



УДК 621.873.

Александр Сергеевич Яблоков, доцент, к.т.н., доцент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта

Волжский государственный университет водного транспорта
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

Андрей Сергеевич Зотин, студент кафедры подъемно-транспортных машин и машиноремонта

Волжский государственный университет водного транспорта
603951, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5.

ОБОСНОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЛОЩАДКИ КОНТРГРУЗА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПОРТАЛЬНОГО КРАНА

Аннотация. Существующие подходы к оценке прочности и ресурса крановых конструкций в настоящее время в основаны на теории предельных состояний. Однако знание только предельных состояний конструктивного узла объекта не позволяет решить на вопрос как скоро состояния будут достигнуты и как они изменяются в результате процесса накопления повреждений в материале конструктивного узла в зависимости от истории эксплуатации объекта. В настоящей работе с современных позиций механики поврежденной среды (МПС), механики разрушения (МР) рассмотрен другой подход к оценке прочности и ресурса крановых конструкций при монотонном и циклическом нагружения.

Ключевые слова: обоснование безопасности, подъемное сооружение, металлоконструкция, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, моделирование, прочность, концентрация напряжений, надежность.

1. Введение.

Для оценки текущего состояния исследуемых объектов, оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса в настоящее время существуют различные подходы [1]. Интенсивно развиваются подходы, основанные на диагностике состояния материала объекта физическими методами например, методами акустической эмиссии, измерении некоторых диагностических параметров объекта, в процессе эксплуатации (например, диагностики состояния по тренду виброакустических характеристик, а также на основе математического моделирования поведения объекта с использованием современных достижений в области механики, вычислительной математики и средств электронно-вычислительной техники [2].

Каждый из перечисленных подходов является достаточно актуальным и имеет свои области эффективного применения. Наибольшие перспективы развития имеет подход, основанный на прямом математическом моделировании поведения объектов с учетом особенностей их геометрических форм, реальных условий нагружения; особенностей развития процессов деформирования и накопления повреждений с учетом временного влияния этих эффектов [3].

2. Описание металлоконструкции.

Конструкции крана, а именно башня, основание и стрела, изготовлены из стальных пластин и труб соответствующей формы и сварены при помощи электросварки квалифицированными сварщиками.

Вращающаяся башня обшита листами стали, сваренными при помощи электросварки, и оснащена гидравлической лебёдкой для подъёма стрелы и поворотным механизмом с управлением с помощью гидравлического двигателя. На башне расположены шарниры с вкладышами, которые обеспечивают вращение стрелы. Сама башня оборудована лестницей, постом управления для контроля оператором.

Основание крана – стандартное круглое основание, из стальной конструкции, под приварку напрямую к конструкциям судна. На верхней части башни расположен фланец для крепления к центральной платформе при помощи болтов, которые затягиваются ключом с ограничением по крутящему моменту. В нижней части основания имеется фланец, который можно прикрепить болтами к палубе или основанию.

Башня оснащена водонепроницаемой крышкой, которая позволяет проводить осмотр изнутри. Башня также включает платформу и лестницу.

Стрела встроена в стальную коробчатую конструкцию, сваренную при помощи электросварки. На оголовке стрелы имеется блок со стальным канатом. Этот блок установлен на подшипниках, на вал которых подаётся смазка при помощи смазывающих устройств.

Кованый крюк соединён с блоком при помощи системы шарниров. Крюк обеспечивает свободный захват груза и оснащён предохранительной защёлкой.

Вариант установки основания крана к палубе изображен на рисунке 1.

