

Белорусский государственный университет транспорта
кафедра «ЛОКОМОТИВЫ»

ОСНОВЫ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ

*Лектор: д.т.н., профессор Сосновский Леонид Адамович
к.т.н., доцент Комиссаров Виктор Владимирович*

п.з.: ассистент Таранова Елена Сергеевна

Лекции – 18 часов

Практические занятия – 12 часов

Форма контроля знаний – зачет

*(по всем вопросам обращаться на кафедру ауд. 1403,
а также в лабораторию ауд. 1415а)*

ГОМЕЛЬ, 2017



Основная:

1. **Сосновский, Л.А.** Элементы теории вероятностей, математической статистики и теории надёжности / Л.А. Сосновский. – Гомель; БелГУТ, 1994. – 146 с. (в НТБ БелГУТа).
2. **Шевченко Д.Н.** Основы теории надёжности : учеб.-методич. пособие для студ. техн. спец./ Д. Н. Шевченко; под ред. Л.А. Сосновского. – Гомель: БелГУТ, 2010. – 250 с. (в НТБ БелГУТа)
3. **Богданович А.В.** Оценка основных показателей надёжности и риска невозстанавливаемых изделий / А.В. Богданович, О.М. Еловой, Л.А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 1995 г. – 95 с. (в НТБ БелГУТа)

Дополнительная:

- **Сосновский, Л.А.** Вероятностные методы расчета на прочность при линейном и сложном напряженных состояниях в 2-х частях: Метод. указания по изучению курса «Сопротивление материалов»/ Л.А. Сосновский. – Гомель: БелИИЖТ, 1984. – 74с. (в НТБ БелГУТа).
1. **Сосновский, Л.А.** L-риск (механотермодинамика необратимых повреждений) / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2004. – 317 с.
 2. **Сосновский, Л.А.** Комплексная оценка надёжности силовых систем по критериям сопротивления усталости и износостойкости (основы трибофатики): Метод. указания по изучению курса «Надёжность транспортных систем, машин и сооружений» для студентов транспортных вузов / Л.А. Сосновский. – Гомель: БелИИЖТ, 1988. – 56 с. (в НТБ БелГУТа).
 3. **Богданович, А.В.** Оценка надёжности простого коленчатого вала. Надёжность по критериям трибофатики: Пособие по курсу «Основы теории надёжности» / А.В. Богданович, О.М. Еловой, Л.А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2002. – Ч.2.–30 с. (в методическом кабинете кафедры – 5 экз.).
 4. **Сосновский, Л.А.** Показатель безопасности и оперативная характеристика риска / Л.А. Сосновский. – Гомель, БелИИЖТ, 1991. (в НТБ БелГУТа).



Лекция 1. Надежность в технике

Лекция 2. Отказы и их причины. Статистический анализ

Лекция 3. Оценка показателей надежности: модель отказов

Лекция 4. Рассеяние характеристик прочности и нагруженности

Лекция 5. Оценка показателей надежности: модель нагрузка-прочность (часть1)

Лекция 6. Оценка показателей надежности: модель нагрузка-прочность (часть2)

Лекция 7. Схемная надежность

Лекция 8. Надежность трибофатической системы

Лекция 9. Концепция риска. Оценка безопасности.



ЛЕКЦИЯ №8

НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОФАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ



ВЕДУЩИЕ ЯВЛЕНИЯ, ПРИВОДЯЩИЕ К ПОВРЕЖДЕНИЮ НЕКОТОРЫХ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ



Наименование деталей и узлов машин и оборудования	Ведущие механизмы повреждения
Зубчатые зацепления общего назначения	Трение качения с проскальзыванием, механическая усталость (контактная усталость)
Трубки теплообменник аппаратов	Виброусталость, фреттинг-изнашивание
Коленчатый вал – подшипник скольжения	Механическая усталость, трение скольжения
Детали проточной части гидротурбин и гидронасосов	Кавитационная эрозия, виброусталость, эрозия при ударе твердых частиц
Судовые гребные винты, подводные крылья судов	Коррозионная усталость, кавитационная эрозия, эрозионная коррозия
Колеса - железнодорожные рельсы	Трение качения, механическая усталость (контактная усталость)
Лопатки паровых турбин	Эрозия при ударе жидких капель, виброползучесть, виброусталость
Лобовые поверхности летательных аппаратов	Эрозия при ударе жидких капель и твердых частиц, виброусталость
Валы с напрессованными деталями	Фреттинг, механическая усталость (фреттинг-усталость)
Лопатки турбин авиадвигателей	Термомеханическая усталость, газовая эрозия
Внутренняя поверхность стволов пушек, наружная облицовка космических аппаратов	Термомеханическая усталость, абляция
Основные узлы ядерных и термоядерных реакторов	Термомеханическая усталость, ползучесть, радиационная эрозия (блистеринг, флекинг)



СХЕМЫ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ

6

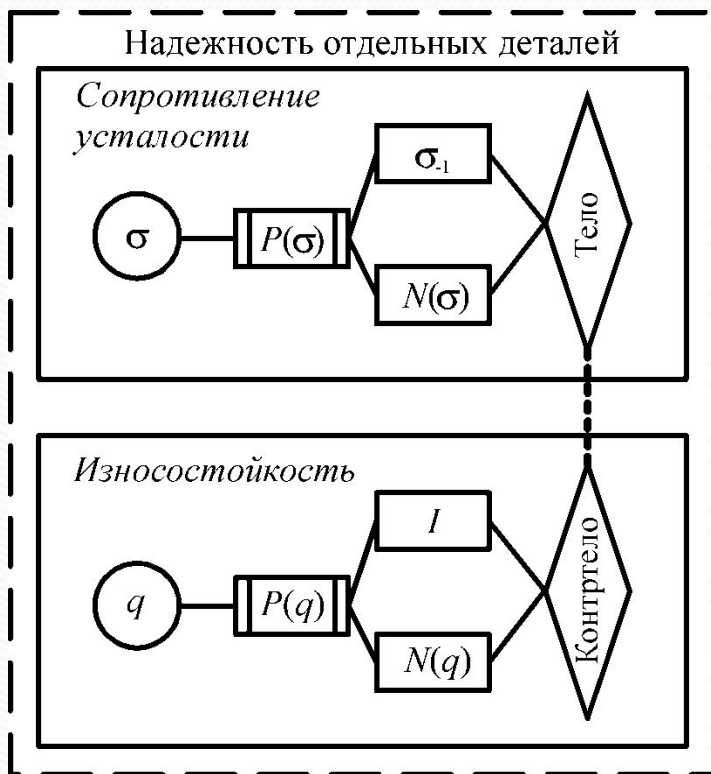


Схема традиционного подхода к оценке надежности сложной системы по отдельным критериям

