

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ФАКТОРОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ УЗЛОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

На основе анализа косвенной характеристики накопленного усталостного повреждения – энергии разрушения локальных моделей узлов рам – определена зависимость снижения предела выносливости от доли выработанного ресурса. Предложен модифицированный вариант линейной гипотезы накопления усталостных повреждений, при котором используется условное значение предела выносливости, определяемое коэффициентом нижней границы повреждающих напряжений. Приведено расчетное обоснование нижней границы повреждающих напряжений.

В настоящее время наибольшее распространение в практике расчетов усталостной долговечности получила линейная гипотеза накопления усталостных повреждений, впервые предложенная Пальмгреном для расчета подшипников качения и развитая М. Майером. Расчет долговечности производится на основе уравнения Баскуина в записи [1]:

$$N_i = N_G \left[\frac{\sigma_R}{\sigma} \right]^m, \quad (1)$$

где N_i – число циклов до разрушения при напряжении σ ; N_G – абсцисса точки перелома кривой усталости; σ_R – предел выносливости; m – характеристика наклона левой ветви кривой усталости в двойной логарифмической системе координат.

Предельное состояние объекта обозначается условием:

$$\sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} = 1, \quad (2)$$

где n_i/N_i – доля выработанного ресурса при напряжении σ по исходной кривой усталости.

Однако реальный процесс накопления усталостных повреждений носит нелинейный характер ввиду изменения по мере выработки ресурса конструкции характеристик сопротивления усталости, прежде всего – предела выносливости. Учет данного факта положен в основу кинетической теории усталости Е.К. Почтенного [2].

Параметр нелинейности зависит от уровня и относительной длительности приложения нагрузки. Обобщение экспериментальных данных ряда исследователей [3-5] позволило установить следующее:

– при регулярном нагружении большее напряжение оказывает большее повреждающее воздействие, вследствие чего интенсивность снижения предела выносливости выше в тех случаях, когда действовало более высокое напряжение;

– при нерегулярном блочном нагружении в зависимости от характера чередования нагрузки появляются эффекты «тренировки» или разупрочнения, снижающие либо увеличивающие интенсив-

ность накопления усталостного повреждения соответственно;

– в момент долома конструкции конечное значение предела выносливости отлично от нуля;

– наибольшее повреждающее воздействие оказывают кратковременные перегрузки.

Нелинейность накопления усталостных повреждений может быть описана гипотезой Пальмгрена – Майера с учетом кинетики предела выносливости. Определение уравнения его снижения прямым экспериментальным методом требует большого объема испытаний, что предопределило гипотетичность предлагаемых для описания снижения предела выносливости критериев, основными из которых являются критерии, представленные на рисунке 1:

– Д. Генри [6]

$$\sigma_{Ri} = \sigma \frac{1 - \frac{n_i}{N_i}}{\frac{\sigma}{\sigma_R} - \frac{n_i}{N_i}}; \quad (3)$$

– С.В. Серенсена [7]

$$\frac{\sigma_{Ri}}{\sigma_R} = 1 - \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} - 1 \right) \frac{1}{\frac{\sigma}{\sigma_R} - \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^2}; \quad (4)$$

– М.Я. Шашина [8]

$$\frac{\sigma_{Ri}}{\sigma_R} = 1 - \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} - 1 \right) \exp\left(\frac{m_i}{m} \right); \quad (5)$$

– Е.К. Почтенного [10]

$$\sigma_{Ri} = \sigma_R \left(1 - \frac{n_i}{N_i} \right)^{1/m}, \quad (6)$$

где σ_{Ri}, σ_R – пределы выносливости соответственно поврежденного и исходного материалов; $\frac{\sigma}{\sigma_R}$ – степень перегрузки; m, m_i – характеристики наклона левой ветви первичной и вторичной кривых усталости.

