

01.02.06

X 982

V

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

На правах рукописи

Худяков Альберт Васильевич

УДК 589.3: 519.23

ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ТЕПЛОСМЕНАХ

Специальность 01.02.06 -- "Динамика, прочность
машин, приборов и аппаратуры"

А н т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Челябинск -- 1989

Работа выполнена на кафедре "Сопротивление материалов, динамика и прочность машин" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Гохфельд Д.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Гецов Л.Б.,

кандидат технических наук,
доцент Икрин В.А.

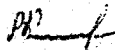
Ведущая организация - НИИтяжмаш производственного объединения
"Уралмаш".

Защита состоится " _____ " _____ " 1989 года на заседании
специализированного совета Д 053.13.01 в Челябинском политехни-
ческом институте (454044, г. Челябинск, пр. им. Ленина, 76).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " _____ " _____ 1989 года

Ученый секретарь
специализированного совета
кандидат технических наук,
доцент



В.М.Коновалов

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ. Элементы многих конструкций, применяемых в различных областях техники, в процессе эксплуатации испытывают циклически изменяющиеся воздействия механических и тепловых нагрузок. В этих условиях нарушение работоспособности конструктивных элементов возможно в результате циклического неупругого деформирования одного из двух типов - знакопеременного течения или одностороннего накопления деформаций (прогрессирующего формоизменения). Проблема возникновения знакопеременного течения и прогрессирующего формоизменения в элементах теплонапряженных конструкций весьма актуальна для ряда узлов и агрегатов энергетических установок, авиационной техники, технологического оборудования металлургической и химической промышленности. Она имеет прямое отношение к таким объектам металлургического оборудования, как корпуса обжиговых и агломерационных конвейерных машин. Как показывает опыт эксплуатации, работоспособность обжиговых тележек, испытывающих циклические воздействия тепловых потоков большой мощности, ограничена возникновением односторонней необратимой деформацией, нарастающей с каждым циклом, а также ростом термоусталостных трещин. Практическая актуальность проблемы долговечности обжиговых тележек связана с тем, что их преждевременный выход из строя не только приводит к расходу дорогостоящей легированной стали, из которой они изготовлены, но и к остановкам конвейера в условиях непрерывного производства.

При решении проблемы повышения безотказной работы обжиговых тележек, изготовленных из материалов со стохастическими свойствами пределов текучести и подверженных случайным внешним воздействиям, важное значение имеет разработка эффективных методов оценки работоспособности конструкций на стадии проектирования, доводки и модернизации. С другой стороны надежность оборудования необходимо учитывать при выборе оптимальных технологических режимов эксплуатации.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ. Разработка методов расчета параметров предельного цикла упругой приспособляемости конструкций, изготовленных из материалов со стохастическими свойствами, подверженных случайным циклическим внешним воздействиям, и использование этих методов для решения задачи по определению несущей способности обжиговых тележек.

Создание методики оценки долговечности обжиговых тележек по

критерию возникновения термоусталостной трещины (с использованием результатов исследования кинетики неупругого деформирования конструкции) при случайном повторном нагружении.

Получение регрессионных моделей несущей способности обжиговых тележек по критериям приспособляемости в зависимости от технологических параметров обжига окатышей и на этой основе определение области безопасного сочетания технологических факторов по критериям безотказной работы оборудования.

НА ЗАЩИТУ ВНОСЯТСЯ:

1. Методика расчета параметров предельного цикла упругой приспособляемости конструкций, изготовленных из материалов со стохастическими свойствами, подверженных случайным тепловым воздействиям, и ее использование для решения задачи по определению несущей способности обжиговых тележек.
2. Методика оценки долговечности обжиговых тележек по критерию возникновения термоусталостной трещины, с использованием результатов расчетного исследования кинетики неупругого деформирования конструкций при случайном повторном нагружении.
3. Детерминированная оценка несущей способности обжиговых тележек различных конструкций по данным экспериментального исследования их температурных полей.
4. Регрессионные модели несущей способности обжиговых тележек по критериям приспособляемости (в зависимости от технологических параметров обжига окатышей) и методика построения диаграмм приспособляемости.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Разработан метод расчета вероятности безотказной работы теплонапряженных конструкций по критериям приспособляемости при случайном тепловом воздействии. Разработана методика выбора экономически оправданных минимальных коэффициентов запаса по критериям приспособляемости для существующих или вновь проектируемых конструкций.

Приведена оценка долговечности элементов обжиговых тележек по критерию возникновения трещины малоциклового усталости при случайном повторном нагружении.

Разработана методика получения математических моделей несущей способности элементов обжиговых тележек по критериям приспособляемости и диаграмм приспособляемости в зависимости от технологических параметров обжига окатышей.