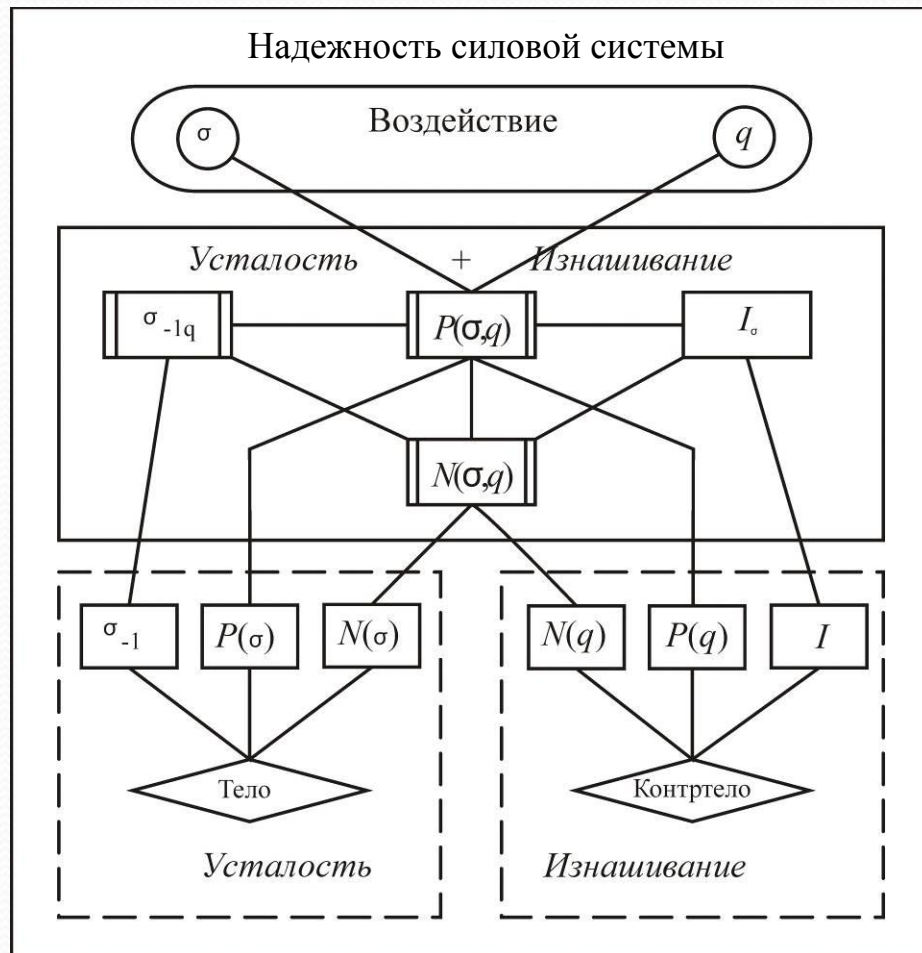
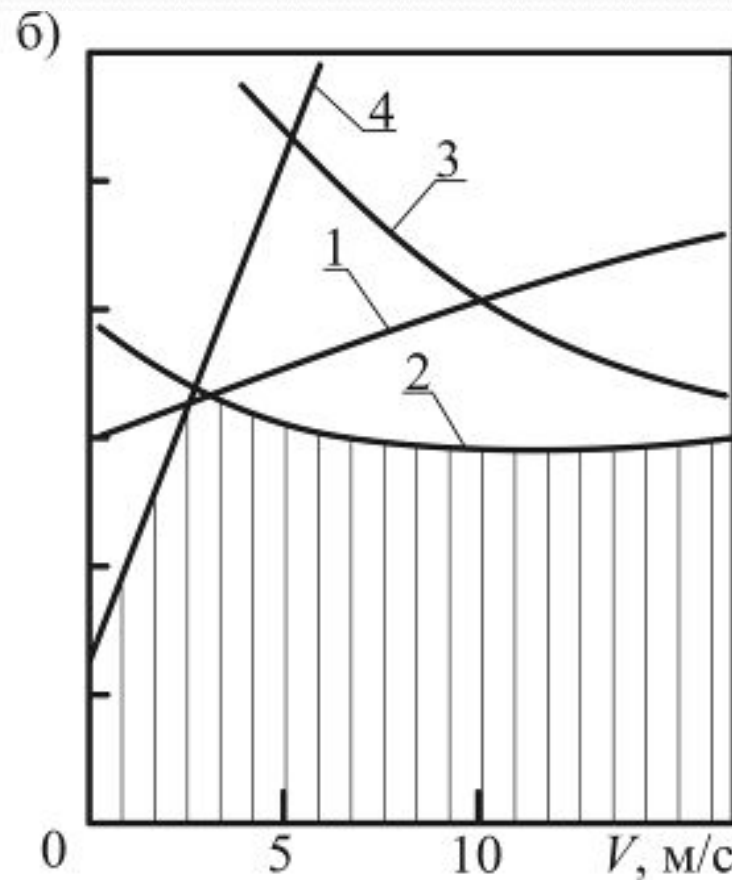
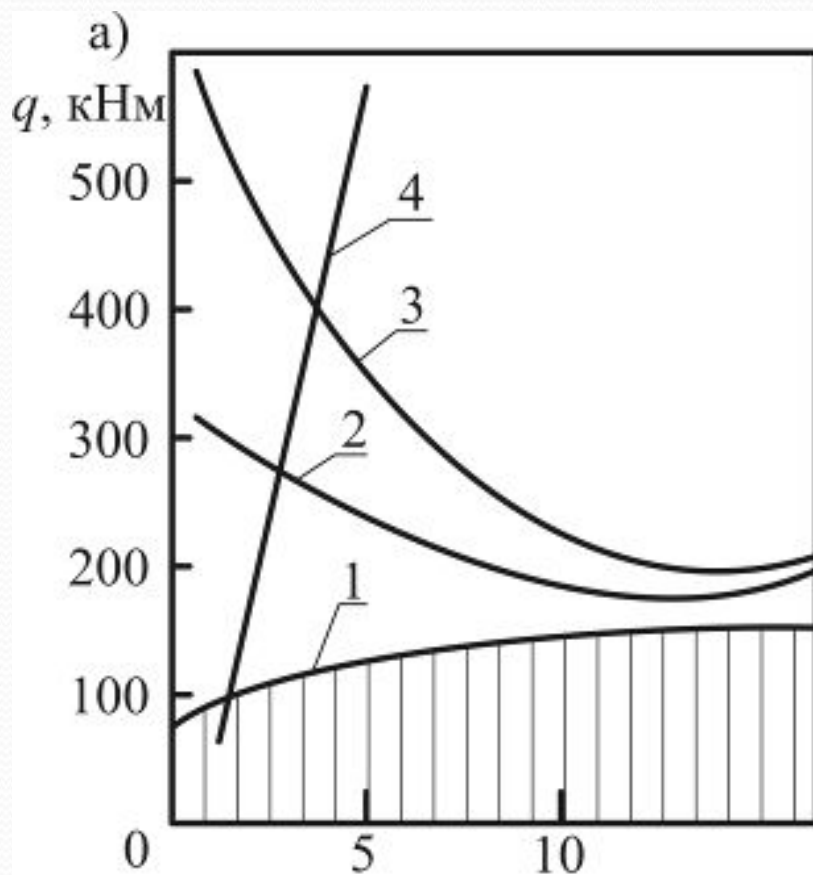


Схема комплексного подхода к оценке надежности трибофатических систем по критериям сопротивления усталости и износостойкости

