Механика деформируемого твердого тела

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-3>
УДК 621.875.1:624.014.078.45

С.Б. Будрин, В.В. Овсянников

БУДРИН СЕРГЕЙ БОРИСОВИЧ – к.т.н., заведующий кафедрой,
e-mail: Budrin@msun.ru

Кафедра эксплуатации перегрузочной техники и основ проектирования машин
Морской государственный университет им. адмирала Г.И. Невельского
Верхнепортовая ул., 50 а, Владивосток, Россия, 690003

ОВСЯННИКОВ ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, SPIN-код: 7279-4371,
AuthorID: 759569, e-mail: Ovsyannikov.vv@dvfu.ru

Дальневосточный федеральный университет
Суханова ул., 8, Владивосток, Россия, 690091

Оценка остаточного ресурса металлических конструкций перегрузочных машин по условию трещиностойкости

Аннотация: Авторы представляют опыт применения своей методики расчёта остаточного ресурса металлоконструкций перегрузочных машин по критерию развития усталостных трещин до критического размера, которую они используют для сложных металлоконструкций перегрузочных машин морских торговых портов в течение последних 5 лет. В основу методики положены известные расчетные зависимости механики разрушения, уточненные и дополненные компонентами, учитывающими специфику эксплуатации перегрузочных машин в сложных погодных условиях. Особое внимание обращалось на точность определения напряжений в элементе металлоконструкции при выполнении рабочих операций из-за постоянно изменяющейся величины нагрузки, действующей на металлоконструкцию, в зависимости от массы поднимаемого груза и положения машины в пространстве. Для подтверждения высокой чувствительности к точности определения напряжений графически представлена зависимость влияния ресурса элемента металлоконструкции с трещиной от размаха напряжений. Методика оценки остаточного ресурса успешно апробирована на целом ряде сложных металлоконструкций перегрузочных машин дальневосточных портов и может быть рекомендована для оценки остаточного ресурса металлоконструкций строительно-дорожных и землеройных машин, работающих в условиях интенсивной эксплуатации.

Ключевые слова: металлоконструкция, размер трещины, размах напряжений, перегрузочные машины, остаточный ресурс, разрушение элемента.

Введение

В соответствии с Правилами [14] грузоподъемные машины с истекшим назначенным сроком службы подлежат экспертизе промышленной безопасности. Обязательной частью проводимой экспертизы является расчетная оценка остаточного ресурса металлических конструкций. Обычно такой расчёт выполняется по критерию вероятного возникновения усталостных трещин в наиболее нагруженных элементах металлоконструкции с концентраторами напряжений [2]. Если результаты расчёта показывают, что назначенный ресурс не исчерпан, эксперты разрабатывают обязательные для владельца машины мероприятия, обеспечи-

вающие ее дальнейшую безопасную эксплуатацию до проведения следующей экспертизы. В частности, экспертами даются рекомендации по назначению проверки методами неразрушающего контроля мест возможного появления микротрещин в элементах металлоконструкций с заданной периодичностью. Для серийно выпускаемых машин (например, мостовых, козловых или порталных кранов небольшой или средней грузоподъемности) заключение экспертов об исчерпании ее ресурса и запрещении дальнейшей эксплуатации не является для владельца критичным. Однако в случае уникальных машин (например, мостовых грейферных или контейнерных перегружателей больших пролётов), когда масса всей установки достигает 400–600 т, а стоимость оценивается сотнями миллионов рублей, запрещение дальнейшей эксплуатации таких установок является для владельца крайне болезненной или даже катастрофической проблемой. В этой ситуации возможна оценка остаточного ресурса металлических конструкций по критериям возникновения и развития возникших усталостных трещин до критического размера, т.е. до исчерпания ресурса.

Расчёт остаточного ресурса металлоконструкций по критерию развития усталостных трещин до критического размера выявляет дополнительные резервы, что позволяет владельцу машины выиграть некоторое время для накопления финансовых ресурсов и решения проблемы замены машины новой.

Цель статьи – анализ пятилетнего опыта использования авторской методики оценки остаточного ресурса металлических конструкций уникальных перегрузочных машин морских портов по критерию трещиностойкости.

Оценка остаточного ресурса по критерию трещиностойкости выполнялась после того, как расчетный остаточный срок службы по условию возникновения усталостных трещин был превышен и при осмотре металлоконструкций визуально были обнаружены элементы с начальными усталостными трещинами.

