

B58

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
им. М. И. КАЛИНИНА

На правах рукописи

ВЛАСОВ Владимир Васильевич

УДК 624.046.5.003.1

НАДЕЖНОСТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗГИБАЕМЫХ СИСТЕМ  
В УСЛОВИЯХ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Специальность 01.02.03 - Строительная механика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Днепропетровск - 1983

НТБ  
ДНУЖТ

Губернатору Харьковской области  
от автора *Р. М. А.*

Работа выполнена в лаборатории надежности института  
"Уральский промстройинипроект".

Научный руководитель -  
доктор технических наук, старший научный  
сотрудник ТИМАСЕВ С. А.

Официальные оппоненты  
доктор технических наук,  
профессор И. А. БИРГЕР  
доктор технических наук, старший научный  
сотрудник Е. С. ПЕРЕВЕРЗЕВ

Ведущее предприятие -  
Центральный научно-исследовательский институт  
строительных конструкций им. В. А. Кучеренко

Защита состоится "2" июня 1983 г. в 15<sup>00</sup> часов  
на заседании специализированного совета К И 4.07.02 в Днепропет-  
ровском институте инженеров железнодорожного транспорта имени  
М. И. Калинина (320629, ГСП, г. Днепропетровск-Ю, ул. Академика  
В. А. Лазаряна, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "22" июня 1983 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета, кандидат  
технических наук, доцент

*В. А. Радеиковский*

В. А. РАДЕ ИКОВСКИЙ

НТБ  
ДНУЖТ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Большинство существующих в настоящее время методик оптимального проектирования механических систем ориентировано на критерии минимизации их объема, веса, либо стоимости "в деле". Вместе с тем практика показывает, что одним из важнейших критериев эффективности конструкций являются характеристики их эксплуатации. Народное хозяйство заинтересовано в снижении не только себестоимости, но и расходов на эксплуатацию конструкций, которые в первую очередь зависят от уровня их надежности. Стоимость эксплуатации ненадежных систем может в 10-100 раз превышать их первоначальную стоимость.

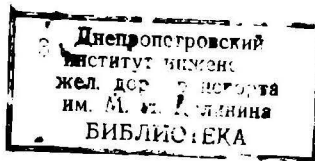
Для проектирования конструкций по критерию надежности необходимо знать ее нормативный уровень. Задача нормирования функции надежности решается двояко: обобщением опытных и натурных данных, либо путем оптимизации конструкций по критериям надежности с учетом ряда экономических характеристик - стоимости проектных разработок, изготовления, эксплуатации, ущерба от отказа системы и др.

Величина возможного ущерба является одним из факторов, имеющих принципиально важное значение в оптимизации, так как определяет степень ответственности системы и обеспечивает существование минимума функции стоимости, позволяющее найти искомую оптимальную надежность. Но до настоящего времени не существовало практического, достаточно обоснованного способа определения величины ущерба.

Таким образом, задача оптимизации механических систем по критериям надежности включает: 1) определение функции надежности; 2) определение всех составляющих функции стоимости, в том числе ущерба от отказа системы; 3) решение оптимизационных задач.

Решение задач надежностной оптимизации применительно к конкретным механическим системам позволит ускорить внедрение методов теории надежности в практику проектирования конструкций. В настоящее время, как отмечает В.Р.Болотин, уровень практического применения указанных методов невысок, что объясняется не-

1) Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Стройиздат, 1982. - 351 с.



достаточной разработанностью экономических моделей, условным характером численных значений стоимостных показателей и рядом других факторов.

Целью диссертации является разработка алгоритма надежностной оптимизации изгибаемых систем в условиях накопления повреждений с учетом ущерба от их отказа и его реализации для подкрановой балки.

Научную новизну работы составляет:

- алгоритм безусловной надежностной оптимизации, позволяющий определять оптимальный уровень надежности конструкций с чисто экономической ответственностью с учетом возможного ущерба от их отказа, определяемого на базе моделирования отказовых ситуаций;
- алгоритм анализа циклов повреждающих напряжений в произвольном сечении подкрановой балки, позволяющий определять совместную плотность распределения их экстремумов;
- аналитические выражения оценок долговечности и надежности подкрановых балок;
- результаты численного исследования зависимости долговечности, оптимальной надежности подкрановой балки от ее геометрических и физических параметров, величины ущерба и срока эксплуатации.