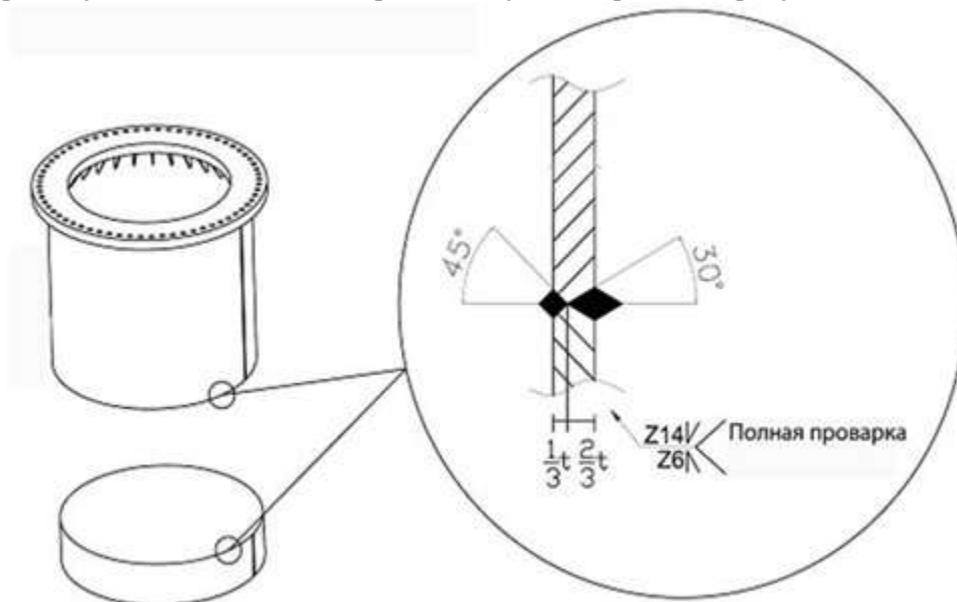


Рис. 1.

3. Определение прочности площадки контргруза.

Значения расчетных сопротивлений определяются по формуле:

$$R_p = \frac{\sigma_m}{\gamma_m},$$

где γ_m – коэффициент надёжности по материалу. Для стали с $\sigma_m \leq 380$ МПа $\gamma_m = 1,05$, а для стали с $\sigma_m > 380$ МПа $\gamma_m = 1,1$. Примем сталь марки Е 36, $\sigma_t = 360$ МПа.

$$R_p = \frac{360}{1,05} = 343 \text{ МПа.}$$

Расчетные значения сварных соединений назначаем по таблице 1.1 [СТО 24.09-5821-01-93, табл.3.5, стр. 10]

Для сварки назначаем сварочную проволоку Св-08Г2С или электрод типа Э50А со значениями $R_{wun} = 490$ МПа, $R_{wf} = 215$ МПа.

Производим расчет значений расчетных сопротивлений:

$$R_{wy} = R_p,$$

$$R_{wu} = \frac{\sigma_s}{\gamma_m} = \frac{470}{1,05} = 447 \text{ МПа.}$$

$$R_{ws} = 0,58R_p = 343 * 0,58 = 199 \text{ МПа.}$$

$$R_{wz} = 0,45 * 490 = 220 \text{ МПа}$$

$$R_{wf} = 0,55 \frac{R_{wun}}{\gamma_m} = 0,55 \frac{490}{1,25} = 216 \text{ МПа.}$$

Допускаемое напряжение $[\sigma]$, МПа, для стали Е36:

$$[\sigma] = \sigma_{тс},$$

σ – Допускаемое напряжение в долях от предела текучести материала. При грузоподъемности < 10 т, $c=0,48$ [4].

$$[\sigma] = 360 \cdot 0,48 = 173 \text{ МПа.}$$

$$86,62 < 173.$$

Таблица 1. Расчетные значения сварных соединений.

Сварные соединения	Напряженное состояние		Условное обозначение	Расчетное сопротивление сварных соединений
Стыковые	Сжатие, растяжение и изгиб	По пределу текучести	R_{wy}	$R_{wy} = R_p$
		По временному сопротивлению	R_{wu}	$R_{wu} = R_u$
	Сдвиг		R_{ws}	$R_{ws} = 0,58R_p$
С угловыми швами	Срез	По металлу шва	R_{wf}	$R_{wf} = 0,55 \frac{R_{wun}}{\gamma_{wm}}$
		По металлу границы сплавления	R_{wz}	$R_{wz} = 0,45R_{wun}$

$\gamma_{wm} = 1,25$ – значение коэффициента надёжности по материалу шва при значениях нормативного сопротивления металла шва $R_{wun} \leq 490$ МПа.

Максимальное напряжение, действующее на стрелу должно быть меньше допустимого:

$$\sigma_{max} < [\sigma],$$

Определение прочности металлоконструкции стрелы крана. Расчет по методу предельных состояний.