Методика оценки остаточного ресурса

В рассматриваемой в настоящей статье авторской методике оценки остаточного ресурса металлоконструкций перегрузочных машин по критерию развития трещины до критического размера используются известные решения основополагающих работ по механике разрушений упругопластических материалов [5, 7, 9, 15] и современные подходы к решению таких задач [3, 4, 6, 8, 10–12]. В основу методики положен силовой подход, в котором в качестве критерия оценки трещиностойкости взят коэффициент интенсивности напряжений. Такой подход обусловлен широким использованием в металлических конструкциях перегрузочных машин элементов толщиной до 30 мм, модели которых могут быть представлены в виде плоскости или полосы с краевыми трещинами. Кроме того, для таких элементов в подавляющем большинстве практических случаев характерно плоское напряженное состояние. При таких условиях распределение напряжений по сечению с трещиной вблизи её вершины описывается классическим решением, согласно которому [7, 9, 11, 15]:

$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, \quad (1)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений (КИН); r – расстояние от кончика трещины, измеренное вдоль линии, на которой расположена трещина.

Как следует из приведенной формулы, теоретически с уменьшением этого расстояния r напряжения σ могут возрастать практически до бесконечности. Однако для элементов металлических конструкций машин, изготовленных из пластичных сталей, максимальное значение напряжений в вершине трещины ограничивается пределом текучести σ_T : $\sigma \leq \sigma_T$. При достижении напряжений в вершине трещины $\sigma = \sigma_T$ трещина раскрывается и увеличивает свой размер.

Коэффициент интенсивности напряжений зависит от уровня напряжений σ в элементе, его геометрии и длины трещины a [7, 11]:

$$K_I = \xi_K \sigma \sqrt{\pi a}, \quad (2)$$

где ξ_K – коэффициент К-тарировки, зависящий от геометрии элемента и условий нагружения; a – длина трещины.

Напряжения σ в элементе определяются для расчётной площади сечения брутто (т.е. в предположении, что $a = 0$).

Приведенную формулу можно использовать для определения значения КИН K_I для трещин в стержнях простейших сечений в виде полосы, уголка, швеллера, двутавра – при условии, что трещина не выходит за пределы полки или стенки [11].

При постепенном росте трещины её длина достигает критического характерного размера a_c , после чего достаточно однократного максимального нагружения, которое приводит к разрушению элемента. Однократное максимальное нагружение – это одно из нагружений, характерных для обычных условий эксплуатации перегрузочных машин.

В механике разрушения разработано несколько критериев разрушения трещины при однократном нагружении [1–3, 6, 7]. Однако самый большой объем методического материала, основанного на экспериментальных исследованиях, накоплен в отношении силового критерия:

$$K_{I\text{MAX}} = \xi_K \sigma_{\text{MAX}} \sqrt{\pi a}, \quad (3)$$

где σ_{MAX} – максимальное напряжение, возникающее в сечении элемента от максимальной расчётной нагрузки без учёта ослабления трещиной.

Условие, при котором трещина не будет развиваться при однократном нагружении [11]:

$$K_{I\text{MAX}} \leq \gamma_n \gamma_{dc} K_C. \quad (4)$$

В приведенном условии K_C – критическое значение КИН, зависит от свойств материала, толщины элемента и температуры, находится экспериментально [1, 3, 13]; γ_n – коэффициент надёжности по назначению элемента, γ_{dc} – коэффициент надёжности методики определения расчётных параметров и методики расчёта трещиностойкости.

При значительных негативных последствиях разрушения элемента принимается $\gamma_n = 0,85$ [11]. Если развитие трещины происходит – по основному металлу элемента, – рекомендуется принимать $\gamma_{dc} = 0,85–0,95$; если по сварному шву или в околошовной зоне – $\gamma_{dc} = 0,75–0,80$ [11, 12].

Для металлических конструкций перегрузочных машин, работающих на открытом воздухе, важное значение имеет определение критических значений КИН при отрицательных температурах. В монографии [11] предложено выражение для определения минимального критического значения КИН при отрицательных температурах для элементов конструкций из прокатных сталей:

$$K_C = [1 + c(T_{\text{Э}} - 20^\circ\text{C})] K_{\text{СТ}}(t_0/t)^{0,2}, \quad (5)$$

где c – коэффициент, зависящий от свойств стали; $T_{\text{Э}}$ – температура эксплуатации конструкции; $K_{\text{СТ}}$ – критическое значение коэффициента интенсивности напряжений, найденное при испытании образца стали при температуре $+20^\circ\text{C}$; $t_0 = 20$ мм – толщина испытываемого образца стали; t – толщина элемента конструкции с трещиной, мм.