Практическая ценность диссертации заключается в том, что разработанные алгоритмы, реализованные в программах расчета на ЭВМ, позволяют:

- находить функции надежности подкрановых балок по критерию выносливости;
- прогнозировать величину возможного ущерба от их отказов;
- определять оптимальную надежность балок;
- проектировать более экономичные и надежные сварные подкрановые балки.

Внедрение. Полученные в диссертации результаты приняты ЦНИИСК им.В.А.Кучеренко для использования при пересмотре и совершенствовании основных положений расчета строительных конструкций (СТ СЭВ 384-76).

Результаты диссертационной работы внедрены на Магнитогорском металлургическом комбинате им.В.И.Ленина при прогнозировании долговечности, надежности и обосновании планирования ремон-

тов подкрановых балок, эксплуатирующихся в цехах комбината.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзных совещаниях по проблемам надежности строительных конструкций (Махачкала, 1977 г., Ростов-на-Дону, 1979 г.), Всесоюзном совещании по повышению эффективности и качества металлических конструкций (Валгород, 1979 г.), Республиканской конференции "Современное проектирование и прогрессивная технология изготовления строительных металлоконструкций" (Жданов, 1978 г.), зональной конференции по проблемам проектирования и внедрения рациональных строительных конструкций и сооружений в условиях Дальнего Востока и БАМа (Хабаровск, 1976 г.), XIV научно-технической конференции "Статистические методы расчетов на прочность" (Свердловск, 1979 г.), совместном научном семинаре кафедр испытания сооружений и металлических конструкций Московского ордена Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева (1979 г.), конференции молодых ученых Уральского промстройинипроекта (Свердловск, 1977 г.), ученом совете Уральского промстройинипроекта (1979, 1983 гг.), научном семинаре лаборатории надежности ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко (1983 г.), совместном научном семинаре лабораторий надежности и прочности Отдела комплексных проблем машиностроения УНЦ АН СССР (1983 г.), научном семинаре кафедры строительной механики Днепрпетровского ордена Трудового Красного Знамени института инженеров железнодорожного транспорта им. М. И. Калинина (1983 г.).

Объем работы. Диссертация изложена на 168 страницах, из которых 124 страницы занимает текст (введение, четыре главы и заключение), 20 страниц - рисунки (23 рисунка), 5 страниц - таблицы (9 таблиц), II страниц - литература (108 наименований), 8 страниц - приложение (документы о внедрении).

На защиту выносятся:

- алгоритмы безусловной надежностной оптимизации изгибаемых систем в условиях накопления повреждений с учетом ущерба от их отказов, определяемого на базе моделирования отказовых ситуаций;
- алгоритмы оценки долговечности и надежности стальной разрезной подкрановой балки по критерию выносливости;
- результаты численных исследований долговечности и оптимальной надежности подкрановых балок в реальных условиях эксплуатации.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дана общая характеристика работы.

Первая глава содержит краткий обзор и анализ современного состояния исследований по проблемам оптимизации механических систем, оценки их долговечности, методам расчета и оптимизации подкрановых балок.

Вопросы оптимизации механических систем, в частности, строительных конструкций, по критериям надежности были поставлены еще в 20-е годы Н.Ф.Хопиаловым, Эта идея была развита в работах Н.С.Стрелецкого, В.В.Болотина, А.Р.Ржаницына, А.Я.Држвинга, С.А.Тимашева, М.Шинозуки, А.Фрейденталя и др.

В настоящее время большинство оптимизационных задач приходится на минимизацию веса, объема или стоимости "в деле" конструкций. В этих задачах исследуются отдельные важные моменты в создании и эксплуатации конструкций, но учитываются не все существенные факторы процесса эксплуатации.

Прогресс в методах оптимизации механических систем связан с развитием теории надежности и более глубоким изучением природы отказов и их последствий. Фундамент развития современной теории надежности механических систем и внедрения ее методов в практику расчетов заложили труды В.В.Болотина, В.В.Гнеденко, С.В.Серенсена, А.Р.Ржаницына. Значительный вклад в это направление внесли И.А.Биргер, О.В.Лукин, С.А.Тимашев, В.Д.Райзер, М.Шинозука, П.Спанос, А.Анг, Я.Мужевски и др.