Выполнен активный эксперимент и получены регрессионные модели

несущей способности тележек в зависимости от технологических параметров обжига окатышей, характерных для условий эксплуатации.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ. Разработаны методики и алгоритмы решения задачи расчета элементов обжиговых тележек по критериям приспособляемости при детерминированных и случайных тепловых воздействиях и составлены вычислительные программы для ЭВМ серии ЕС. Разработан алгоритм и составлена вычислительная программа для ЭВМ получения математических моделей несущей способности тележек в зависимости от технологических параметров обжига окатышей, указаны области безопасного сочетания этих параметров. На основе анализа проведенных расчетов разработаны варианты изменения конструкции тележки, защищенные тремя авторскими свидетельствами. Общий экономический эффект внедренных мероприятий составляет 225 тыс. руб.

Работа выполнена в соответствии с тематикой Координационного плана НИР по проблеме I.10.2 "Механика деформированного твердого тела" на 1981-85 гг. (АН СССР), связанным с проблемами разработки и внедрения методов оценки несущей способности и долговечности теплонапряженных конструкций, и Координационным планом МЧМ СССР (тема 2.4-18.24.79), а также в соответствии с программой стандартизации по надежности, прочности и износостойкости на 1981/85 и на период до 1990 г. (№ 450-I.09.82), утвержденной Постановлением Госстандарта СССР от I.10.81 (задание МР I.09.06.07 "Методика анализа эксплуатационной нагруженности в связи с оценкой долговечности при случайном нагружении").

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ. Разработанные в диссертационной работе методы расчета на стохастическую приспособляемость элементов обжиговых тележек, соответствующее математическое обеспечение и программы, а также результаты отдельных расчетов внедрены на ПО Уралмаш НИИтяжмаш. Обжиговая тележка, измененной конструкции, проходит промышленную проверку на Костомукшском горно-обогатительном комбинате (ГОКа). В конструкторскую документацию тележки Каратауского химзавода внесены предложенные в работе изменения. Планируется внедрение математических моделей несущей способности тележек в зависимости от технологических параметров обжига окатышей при эксплуатации обжиговой машины Костомукшского ГОКа.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Материалы работы докладывались и обсуждались на научно-техническом семинаре "Способы повышения долговечности и надежности теплонапряженного металлургического и горно-металлургического оборудования" (г. Челябинск, 1983), XII Всесоюз-

ной конференции по прочности и пластичности (г. Пермь, 1983), III Всесоюзной конференции по расчетам на прочность металлургических машин (г. Москва, 1985), XXXII-XXXIX научно-технических конференциях Челябинского политехнического института (1981-1988).

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 статьях, на основе исследований разработаны изобретения, на которые получено 3 авторских свидетельства.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и выводов, списка литературы и приложения. Она содержит 170 страниц основного текста, 9 таблиц, 29 рисунков. Библиография включает 153 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ причин и условий возникновения прогрессирующего формоизменения и термоусталостного разрушения конструкций, работавших в условиях неизотермического нагружения, может быть выполнен на основе методов предельного анализа, в частности, теории приспособляемости. Достоинство указанного подхода состоит в том, что он позволяет наиболее просто указать, в каком случае пластические деформации не прекращаются и приводят к потере работоспособности, а также оценить какого рода разрушение следует ожидать - путем накопления односторонних деформаций или вследствие появления трещин.

Обычно приспособляемость конструкции рассматривается в детерминированной постановке. Однако расчетная оценка прочности, предполагающая строго детерминированные характеристики материала, из которого изготовлена конструкция, и детерминированные внешние воздействия, имеет определенные недостатки. Такой подход может привести как к излишним мерам предосторожности при проектировании и эксплуатации, так и к недостаточной надежности конструкции. Это связано с тем, что исходные данные, необходимые для расчетной оценки прочности конструкции и получаемые в результате измерений, всегда содержат некоторую неопределенность (случайность). Так, случайный характер пластических свойств материала во многом связан с неоднородностью и колебаниями химического состава, режимов термообработки и другими факторами. Случайность параметров внешних воздействий определяется характером и особенностями эксплуатации. При этом следует помнить, что из всей генеральной совокупности параметров внешних воздействий в натуральных экспериментах реализуются

лишь некоторые. Стохастическая постановка задачи теории приспособляемости обсуждалась в работах Хорна, Маспретта, Аугусти и Баратты

В диссертации рассматривается постановка задачи стохастической упругой приспособляемости конструкций. В общей формулировке задача сводится к проблеме стохастического программирования. Применительно к рассматриваемым в работе конкретным условиям используется возможность сведения проблемы стохастического программирования к задаче вероятностной оценки параметров предельного цикла в рамках кинематической теоремы теории приспособляемости. Методика такой оценки рассмотрена на примере расчета тележек обжиговых конвейерных машин. Кроме того, выполнена оценка долговечности тележек по критерию возникновения трещин малоциклового усталости при случайном повторном тепловом нагружении. Разработаны математические модели несущей способности тележек по критериям приспособляемости в зависимости от технологических параметров обжига скатиншей.