Для прокатных малоуглеродистых сталей, соответствующих марке Ст3, по данным [11] можно принять $c = 0,005$, $K_{\text{СТ}} = 80 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Скорость развития трещины $V_{\text{ТР}}$ определяется размахом коэффициента интенсивности напряжений $\Delta\sigma = \sigma_{\text{MAX}} - \sigma_{\text{MIN}}$

$$\Delta K_I = \xi_K \Delta\sigma \sqrt{\pi a}, \quad (6)$$

Если $\sigma_{\text{MIN}} < 0$, принимается $\sigma_{\text{MIN}} = 0$.

Согласно теории [6, 8, 12] скорость развития трещины определяется по формуле

$$V_{\text{ТР}} = V^*(\Delta K_I / \Delta K^*)^q,$$

где $V^* = 10^{-7}$ м/цикл; ΔK^* – параметр, равный значению ΔK_I , при котором $V_{\text{ТР}} = V^*$; $q = 2,5-3,0$ – показатель степени усталостной кривой, в практике расчётов трещиностойкости рекомендуется принять $q = 3$ [11].

По данным экспериментальных исследований сварных соединений [12] значения ΔK^* для сталей, обычно используемых в сварных конструкциях, имеют удовлетворительную корреляционную связь с пределом прочности σ_B . Это позволяет использовать для определения ΔK^* зависимость [11]

$$\Delta K^* = 0,05\sigma_B - 9 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}. \quad (7)$$

Если размер a_C трещины достаточно мал по сравнению с шириной B элемента конструкции, то можно считать, что $\xi_K = \text{const}$. В этом случае формула для определения ресурса развития трещины от размера a_0 до размера a_C в числе циклов нагружения [11]:

$$Z_a = \frac{\gamma_{dN}(\gamma_n \Delta K^*)^q}{(0,5q-1)V^*(\xi_K \Delta \sigma \sqrt{\pi})^q} \left[\frac{1}{(a_0)^{0,5q-1}} - \frac{1}{(a_C)^{0,5q-1}} \right]. \quad (8)$$

В приведенной формуле коэффициент надёжности методики расчёта:

- $\gamma_{dN} = 0,80-0,95$ – для трещины в основном металле;

- $\gamma_{dN} = 0,60-0,75$ – для трещины по сварному шву или в околошовной зоне.

Начальный размер трещины a_0 – размер, который можно обнаружить визуально.

Критический размер трещины a_C определяется для двух возможных случаев развития событий.

Для металлоконструкции с трещиной наиболее опасным является случай мгновенного (лавинообразного) развития трещины при одноразовом воздействии максимальной нагрузкой из спектра нагрузок условий обычной эксплуатации.

Для этого случая критический размер трещины определяется по силовому критерию K_{MAX} из условия (4).

После подстановок в (4) получаем

$$\frac{\sigma_{\text{MAX}} \sqrt{\pi a_C}}{\sqrt{\cos(0,5\pi a_C / B)}} \leq \gamma_n \gamma_{dc} K_C, \quad (9)$$

где B – ширина расчётного элемента.

Определение a_C из этого уравнения выполняется методом подбора параметра.

Напряжение σ_{MAX} определяется по сечению элемента брутто (без учёта трещины).

Полученное расчетом по формуле (8) число циклов нагружения элемента металлоконструкции до развития трещины до критического размера позволяет перейти к расчетному сроку службы. Зная наработку машины в числе циклов, например за год, Z_{Γ} , можно перейти к сроку службы элемента с трещиной:

$$L_P = Z_P / Z_{\Gamma}, \text{ лет}. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что использование приведенных здесь зависимостей требует тщательной подготовки исходных данных. Например, особое внимание следует обратить на оценку уровня напряжений в элементах металлоконструкции при выполнении машиной характерных технологических циклов. Нагрузки, действующие на металлоконструкции машины, так же как соответствующие уровни напряжений в элементах металлоконструкций, могут существенно меняться при реализации таких циклов. Нагрузки и напряжения зависят как от массы грузов, с которыми работает машина, так и от положения рабочих органов машины в пространстве. Анализ уровней напряжений в элементах металлоконструкций при выполне-

нии машиной технологических циклов позволяет определить как максимальные значения, так и значения соответствующих размахов напряжений.

Задача, поставленная нами по оценке напряженно-деформированного состояния структурно сложных металлоконструкций уникальных перегрузочных машин, осложняется невозможностью аналитического расчета напряжений в их элементах. Поэтому для решения таких задач применяется компьютерное моделирование, в нашем случае модуль Structure3D отечественного пакета APM WinMachine, позволяющий реализовать построение и расчет компьютерных моделей методом конечных элементов.