В.В.Болотин разработал теорию отказов механических систем в виде выбросов случайных процессов из области допустимых состояний, что позволило открыть новый этап в постановке и решении оптимизационных задач. Основопологающей чертой этого этапа является оптимизация функции надежности с учетом фактора времени  $t$ . Впервые эта задача была поставлена в работах В.В.Гнеденко и В.В.Болотина.

Наиболее корректная постановка таких задач основана на построении функции стоимости конструкции с учетом веса, стоимости "в деле", эксплуатационных факторов, надежности (как функции времени) и случайной величины ущерба от отказа системы.

Учет ущерба является принципиально важным в надежностной оптимизации, но в большинстве задач он не учитывался, так как

НИИ  
ДНУЖТ

не было способа его определения. В работах А.Р.Ржаницына, А.Я.Дривинга, Ю.Д.Сухова, В.А.Никифорова, Э.М.Иэги, Ф.Мозеса в функцию стоимости введен ущерб, но не дается метода его определения. В ряде работ С.А.Тимашева и В.В.Власова разработан один из возможных способов оценки величины ущерба, основанный на моделировании отказовых ситуаций.

Проблемой оптимизации систем с учетом долговечности занимался более узкий круг авторов (Э.М.Иэги, Ф.Мозес и др.), в работах которых присутствуют те же ограничения, что и в общем случае.

Анализу долговечности механических систем посвящено значительное число работ. Исследования С.В.Серенсена, В.В.Болотина, В.П.Кобаева, И.А.Биргера, С.Д.Волкова, В.И.Труфякова, С.Крендалда, Р.Петерсона, В.Вейбулла и др. заложили базу, позволившую изучать усталостные процессы в условиях сложного стохастического напряженного состояния, при узкополосном и широкополосном стационарном, квазистационарном и марковском процессах повреждения, включающего как зарождение, так и развитие усталостных трещин с учетом линейного и нелинейного суммирования повреждений, статистических аспектов кривой усталости.

Этот аппарат позволяет решать ряд практических задач и определять надежность механических систем по критерию выносливости, как это делается в работах В.В.Болотина, А.Р.Ржаницына, И.А.Биргера, В.П.Кобаева, Х.Б.Кордонского, С.А.Тимашева, Т.Йоксбори, Т.Койке, Н.Камеды.

В настоящее время он нашел применение в машиностроении, авиационной промышленности и ряде других отраслей, но еще недостаточно используется при расчетах строительных конструкций и, в частности, подкрановых балок. Натурные и экспериментальные исследования А.И.Кикина, Е.И.Белени, К.К.Муханова, И.Е.Спенглера, Д.С.Эглескална, К.А.Шилова, К.К.Нежданова, В.И.Камбарова и др. показали, что основным повреждающим фактором для подкрановых балок являются усталостные трещины в верхней зоне стенки.

Анализ действительной работы подкрановых балок проводится в исследованиях Е.И.Белени, А.И.Кикина, В.М.Горпинченко, А.И.Киневского, М.М.Гохберга, Б.Н.Кочутина, Д.С.Кунина, Ю.И.Кудыкина, К.А.Шилова, В.Ф.Сабурова и др., в которых экспериментально, либо на базе натурных обследований определяются усталостные характеристики, уточняются крановые нагрузки, модели взаимодействия

рельса и верхнего пояса, предлагаются конструктивные пути повышения прочности и долговечности балок. В работах М.М.Броуде, Б.Б.Лампси, В.А.Балдина, Н.С.Москалева, В.М.Горпинченко, В.П.Федосеева, И.Е.Спенглера, А.А.Апалько, Е.А.Митюгова, К.К.Нежданова, Э.А.Рывкина строятся модели сложного напряженного состояния стенки балки, исследуются отдельные компоненты напряжений, обсуждаются различные критерии проверки балок на выносливость.

Названные исследования заложили фундамент, на базе которого стала возможной разработка методики определения долговечности и надежности балок. Вместе с тем в этих работах недостаточно использовался современный аппарат анализа случайных усталостных процессов и не учитывалась в должной мере случайная природа процессов нагружения и деформирования балок.

Оптимизация балок проводилась в работах В.А.Балдина, Б.П.Михайлова, К.П.Гусева, В.М.Бахуркина, В.В.Захарова, А.В.Геммерлинга, Я.А.Каплуна, Б.Я.Володарского и др., где определялись оптимальные геометрические, физические, эксплуатационные параметры балок, но также не учитывалась их случайная природа.