Независимо от степени перегрузки значение предела выносливости в момент долома, вычис-

ленное по уравнению (3), равно нулю, что не соответствует действительности. Выражение (4) в области степеней перегрузок, больших двух, дает заниженные значения предела выносливости при фиксированных долях выработанного ресурса. Параметр m_i , характеризующий накопленное усталостное повреждение, зависит от предыстории нагружения, в связи с чем корректное использование выражения (5) требует подстановки вместо него функциональной зависимости характеристики наклона вторичной кривой от доли выработанного ресурса и степени перегрузки, нахождение которой само по себе является непростой задачей. Допущения в выражении (6) о неизменности параметров N_G и m делают его не зависящим от уровня действующих напряжений, что также недопустимо.

Таким образом, ни одно из рассмотренных уравнений не удовлетворяет всем требованиям, сформулированным выше.

В скорректированной линейной гипотезе В.П. Когаева для учета изменения предела выносливости рекомендуется скорректировать его исходное значение σ_R на расчетную величину $K\sigma_R$ (где K – коэффициент нижней границы повреждающих напряжений, выбираемый априорно из интервала эмпирических значений K от 0 до 1,0 [3]). Коэффициент K зависит от интенсивности снижения предела выносливости, определяемой для конкретной конструкции спектром эксплуатационных нагрузок: чем большая доля амплитудного спектра нагружения находится выше предела выносливости, тем меньше K .

Для получения конкретных рекомендаций по выбору K для рамных металлоконструкций несущих систем мобильных машин необходимо полное решение задачи о расчете ресурса конструкции с учетом постепенного снижения предела выносливости. Для этого необходимо выявить закономерность этого снижения.

В простейшем случае можно допустить, что абсцисса точки перелома N_G и характеристика угла наклона левой ветви кривой усталости m инвариантны [10]. В этом случае по мере накопления повреждения кривая усталости будет опускаться вниз по вертикали, как показано на рисунке 2.

Тогда по уравнению (1) для $0 < n_i/N_i < 1$, при $n_i/N_i = \text{const}$, можно записать:

$$\sigma^m (N_i - n_i) = \sigma_{Ri}^m N_G \quad (7)$$

С учетом допущения об инвариантности m и N_G из уравнения (7) следует, что по мере выработки ресурса снижение предела выносливости описывается зависимостью

$$\sigma_{Ri} = \sigma_R \left(1 - \frac{n_i}{N_i}\right)^{1/m} \quad (8)$$

Таким образом, при сделанных выше допущениях изменение предела выносливости исходного материала описывается убывающей функцией, зависящей только от меры усталостного повреждения (доли выработанного ресурса), и в момент разрушения он становится равным нулю.

Отечественными и зарубежными исследователями экспериментально доказано [1, 3, 5-7, 9, 10], что темп снижения предела выносливости стальных конструкций зависит не только от величины усталостного повреждения, но и от степени перегрузки (σ/σ_R). Кроме того, математическое описание снижения предела выносливости должно быть произведено в соответствии с изменением формы всей кривой усталости, в частности угла наклона ее левой ветви. В этой связи для описания кинети-

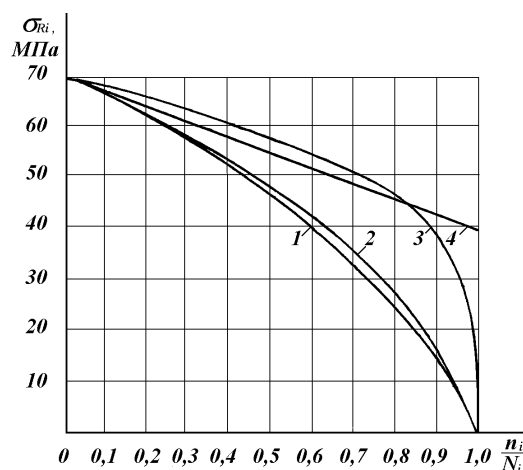


Рисунок 1. Снижение предела выносливости при накоплении усталостных повреждений, описываемое критериями: 1 – Д. Генри; 2 – С.В. Серенсена; 3 – Е.К. Почтенного; 4 – М.Я. Шашина

