УДК 629.4.027.4:539.431

# Оценка ресурса несущей конструкции маневрового локомотива ТЭМ2 железных дорог Республики Узбекистан

**П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров**

Российский университет транспорта, Российская Федерация, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, ГСП-4

**Для цитирования:** *Григорьев П. С., Кодиров Н. С.* Оценка ресурса несущей конструкции маневрового локомотива ТЭМ2 железных дорог Республики Узбекистан // Бюллетень результатов научных исследований. — 2025. — Вып. 2. — С. 77–92. DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-77-92

**Аннотация**

**Цель:** Оценка остаточного ресурса несущей конструкции маневрового локомотива ТЭМ2 на примере рамы тележки с учетом действующих эксплуатационных нагрузок и деградации материала конструкции. **Методы:** В статье рассмотрена оценка остаточного ресурса несущей конструкции маневрового локомотива на примере его рамы тележки с позиций усталостной прочности. Определено напряженно-деформированное состояние конструкции при сочетании статических и динамических нагрузок на основе динамических воздействий от неровностей пути. Построена скорректированная кривая усталости материала с учетом деградации его свойств в результате 40–45-летней эксплуатации. Проведен расчет коэффициента запаса сопротивления усталости. **Результаты:** Показано, что учет переменных нагрузок, пробега и технического состояния пути критически важен для точного прогноза долговечности базовых частей локомотива. Результаты могут быть применены при продлении срока службы подвижного состава, а также при разработке нормативных требований к его прочности. **Практическая значимость:** Предложенный подход способствует совершенствованию методов определения срока службы несущих конструкций. Показана необходимость применения конечно-элементного анализа при оценке технического состояния конструкций. Их использование позволит на ранней стадии выявлять усталостные повреждения, что значительно повысит долговечность рамных конструкций. Предложенный подход оценки ресурса несущей конструкции может быть рекомендован к практическому использованию. Подход позволяет повысить безопасность эксплуатации подвижного состава, снизить затраты на ремонт и модернизацию.

**Ключевые слова:** Маневровый локомотив, тележка, динамическая нагруженность, кривая усталости, напряженно-деформированное состояние, многоцикловая усталость, коэффициент запаса прочности, усталостная долговечность, остаточный ресурс, неровности пути.

## Введение

Старение парка маневровых локомотивов, эксплуатируемых на железных дорогах Республики Узбекистан, обостряет проблему надежности их несущих конструкций. Ключевым объектом технического риска становятся несущие конструкции, подвергаемые многолетнему воздействию переменных нагрузок. Эти

нагрузки, в условиях превышения нормативных сроков службы, приводят к усталостным разрушениям и потере прочностных характеристик. При этом высокая стоимость нового тягового подвижного состава усиливает актуальность задач, связанных с обоснованием его дальнейшей безопасной эксплуатации [1].

На основании нормативных документов [2, 3] ресурс несущих элементов локомотивов определяется через прочностные критерии, включая сопротивление усталости. Однако в существующих подходах расчет запаса прочности не учитывает в полном объеме переменный характер эксплуатационных воздействий. Интересно, что даже при наличии достаточного коэффициента запаса ($n$) конструкции могут быть подвержены разрушению из-за накопления усталостных повреждений, особенно в сварных соединениях и других зонах концентрации напряжений.

Анализ состояния несущих конструкций должен опираться не только на расчет НДС, но и на полную оценку их несущей способности по сопротивлению усталости [4]. В последние годы для решения этой задачи находят широкое применение конечно-элементные пакеты — такие как Ansys, NASTRAN и т. д., позволяющие моделировать поведение конструкций при многовариантных сценариях нагружения [5].

В отличие от упрощенных моделей усталостной прочности, рассматриваемых в работах [6, 7], в настоящем исследовании предлагается подход, основанный на учете реальных эксплуатационных характеристик: геометрии и материала конструкции, ежегодного пробега, а также динамических нагрузок, обусловленных неровностями пути. Использование уточненных данных о механических свойствах позволяет построить скорректированную кривую усталости и выявить наиболее уязвимые зоны конструкции. Применение такой методологии дает возможность количественно оценить остаточный ресурс и спрогнозировать сроки безопасной эксплуатации [8].