На основе проведенного обзора определены цель и задачи диссертации.

Во второй главе приводится систематизация отказов по долговечности и дается алгоритм определения надежности подкрановых балок по критерию выносливости.

Конкретная реализация данного алгоритма проводится применительно к сварной разрезной подкрановой балке. Методика определения надежности основана на модели подкрановой балки, которая учитывает основные случайные параметры ее действительной работы (характеристики подвижной нагрузки, совместной работы кранового рельса и верхнего пояса, поверхности усталости балки и др.).

Предложенная в работе модель нагружения балки основана на простых циклах нагружения - сквозных проездах крана по балке со случайным грузом, что соответствует кусочно-постоянному во времени стационарному случайному процессу, характеризующемуся плотностью распределения  $f(R)$ , давления катков крана и числом циклов нагружения в единицу времени  $n_d$ .

Модель напряженного состояния стенки и критерии выносливости балки у разных авторов (В.М.Горпинченко, А.С.Лазарина, К.К.Нежданова и др.) конструируются по-разному. Для сварных балок экспери-

ментальных данных о корреляции различных критериев с реальными отрывами в настоящее время нет, что не позволяет однозначно определить, какой из критериев должен быть заложен в пространство качества балки при определении ее надежности. В диссертации используются разработанные в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко В.А. Балдиным, Н.С. Москалевым, В.П. Федосеевым рекомендации, в которых в качестве критерия выносливости предлагаются напряжения  $\sigma_{45}$ , действующие по площадкам, расположенным под углом  $45^\circ$  к продольной оси балки. Достоинством данной модели по сравнению с другими является то, что в ней учитывается влияние всех семи существенных компонент общих изгибных и местных напряжений в стенке балки при минимальной размерности пространства качества.

Построен алгоритм анализа стационарного случайного процесса изменения напряжений  $\sigma_{45}$  в произвольном фиксированном сечении балки  $X_0$  на уровне верхнего сварного шва. Показано, что каждый полный цикл  $\downarrow$  изменения напряжений  $\sigma_{45}$ , соответствующий сквозному проезду крана по балке, распадается на  $n_{кр}$  повреждающих циклов  $\downarrow_k$  (где  $n_{кр}$  - число катков крана), которые необходимо учитывать при прогнозировании долговечности балки.

В аналитическом виде получены зависимости локальных максимумов  $S_{1k}$  и минимумов  $S_{2k}$  циклов  $\downarrow_k$  от силы  $R$ , положения сечения  $X_0$  и вектора  $\bar{x}$  геометрических параметров сечения ( $\sigma_0$  - напряжения от собственного веса балки и рельса)

$$S_{ik}(R, \bar{x}, X_0) = C_{ik}(\bar{x}, X_0)R + \sigma_0(\bar{x}, X_0); i=1,2 \quad (1)$$

В этих зависимостях величина  $R$  является случайной. Для определения плотности распределения  $f(R)$  разработан алгоритм, позволяющий по известным натурным данным о положении крана в цехе, тележки на мосту крана и величине поднимаемого груза получить моменты распределения и, на базе принципа максимума энтропии, плотность  $f(R)$ . Алгоритм применен для обработки натуральных данных о работе специального крана грузоподъемностью 24 т, эксплуатирующегося на Карагандинском металлургическом комбинате (натурные данные принадлежат А.Т. Яковенко). В результате получен усеченный нормальный закон  $f(R)$  с математическим ожиданием и стандартом, равными 229 кН и 74,8 кН.

По известным зависимостям (1) и функции  $f(R)$  найдена

совместная плотность распределения экстремумов процесса повреждающих напряжений  $f(S_{1k}, S_{2k})$ . Показано, что процесс случайных колебаний напряжений  $\sigma_{45}$  в фиксированном сечении балки является стационарным и узкополосным.