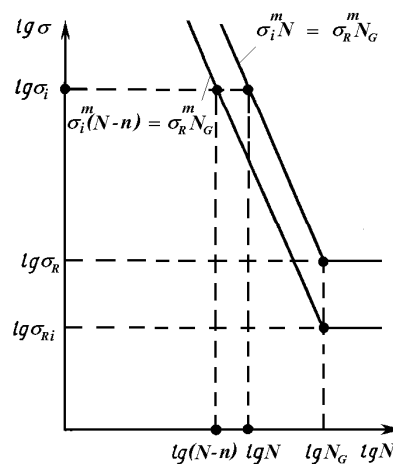


Рисунок 2. Снижение предела выносливости при накоплении повреждений

ки предела выносливости необходимо внести соответствующие коррективы в соотношение (8).

Ввиду большого объема испытаний, необходимого для получения зависимости изменения предела выносливости натуральных конструкций прямыми экспериментальными методами, перспективными, по мнению авторов, являются косвенные методы.

Физическое обоснование формы кривой изменения предела выносливости базируется на аналогичном характере изменения повреждающей энергии разрушения. Полагая, что уровень повреждающей энергии в первом приближении является косвенной характеристикой накопленного усталостного повреждения и коррелирован с пределом выносливости, можно оценить характер изменения последнего при различных степенях перегрузки по результатам измерений мощности, подводимой к образцу.

На рисунке 3 приведены диаграммы изменения мощности приводного электродвигателя испытательного стенда в зависимости от числа циклов нагружения локальных моделей рамы тракторного полуприцепа [11], испытанных в условиях стационарного периодического нагружения при уровнях начальных напряжений 100, 130 и 150 МПа.

Диаграммы подтверждают трехстадийную трактовку процесса усталости большинством теорий накопления усталостных повреждений [12]. Для первой стадии (участок A_1B_1) характерно накопление упругих искажений кристаллической решетки металла. Ее продолжительность составляет от 3,5 до 10% ресурса образца. В этот период потребляемая мощность электродвигателя снижается на 7,6...12%. Участки B_1C_1 соответствуют самой продолжительной (от 85 до 94% ресурса)

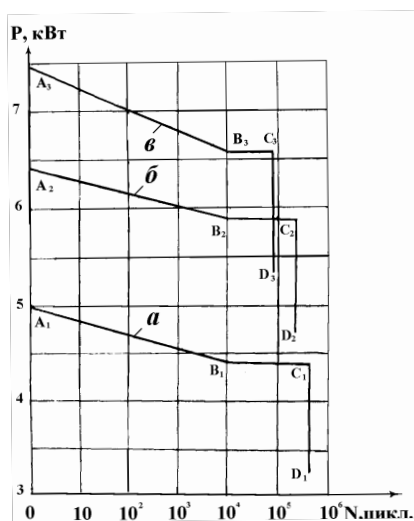


Рисунок 3. Диаграммы изменения мощности приводного электродвигателя стенда

стадии «насыщения», в течение которой происходят процессы коагуляции дефектов, циклического упрочнения и разупрочнения, подготавливающие металл к разрушению. Вторая стадия характеризуется практически неизменной энергией деформации образца. В течение третьей стадии происходит слияние субмикроскопических трещин, зарождение и распространение магистральной трещины, лимитирующей прочность образца. Потребляемая мощность электродвигателя при достижении предельного состояния (точки D_i) снижается на 20,1...33,3% в интервале долей выработанного ресурса от 0,02 до 0,04.

Таким образом, анализ косвенной характеристики сопротивления усталости – изменения мощности приводного электродвигателя стенда в условиях стационарного периодического нагружения – позволил предположить следующее:

- темп снижения предела выносливости локальных моделей рам при стационарном нагружении прямо пропорционален уровню напряжений;

- на начальных стадиях инициализации усталостных повреждений на микроуровне, соответствующих доле выработанного ресурса 0...0,7, снижение предела выносливости испытываемого объекта незначительно;

- наибольшая интенсивность снижения предела выносливости образцов характерна для последней стадии процесса усталости.