В соответствии с общими положениями расчета металлоконструкций на прочность от действия постоянных во времени напряжений, расчеты по методу предельных состояний производятся для I и II случаев нагрузок при сочетаниях а и б. Для металлической конструкции стрелы должны удовлетворять следующие предельные состояния [5]:

1) по потере несущей способности элементов конструкции, по прочности или потере устойчивости при наибольших нагрузках или многократных нагрузках;

2) по непригодности к нормальной эксплуатации вследствие недопустимых упругих деформаций или колебаний, которые влияют на работу крана и обслуживающего персонала.

В качестве расчетных комбинаций нагрузок примем Па и Пб:

Па – стрела неподвижно, резкий подъем груза или опускание;

Пб – стрела в движении, резкий пуск или торможение.

Для определения действующих напряжений в металлоконструкции крана построим модель секции стрелы в натуральную величину с соблюдением заданных характеристик и геометрических размеров. Исходя из параметров используемой листовой стали, идеализация конструкции на конечные элементы проводилась с использованием балочного конечного элемента, который является трехмерным симметричным в поперечном сечении [6]. При моделировании металлоконструкции данным типом конечного элемента в качестве реальных констант использовались стандартные геометрические характеристики: площадь поперечного сечения балки, моменты инерции относительно двух осей (в поперечном сечении), высота поперечного сечения, ширина поперечного сечения [7].

Для выполнения расчета был построен предварительный вид трехмерной модели в программе «Компас 3D» (рис. 2).

Указанная модель была разбита на 20 - узловые конечные элементы из материала с изопараметрическими свойствами для симметричной конструкции относительно продольной оси в программе «APM Studio» из пакета «APM Winmachine» (рисунок 5.3) [8].

Результаты расчета приведены ниже где указаны максимальные значения напряжений и деформаций в элементах металлоконструкции стрелы.

Для расчета действующих напряжений действующую нагрузку от веса груза приложим в виде распределенного давления по площади проушины, расположенной на вершине металлоконструкции [9]. Результаты расчета представлены на рисунке 2 и 9.