Задача стохастической приспособляемости конструкции

Проблема определения параметров предельного цикла для конструкции, изготовленной из материала со стохастическими свойствами предела текучести и подвергаемой многопараметрическим случайным внешним воздействиям, может быть сформулирована в рамках статической и кинематической теорем теории приспособляемости. Предположим, что при стохастических внешних воздействиях и свойствах материала поведение конструкции после небольшого числа первых циклов с вероятностью P_0 станет чисто упругим и скорости пластических деформаций в течение каждого цикла нагружения с той же вероятностью будут равны нулю. Согласно статической теореме приспособляемости в указанном смысле будет иметь место, если существует такое распределение независимых от времени остаточных напряжений $\bar{\rho}_{ij}$, которые в сумме со стохастическими упругими напряжениями $\sigma_{ij}^{(e)}$ с вероятностью близкой к единице образуют напряженное состояние внутри стохастической поверхности текучести

$$P\{f(\sigma_{ij}^{(e)} + \bar{\rho}_{ij}) \leq 0\} \geq P_0, \quad (1)$$

где $P(\cdot)$ - вероятность события; $f(\cdot) = 0$ - уравнение поверхности текучести. При этом должны выполняться условия равновесия

$$\bar{\rho}_{ij,j} = 0, \quad \bar{\rho}_{ij} n_j = 0. \quad (2)$$

В рамках кинематической теоремы приспособляемости при случайных внешних воздействиях и свойствах материала стохастическими условиями неприспособляемости является существование с вероятностью P_q , близкой к единице, отличных от нуля скоростей пластических деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}''$, удовлетворяющих условию совместности приращений пластических деформаций $\Delta \epsilon_{ij}''$.

$$\Delta \epsilon_{ij}'' = \frac{1}{2} (\Delta u_{i,j}^0 + \Delta u_{j,i}^0), \quad (3)$$

где Δu_i^0 — приращения остаточных перемещений за цикл.

При этом с той же вероятностью должно выполняться условие

$$P \left\{ \int_V \min_{\tau} [(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{(e)}) \Delta \epsilon_{ij}''] dV \leq 0 \right\} \geq P_q. \quad (4)$$

Скорости деформаций связаны с напряжениями на поверхности течения ассоциированным законом течения

$$\dot{\epsilon}_{ij}'' = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha} \partial f(\sigma_{ij}) / \partial \sigma_{ij}, \quad \lambda_{\alpha} \geq 0. \quad (5)$$

В такой постановке задача стохастической приспособляемости сводится к проблеме стохастического программирования. Множество стохастических полей остаточных напряжений и кинематически возможных приращений пластических деформаций, входящих в неравенства (1) и (4) (при выполнении условий (2), (3) и (5)), образуют множества соответствующих нижних и верхних оценок параметров предельного цикла, которые с вероятностью P_q превращают неравенства в равенства. Проблема определения стохастических параметров предельного цикла может быть сформулирована как экстремальная со стохастической целевой функцией, роль которой играет искомым параметр, подлежащий максимизации или минимизации (в зависимости от постановки задачи) при соответствующих стохастических ограничениях.

Проблема определения стохастических параметров предельного цикла по условию возникновения знакопеременного течения может быть сведена к выполнению условия

$$P \left\{ \min_{\tau} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{(e)}) \dot{\epsilon}_{ij}'' - \max_{\tau} (\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{(e)}) \dot{\epsilon}_{ij}'' \leq 0 \right\} \geq P_q, \quad (6)$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}''$ — вектор скорости пластической деформации в одном из полуциклов, в каждой точке тела ортогональный к стохастической поверхности течения.

Одним из путей упрощения задачи стохастической приспособляемости является замена условия (4) (нахождение параметров предель-

ного цикла с заданной доверительной вероятностью) условиями минимизации неизвестных параметров предельного цикла при произвольной вероятности, которая в этом случае будет характеризовать вероятность отказа (возможность накопления необратимых пластических деформаций) по условиям прогрессирующего формоизменения. В случае, если механические нагрузки незначительны, согласно преобразованной кинематической теореме вероятность возникновения прогрессирующего формоизменения можно представить в виде

$$\bar{R}_\Phi = P\left\{ \int_V \min_T [(\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{(e)}) \Delta \varepsilon_{ij}^p] dV \leq D \right\}. \quad (7)$$