Целью настоящего исследования является количественная оценка остаточного ресурса несущей конструкции маневрового локомотива ТЭМ2 на примере рамы тележки с учетом действующих эксплуатационных нагрузок и деградации материала конструкции.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– произведен анализ существующих подходов к расчету усталостной прочности конструкций;

– определено напряженно-деформированное состояние рамы тележки в условиях статических и динамических нагрузок;

– построена кривая усталости на основе механических характеристик металла, взятого из зоны максимальных нагрузок после длительной эксплуатации;

– выполнено численное моделирование переменных нагрузок, возникающих при проезде тележки по расчетным профилям неровностей пути;

– рассчитан коэффициент запаса прочности и предельный пробег до появления усталостных повреждений с прогнозом остаточного срока безопасной эксплуатации.

## Материалы и методы

Объектом исследования является несущая конструкция маневрового локомотива, представляющая собой раму тележки тепловоза ТЭМ2, выполненной из стали марки Ст3 и эксплуатировавшейся на железных дорогах Республики Узбекистан более 40 лет. Конструкция рамы представляет собой сварной силовой элемент, включающий боковины, поперечные коробчатые связи, концевые балки и литую шкворневую часть. В условиях многолетней эксплуатации данная конструкция подвергается переменным нагрузкам, возникающим при взаимодействии с верхним строением пути, что в совокупности с деградацией металла приводит к снижению ее сопротивления усталости.

Современные методы анализа долговечности опираются на линейную гипотезу накопления повреждений Майнера [9], в которой основным инструментом прогноза выступает кривая усталости ($S$ — $N$ кривая). При этом более полный анализ ресурса требует учета не только предела выносливости, но и характеристик нагружения в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации.

В настоящее время по требованиям [2, 3] коэффициенты запаса сопротивления усталости ($n$) для рамы тележки маневрового локомотива следует определять по формулам:

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma д}\sigma_a + \psi_\sigma \frac{\sigma_т}{\alpha_\sigma}} \geq [n] \text{ или } n = \frac{\sigma_{-1p}}{K_{\sigma д}\sigma_a + \psi_\sigma \frac{\sigma_т}{\alpha_\sigma}} \geq [n]. \quad (1)$$

В данной работе основной акцент ставится на применении метода конечно-элементного анализа с использованием современных программных комплексов. Геометрическая модель рамы тележки построена по данным технической документации с учетом реального коррозийного износа, а расчетная сетка включает более 280 000 тетраэдрических элементов со средним размером 20 мм (рис. 1). Расчеты выполнялись в двух режимах: статическая нагрузка и комбинированное нагружение, учитывающее нагружение от прохождения по профилям неровностей рельсов, заданных по нормативам ПНСТ 511—2020 и РД 32.68—96.

Чтобы учесть рессорное подвешивание, в модель были введены 12 упругих элементов, имитирующих характеристики пружин с заданной жесткостью и геометрией. Это позволило воспроизвести реалистичное распределение реакций на опоры тележки (точки $A$, $E$, $F$, $G$) и адекватно смоделировать реакцию конструкции на вертикальные воздействия, возникающие при проезде по стыкам (рис. 2).