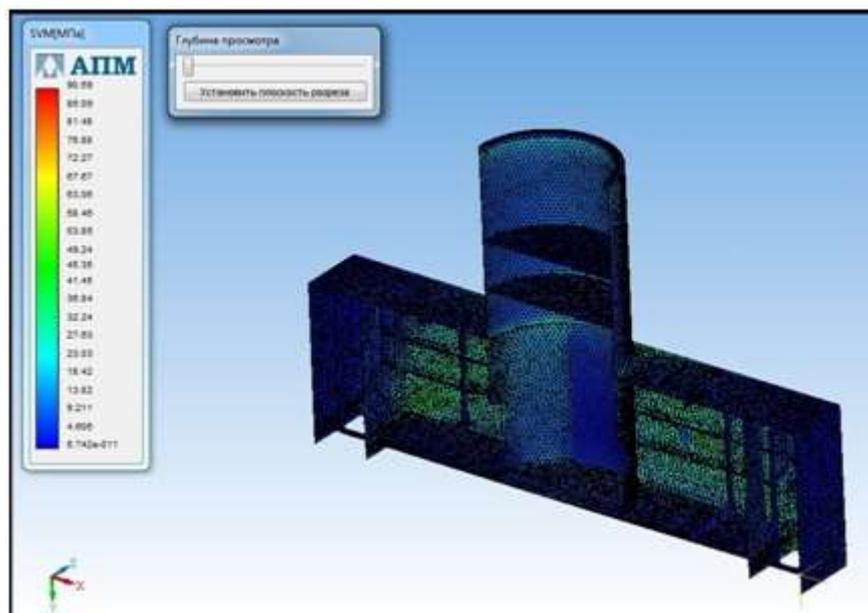


Рис. 2

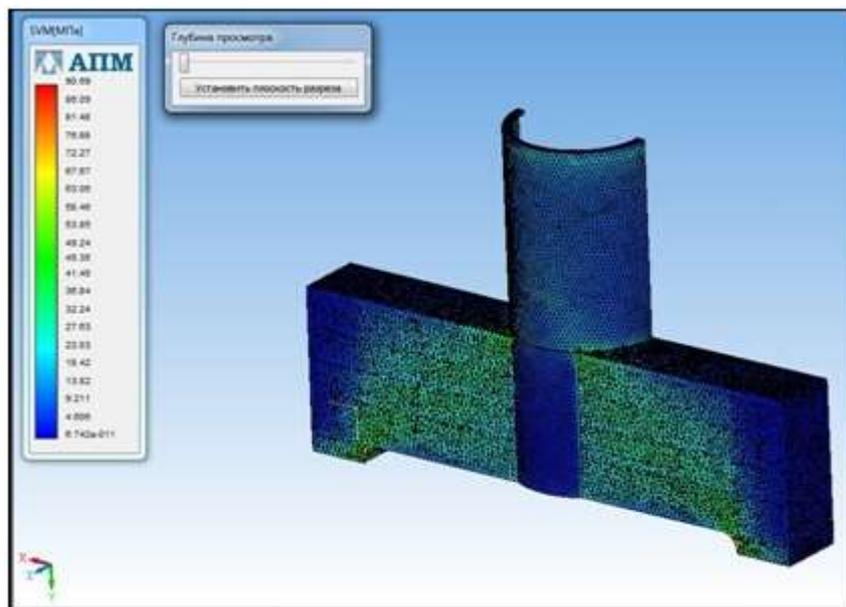


Рис. 3

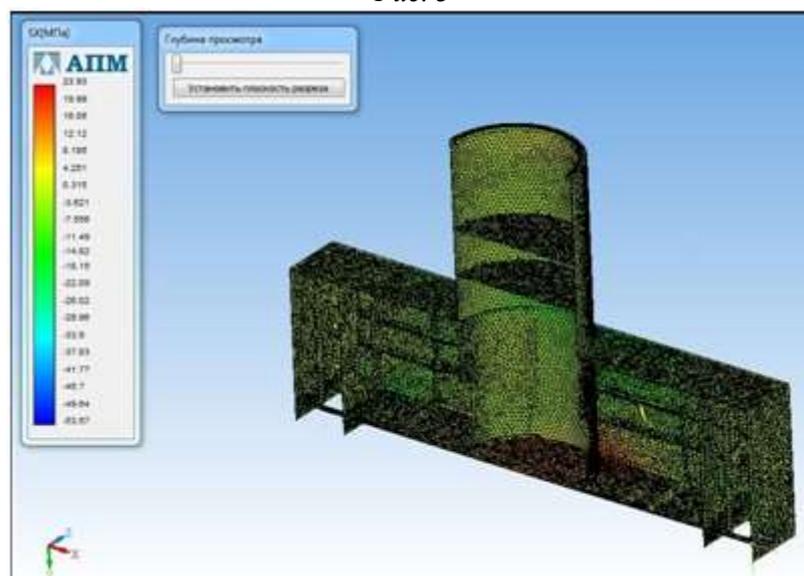


Рис.4 Напряжения по оси X.

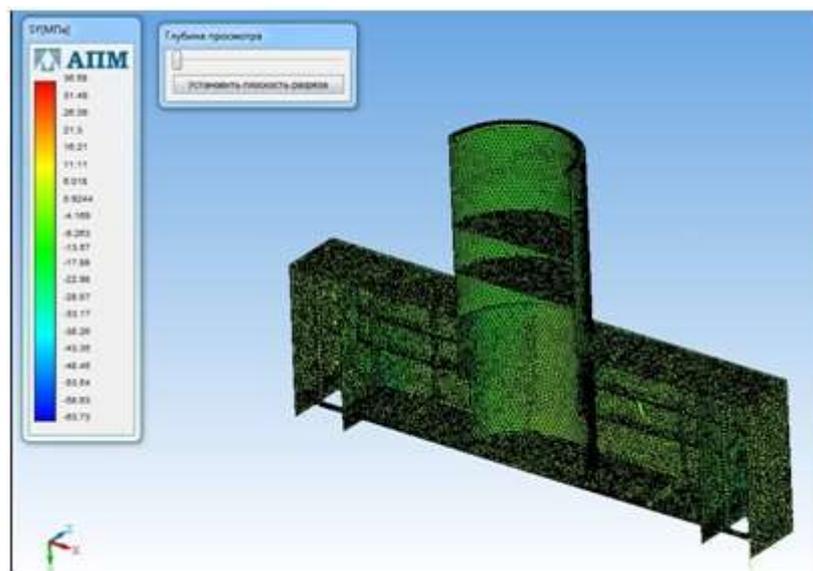


Рис. 5 Напряжения по оси Y.