На базе введенного В.В.Болотиным понятия характеристической долговечности, используя выражение для поверхности усталости, полученное на основе диаграммы Гудмана, найдена в аналитическом виде долговечность  $T_g$  произвольного фиксированного сечения балки

$$T_g = A Q_{-1}^m; A(\bar{x}, x_0) = \frac{2 N_\sigma}{n_\sigma \beta^m Q_{\sigma p}^m} \left\{ \sum_{k=1}^{n_{кр}} [J_k(x, x_0) + J_k(\bar{x}, L - x_0)] \right\}^{-1}$$

$$J_k = \int_{R_{min}}^{R_{max}} f(R) \left[ \frac{S_{1k}(R) - S_{2k}(R)}{2 Q_{\sigma p} - S_{1k}(R) - S_{2k}(R)} \right]^m dR, \quad (2)$$

где  $N_\sigma$  - базовое число циклов;  $\beta$  - коэффициент концентрации напряжений;  $m$  - параметр наклона кривой усталости;  $Q_{-1}$ ,  $Q_{\sigma p}$  - пределы усталости и прочности;  $L$  - длина балки.

Случайный разброс параметров балки порождает стохастический характер ее долговечности. Аналитический и численный анализ показал, что основной вклад в разброс долговечности вносят такие случайные факторы, как пределы усталости  $Q_{-1}$  и прочности  $Q_{\sigma p}$ , число циклов нагружения балки в единицу времени  $n_\sigma$ , коэффициент пропорциональности  $K_\theta$  угла закручивания  $\theta$  при кручении верхней полки и местном изгибе стенки; высота  $h$  и толщина  $\delta$  стенки балки.

Плотности  $f(K_\theta)$ ,  $f(n_\sigma)$  получены на базе статистической обработки методом максимума энтропии массивов значений угла  $\theta$ , коэффициента  $K_\theta$  (собранных В.И.Камбаровым и переданных им любезно автору) и частоты нагружения  $n_\sigma$  (найденных на основе обработки натурной информации А.Т.Яковенко). Плотности распределения  $f(Q_{\sigma p})$ ,  $f(Q_{-1})$ ,  $f(h)$ ,  $f(\delta)$  взяты из экспериментальных и натуральных исследований М.Р.Урицкого, В.И.Труфякова, И.В.Кудрявцева, Н.Е.Наумченкова, Я.М.Зильбера.

По известным плотностям распределения названных параметров и аналитическим зависимостям от них долговечности  $T_g$ , используя комбинацию методов последовательной замены случайных аргу-

ментов, Монте-Карло и максимума энтропии, найдена плотность распределения стохастической долговечности  $f_T$  и надежность произвольного фиксированного сечения балки  $P(t, \bar{x}, x_0)$ .

Предложен способ нахождения наиболее опасных сечений балки из условия минимума функции  $P(t, \bar{x}, x_0)$  и получена оценка надежности балки в целом по этим сечениям.

Разработанный в диссертации алгоритм определения надежности подкрановой балки учитывает изученные на сегодня существенные моменты ее действительной работы и может быть модифицирован для ряда других изгибаемых систем, находящихся под воздействием подвижной нагрузки, а также для различных моделей нагружения и деформирования балок.

В третьей главе приведен алгоритм решения задачи надежностной оптимизации изгибаемых систем, подверженных усталостным повреждениям, и его реализация применительно к подкрановой балке.

Проведена систематизация ущербов от отказов по долговечности, построена функция стоимости изгибаемых систем с экономической ответственностью, находящихся в условиях накопления повреждений, с учетом этапов их проектирования, изготовления и возможного отказа при эксплуатации.

Проанализированы существующие предложения и способы оценки ущерба от отказов строительных конструкций. Показана необходимость применения для оценки ущерба  $C_y$  метода, основанного на многократном моделировании отказа конкретной единичной конструкции и всех его технико-экономических последствий.

Предложен и обоснован алгоритм безусловной надежностной оптимизации изгибаемых систем, подверженных усталостным повреждениям, позволяющий находить оптимальные параметры конструкций без введения априорных ограничений на их надежность.

Разработана методика надежностной оптимизации подкрановой балки, основанная на построении ее функции полной стоимости (включая этап определения ущерба от отказа) в виде

$$C(T, \bar{x}) = C_0(T) + C_y(\bar{x}) + C_z(\bar{x}) \int_0^{z_T(\bar{x})} f_{a_1}(z) (1 + E_{nn})^{Az^{mN}} dz, \quad (3)$$

где  $z_T(\bar{x}) = \{T/A(\bar{x}, x_0)\}^{1/m}$ ,  $C_0(T)$  - составляющие стоимости, не зависящие явно от параметров балки  $\bar{x}$  (стоимость проектных раз-

работок, эксплуатации и т.п.);  $C_g(\bar{x})$  - стоимость "в деле";  $E_{нп}$  - коэффициент дисконтирования расходов;  $N$  - коэффициент перевода величины  $A z^m$  в годы.