ТАБЛИЦА 1. Исходные данные для оценки сопротивления усталости рам тележек ТЭМ2 согласно нормативными требованиям [10, 11]

| Обозначение | Параметр | Значение параметра |
|---|---|---|
| $\sigma_{-1}$ | предел выносливости стандартного образца при изгибе с симметричным циклом нагружения | для Ст3 $\sigma_{-1}$ = 180°МПа |
| $\sigma_{-1p}$ | предел выносливости стандартного образца при растяжении-сжатии с симметричным циклом нагружения | для Ст3 $\sigma_{-1p}$ = 140°МПа |
| $k_\sigma$ | коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца (коэффициент концентрации) | $k_\sigma = \frac{k_1 k_2}{\gamma k_m} k_3$ По принятым значениям коэффициентов $k_\sigma$ |
| $k_1$ | коэффициент, учитывающий влияние неоднородности материала детали; проката, поковки и штамповки | принимаем 1,1 |
| $k_2$ | коэффициент, учитывающий влияние внутренних напряжений в детали, принимаем в зависимости от ее наибольшего поперечного размера | принимаем: 1,0 — при размере до 250 мм |
| $k_m$ | коэффициент, учитывающий состояние поверхности детали, для поверхностей после черновой станочной обработки, поверхностей с окалиной и поверхностей стальных литых деталей после пескоструйной обработки | принимаем 0,8 |
| $\gamma$ | коэффициент, учитывающий масштабный фактор и выбираемый в зависимости от наибольшего поперечного размера сечения детали $h$ | при высоте сечения до 100 мм включительно принимаем — 0,8 |
| $k_3$ | корректировочный коэффициент. для углеродистых прокатных сталей марок Ст3 | принимаем — 1,0 |
| $K_\sigma$ | обобщающий коэффициент, учитывающий влияние неоднородности материала, размерного фактора, состояния поверхности | $K_{\sigma д} = K_\sigma \beta_K$ По принятым значениям коэффициентов $K_\sigma$ |
| $\beta_k$ | эффективный коэффициент концентрации напряжений, учитывающий форму детали | принимаем 2,1 от связи $\beta_k = 1 + q(\alpha_\sigma - 1)$ |
| $q$ | коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений | Для сталей Ст3 $q$ = 0,7 |
| $\alpha$ | теоретический коэффициент концентрации напряжений | 2,57 |
| $\sigma$ | амплитуда переменных напряжений (максимальных в зоне концентрации) цикла | 25 МПа |
| $\psi_\sigma$ | коэффициент, характеризующий влияние асимметрии цикла | $\psi_\sigma$ = 0,3 для $\sigma_m > 0$ |

Граничные условия моделирования заданы следующим образом:

– точка *B*: зафиксированы перемещения по осям *x* и *z* (ось *y* свободна);

– точка *C*: перемещения по осям *y* и *z* свободны (перемещения по оси *x* закреплены);

– точка *D*: перемещения по осям *y* и *z* свободны (перемещения по оси *z* закреплены).