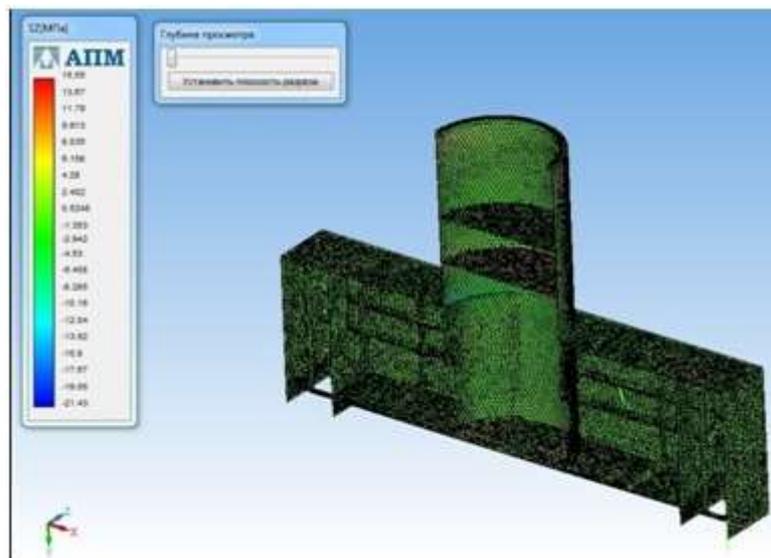


Рис. 6 Напряжения по оси Z.

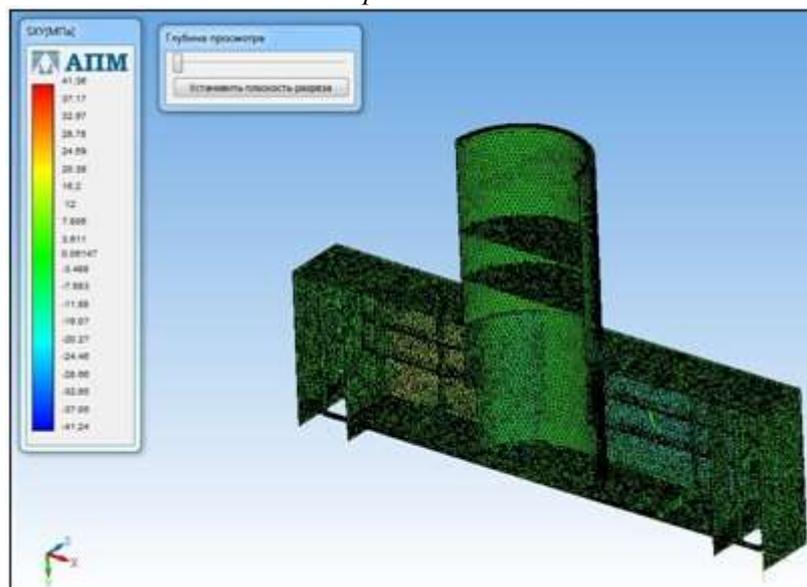


Рис. 7 Напряжения в плоскости XY.

