdot k \right]^{1/m}}, \quad (33)$$

где $\sum_{j=0}^{k-1} P_{kj}$ – поврежденность, полученная на предыдущих стадиях движения трещины; k – порядковый номер структурного элемента в упругопластической зоне; j – шаг продвижения трещины на длину ΔL ; $\Delta e_i^p = (\Delta e_i^{PHQ} + n_{BQ} \Delta e_i^{PBQ})$ – размах интенсивности пластических деформаций в вершине трещины в поле двухчастотного спектра нагрузок; Δe_i^{PHQ} – размах интенсивности пластических деформаций в вершине трещины от низкочастотной составляющей двухчастотного спектра нагрузок; Δe_i^{PBQ} – размах интенсивности пластических деформаций в вершине трещины от высокочастотной составляющей двухчастотного спектра нагрузок; N_{BQ} – количество высокочастотных циклов в одном низкочастотном; N – количество циклов, необходимых для продвижения трещины на шаг ΔL ; c и m – коэффициенты уравнения Коффина – Мэнсона; ε_i^p – интенсивность пластических деформаций; ε_j^p – критическая пластическая деформация.

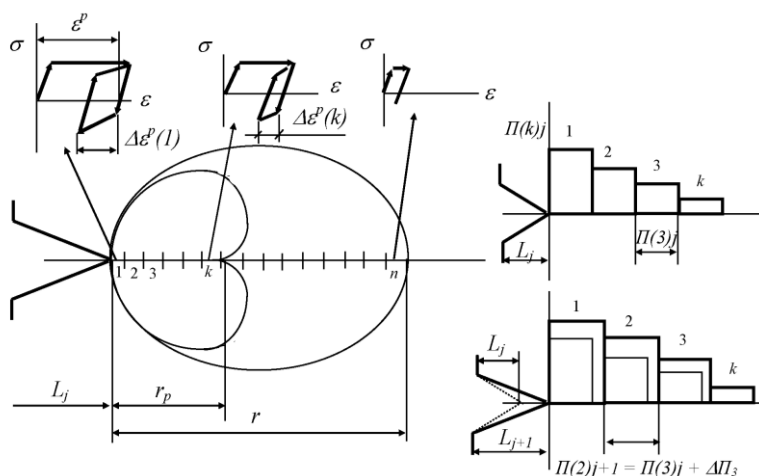


Рис. 2. Схема дискретизации упругопластической зоны в вершине трещины и накопления повреждений в элементах зоны

Таким образом, ресурс на стадии устойчивого развития трещины от L до L_k будет определяться суммированием количества циклов на каждом шаге продвижения трещины:

$$N_{II} = \sum_L^{L_k} N_{kj}. \quad (34)$$

Для расчета продолжительности развития макротрещины от своего минимального размера до критического с учетом поврежденности металла, полученной на первой стадии, величина приращения дискретного развития макротрещины. Определяется состоянием структуры, критическим коэффициентом интенсивности напряжений и максимальным суммарным напряжением эксплуатационного цикла:

$$\Delta L_j = 2 \cdot d_3 \cdot 0,618^z + \frac{2 \cdot K_{j \max}^2 - K_{j-1 \max}^2 \cdot 0,618}{K_{IC}^2}, \quad (35)$$

где ΔL_j – текущий размер структурного элемента; $K_{j \max}$ – коэффициент интенсивности напряжений, соответствующий моменту выбора размера структурного элемента на j -м шаге развития трещины.

Выводы. Процедура определения ресурса на стадии устойчивого развития трещины представляется следующим алгоритмом:

- 1) рассчитываются величины K_{th} и K_{1C} по формулам (1) и (8);
- 2) рассчитываются размер начальной микротрещины L (29) и размер критической трещины L_k , используя (8);
- 3) определяется размер зоны упругопластической деформации при плоской деформации:

$$r_p = \frac{1-2\mu}{2\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_T} \right)^2; \quad (36)$$

4) определяется величина шага трещины при $K_{max} = K_{th}$ и вычисляется количество ($n = r_p / d_{cmp}$) таких элементов в упругопластической зоне;

5) вычисляется размах интенсивности пластических деформаций и интенсивность пластических деформаций ϵ_i^p в центре каждого структурного элемента, находящегося в упругопластической зоне ($r_i = r_{th}(k - 1/2)$, где $k = 1, \dots, n$);

6) определяется повреждаемость каждого элемента за цикл на первом шаге продвижения трещины по выражению (32) и количество циклов, необходимых для разрушения первого элемента (33);

7) вычисляются повреждения, полученные последующими структурными элементами на первом шаге.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические рекомендации по проведению технического диагностирования грузоподъемных кранов с истекшим сроком службы. – Минск: «Инженерный центр “БОИМ”», 2006. – 328 с.
2. Винокуров, В.А. Сварные конструкции. Механика разрушений и критерии работоспособности / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев; под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1996. – 570 с.
3. Майзель, В.С. Сварные конструкции / В.С. Майзель, Д.И. Навроцкий. – Л.: Машиностроение, 1973. – 306 с.
4. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н.А. Махутов. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
5. Винокуров, В.А. Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1986. – 236 с.

Поступила 02.11.2011

ASSESSMENT OF RESIDUAL LIFE OF METAL STRUCTURES OF LIFTING MACHINES AT THE STAGE OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE CRACK

A. LISOWSKI

Shows the method for calculating the residual life of metal structures of cranes with an expired service. It is shown that the applied methodology for assessing the residual life of metal structures of lifting machines, even adopted regulations do not fully take into account the processes of aging that occur during the operation of cranes. A clearer method is proposed to estimate the residual life of the calculation of the threshold characteristics of the evolution deformed structure with the influence of the nature of cyclic loading on the lifting machine. Techniques are offered: the calculation of the endurance limit, taking into account the diagram of limiting stresses loop calculation of the critical characteristics of the metal, depending on the service life and operating temperature. Estimates be used for the duration of embryonic micro cracks with the calculation of the number of cycles of micro cracks which can calculate the total and residual service life of steel crane. The proposed method allows taking into account the structural changes in the metal and more accurately assesses the residual life of cranes working on construction sites.