Дальнейшее снижение трудоемкости решения задачи стохастической приспособляемости связано с использованием приближенного кинематического метода, который состоит в задании с точностью до множителя, "подходящих" распределений, независимых от времени приращений пластических деформаций (задание кинематического механизма разрушения). Используя приближенный кинематический метод теории приспособляемости в случае неизотермического нагружения, предположим, что размеры стохастической поверхности текучести, при сохранении ее выпуклости и ортогональности к ней детерминированного вектора скорости пластической деформации, параметрически зависят от температуры. Примем также, что рабочий и предельный циклы нагружения конструкции отличаются лишь пропорциональным изменением распределения стохастических термоупругих напряжений (пропорциональным изменением температурных градиентов) и, что температурное поле зависит только от одного параметра. Минимизируя по времени и интегрируя по объему выражение (7), результат можно представить в виде

$$\bar{R}_\Phi = P(A_S - A_e \leq D). \quad (8)$$

Здесь A_S, A_e - диссипация энергии и работа термоупругих напряжений, удовлетворяющие минимуму разности подинтегрального выражения (7).

Вероятность безотказной работы конструкции по условиям возникновения прогрессирующего формоизменения можно определить из выражения (8) двумя способами: а) используя числовые характеристики и приняв какой-либо, близкий к реальному, закон распределения работы термоупругих напряжений и диссипации энергии; б) рассматривая коэффициент запаса по формоизменения как случайную величину (закон распределения значений запаса приняв произвольным).

При нормальном законе распределения работы термоупругих нап-

ражений и диссипации энергии вероятность безотказной работы конструкции можно определить из выражения

$$R_{\alpha} = 1 - \Phi \left\{ - \left(\bar{A}_S - \bar{A}_e \right) \left[S^2(A_S) + S^2(A_e) \right]^{-1/2} \right\}, \quad (9)$$

где $\Phi(\cdot)$ - интеграл вероятности; $A_S, A_e, S^2(A_S), S^2(A_e)$ - математические ожидания и дисперсии диссипации энергии и работы термоупругих напряжений, соответственно.

С другой стороны, вероятность безотказной работы по условию возникновения формоизменения, используя коэффициент запаса как случайную величину, можно определить из выражения (аналогичного предложенному в работе К. Капура и Л. Ламберсона)

$$R_{\phi} \geq 1 - \left(\bar{n}_{\phi} V_{n\phi} \right)^2 \left[\left(\bar{n}_{\phi} V_{n\phi} \right)^2 + \left(\bar{n}_{\phi} - 1 \right)^2 \right]^{-1}, \quad (10)$$

где $\bar{n}_{\phi} \approx A_S/A_e$ - среднее значение коэффициента запаса по формоизменению;

$$V_{n\phi} \approx \left(V_{A_S}^2 + V_{A_e}^2 \right)^{1/2} \left(1 + V_{A_e}^2 \right)^{-1}, \quad (11)$$

V_{A_e}, V_{A_S} - коэффициенты вариации работы термоупругих напряжений и диссипации энергии.

Вероятность возникновения знакопеременного пластического течения (отказа) можно определить используя выражение (6). Для случая линейного напряженного состояния ее можно представить в виде

$$\bar{R}_3 = P \left\{ \min_i (\sigma_S - \sigma^{(e)}) - \max_j (-\sigma_S - \sigma^{(e)}) \leq 0 \right\}, \quad (12)$$

где \bar{R}_3 - вероятность отказа по условию знакопеременного течения; σ_S - предел текучести, $\sigma^{(e)}$ - термоупругие напряжения в точке конструкции. Полагая, что с помощью выражения (12) определены характерные моменты времени i и j , при которых в опасной точке конструкции достигается минимум и максимум указанных разностей, это выражение можно представить в более краткой записи

$$\bar{R}_3 = P \left\{ \Delta \sigma_S - \Delta \sigma^{(e)} \leq 0 \right\}, \quad (13)$$

где $\Delta \sigma_S = \sigma_{S_i} + \sigma_{S_j}$ - сумма пределов текучести для соответствующего температурного перепада, $\Delta \sigma^{(e)} = \sigma_j^{(e)} - \sigma_i^{(e)}$ - размах термоупругих напряжений. Как и для прогрессирующего формоизменения вероятность безотказной работы по условию возникновения знакопеременного течения может быть определена из выражения (13) двумя способами: а) используя числовые характеристики и приняв закон распределения размахов термоупругих напряжений и предела текучести из выражения, аналогич-

чного (9) (заменяя работу термоупругих напряжений и диссипацию энергии соответствующими размахами термоупругих напряжений и предела текучести); б) из выражения, аналогичного (10), рассматривая коэффициент запаса по знакопеременному течению как случайную величину. Отметим, что оценки вероятности безотказной работы по критериям приспособляемости, полученные для случая б), справедливы при любых законах распределения коэффициентов запаса и в рамках кинематического механизма разрушения являются их нижними оценками.