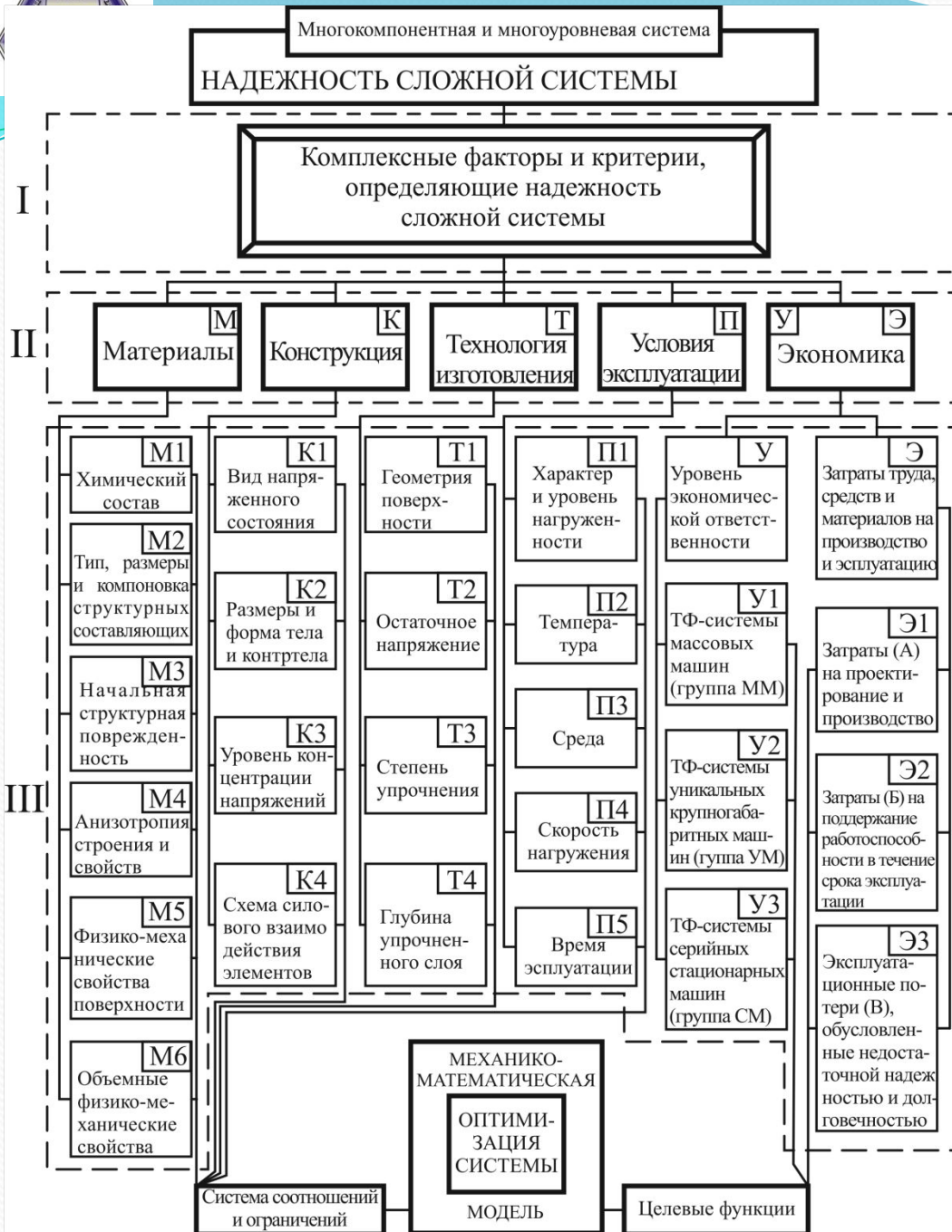


РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЗУБЧАТОГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ

7



Работоспособность зубчатого зацепления по различным критериям сопротивления усталости и износостойкости: а) – незакаленные колеса; б – закалённые колеса;
отказы по контактной усталости (1), изгибной усталости (2), заеданию (3), износу (4)



$$\Psi(q_1, q_2, \dots, q_n) =$$

$$= \sigma_*(q_1, q_2, \dots, q_r) - \sigma(q_{r+1}, q_{r+2}, \dots, q_n).$$

$$P_0 = \int \dots \int p(q_1, q_2, \dots, q_n) \times$$

$$\Psi(q_1, q_2, \dots, q_n) < 0$$

$$\times dq_1, dq_2, dq_3, \dots, dq_n$$



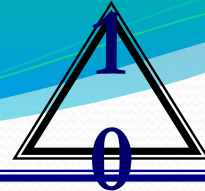
СХЕМА ЗАДАЧИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

9

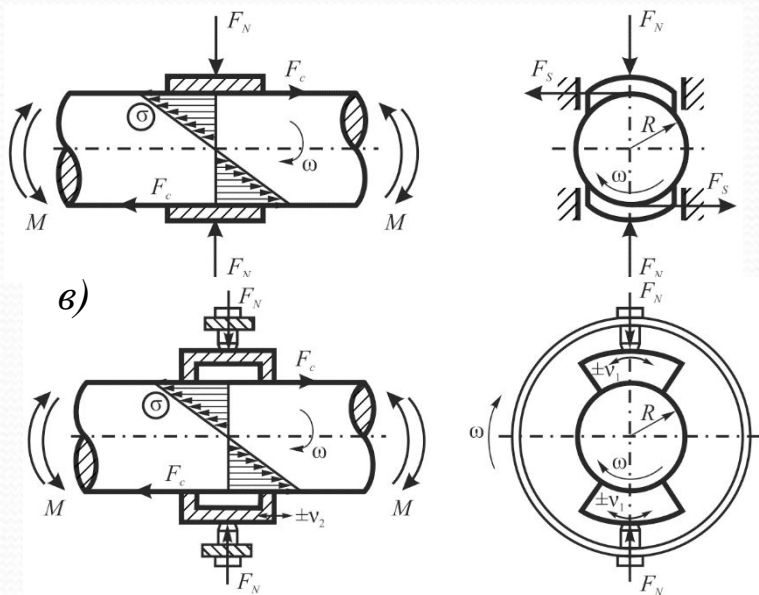
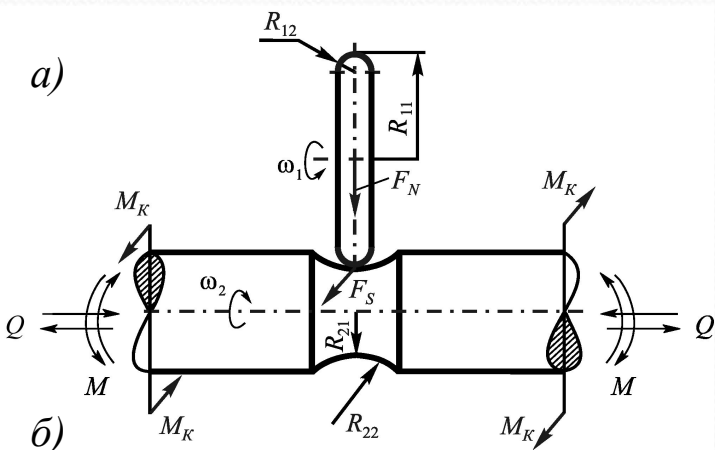