Для математической интерпретации снижения предела выносливости с учетом приведенных предположений предлагается в формулу (8) ввести кинетический коэффициент накопления усталостного повреждения φ , зависящий от относительной долговечности и степени перегрузки ($\frac{\sigma}{\sigma_R}$). С учетом корректировки предлагаемая зависимость (φ -критерий) имеет вид:

$$\sigma_{Ri} = \varphi \sigma_R \left(1 - \frac{n_i}{N_i} \right)^{1/\varphi n_i}, \quad (9)$$

где
$$\varphi = \exp \left(\frac{n_i}{N_i} \lg \frac{\sigma}{\sigma_R} \right).$$

Предлагаемая зависимость удовлетворяет всем требованиям, сформулированным в начале статьи. Кроме того, при нерегулярном нагружении, характеризуемом большими степенями перегрузки и малыми долями выработанного ресурса, удовлетворительно описывается имеющий место незначительный (от 0,5 до 1,5%) рост предела выносливости при убывающем чередовании напряжений в программном блоке, что может быть интерпретировано проявлением «эффекта тренировки» [3, 13]. Этот

эффект проявляется тем сильнее, чем выше предельное нагружение и чем ниже последующее. Причиной такого действия больших напряжений является неравномерность распределения пластической деформации в зоне сварных швов и образование при разгрузке остаточных напряжений сжатия, способствующих росту предела выносливости.

Полученная зависимость позволяет учесть изменение предела выносливости в расчетах усталостной долговечности несущих систем.

Расчет циклической долговечности узла соединения второй поперечины с лонжероном рамы тракторного полуприцепа ОЗТП-9554 произведен для двух выбранных режимов эксплуатации: движение по разбитой грунтовой дороге (режим А) и грунтовой дороге в удовлетворительном состоянии (режим В). Параметры режимов в виде нагрузочных блоков приведены в таблице 1, результаты расчета – в таблице 2, данные для сравнительной оценки точности расчета – в таблице 3.

Первичный анализ результатов, приведенных в таблицах, показывает, что долговечность, вычисленная по линейной гипотезе, превышает вычисленную по скорректированной линейной гипотезе более чем в 5 раз и долговечность, вычисленную с использованием критериев снижения предела выносливости, от 1,41 до 2,0 раз. Высокие расчетные значения долговечности, полученные при использовании линейной гипотезы, объясняются тем, что в этом случае не учитывается повреждающее воздействие напряжений ниже предела выносливости.

Полученные результаты показывают, что наименьшая точность характерна для методов, основанных на прямом применении линейной гипотезы суммирования повреждений и скорректированной линейной гипотезы. Погрешность линейной гипотезы во всех вариантах расчета направлена не в запас долговечности, что предопределяет раннее возникновение отказов несущих систем. Недостаточная точность метода, основанного на применении линейной гипотезы, объясняется неучетом повреждающего воздействия напряжений ниже предела выносливости.

Недостаточная точность метода, основанного на применении скорректированной линейной гипотезы, показывает некорректность применения этого метода для расчета долговечности объектов с небольшой (до двукратной) степенью перегрузки. Его погрешность направлена в значительный запас долговечности, что предопределяет чрезмерное завышение металлоемкости объекта. Недостаточная точность этого метода объясняется

необоснованностью параметров, учитывающих снижение предела выносливости.

При расчете ресурса несущей системы полуприцепа ОЗТП-9554 наибольшая точность ($\sigma = 6\%$) достигнута при использовании ф-критерия. При этом погрешность направлена не в запас долговечности.