Вероятностная оценка долговечности конструкции при случайном малоцикловом нагружении

Использование теории приспособляемости при расчете конструкции в условиях случайного нагружения позволяет судить о вероятности возникновения прогрессирующего формоизменения и знакопеременного течения, но не дает представления о сроках службы. Оценка долговечности конструкции в условиях случайного нагружения может быть проведена с помощью размаха деформаций за цикл с использованием вероятностно-статистического подхода. Случайный характер числа циклов до разрушения можно охарактеризовать с помощью соответствующих числовых характеристик (математического ожидания, дисперсии и закона распределения), выраженных через соответствующие числовые характеристики размахов полных деформаций. Математическое ожидание числа циклов до разрушения может быть определено приближенно из выражения

$$\bar{N} \approx (C/\bar{\Delta E})^2, \quad (14)$$

где $\bar{N}, \bar{\Delta E}$ — математические ожидания числа циклов до разрушения и размаха полной деформации за цикл, соответственно; C — константа. Приближенная оценка дисперсии числа циклов до разрушения $S^2(N)$ может быть определена с использованием дисперсии размаха полной деформации $S^2(\Delta E)$ из выражения

$$S^2(N) \approx (2\bar{N}/\bar{\Delta E})^2 S^2(\Delta E). \quad (15)$$

Числовые характеристики размаха полной деформации при циклическом нагружении можно определять с помощью статистической обработки результатов расчета кинетики напряженно-деформированного состояния конструкции по отдельным реализациям случайного внешнего нагружения. Расчет кинетики напряженно-деформированного состояния может быть, в частности, выполнен на основе разработанной на кафедре со-

противления материалов, динамики и прочности машин Челябинского политехнического института структурной модели среды. Примем, что закон распределения числа циклов до разрушения близок к логарифмическому нормальному с порогом чувствительности N_0 . При логарифмически нормальном законе распределения долговечности по критерию возникновения трещин малоциклового усталости определим вероятность безотказной работы конструкции из выражения

$$R(N) = P \left\{ Z > \frac{\ln(N-N_0) - \ln(N-N_0)}{S[\ln(N-N_0)]} \right\}, \quad (16)$$

где Z - нормированная случайная величина, распределенная по нормальному закону; $\ln(N-N_0)$, $S^2[\ln(N-N_0)]$ - математическое ожидание и дисперсия логарифма долговечности с порогом чувствительности.

Исследование эксплуатационной нагруженности и оценка работоспособности тележек обжиговых машин

Необходимым этапом исследований для оценки вероятности возникновения необратимого формоизменения и знакопеременного течения является изучение и анализ эксплуатационной нагруженности конструкции. Обжиговая тележка находится под воздействием механических нагрузок, состоящих из собственного веса конструкции, веса скатывшей, перепада давлений между горном и вакуум-камерами и нестационарных температурных полей. Оценка напряжений, вызванных действием механических нагрузок, показывает, что они сравнительно невелики (10-20 МПа) и по сравнению с тепловыми напряжениями ими можно пренебречь. Исследования тепловой нагруженности обжиговых тележек различных конструкций (ОК-108, ОК-306, ОК-520) проводили в условиях эксплуатации Соколовско-Сарбайского, Лебединского и Костомукшского ГОКов. При этом было выполнено значительное число опытов: на ССОКе - 18, на ЛебГОКе - 18, на Костомукшском ГОКе - 64. Температуры измеряли хромель-алюмелевыми термопарами, установленными по определенным схемам. Кинетика температурных полей элементов тележек изучалась при различных условиях эксплуатации (кратковременные остановки и изменение скорости движения конвейера, высоты слоя окатышей и постели, температуры в вакуум-камерах), а для тележек Костомукшского ГОКа в условиях планирования активного эксперимента. Была оценена точность полученных результатов. Так, приведенная погрешность измерения температуры всей измери-

тельной цепи в начале и конце диапазона измерений прибора КСП-4 оказались соответственно равными 0,75% и 1,25% от максимального значения шкалы прибора.

Проведенные исследования температурных полей элементов тележек различных конструкций выявили некоторые общие закономерности, а именно: по высоте и ширине сечения элементов подколосниковых балок возникают значительные градиенты температур; характер распределения температур - нелинейный; при кратковременных остановках и уменьшении скорости движения конвейера наблюдается возрастание уровня максимальных температур на 100-250°C; даже при нормальном технологическом режиме обжига окатышей наблюдается от цикла к циклу значительный разброс температур тележек.