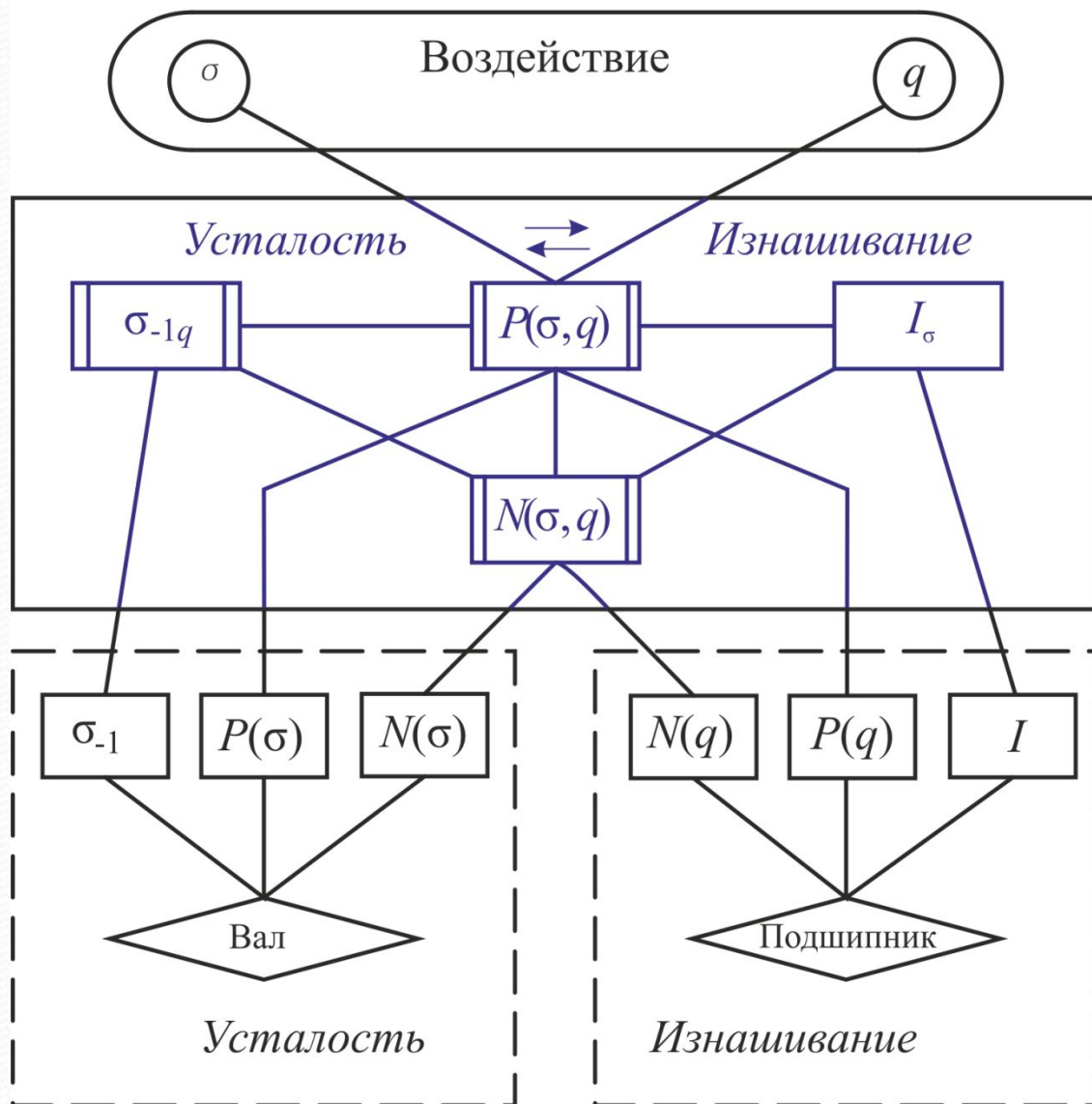
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ ТРИБОФАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



Типичные трибофатические системы

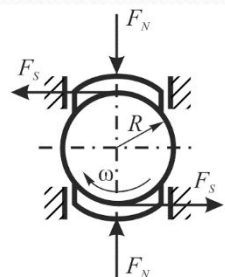
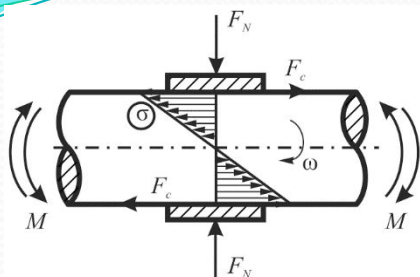


Надежность трибофатической системы





НАДЕЖНОСТЬ ТРИБОФАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ



Задача: найти многокритериальную двумерную функцию вероятностей отказа

$$P(\sigma, \tau_w = fq)$$

Трибофатическая система вал/подшипник скольжения

$$P(\sigma, \tau_w) \sim \underbrace{(V_0, S_k)}_{\text{Конструкция}}; \underbrace{(F(\sigma), F(\tau_w))}_{\text{Нагруженность}}; \underbrace{(n_1 V_{p\gamma}, n_2 S_{p\gamma})}_{\text{Материалы}} \\ \underbrace{(T > T_0; \tau_w = \text{const}; \sigma = \sigma_{-1})}_{\text{Условия эксплуатации}}$$

Основные допущения:

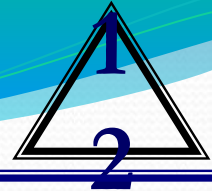
1. Рассматривается трибофатическая система вал/подшипник скольжения;
2. Материалы контрастные по физико-механическим свойствам: стальной вал и полимерный подшипник скольжения;
3. Смазочный материал отсутствует;
4. Система работает в нейтральной среде с повышенной температурой $T > T_0$;
5. Нагрузки: вал-регулярное по симметричному циклу $M = M_0 \sin \omega t$
подшипник: контактная нагрузка $F = \text{const}(\tau_w = f_s q)$;
6. Напряженное состояние элементов одномерное (линейное).
Задача определяется как *основная* (усталость трение скольжения) и *принципиальная* (система металл/полимер)

В основу решения задачи положим:

- Теорию прочности наиболее слабого звена в ее современной трактовке;
- Концепции об опасных областях деформируемого твердого тела при трении и усталости;
- Кинетическую теорию прочности твердых тел;
- Усталостную теорию изнашивания;
- Молекулярно-механическую концепцию трения твердых тел



ДВУМЕРНАЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ



*Вал: функция распределения $P(\sigma_{-1})$
пределов выносливости (σ_{-1})*

$$P(\sigma_{-1}) = 1 - [1 - F(\sigma_{-1})]^{n_1 V_\sigma} \quad (1)$$

*Пара трения: функция распределения $P(\tau_f)$
пределов фрикционной усталости (τ_f)*

$$P(\tau_f) = 1 - [1 - F(\tau_f)]^{n_2 V_\tau} \quad (2)$$

*Трибофатическая система: многокритериальная двумерная
функция распределения $P(\sigma_{-1}, \tau_f)$ предельных напряжений (σ_{-1}, τ_f)*

$$P(\sigma_{-1}, \tau_f) = 1 - [1 - F(\sigma_{-1})]^{n_1 V_\sigma} [1 - F(\tau_f)]^{n_2 S_\tau} \quad (3)$$

$$P(\sigma_{-1}, \tau_f) = 1 - \exp[-c_1 n_1 V_\sigma F(\sigma_{-1}) - c_2 n_2 V_\tau F(\tau_f)] \quad (4)$$

$$P(\sigma_{-1}, \tau_f) = 1 - \exp \left\{ -C_V \frac{V_{P\gamma}}{V_0} \left[\left(\frac{T_M}{T_0} \right)^{m_T} \frac{\sigma_{-1} - \sigma_{-1\min}}{\sigma_W} \right]^{m_V} - C_S \frac{S_{P\gamma}}{S_k} \left(\frac{\tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{\tau_d - \tau_f} \right)^{m_S} \right\} \quad (5)$$

Относительные меры поврежденности

$$0 \leq \omega_\sigma = \frac{V_{P\gamma}}{V_0} = \frac{1}{V_0} \iiint_{\sigma > \sigma_{-1\min}} f(x, y, z) dV \leq 1; \quad 0 \leq \omega_\tau = \frac{S_{P\gamma}}{S_k} = \frac{1}{S_k} \iiint_{\tau_w > \sigma_{f\min}} f(x, y, z) dV \leq 1$$



ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ФУНКЦИИ $P(\sigma_{-1}, \tau_f)$