На рис. 1 приведено полученное нами компьютерным моделированием графическое распределение напряжений в металлической конструкции мостового перегружателя, а на рис. 2 более подробная картина распределения напряжений в сварном соединении одного из элементов этой конструкции.

Рис. 1. Графическое распределение напряжений в элементах металлической конструкции мостового перегружателя.

Рис. 2. Картина распределения напряжений в сварном соединении.

Как иллюстрируют приведенные рисунки, использование метода конечных элементов позволяет оценить уровень напряжений всей металлической конструкции (рис. 1) и определить зоны концентрации напряжений, в точках которых возможно зарождение усталостных трещин (рис. 2, области, выделенные красным цветом).

Следует особо отметить, что в воспроизведении как самих компьютерных моделей, так и в назначении расчётных нагрузок и их сочетаний требуется обеспечивать максимальную точность. Такие требования связаны с высокой чувствительностью зависимостей (8) и (9) от значений $\sigma_{\max}$ и $\Delta\sigma$.

Для подтверждения высокой чувствительности к точности определения напряжений построен график зависимости влияния размаха напряжений $\Delta\sigma$ на ресурс трещины Z_a в стальной полосе из стали 09Г2 шириной $B = 100$ мм, толщиной $t = 10$ мм при осевом растяжении (рис. 3). В расчётах принято: $\sigma_B = 450$ МПа, $a_0 = 10$ мм, $a_C = 40$ мм, $\xi = 1$. Остальные составляющие формулы (8) по приведенным выше рекомендациям.

Рис. 3. Результаты расчета: зависимость ресурса элемента с трещиной от размаха напряжений.

Как показывает график, увеличение размаха напряжений с 20 до 36 МПа (в 1,8 раза) приводит к уменьшению ресурса с 2900 тыс. до 500 тыс. циклов (в 5,8 раза), что чрезвычайно чувствительно.

Выводы

1. Приведены сведения о нормативных требованиях к оценке остаточного ресурса металлических конструкций перегрузочных машин, а также об особенностях подхода к такой оценке применительно к уникальным машинам.
2. Описана методика расчёта остаточного ресурса металлоконструкций перегрузочных машин по критерию развития усталостных трещин до критического размера, использованная авторами применительно к сложным металлоконструкциям перегрузочных машин морских торговых портов.
3. В основу методики расчёта остаточного ресурса металлоконструкций перегрузочных машин по критерию развития усталостных трещин до критического размера положены известные расчетные зависимости механики разрушения, уточненные и дополненные элементами, учитывающими специфику эксплуатации перегрузочных машин.
4. Графически показана высокая чувствительность остаточного ресурса в зависимости от точности определения напряжений в элементах металлоконструкций.
5. Предлагаемая методика может быть рекомендована для оценки остаточного ресурса металлоконструкций строительно-дорожных и землеройных машин, работающих в условиях интенсивной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Стандартиформ, 2005. 103 с.
2. ГОСТ 33169–2014. Краны грузоподъемные. Металлоконструкции. Подтверждение несущей способности. М.: Стандартиформ, 2015. 55 с.
3. Емельянов О.В., Шувалов А.Н. Совершенствование определения коэффициента интенсивности напряжений методом малобазной тензометрии // Вестник ЮУрГУ. Сер. Строительство и архитектура. 2015. Т. 15, № 3. С. 32–37.

4. Кычкин В.И. Расчет остаточного ресурса металлоконструкции грузоподъемных машин с учетом риска назначения эксплуатационных показателей // Вестник машиностроения. 2013. № 7. С. 11–16.
5. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии механики разрушения. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
6. Махутов Н.А., Москвичев В.В., Морозов Е.М., Гольдштейн Р.В. Современные задачи механики разрушения и механики катастроф // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83, № 10. С. 5–11.
7. Механика разрушения и прочность материалов: в 4 т. Т. 4 / под общ. ред. В.В. Панасюка. Киев: Наукова думка, 1990. 680 с.
8. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. Специальные задачи механики разрушения. М.: Изд-во URSS, 2017. 192 с.
9. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения. СПб.: ЦОП Профессия, 2012. 552 с.
10. Сероштан В.И., Гааз Г.В. Процесс образования трещин в металлоконструкциях грузоподъемных кранов // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2016. Вып. 5. С. 215–220.
11. Соколов С.А. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.
12. Соколов С.А., Знатнов С.А. Статистические исследования параметров циклической трещиностойкости элементов конструкций // Строительные и дорожные машины: сб. науч. тр. Вып. 2. Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. ун-та, 2002. С. 4–8.
13. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2 т. Т. 2 / под ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. 568 с.
14. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасной эксплуатации опасных производственных объектов, на которых используются подъемные средства». М.: Ростехнадзор, 2013. 103 с.
15. Irwin G.R. Plastic zone near a crack and fracture toughness. 7th Sagamore Ardanace Materials Research Conference. Syracuse, Syracuse Univ. Press. 1960, p. 4–63.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2019. N 3/40

Mechanics of Deformable Solids

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-3>

Budrin S., Ovsyannikov V.