Оценка несущей способности обжиговых тележек в реальных условиях эксплуатации

Расчет условий начала прогрессирующего формоизменения элементов обжиговой тележки выполняли с помощью приближенного кинематического метода теории приспособляемости. Предварительно проводили расчет термоупругих напряжений, возникающих в элементах тележки, которые определяли в раме на основе исходных данных, полученных термометрированием в условиях эксплуатации. Для определения термоупругих напряжений, условий начала возникновения прогрессирующего формоизменения и знакопеременного течения элементов тележки были составлены вычислительные программы применительно к ЭВМ серии ЕС. Проведенные расчеты показали, что минимальные коэффициенты запаса по приспособляемости имеют тележки Лебединского ГОКа. Средние коэффициенты запаса равны соответственно по формоизменению - 3,0, а по знакопеременному течению - 1,7. Остановка конвейера на 6 мин в момент нахождения тележки над 13-ой вакуум-камерой приводит к снижению соответствующих запасов примерно в 1,7 и 3 раза. Коэффициенты запаса по приспособляемости существенно зависят от скорости движения конвейера. Так, уменьшение скорости движения конвейера в два раза ведет к снижению коэффициентов запаса по формоизменению примерно в 2,5 раза, а по знакопеременному течению в 6 раз. Из расчета следует, что наиболее вероятно возникновение знакопеременного течения в верхних наружных углах крайних балок тележки, именно в этих местах (зонах тепловых концентраторов) в реальных условиях наблюдается при длительной эксплуатации большое число мелких тре-

ция. На основе анализа расчетов было предложено изменение конструкции тележки (а.с. №1130726, удалены тепловые концентраторы). Как показывают расчеты по экспериментальным температурным полям, коэффициенты запаса тележки без тепловых концентраторов крайней балки по сравнению с тележкой с тепловыми концентраторами увеличились: по знакопеременному течению примерно на 40%, а по формоизменению - на 15%.

Вероятностная оценка параметров предельного цикла тележек обжиговых конвейерных машин

Как показали исследования, проведенные в условиях эксплуатации, температурные поля, возникающие в обжиговых тележках, изменяются от цикла к циклу случайным образом. При оценках прочности конструкции следует учитывать не только случайный характер внешнего воздействия, но и то, что корпус тележки, изготавливаемый литьем, является деталью массового производства, в связи с чем механические свойства материала (например, предел текучести) могут изменяться в довольно широких пределах. Стохастические свойства внешних воздействий и предела текучести отражаются на долговечности тележек: длительность работы до отказа вследствие развития трещин или возникновения недопустимых изменений геометрии на различных тележках существенно отличаются между собой. Для оценки стохастической приспособляемости тележек исходными данными служили экспериментальные температурные поля и характеристика материала (предел текучести, измеренный образцовым методом на реальных тележках). При этом следует отметить, что числовые характеристики случайных величин температурного поля в различных точках поперечного сечения элементов рамы тележки не могут быть независимы друг от друга, так как распределение температуры подчиняется законам теплопередачи. Поэтому температура в произвольной точке тележки была описана с помощью двух векторов

$$T = \{N\}' \{T\}. \quad (17)$$

Здесь $\{N\}$ - детерминированный вектор аппроксимирующей функции формы; $\{T\}$ - случайный вектор температур узловых точек, полученный путем их замера в эксплуатационных условиях. В качестве исходных данных при определении стохастических термоупругих напряжений в тележке использовали числовые характеристики температурного поля.

Вероятность безотказной работы тележек определяли непосредственно с помощью выражений типа (9) и (10), которые дают соответственно верхнюю и нижнюю стохастические оценки. Как видно из выражения (10), вероятность безотказной работы существенно зависит от коэффициента вариации V_n (рис.1а) и среднего значения коэффициента запаса \bar{n} (рис.1б), т.е. фактически от вариаций и средних значений соответствующих пределов текучести материала, а также термоупругих напряжений. Увеличение вероятности безотказной работы спо-

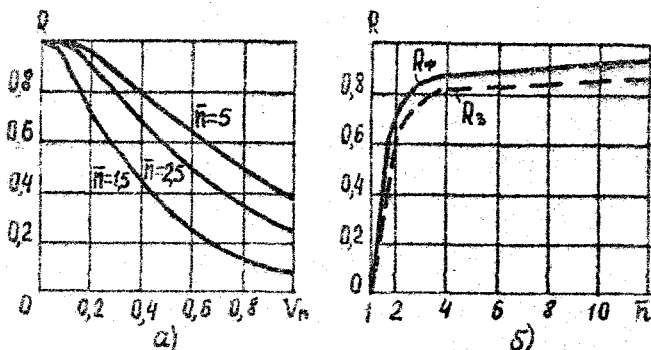


Рис. 1.

собствует как увеличение среднего значения коэффициента запаса, так и уменьшение коэффициента вариации термоупругих напряжений и предела текучести. Наиболее эффективным путем увеличения вероятности безотказной работы тележек является уменьшение коэффициента вариации термоупругих напряжений и предела текучести, что может быть достигнуто путем уменьшения отклонений параметров от заданного технологического процесса, или уменьшая разброс механических свойств материала, что связано с технологией изготовления тележки. Используя полученные зависимости и построенные по ним графики (рис.1) можно определить минимально необходимые значения коэффициентов запаса, неоправданное увеличение которых при существующей технологии производства и эксплуатации (отклонения параметров от заданного технологического процесса) тележек становится экономически невыгодным.