1 Стальной вал: механическая усталость ($\tau_w = 0$; $S_{P\gamma} = 0$):

$$P(\sigma) = 1 - \exp \left\{ -C_V \frac{V_{P\gamma}}{V_0} \left[\left(\frac{T_M}{T_0} \right)^{m_T} \frac{\sigma_{-1} - \sigma_{-1\min}}{\sigma_w} \right]^{m_V} \right\} = 1 - \exp \left[-\eta_\sigma \left(\frac{\sigma_{-1} - \sigma_{-1\min}}{\sigma_w} \right)^{m_v} \right],$$
$$\sigma_{-1} > \sigma_{-1\min}; \quad P(\sigma_{-1} > \sigma_{-1\min}) = 0.$$

где термомеханическая функция в форме Вейбулла

$$F(\sigma_{-1}) = \left[\left(\frac{T_M}{T_0} \right)^{m_T} \frac{\sigma_{-1} - \sigma_{-1\min}}{\sigma_w} \right]^{m_V}, \quad \eta_\sigma = C_V \frac{V_{P\gamma}}{V_0} \left(\frac{T_M}{T_0} \right)^{m_T m_V}$$

2 Полимерный подшипник: фрикционная усталость ($\sigma = 0$; $V_{P\gamma} = 0$, трение скольжения):

$$P(\tau_w) = 1 - \exp \left\{ -C_S \frac{S_{P\gamma}}{S_k} \left(\frac{\tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{\tau_d - \tau_f} \right)^{m_S} \right\} = 1 - \exp \left[-\eta_\tau \left(\frac{\tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{\tau_d - \tau_f} \right)^{m_S} \right], \quad \tau_f > \tau_d; \quad P(\tau_f > \tau_d) = 0.$$
$$\tau_d = U_0 / \gamma_\tau; \quad \tau_{tf}^{(1)} = R / \gamma_\tau; \quad \tau_{tf} = \tau_{tf}^{(1)} \Delta T$$

где молекулярно-механическая функция в форме Фреше соответствует таковой в кинетической теории прочности твердых тел

$$F(\tau_f) = \left(\frac{R \Delta T}{U_0 - \gamma_\tau \tau_w} \right)^{m_S} = \left(\frac{R \Delta T}{\gamma_\tau \left(\frac{U_0}{\gamma_\tau} - \tau_f \right)} \right)^{m_S} = \left(\frac{\tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{\tau_d - \tau_f} \right)^{m_S}, \quad \eta_\tau = C_S \frac{S_{P\gamma}}{S_k} (\Delta T)^{m_S}$$



ВЕРОЯТНОСТЬ ОТКАЗА МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНОЙ СИСТЕМЫ



$$P(\sigma, \tau_w) = \left[1 - \exp \left\{ -C_V \frac{V_{P\gamma}}{V_0} \left[\left(\frac{T_M}{T_0} \right)^{m_T} \frac{\sigma - \sigma_{-1\min}}{\sigma_w} \right]^{m_V} - C_S \frac{S_{P\gamma}}{S_k} \left(\frac{\tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{\tau_d - \tau_w} \right)^{m_S} \right\} \right] \Lambda_p$$

ИЛИ

$$\eta_\sigma \left(\frac{(\sigma_{-1\tau})_p - \sigma_{-1\min}}{\sigma_w} \right)^{m_v} + \eta_\tau \left(\frac{\tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{\tau_d - (\tau_{f\sigma})_p} \right)^{m_s} = \ln [1 - P(\sigma, \tau)] = B_p$$

Система условий надежности

Постановка задачи оптимизации

$$P(\sigma, \tau_w) \Rightarrow \min;$$

$$C_0(\sigma_{-1\min}, \sigma_w, m_V; \tau_d, \tau_{tf}^{(1)}, m_S) \Rightarrow \min,$$

Повреждение	Опасный объем	Условие безотказной работы	Мера поврежденности	Условия повреждения и разрушения с вероятностью P
Механическая усталость	$V_{P\gamma} = \iiint_{\sigma(x,y,z) > \sigma_{-1\min}} dx dy dz$	$V_{P\gamma} = 0$	$\omega_{VP} = \frac{V_{P\gamma}}{V_0}$	$0 < \omega_{VP} \leq 1$
Трение и изнашивание	$S_{P\gamma} = \iiint_{\tau_w(x,y,z) > \tau_{f\min}} dx dy dz$	$S_{P\gamma} = 0$	$\omega_{SP} = \frac{S_{P\gamma}}{S_k}$	$0 < \omega_{SP} \leq 1$
Износоусталостное повреждение	$W_{P\gamma} = (V_{P\gamma} + S_{P\gamma}) \phi_{SV}$	$W_{P\gamma} = 0$	$\omega_{WP} = \frac{W_{P\gamma}}{V}$	$0 < \omega_{WP} \leq 1$



СВОДКА ФОРМУЛ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ МПС



Вероятность отказа системы по критериям комплексного износоусталостного повреждения и разрушения	$P(\sigma, \tau_w) = \left(1 - \exp \left\{ -C_V \frac{V_{p\gamma}}{V_0} \left[\left(\frac{T_M}{T_0} \right)^{m_T} \frac{\sigma - \sigma_{-1\min}}{\sigma_w} \right]^{m_V} - C_S \frac{S_{p\gamma}}{S_k} \left(\frac{\tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{\tau_d - \tau_w} \right)^{m_S} \right\} \right) \Lambda_p$
Функция распределения пределов выносливости стального вала с учетом влияния процессов трения полимера при действии фрикционных напряжений τ_w	$(\sigma_{-1\tau})_p = \sigma_{-1\min} + \sigma_w \left[\frac{B_p}{\eta_\sigma} - \frac{\eta_\tau}{\eta_\sigma} \left(\frac{\tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{\tau_d - \tau_w} \right)^{m_s} \right]^{1/m_v}$
Функция распределения пределов фрикционной усталости полимерного подшипника с учетом влияния циклических напряжений σ на поверхности вала (обратный эффект)	$(\tau_{f\sigma})_p = \tau_d - \frac{\tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{\left[\frac{B_p}{\eta_\sigma} - \frac{\eta_\tau}{\eta_\sigma} \left(\frac{\sigma - \sigma_{-1\min}}{\sigma_w} \right)^{m_v} \right]^{1/m_s}}$
Среднее значение предела выносливости стального вала при фрикционно-механической усталости	$\bar{\sigma}_{-1\tau} = \sigma_{-1\min} + \sigma_w \left[B_{0,5} / C_v \frac{V_{0,5\gamma}}{V_0} \left(\frac{T_M}{T_0} \right)^{n_T} \right]^{1/m_v}$
Среднее значение предела выносливости полимерного подшипника при фрикционно-механической усталости	$\bar{\tau}_{f\sigma} = \tau_d - \left(\frac{C_s S_{0,5\gamma} \tau_{tf}^{(1)} \Delta T}{B_{0,5} S_k} \right)^{1/m_s}$



АНАЛИЗ ФУНКЦИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОТКАЗА $P(\sigma, \tau_w)$



Основные заключения:

(а) вероятность отказа металл-полимерной силовой системы увеличивается с ростом:

- действующих циклических ($\sigma > \sigma_{-1\min}$) и контактных ($\tau_w < \tau_d$) напряжений;
- дефектности металла (m_V) и полимера (m_S);
- размеров опасных объемов при циклическом нагружении ($V_{P\gamma}$) и при трении ($S_{P\gamma}$);
- температуры металла (T_M) и полимера (ΔT);
- термодинамического состояния металла m_T и полимера ;

(б) вероятность отказа металл-полимерной силовой системы зависит:

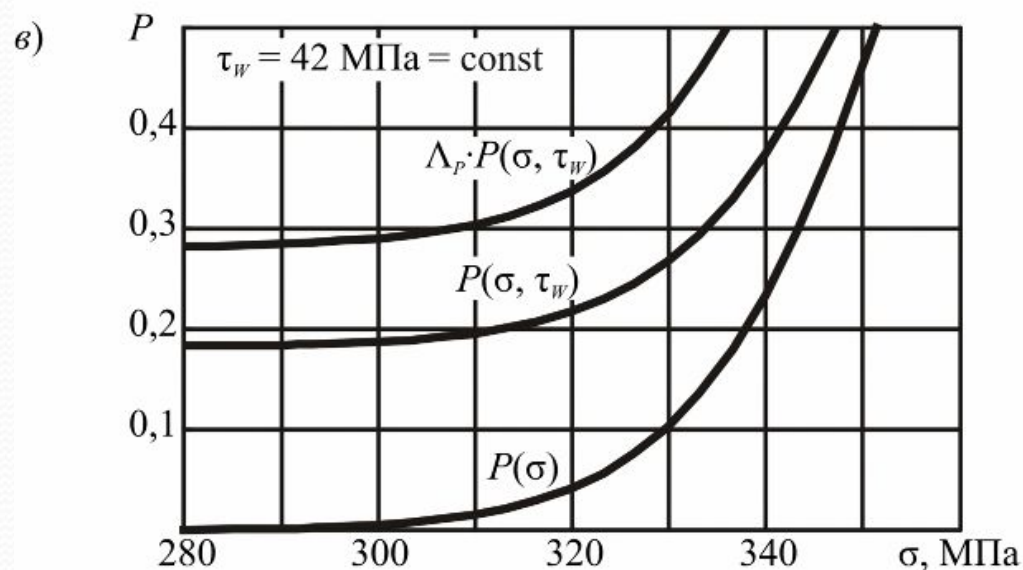
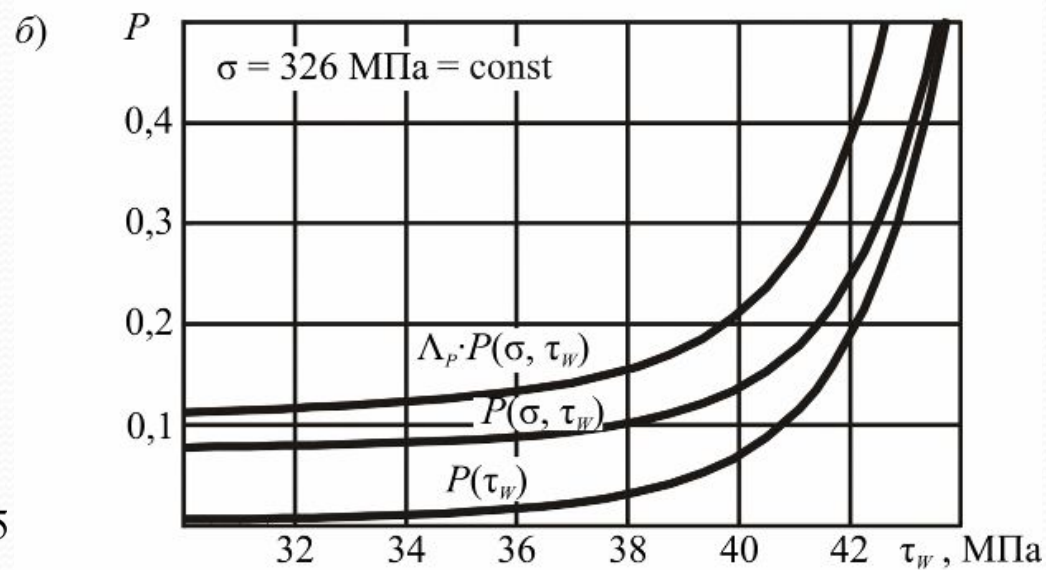
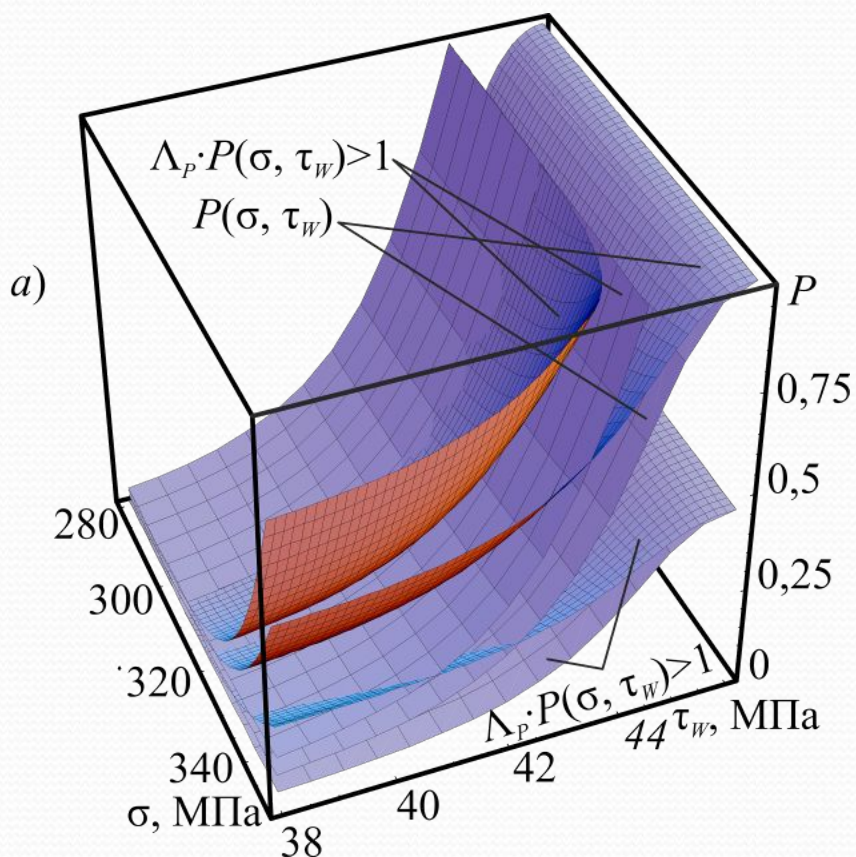
- от размеров и формы элементов, а также схемы их циклического деформирования и контактного взаимодействия (C_V/V_0 , C_S/S_k);
- комплекса физико-механических свойств полимера (τ_d , m_S , U_0 , γ_τ);
- комплекса физико-механических свойств металла ($\sigma_{-1\min}$, σ_w , m_V , m_T);

(в) характера и направленности взаимодействия повреждающих явлений ($\Lambda_P \Lambda_{\sigma/\tau}$).