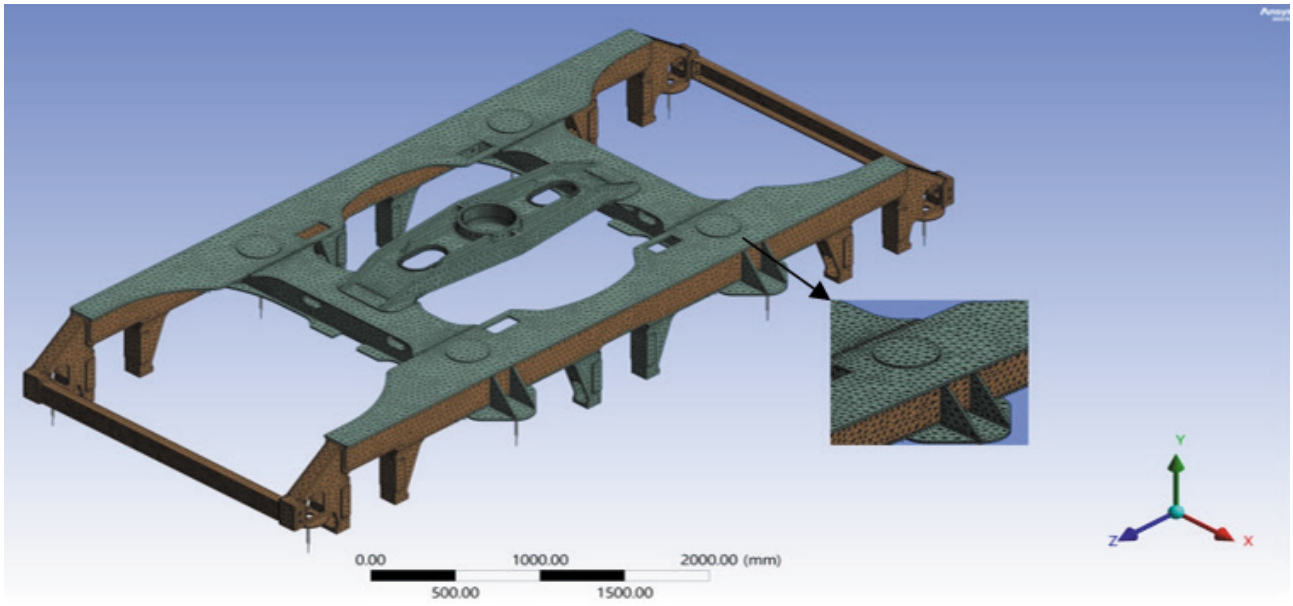


Рис. 1. Конечно-элементная сетка рамы тележки

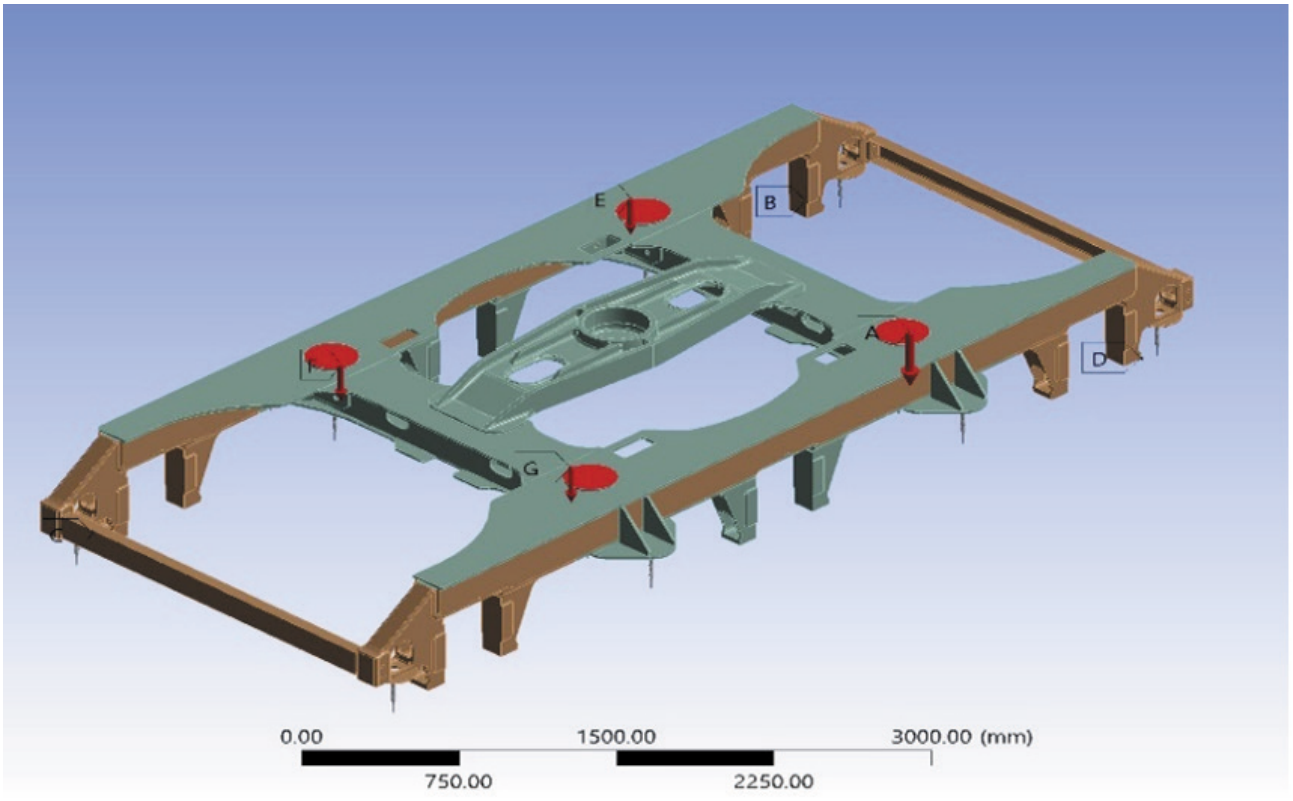


Рис. 2. Закрепление рамы тележки и прикладываемые силы

Нагрузки рассчитывались на основе массы тепловоза ТЭМ2 (120 т) и массы одной тележки (23,6 т). Вертикальная нагрузка от кузова, приходящаяся на одну тележку, составляла 36,4 кН. Данная нагрузка распределена между опорами с учетом конструктивной схемы.

ТАБЛИЦА 2. Механические свойства образца стали от рамы тележки ТЭМ2

| Параметр | Значение | Размерность |
|---|---|---|
| Предел текучести, $\sigma_т$ | 235 | МПа |
| Временное сопротивление, $\sigma_в$ | 395 | МПа |
| Модуль упругости, *E* | 213 | ГПа |
| Коэффициент Пуассона, μ | 0,286 | — |
| Модуль сдвига, *G* | 82,8 | ГПа |
| Твердость по Бринеллю, НВ | 111 | МПа |
| Ударная вязкость KCU | 145,3 | Дж/см² |
| Относительное удлинение, δ | 40,7 | % |

Механические свойства стали Ст3, использованные в расчетах, получены на основе лабораторных испытаний образцов, вырезанных из наиболее нагруженных зон рамы тепловоза [12]. Особое внимание уделялось деградированным участкам, подверженным длительному действию эксплуатационных напряжений. Полученные значения приведены в табл. 2.

На следующем этапе была построена кривая усталости Веллера по уравнению Басквина (2), учитывающему два наклонных участка, соответствующих разным режимам усталостного разрушения. Для описания поведения материала в многоцикловом режиме (при напряжениях, не превышающих предел текучести) на основании работы [6] был использован наклон $m = 5$ на первом участке и показатель степени $m = 9$ на втором участке.