Оценка долговечности конструкции тележки при случайном тепловом нагружении была проведена по критерию возникновения трещин малоциклового усталости. Расчет кинетики напряженно-деформированного состояния элементов тележки с использованием структурной модели среды позволил определить числовые характеристики размахов полных

деформаций за цикл, а по ним была определена вероятность возникновения трещин в зависимости от числа циклов из выражения (16). Вероятность безотказной работы тележек ОК-306 по критерию возникновения трещин малоциклового усталости, полученная расчетным путем (рис. 2, кривая А), удовлетворительно согласуется с эксперименталь-

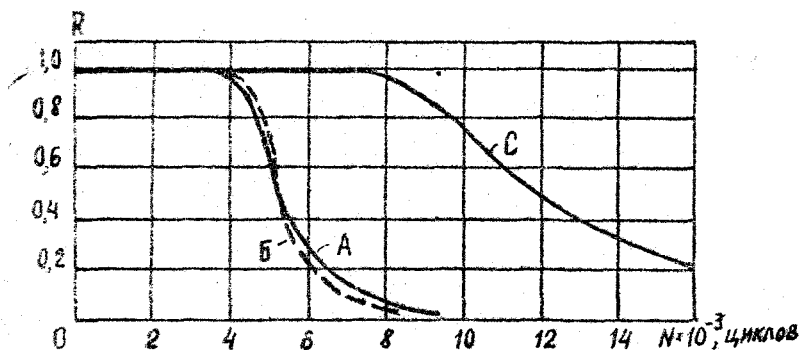


Рис. 2.

ными данными по трещинам, возникающих в тележках (рис. 2, кривая Б). Кроме того, на рис. 2 (кривая С) показана расчетная оценка вероятности безотказной работы тележек ОК-520 Костомукшского ГОКа.

Регрессионные модели несущей способности обжиговой тележки в зависимости от технологических факторов

Для активного управления (регулирования) технологическим процессом, с целью уменьшения вариации температурного поля и повышения вероятности безотказной работы тележек были построены регрессионные модели зависимости коэффициентов запаса по приспособляемости от технологических факторов. Для определения коэффициентов регрессионных уравнений, с использованием теории планирования эксперимента, был спланирован и проведен активный эксперимент на двух уровнях факторов. После вычисления коэффициентов запаса элементов тележки по приспособляемости с помощью регрессионного анализа были получены линейные модели коэффициентов запаса по формоизменению \hat{n}_φ и знакопеременному течению \hat{n}_3 в зависимости от технологических факторов

$$\begin{aligned} \hat{n}_\varphi &= 7,3 + 1,1X_1 - 1,8X_2 + 0,5X_3, \\ \hat{n}_3 &= 3,6 + 0,8X_1 - 1,4X_2 + 0,5X_3. \end{aligned} \quad (18)$$

Здесь X_1, X_2, X_3 — кодированные значения скорости движения конвейера, температуры в 18-ой вакуум-камере и высоты слоя постели окатышей. Из уравнений (18) видно, что наибольшее влияние на несущую способность тележек оказывают температура в 18-ой вакуум-камере и скорость движения обжигового конвейера, несколько меньше влияет высота постели окатышей. На основе регрессионных уравнений (18) были построены диаграммы (карты состояния) приспособляемости и определены области опасного и безопасного сочетания технологических факторов по условиям приспособляемости обжиговых тележек ОК-520.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена развитию методов расчета приспособляемости конструкций, изготовленных из материалов со стохастическими механическими характеристиками и подверженных повторным случайным тепловым воздействиям. Рассматривается применение предложенных методов расчета к оценке несущей способности элементов тележек обжиговых конвейерных машин, предназначенных для обжига окатышей. Выполненная работа направлена на исследование причин снижения долговечности тележек вследствие накопления необратимой деформации и образования трещин. Комплексное экспериментальное и расчетно-теоретическое исследование позволило получить следующие результаты:

1. Разработана методика расчета теплонапряженных конструкций на приспособляемость в вероятностно-статистическом аспекте. Она позволяет получать на стадии проектирования информацию о выборе минимально необходимых и экономически оправданных значений коэффициентов запаса, которые с заданной доверительной вероятностью обеспечат упругую приспособляемость конструкции.

2. На основе экспериментальных исследований температурных полей обжиговых тележек в условиях эксплуатации на Соколовско-Сарбайском, Лебединском и Костомукшском ГОКах установлено, что элементы тележек имеют значительные градиенты и разброс температур.