Получены статистические характеристики случайной величины ущерба от неаварийного (усталостные трещины) и аварийного отказов подкрановой балки в условиях металлообрабатывающего и литейно-прокатного производства, а также ущерб от обрушения мостового крана. Показано, что при обрушении балки либо крана основную долю в экономическом ущербе составляют стоимость ремонта оборудования и потери прибыли от его простоя (65% и более). В практических расчетах ущерб от неаварийного и аварийного отказов балок, эксплуатирующихся в цехах металлообрабатывающего производства, можно принимать соответственно равными 5-6 и 25-30 их стоимости "в деле". В литейно-прокатных цехах ущерб от отказа балки возрастает в 3-4 раза.

Проведена модификация задачи безусловной оптимизации с учетом требований действующих норм расчета балок (СНиП П-23-81).

Четвертая глава посвящена численной реализации разработанных в диссертации алгоритмов.

Расчеты проводились на ЭВМ "БЭСМ-6" для сварных разрезных подкрановых балок длиной 12 м, подвергающихся воздействию мостового крана, имеющего четыре катка, грузоподъемностью 24 т, натурные данные о работе которого использовались во второй главе при определении плотности  $f(R)$  и частоты нагружения  $n_{ц}$ . Проведены численные исследования зависимости напряженного состояния, предела выносливости, долговечности, надежности и стоимости балки от вектора  $\bar{x}$  параметров сечения, изменяющихся в области  $\Omega$ , моделей деформирования, условий нагружения, срока эксплуатации и других параметров.

Анализ показал, что определение местных напряжений изгиба и кручения  $\sigma_{45}^{изг}$  через угол  $\theta$  закручивания верхнего пояса, являясь наиболее достоверным, понижает уровень этих напряжений (до 20%) по сравнению с оценкой  $\sigma_{45}^{изг}$  через крутящий момент  $M_{кр}$ , зависящий от эксцентриситета приложения давления катка и горизонтальных составляющих крановой нагрузки. Исследованы достоинства и недостатки, определены области преимущественного применения в расчетах каждой из двух этих моделей. Предложена комбинированная модель, суммирующая достоинства обоих способов.

НТБ  
ДНУЖТ

Показано, что местные напряжения  $\sigma_{4,5}(R)$  могут более, чем в два раза превышать общие напряжения от изгибающего момента и перерезывающей силы. Это требует обязательного учета сложной локальной экстремальной структуры повреждающих циклов напряжений в балке при определении ее долговечности и надежности. Неучет этого фактора может привести к ошибке до 20%.

Проведен численный анализ нижних оценок предела выносливости балки  $Q_{вн}$  с учетом случайного разброса коэффициента асимметрии циклов напряжений. Показано, что  $Q_{вн}$  монотонно убывает с ростом размеров сечения балки. Изменчивость  $Q_{вн}$  в области  $\Omega$  невелика и практически не влияет на оценку долговечности и надежности, в силу чего  $Q_{вн}$  может считаться постоянным для фиксированных условий эксплуатации балки. В качестве первого приближения  $Q_{вн}$  по напряжениям  $\sigma_{4,5}$  получено осредненное значение  $Q_{вн} = 102$  МПа, которое на 11% отличается от аналогичной экспериментальной оценки В.П.Федосеева.

Проанализирован характер зависимости долговечности  $T_q$  и надежности  $P$  балки от габаритов сечения и его положения по длине балки. Показано, что изменение надежности  $P(t, \bar{x}, x_0)$  вдоль оси балки зависит от особенностей процесса ее нагружения; в случае эквивалентности двух противоположных направления движения крана по балке надежность  $P$  изменяется симметрично относительно центра балки и достигает минимума в двух наиболее опасных сечениях  $x_{оп}$ , которые находятся, в основном, в зоне  $(0,45-0,55)L$ . В случае неэквивалентности движений имеется одно сечение  $x_{оп}$ , расположенное на расстоянии  $(0,3-0,45)L$  от левого, либо правого конца балки.