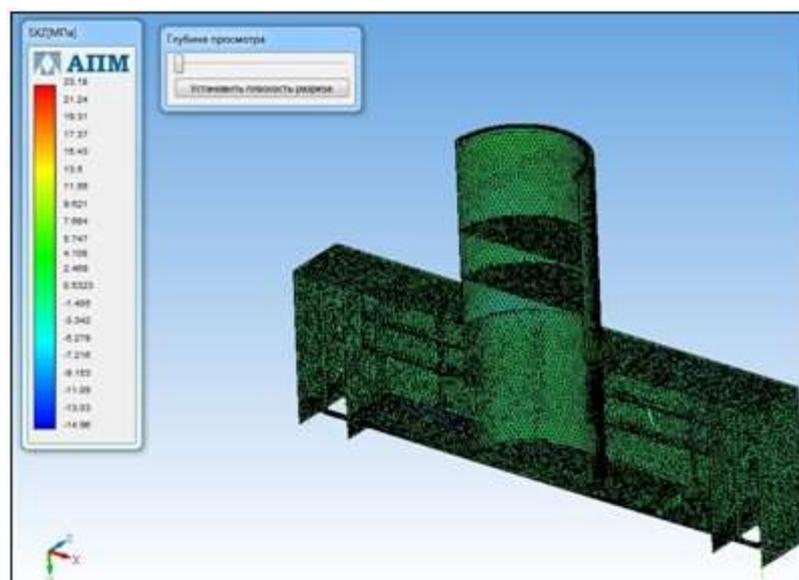


Рис. 8 Напряжения в плоскости XZ.

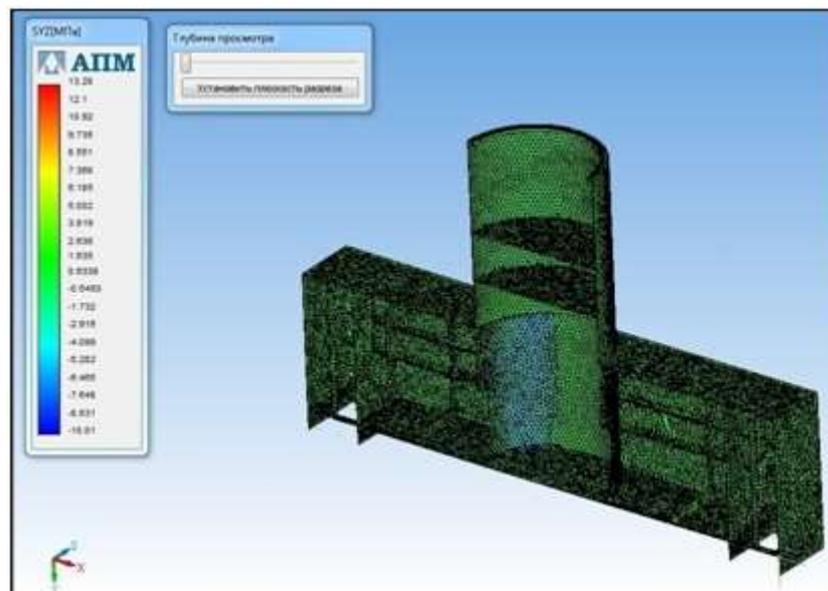


Рис. 9 Напряжения в плоскости YZ.

3. Проверка нормальных напряжений

Нормальные напряжения в опасном сечении металлоконструкции, МПа:

$$\sigma = \frac{m_0 R_H}{k_M}$$

где m_0 - коэффициент условий работы, $m_0 = 0,54$;

$$m_0 = m_1 * m_2 * m_3$$

$$m_0 = 0,6 * 0,9 * 1 = 0,54$$

R_H - нормативный предел текучести, для малоуглеродистых сталей 502 МПа;

k_M - коэффициент надёжности по материалу, $k_M = 1,5$, для малоуглеродистой стали;

$$\sigma = (0,54 * 502) / 1,5 = 180,72 \text{ МПа}$$

Нормальные напряжения в опасном сечении составляют $\sigma = 72,4$ МПа, что ниже предельного напряжения $\sigma = 180,72$ МПа.

По результатам оценки реконструкции грузозахватного устройства (спредера) сделан вывод: о выработке ресурса металлоконструкции спредера эксплуатация крана в паспортном режиме допускается с проведением ежегодной экспертизы промышленной безопасности, и с применением неразрушающих методов контроля несущих узлов металлоконструкции устройства [10].

4. Проверка касательных напряжений.

Касательные напряжения в опасном сечении металлоконструкции [11], МПа:

$$\tau = (m_0 * R_H) / k_M = 117,3 \text{ МПа}$$

Касательные напряжения в плоскости xz равно 1.05 МПа, что ниже предельно допустимого значения 117.3 Мпа.

5. Заключение.

1. Представлен вариант математической модели МПС, развитой в работах Ю.Г. Коротких для расчета усталостной долговечности конструкций по механизму деградации многоциклового усталости материала [12, 13].