В целом необходимо отметить, что применение прогнозирующих методов расчета долговечности несущих систем, основанных на использовании критериев, учитывающих закономерности снижения предела выносливости в процессе эксплуатации, позволяет достигнуть высокой точности расчета. В нашем случае колебания суммарной относительной погрешности расчетной оценки находятся в пределах $6\% \leq \delta \leq 26\%$. Это подтверждает эффективность методов кинетической теории усталости, основанной на учете реальных физических процессов накопления усталостных повреждений.

Представленные расчетно-экспериментальные данные по оценке долговечности позволяют предпринять попытку модификации метода расчета долговечности, основанного на применении линейной гипотезы. Суть модификации заключается в замене реальной кривой усталости, полученной по результатам испытаний при регулярном нагружении, некоторой фиктивной, учитывающей изменение факторов сопротивления усталости по мере выработки ресурса (рисунок 4).

Реальная кривая усталости 1 с параметрами σ_R, N_G, m заменяется расчетной кривой 2 с параметрами σ_{Rp}, N_{Gp}, m . Вычисление величин σ_{Rp}, N_{Gp} производится по формулам:

$$\sigma_{Rp} = K \sigma_R, \quad (10)$$

$$\lg N_{Gp} = \lg N_G + m \lg \left[\frac{\sigma_R}{\sigma_{Rp}} \right]. \quad (11)$$

Для некоторой обобщенной кривой снижения предела выносливости (рисунок 5) среднее взвешенное значение предела выносливости

$$\sigma_{Rp} = \int_0^1 \sigma_{Ri} \left(\frac{n_i}{N_i} \right) d \left(\frac{n_i}{N_i} \right), \quad (12)$$

откуда определим К по критериям Д. Генри, С.В. Серенсена и Е.К. Почтенного, учитывая, что интеграл в выражении (12) берется в явном виде:

– для критерия Д. Генри

$$K = \frac{\int_0^1 \sigma \cdot \frac{1 - \frac{n_i}{N_i}}{\sigma_R - \frac{n_i}{N_i}} \cdot d \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \cdot \sigma \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} - 1 \right) \cdot \ln \left| \frac{\frac{\sigma}{\sigma_R}}{\frac{\sigma}{\sigma_R} - 1} \right|}{\sigma_R} = \frac{\int_0^1 \sigma \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} - 1 \right) \cdot \ln \left| \frac{\frac{\sigma}{\sigma_R}}{\frac{\sigma}{\sigma_R} - 1} \right|}{\sigma_R};$$

– для критерия С.В. Серенсена

$$K = 1 - \int_0^1 \left(\frac{n_i}{N_i} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} - 1 \right) \frac{1}{\frac{\sigma}{\sigma_R} - \left(\frac{n_i}{N_i} \right)^2} d \left(\frac{n_i}{N_i} \right) =$$

$$= 1 + \frac{\sigma}{\sigma_R} - 1 \ln \left| \frac{1 - \frac{\sigma}{\sigma_R}}{\frac{\sigma}{\sigma_R}} \right| ;$$

– для критерия Е.К. Почтенного

$$K = \int_0^1 \left(1 - \frac{n_i}{N_i} \right)^{1/m} d \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = \frac{m}{m+1} .$$

Подставляя в полученные выражения численные значения параметров, получим значения К. Результаты вычислений сведены в таблице 4.

С достаточной точностью можно принять $K = 0,6...0,75$.

Произведен расчет долговечности узлов с использованием линейной гипотезы и расчетных кривых усталости. Результаты расчета сведены в таблице 5.

Отметим, что при $K=0,7$ расчетный предел выносливости $\sigma_{Rp} = 48,4$ МПа. Расчетные абсциссы точек перелома кривой усталости $N_{Gp} = 3,7 \cdot 10^6$ циклов.

Таким образом, для рассматриваемых конструктивных вариантов узлов применение модифицированной линейной гипотезы с использованием расчетных кривых усталости может обеспечить высокую точность прогнозирующего расчета долговечности при значении $K = 0,7$. Кроме того, положительным свойством предлагаемого метода является направленность погрешности в запас долговечности.