Выявлено влияние симметричного, несимметричного и одностороннего (кольцевого) процессов нагружения (обусловленных технологией производства, обслуживаемого краем) на долговечность и надежность подкрановых балок.

Надежность  $P$  балки в целом, определяемая по наиболее опасным сечениям, быстро убывает с ростом срока эксплуатации (до 40% при увеличении  $T$  с 5 до 20 лет) и монотонно возрастает с увеличением размеров сечения. Надежность наиболее чувствительна по отношению к толщине стенки. Среди других параметров балки наиболее существенными для ее долговечности и надежности являются величина крановой нагрузки, режим работы крана, коэффи-

риент концентрации напряжений  $\beta$  и характеристики поверхности усталости.

Получены оценки долговечности и надежности балок с учетом случайного разброса предела прочности и частоты нагружения. Показано, что увеличение числа параметров, случайная природа которых учтена при расчете выносливости балок, дает уточнение оценки долговечности на 60-85% и надежности на 10-35%.

Проведено сравнение критериев прочности, местной устойчивости и выносливости балок по методикам, заложенным в современные нормы их расчета, и разработанных в диссертации алгоритмов оценки долговечности и надежности подкрановых балок. Анализ показал, что а) критерий выносливости почти всюду в области  $\Omega$  мажорирует условия прочности и устойчивости; б) проверка выносливости подкрановых балок в действующем СНиП по принципу превышения максимальными напряжениями предела выносливости закладывает в балки завышенный уровень надежности.

Численный анализ функции полной стоимости балки  $C(T, \bar{x})$  показал, что она имеет в области  $\Omega$  абсолютный минимум. Это позволяет проводить двумерную безусловную оптимизацию балки. Для конкретных условий нагружения найдены оптимальные сечения балок при различных сроках эксплуатации  $T$  и ущербах от отказа балок  $C_y$ . Показано, что применение закругленного значения ущерба  $C_{y3}$ , полученного без моделирования отказовой ситуации, ведет к перерасходу материала в оптимальных сечениях на 15-25%.

Разработан алгоритм оптимизации балок с обеспечением нормативной надежности  $P_n(T)$ , позволяющий находить оптимальные параметры экономически эффективных балок без изменения существующей практики их проектирования, изготовления и эксплуатации. Алгоритм реализован на ЭВМ "БЭСМ-6". По полученным Д.С.Эглескиным натурным данным об отказах эксплуатирующихся подкрановых балок найдены оценки  $P_n(T)$  и соответствующие оптимальные параметры балок.

Анализ результатов оптимизации показал, что

- повышение требуемого срока эксплуатации  $T$  с 5 и 10 лет до 20 и 50 лет ведет к росту оптимальных параметров сечения балки, в частности толщины поясов на 8-19% и толщины стенки на 7-16% (для различных  $T$  и величин ущербов  $C_y$ );
- изменение технологии производства, обслуживаемого краном, и, как следствие, рост ущерба от возможного неаварийного отказа

балки в 3-4 раза приводит к увеличению оптимальных параметров сечения - толщины полки и стенки на 7-14% и оптимальной надежности на 4-22% (для разных  $T$ );

- учет ущерба от аварийного отказа балки требует роста оптимальных параметров ее сечения на 7-20% по сравнению с неаварийным отказом.

Сравнение оптимальных параметров с характеристиками балки минимального веса  $H_{min}$ , рассчитанной по действующему СНиП для той же нагрузки, показало, что

- в балках, обладающих оптимальной надежностью, можно уменьшить (до 21%) толщину поясов при одновременном некотором увеличении толщины стенки по сравнению с балкой  $H_{min}$ ;

- более рациональное распределение материала в сечениях балок позволяет несколько уменьшить их материалоемкость (на 2-10% для  $T = 20$  и 50 лет) и снизить надежность проектируемых по СНиП балок до оптимальных значений  $P_{оп}$

Проведенные единичные сравнения не позволяют дать обобщенных конкретных рекомендаций по проектированию подкрановых балок, но иллюстрируют возможности применения разработанных в диссертации алгоритмов для обоснования процедур нормирования надежности и более рационального распределения материала в сечениях балок и аналогичных изгибаемых конструкций, находящихся под воздействием подвижной нагрузки.