$$N_э = \left( \frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_{аэ}} \right)^m N_0 = n_\sigma^m N_0, \quad (2)$$

где *m* — показатель степени уравнения наклона второй ветви кривой усталости.

В отличие от общепринятых значений предела выносливости, в работе применен скорректированный уровень $\sigma_{-1} = 35$ МПа (для изгиба при симметричном цикле), что соответствует данным, полученным при испытаниях деградированного материала [6]. Значение учитывает масштабный и поверхностный факторы, коэффициенты концентрации напряжений, а также особенности сварных соединений конструкции.

Для расчета амплитудных напряжений использовалась методология «дождевого потока» [13] и коррекция среднего напряжения по критерию Гудмана (3). Такая связка методик позволяет выявить зоны вероятного зарождения трещин и установить максимально опасные участки на основе накопления усталостных повреждений [14–17].

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_{fat}} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}} = 1, \quad (3)$$

где $\sigma_m$ — амплитуда напряжения;
$\sigma_{fat}$ — предел усталости при симметричном цикле;
$\sigma_a$ — среднее напряжение;
$\sigma_{uts}$ — предел прочности материала при растяжении.

## Результаты

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) рамы тележки маневрового тепловоза ТЭМ2 был проведен в два этапа [15], каждый из которых имитирует определенные условия эксплуатации. Первый этап — статическое нагружение — позволяет определить равновесное распределение напряжений без учета временных изменений. Второй — многоцикловое нагружение, учитывающее динамическую составляющую, обусловленную воздействием неровностей пути при движении локомотива.