Данная математическая модель позволяет учитывать

– нелинейность процесса накопления усталостных повреждений;

– нелинейность суммирования повреждений при изменении режимов нагружения или вида напряженного состояния.

2. Разработана научно-обоснованная инженерная методика расчета полей напряжений, деформаций, повреждений в опасных зонах элементов и узлов несущих конструкций по механизму деградации многоциклового усталости материала.

3. Проведён анализ кинетики НДС элементов и узлов подъемного сооружения, подверженного воздействию знакопеременного нагружения и выполнен на его основе прогноз усталостной долговечности, который показал, что данный подход пригоден для разработки на его основе экспертных систем оценки ресурса грузоподъемных машин, как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации [14, 15, 16].

Список литературы:

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. – М.: Мир, 1984.
2. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. – 424с.
3. Романов А. Н. Разрушение при малоцикловом нагружении. – М.: Наука, 1988. – 279с.
4. Корум, Сартори. Оценка современной методологии проектирования высокотемпературных элементов конструкций на основе экспериментов по их разрушению // Теоретические основы инженерных расчетов. 1988, № 1. С. 104 - 118.
5. Броек Д. Основы механики разрушения. – М.: Высшая школа, 1980. – 368с.
6. Патрикеев А.Б. О механизме разрушения верхних участков стальных подкрановых балок // Пром. стр-во. – 1979, №5. С. 38–43.
7. Руководящий технический материал // Расчёты и испытания на прочность / Методы расчёта на трещиностойкость металлоконструкций мостовых кранов при статическом и циклическом нагружении. – Красноярск, 1990. – 58 с.
8. Трощенко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 343с.
9. Волков И.А. Модель повреждённой среды для оценки ресурсных характеристик конструкционных сталей при механизмах истощения, сочетающих усталость и ползучесть материала / И.А. Волков, А.И. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6, № 2. С. 232–245.
10. Боднер, Линдхолм. Критерий приращения повреждения для зависящего от времени разрушения материалов // Теоретические основы инженерных расчетов. 1976, №2. С. 51 - 58.
11. Chaboche J. L. Continuous damage mechanics a tool to describe phenomena before crack initiation // Engineering Design. 1981. vol. 64. p. 233-247.
12. Волков, И.А. Численное моделирование упругопластического деформирования и накопления повреждений в металлах при малоциклового усталости. / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких, И.С. Тарасов, Д.Н. Шишулин // Междунар. научно-технический журнал «Проблемы прочности»: изд-во Института проблем прочности НАНУ, №4. – Киев, 2011.
13. «Structure CAD» пакет «Scad Office v.11».
14. Акимов, И.А., Яблоков, А.С. Оценка напряженно-деформированного состояния металлоконструкции каркаса машинного отделения плавучего крана / И.А. Акимов, А.С. Яблоков // Труды 16-го международного научно-промышленного форума «Великие реки - 2014». Материалы научно-методической конференции профессорско-преподавательского

состава, аспирантов, специалистов и студентов «Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек». Том 1. – Н. Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГАВТ», 2014. – 215 - 219с.

15. Волков, И.А., Яблоков, А.С. Об одном подходе к оценке долговечности металлоконструкций плавучих кранов по их фактическому, эксплуатационному нагружению // Вестник ВГАВТ №42. – Н.Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГАВТ», 2015. – 56 – 68с.

16. Леметр, Ж. Модель механики повреждения сплошных сред при вязком разрушении // J. of Engineering Materials and Technology. 1985. V. 107. P. 3-9.

SUBSTANTIATION OF SAFETY OF RECONSTRUCTION OF THE SITE OF THE HYDRAULIC PORTAL CRANE

A. Yablokov, A. Zotin,

Annotation. Existing approaches to assessing the strength and resource of crane structures are currently based on the theory of limit states. However, knowledge of only the limiting states of the structural unit of the object does not allow us to solve the question of how soon the states will be achieved and how they change as a result of the accumulation of damage in the material of the structural unit, depending on the history of operation of the object. In the present work, from a modern standpoint of mechanics of a damaged medium (MPS), fracture mechanics (MR), we consider a different approach to assessing the strength and resource of crane structures under monotonous and cyclic loading.

Keywords: safety justification, hoisting structure, metal construction, stress-strain state, finite element method, modeling, strength, stress concentration, reliability.