АНАЛИЗ ФУНКЦИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОТКАЗА $P(\sigma, \tau_w)$

17



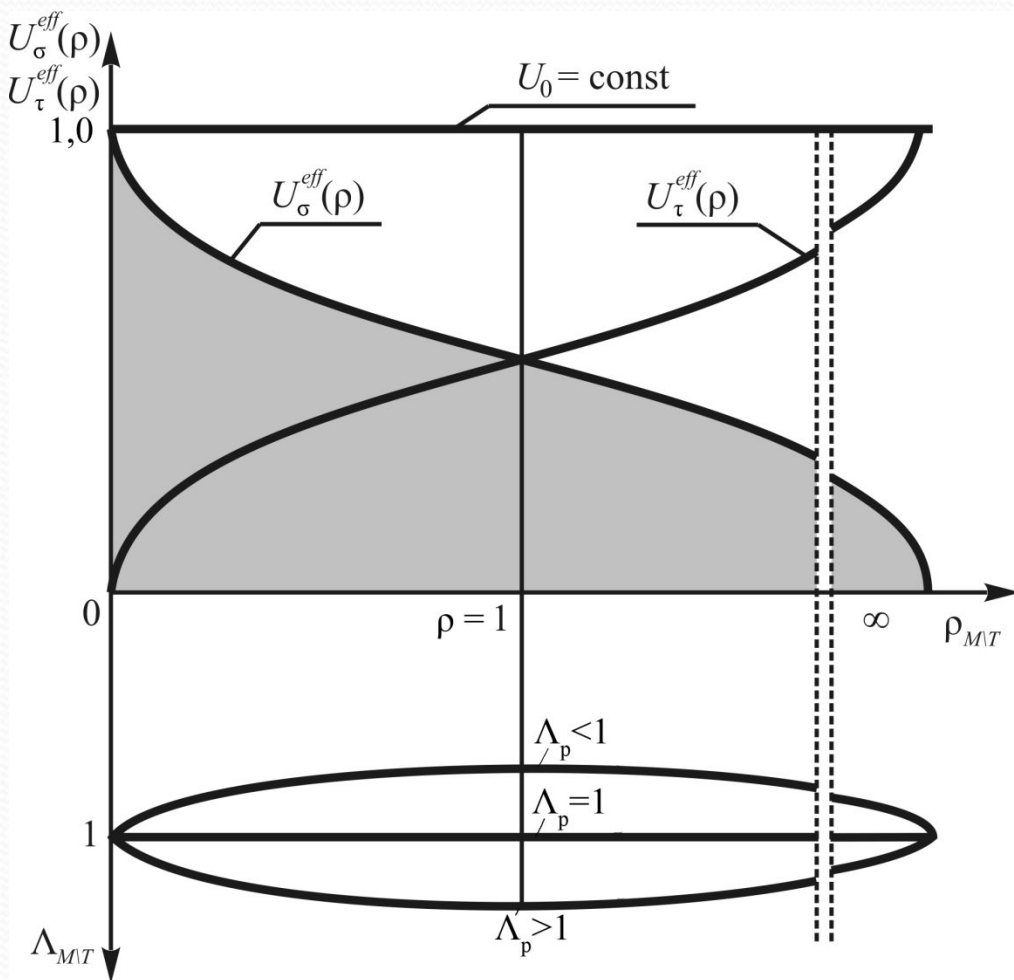


ФУНКЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

11

$$\Lambda_p = \Lambda_{\tau/\sigma} = \varphi(\bar{\rho}); \quad \rho = \frac{U_{\tau}^{eff}}{U_{\sigma}^{eff}} = \frac{a_{\tau} \tau_w^2}{a_{\sigma} \sigma^2}; \quad \bar{\rho} = \frac{U_{\tau}^{eff} / U_f^{eff}}{U_{\sigma}^{eff} / U_{\sigma-1}^{eff}} = \left(\frac{\tau_w}{\sigma} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\tau_f} \right)^2 =$$

$$= \left(\frac{\tau_w}{\tau_f} \right)^2 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right)^2 = \frac{n_{\sigma}^2}{n_{\tau}^2}$$



Общий случай:

$$\Lambda_p = \Lambda_{\tau/\sigma} = A_0 + C_{h,g} z$$

Простейший случай:

$$\Lambda_p = 1 \pm \bar{\rho} \exp(-\bar{\rho})$$

$\Lambda_p < 1$ самопроизвольное упрочнение

$\Lambda_p > 1$ самопроизвольное разупрочнение

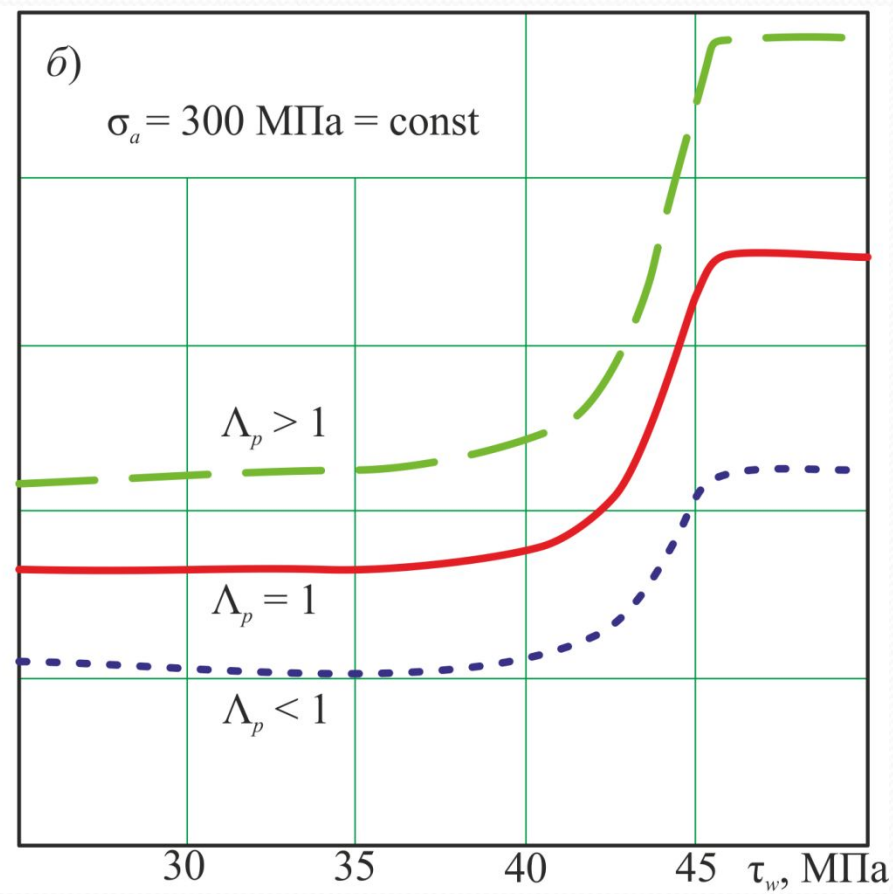
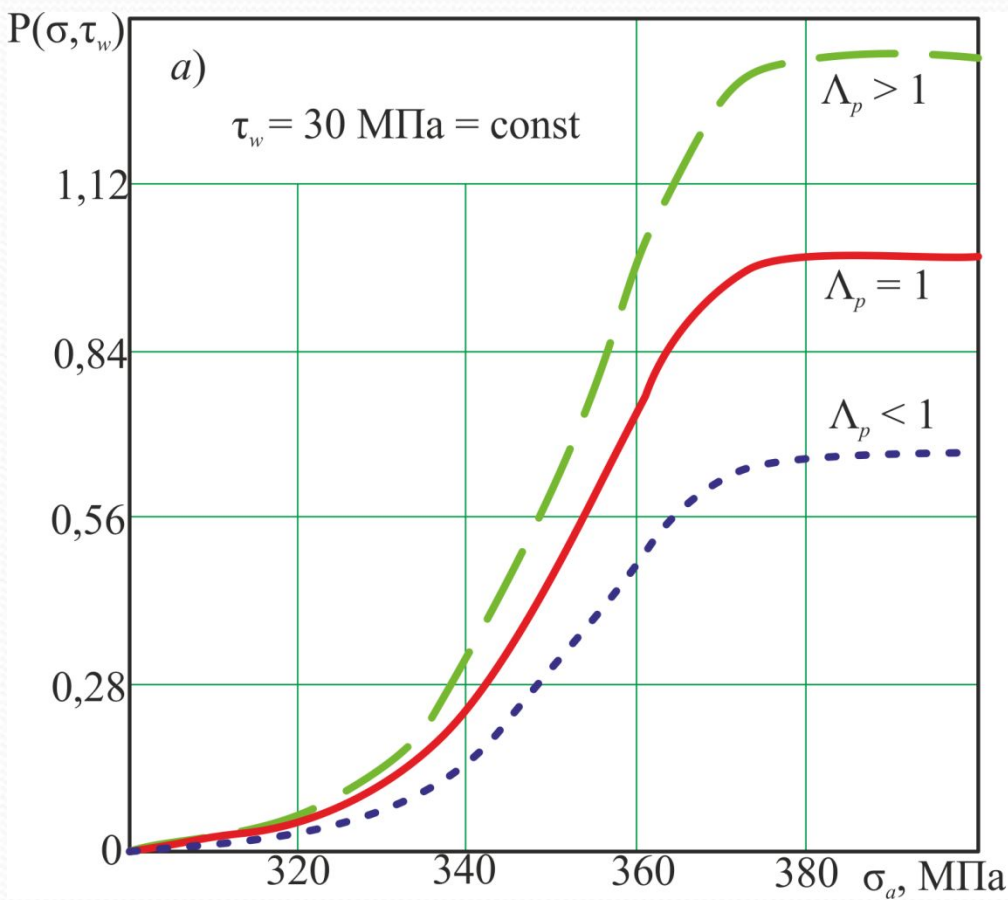
$\Lambda_p \gtrless 1$ процессы упрочнения-разупрочнения



СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИЙ

$P(\sigma, \tau_w)$ ПРИ $\Lambda_p \gtrless 1$

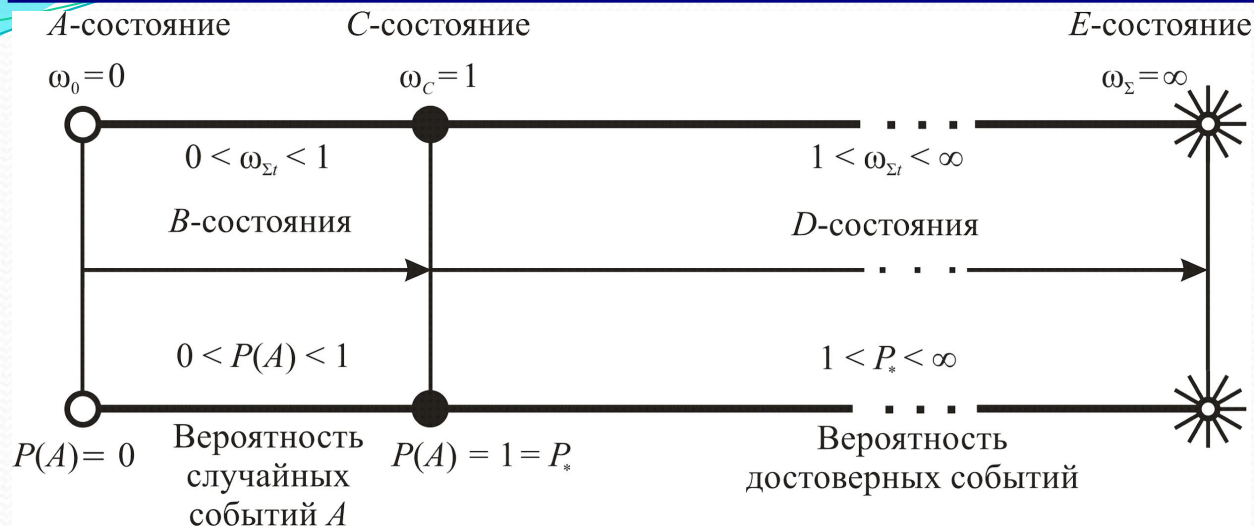
12





О ВЕРОЯТНОСТИ ДОСТОВЕРНЫХ СОБЫТИЙ

13



Взаимосвязь повреждений системы с вероятностью

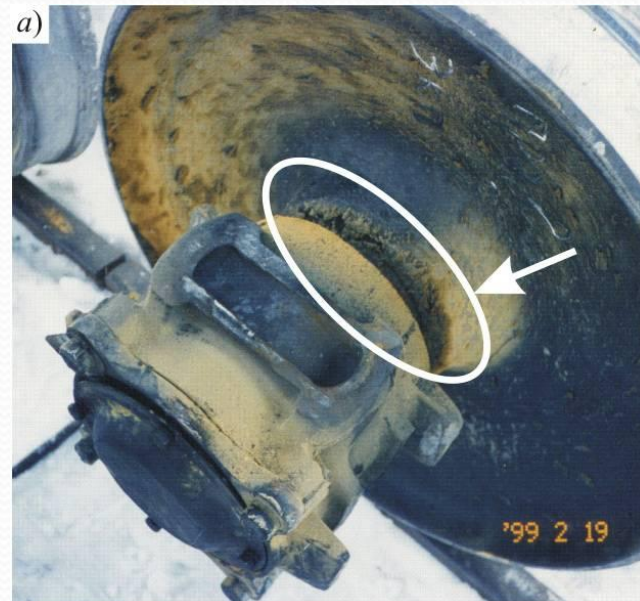
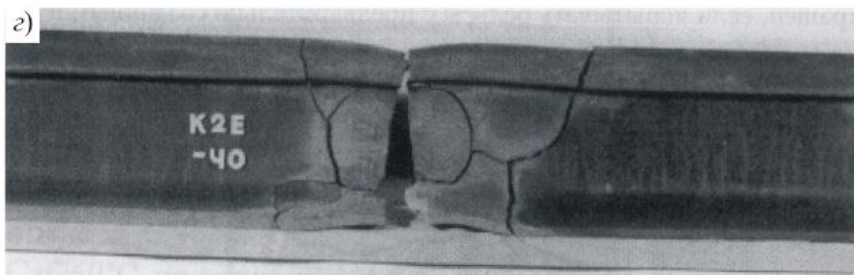
$$\frac{\Lambda_{M \setminus T}}{U_0} \left[\frac{a_T}{1 - D_T} T_\Sigma + \Lambda_{\tau \setminus \sigma} \left(\frac{a_\sigma}{1 - D_\sigma} \sigma^2 + \frac{a_\tau}{1 - D_\tau} \tau_w^2 \right) \right] = 1;$$

$$\Lambda \geq 1;$$

А-состояние	Неповрежденное	$\omega_\Sigma = 0$	А-эволюция: характерные состояния системы
В-состояние	Поврежденные	$0 < \omega_\Sigma < 1$	
С-состояние	Критическое (предельное)	$\omega_\Sigma = 1 = \omega_c$	
Д-состояние	Закритические (запредельные)	$1 < \omega_\Sigma < \infty$	
Е-состояние	Разложение	$\omega_\Sigma = \infty$	

Характеристика состояний объектов

$$0 \leq \omega_\Sigma = \Lambda_{M \setminus T} \left[\omega_{T(ch)} + \Lambda_{\tau \setminus \sigma} \left(\omega_{\sigma(ch)} + \omega_{\tau(ch)} \right) \right] \leq \infty$$



$$1 \ll P_*^{(1)} \ll P_*^{(2)} \ll P_*^{(3)} \ll \infty$$



СПАСИБО

ЗА

ВНИМАНИЕ