В рамках первого этапа нагрузка от массы кузова тепловоза (72,8 т), приходящаяся на тележку, распределялась между четырьмя опорными точками конструкции. Учет рессорного подвешивания позволил отразить реалистичную кинематику конструкции и зафиксировать характер деформаций при вертикальном давлении. Конечно-элементная модель имела достаточную для данного расчета детализацию: 280 376 элементов, тетраэдрическая сетка с шагом 20 мм. На рис. 3 представлены результаты моделирования НДС и локализация критических зон.

Наибольшие напряжения были определены в сварных соединениях поперечной балки с боковыми элементами рамы, а также в области сопряжения коробчатых челюстей с нижним поясом. В этих участках наблюдаются максимальные значения эквивалентных напряжений до 47,7 МПа. Эти зоны, по сути, представляют собой «концентраторы усталости», формирующие потенциальные очаги разрушения при циклических воздействиях.

Интересно, что расчет коэффициентов запаса сопротивления усталости ($n$) по методике [2, 3] показывает снижение прочностного запаса даже при классическом подходе:

при изгибе: $n = 1{,}70$,

при растяжении: $n = 1{,}32$.

Такие значения считаются низкими, особенно для конструкций, отработавших более четырех десятилетий. Снижение сопротивления усталости напрямую связано с деградацией свойств материала: накопленные дефекты микроструктуры, остаточные напряжения и усталостные повреждения на сварных швах приводят к резкому падению долговечности конструкции.

Второй этап анализа учитывает воздействия на тележки от движения по пути с характерными неровностями, заданными в соответствии с нормативами РД 32.68—96 и ПНСТ 511—2020. Для каждого варианта принята история нагружения,