SERGEY BUDRIN, Candidate of Engineering Sciences., Head of the Department,
e-mail: Budrin@msun.ru

Department of Material Handling Equipment Operations and the Fundamentals
of Machine Design

Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelsky

50-a Verkhneportovaya St., Vladivostok, Russia, 690003

VIKTOR OVSYANNIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
e-mail: Ovsyannikov.vv@dvfu.ru

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Residual life analysis of metal structures of reloading machines under crack resistance conditions

Abstract: The authors present the experience of applying their methodology for predicting the residual life of metal structures of reloading equipment according to the criterion of the fatigue crack growth to a critical size, which they have used for assessment of complex metal structures of reloading machines at the commercial sea ports over the past 5 years. The methodology is based on the well-known calculated dependencies of fracture mechanics, modified and updated with elements

that take into account the specifics of the operation of transshipment machines in difficult weather conditions. Particular attention was paid to the accuracy of determining the stresses in a metal structure element during work operations due to the constantly changing magnitude of the load acting on the metal structure depending on the weight of the load lifted and the position of the machine in space. To confirm the high sensitivity to the accuracy of the determination of stresses, the dependence of the influence of the resource of a metal structure element with a crack on the stress amplitudes is graphically presented. The methodology for assessing the residual resource has been successfully tested on a number of complex metal structures of transshipment machines of the Far Eastern ports and can be recommended for assessing the residual life of metal structures of heavy duty construction and earth-moving machinery.

Keywords: metal structures, crack size, stress range, reloading machines, residual life, element destruction.

REFERENCES

1. GOST 25.506–85. Calculations and tests of strength. Methods of mechanical testing of metals. Characterization of crack resistance (fracture toughness) under static loading. M., Standardinform, 2005, 103 p.
2. GOST 33169–2014. Lifting cranes. Metal structures. Confirmation of bearing capacity. M., Standardinform, 2015, 55 p.
3. Yemelyanov O.V., Shuvalov A.N. Improving the determination of the stress intensity factor by the method of low-base tensometry. *Vestnik SUSU. Series Building and Architecture*. 2015(15);3:32–37.
4. Kychkin V.I. The calculation of the residual life of metal lifting machines, taking into account the risk of the appointment of performance indicators. *Bulletin of Mechanical Engineering*. 2013;7:11–16.
5. Matvienko Yu.G. Models and criteria for fracture mechanics. M., Fizmatlit, 2006, 328 p.
6. Makhutov N.A., Moskvichev V.V., Morozov E.M., Goldstein R.V. Modern problems of fracture mechanics and catastrophe mechanics. *Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2017(83);10:5–11.
7. Fracture mechanics and strength of materials, in 4 vols, vol. 4. Kiev, Naukova Dumka, 1990, 680 p.
8. Parton V.Z., Morozov E.M. Mechanics of elastoplastic destruction. Special tasks of fracture mechanics. M., Publishing House of URSS, 2017, 192 p.
9. Pestrikov V.M., Morozov E.M. Mechanics of Solids Fracture. SPb., TSOP Profession, 2012, 552 p.
10. Seroshtan V.I., Haaz G.V. The process of formation of cracks in the metal structures of cranes. *Izv. Tula State University, Technical Science*. 2016(5):215–220.
11. Sokolov S.A. Metal constructions of hoisting-and-transport machines. SPb., Polytechnic, 2005, 423 p.
12. Sokolov S.A., Znatnov S.A. Statistical studies of the parameters of cyclic crack resistance of structural elements. *Construction and Road Machines*. Khabarovsk, Publishing House Khabar. State Univ., 2002;2:4–8.
13. Handbook of stress intensity factors. In 2 vols, vol. 2. M., Mir, 1990, 568 p.
14. Federal norms and rules in the field of industrial safety “Rules for the safe operation of hazardous production facilities using lifting equipment”. M., Rostekhnadzor, 2013, 103 p.
15. Irwin G.R. Plastic zone near a crack and fracture toughness. 7th Sagamore Ardanace Materials Research Conference. Syracuse, Syracuse Univ. Press, 1960, p. 4–63.