Полученные в диссертационной работе результаты показывают также необходимость дальнейшего уточнения методик расчета подкрановых балок. Одним из возможных путей такого уточнения является использование в практике проектирования балок критерия обеспечения их нормативной надежности с учетом ограничений по выносливости, прочности и устойчивости.

Выводы гл.4 согласуются с известными результатами экспериментальных и натурных исследований напряженного состояния и долговечности балок. На базе сравнений теоретических оценок и фактической долговечности эксплуатируемых на Челябинском металлургическом заводе балок показана достоверность разработанных в диссертации алгоритмов.

#### Основные результаты

I. Разработан алгоритм безусловной надежностной оптимизации изгибаемых систем в условиях накопления повреждений с уче-

том ущербов от их отказов, определяемых на базе моделирования отказовых ситуаций.

2. Разработан алгоритм определения долговечности и надежности подкрановых балок, основанный на использовании современного аппарата анализа стохастических усталостных процессов применительно к повреждающим циклам напряжений в балках. Алгоритм учитывает изученные на сегодня существенные моменты действительной работы подкрановых балок, при его разработке решен ряд задач по анализу случайных процессов нагружения, деформирования, накопления повреждений в балках и определению наиболее опасных сечений.

3. Построены методики безусловной надежностной оптимизации подкрановых балок, а также оптимизации по критерию обеспечения нормативной надежности балок.

4. Полученные в диссертации алгоритмы реализованы на ЭВМ "БЭСМ-6". Анализ результатов численных расчетов позволил исследовать влияние моделей деформирования, геометрических характеристик сечения, условий нагружения и других параметров на напряженное состояние, долговечность, стоимость и оптимальную надежность балки.

5. На базе сравнения с результатами экспериментальных, натурных исследований напряженного состояния и долговечности подкрановых балок показана достоверность разработанных в диссертации алгоритмов.

6. На примере одного из реальных кранов проведено сравнение выносливости, надежности и характеристик сечения оптимальных (экономически эффективных) балок с балкой минимального веса, рассчитанной по действующему СНиП. Показана возможность более рационального распределения материала в сечении проектируемых балок, что позволит в ряде случаев снизить на 2-10% материалоемкость балок при одновременном обеспечении их оптимальной надежности.

7. Проведенные численные исследования показали возможность использования построенных в диссертационной работе методик для обоснования процедур нормирования надежности изгибаемых конструкций балочного типа, подверженных воздействию подвижных нагрузок.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Власов В.В. Применение методов теории надежности и оптимизации к расчету подкрановых балок. - В кн.: Строительные конструкции и архитектура промышленных зданий: Тез. докл. I городской конф. молодых ученых. Свердловск, 1977, с.5-6.

2. Власов В.В. К определению величины ущербов при разрушении строительных конструкций. - В кн.: Строительные конструкции и архитектура промышленных зданий: Тез. докл. I городской конф. молодых ученых. Свердловск, 1977, с.3-4.

3. Тимашев С.А., Власов В.В., Бареева Г.Н. Оптимизация стальных подкрановых балок по критериям надежности. - В кн.: Современное проектирование и прогрессивная технология изготовления строительных металлоконструкций: Тез. докл. республиканской конф. (Жданов, ноябрь 1978 г.), Киев, 1978, с.154.

4. Тимашев С.А., Власов В.В. Метод оценки величины ущербов от различного вида отказов строительных конструкций. - В кн.: Исследования в области надежности инженерных сооружений. Сб. трудов/Ленпромстройпроект, Л., 1979, с.25-35.

5. Тимашев С.А., Власов В.В., Бареева Г.Н. Определение оптимального уровня надежности стальных подкрановых балок. - В кн.: Повышение эффективности и качества металлических конструкций: Тез. докл. Всесоюзного совещания (Белгород, октябрь 1979 г.), М.: Стройиндат, 1979, с.250-251.

6. Власов В.В. Надежностная оптимизация подкрановых балок. - В кн.: Надежность и долговечность механических систем. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1982, с.76-93.



НС-14058 подписано к печати 08.04.83г.

заказ № 126 Тираж-100 экз.

формат 60 x 80 объем I-п.л. бесплатно

---

Ротапринт Уральского ПромстройНИИпроекта  
Свердловск, пр.Ленина 50а.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ  
ДНУЖТ