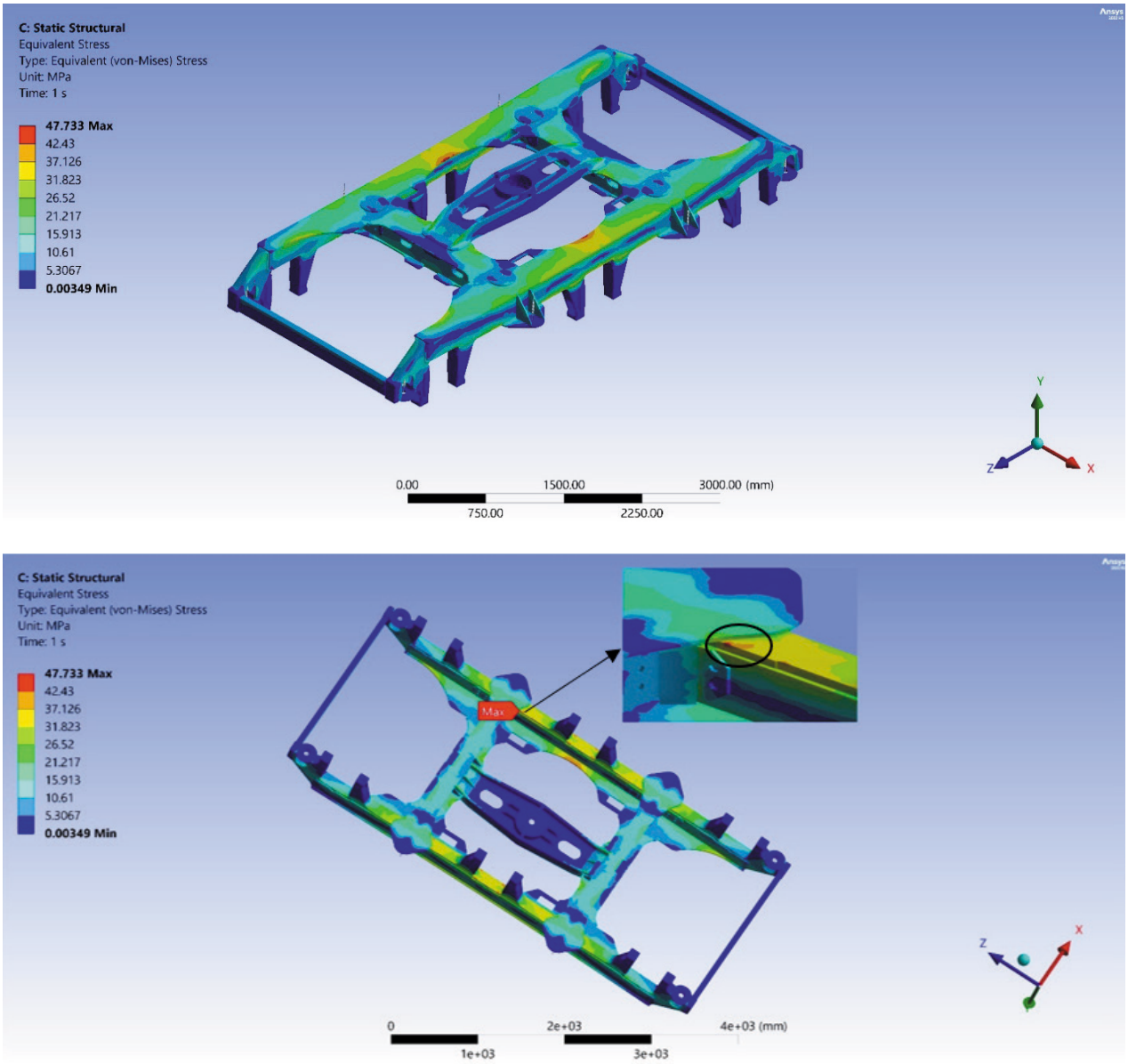


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние рамы тележки (верхний рисунок) и критическая точка в статическом состоянии (нижний рисунок)

полученная на основе математической модели, созданной в программном комплексе «Универсальный механизм». Такой подход позволил построить гистограммы нагружений, полученных с использованием метода «дождевого потока», и реализована коррекция средних напряжений по критерию Гудмана. Эти методы, в совокупности с конечно-элементным анализом, позволили получить пространственно-временное распределение усталостной прочности конструкции.

На рис. 4 представлены реалистичные временные диаграммы нагружения при прохождении тележкой 1 км пути, полученные на основе математической модели по двум вариантам неровностей. Эти данные легли в основу оценки остаточного ресурса.