3. Установлено, что основной причиной необратимого изменения размеров и формы и возникновения трещин малоциклового усталости тележки являются воздействия циклических температурных полей. Показано также, что накопление необратимых деформаций подкосниковых балок (прогиб вниз с одновременным укорочением), наиболее значительное для тележек ЛебГОКа, является следствием более

существенной (по сравнению с условиями на других ГОКах) вариации температурного поля тележки.

4. Разработана методика оценки долговечности элементов обжиговых тележек по критерию возникновения трещин малоциклового усталости при случайном тепловом воздействии.

5. На основе проведения активного эксперимента (замер температурных полей тележек Костомукшского ГОКа) были разработаны регрессионные модели, определяющие условия приспособляемости в зависимости от технологических параметров обжига окатышей - скорости движения конвейера, температуры в 18-ой вакуум-камере и высоты слоя постели окатышей. На этой основе построены диаграммы приспособляемости (карты состояния) и найдены области опасного и безопасного сочетания технологических факторов.

6. На основе анализа условий эксплуатации и результатов расчета предложены изменения конструкции обжиговых тележек, на которые получены авторские свидетельства (№ 1046592, № 1108319, № 1130726). Изменения конструкции согласно авторского свидетельства № 1130726 (исключение тепловой концентрации в крайних балках) внесены в проектную документацию для Каратауского хмзавода, такая конструкция проходит промышленную проверку на Костомукшском ГОКе.

Методики расчета элементов обжиговых тележек по критериям приспособляемости в вероятностно-статистическом аспекте и построения регрессионных моделей несущей способности переданы на предприятие НИИтяжмаш ПО "Уралмаш". В расчетную практику НИИтяжмаш внедрены вычислительные программы для ЭВМ серии ЕС расчета несущей способности элементов обжиговых тележек по критерию приспособляемости. Общий экономический эффект от внедренных мероприятий составляет 225 тыс. руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Исследование температурного поля элементов обжиговой тележки// Сталь, 1983, № 6. - С. 10-12. (В соавторстве с И.М.Плаговым, В.Г.Подойниковым, В.И.Мехонцевым).

2. Исследование температурных напряжений в элементах обжиговой тележки// Прочность машин и аппаратуры при переменных напряжениях.- Челябинск: ЧПИ, 1983. - С. 96-101. (В соавторстве с И.М. Плаговым).

3. Оценка прогрессирующего формоизменения элементов обжиговой тележки// Способы повышения долговечности и надежности термос-

напряженного металлургического и горнометаллургического оборудования: Тезисы докладов - Челябинск, 1983. - С. 22-23. (В соавторстве с И.М.Плаговым и В.Б.Порошиным).

4. А.с. № I046592 СССР. Тележка конвейерной обжиговой машины / Оpubл. в Б.И., 1983, № 37. (В соавторстве с И.М.Плаговым, В.Г. Подойниковым и др.).

5. Оценка прогрессирующего формоизменения тележек обжиговых конвейерных машин// 7-я Всесоюзная конференция по прочности и пластичности: Тезисы докладов - Пермь, 1983.- С. 150.) (В соавторстве с И.М.Плаговым, В.Г.Подойниковым и др.).

6. А.с. № II08319 СССР. Тележка конвейерной обжиговой машины / Оpubл. в Б.И., 1984, № 30. (В соавторстве с И.М.Плаговым, В.Г. Подойниковым и др.).

7. А.с. № II30726 СССР. Тележка конвейерной обжиговой машины / Оpubл. в Б.И., 1984, № 47. (В соавторстве с Л.К.Кокориным, М.Х. Фастовским и др.).

8. Исследование температурного поля элементов обжиговых тележек в условиях эксплуатации на Лебединском ГОКе// Расчеты и исследования обогатительного оборудования. Труды БНИИМЕТМАШ, Москва, 1985. С. 26-32. (В соавторстве с И.М.Плаговым, В.А.Оленевой и др.).

9. Влияние технологических параметров на тепловую нагруженность обжиговых тележек// 3-я Всесоюзная конференция по расчетам на прочность металлургических машин: Тезисы докладов, Москва, 1985.-С.50. (В соавторстве с В.А.Ващуком, И.М.Плаговым и др.).

10. Прогрессирующее формоизменение элементов обжиговых тележек при стохастических воздействиях температурного поля// 3-я Всесоюзная конференция по расчетам на прочность металлургических машин: Тез. докл. - М.: Москва, 1985. - С. 50-51. (В соавторстве с И.М.Плаговым).

11. О вероятностно-статистической оценке коэффициентов запаса по приспособляемости конструкций при теплосменах// Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузениях. - Челябинск: ЧПИ, 1986. - С. 55-59.



Подписано к печати 20.04.89. ФБО8129. Формат 60x90 1/16.
Печ. л. 1. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 157/418.

УОП ЧПИ. 454080. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.