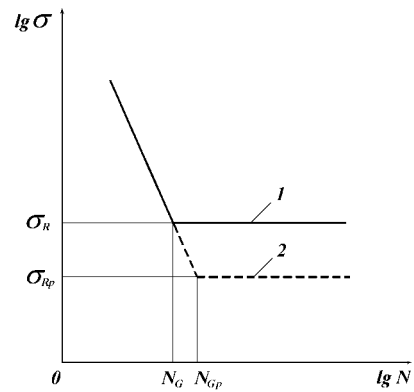


Рисунок 4. К определению расчетной кривой усталости

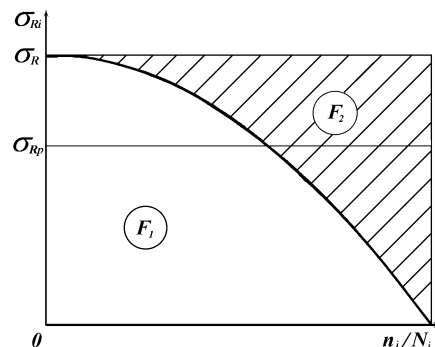


Рисунок 5. К определению нижней границы повреждающих напряжений

Таблица 4. Результаты вычисления коэффициента К

| Наименование Критерия | Режим | |
|-----------------------|-------|-------|
| | А | В |
| Д. Генри | 0,598 | 0,645 |
| С.В. Серенсена | 0,634 | 0,691 |
| В.К. Почтенного | 0,757 | 0,757 |

Таблица 5. Результаты расчета долговечности узлов на основе модификации линейной гипотезы

| № | К | Режим | N_i , цикл | L_i , км | L , км* |
|---|-----|-------|--------------|------------|-----------|
| 1 | 0,6 | А | 2 455 103 | 12 590 | 76 186 |
| | | В | 8 543 604 | 123 820 | - 31,4 |
| 2 | 0,7 | А | 3 294 798 | 16 894 | 103 798 |
| | | В | 13 704 562 | 198 616 | - 6,6 |

*В знаменателе дана погрешность расчета (%) относительно эксплуатационной долговечности. Знак «-» свидетельствует о том, что погрешность направлена в запас долговечности.

Список использованной литературы:

1. Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и диагностика усталости деталей машин. – Минск: Наука и техника, 1983. – 246 с.
2. Почтенный Е.К. Кинетическая теория механической усталости и ее приложения. – Минск: Наука и техника, 1973. – 216 с.
3. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
4. Коцаньда Ст. Усталостное растрескивание металлов / Пер. с польск. – М.: Металлургия, 1990. – 623 с.
5. Почтенный Е.К., Рыжков Е.П. Исследование кинетики повреждения листовых образцов стали 45 // Заводская лаборатория. 1975. №1. – С. 93-97.
6. Henry D.L. A theory of fatigue damage accumulation in steel. – Transaction ASME, 1955, v. 77. № 6. – P. 913-918.
7. Серенсен С.В. Об оценке долговечности при изменяющейся амплитуде переменных напряжений // Вестник машиностроения. 1944. №7-8. – С. 8-11.
8. Шашин М.Я. Оценка долговечности при изменяющейся амплитуде переменных напряжений // Вестник машиностроения. 1945. №3. – С. 8-11.
9. Гусев А.С. Сопротивление усталости и живучесть конструкций при случайных нагрузках. – М.: Машиностроение, 1989. – 248 с.
10. Почтенный Е.К. Упрощенный метод суммирования усталостных повреждений с учетом снижения пределов выносливости // Вестник машиностроения. 1986. №8. – С. 33-37.
11. Шурин К.В., Миркитанов В.И., Ракицкий А.А. Электродвигатель как датчик усталостного разрушения деталей АТС // Автомобильная промышленность. 1989. №5. – С. 29.
12. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1963. – 258 с.
13. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.