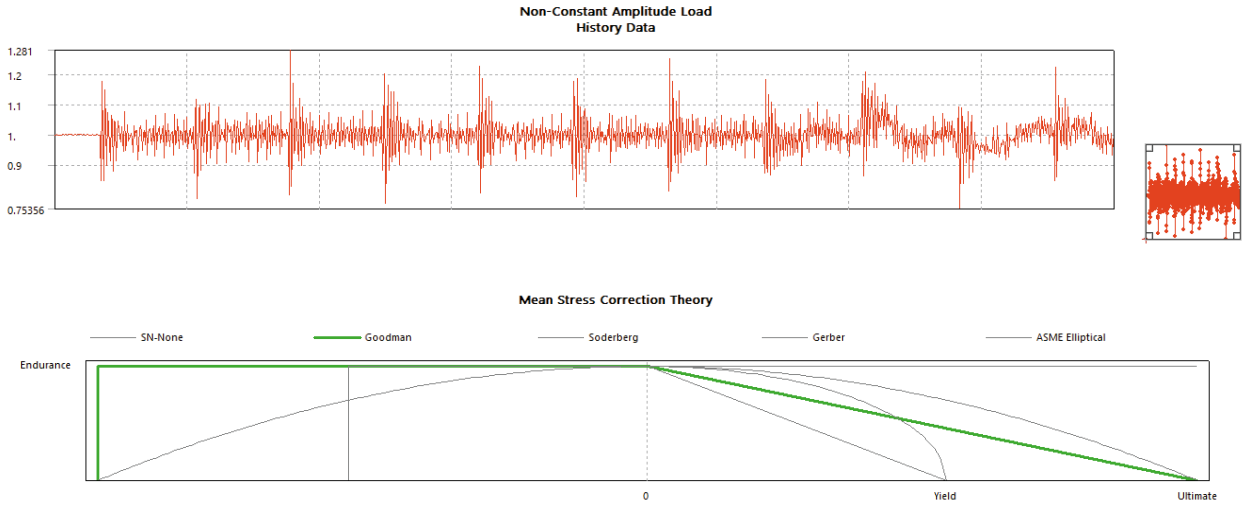


Рис. 4. Гистограммы нагружения при проезде сгенерированных расчетных неровностей на 1 км железнодорожного пути по РД 32.68—96 (верхний рисунок) и ПНСТ 511—2020 (нижний рисунок)

Построенная кривая усталости Веллера (рис. 5) для материала, отобранного из тележки, эксплуатировавшейся более 40 лет, показала резкое снижение выносливости — предельное значение $\sigma_{-1}$, как было сказано ранее, составило всего 35 МПа при базе $10^7$ циклов. Это значение легло в основу дальнейших расчетов остаточного ресурса.

Приведем результаты расчета на усталость рамы тележки локомотива ТЭМ2 (рис. 6).

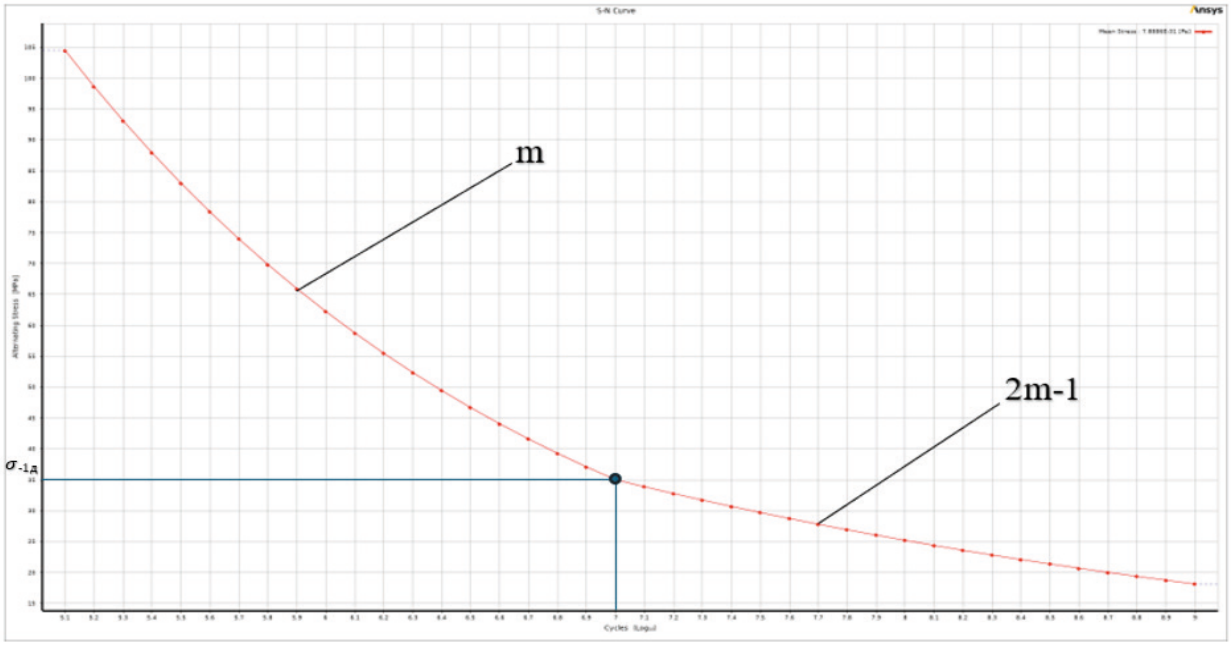


Рис. 5. Кривая усталости Веллера, применяемая в расчетах

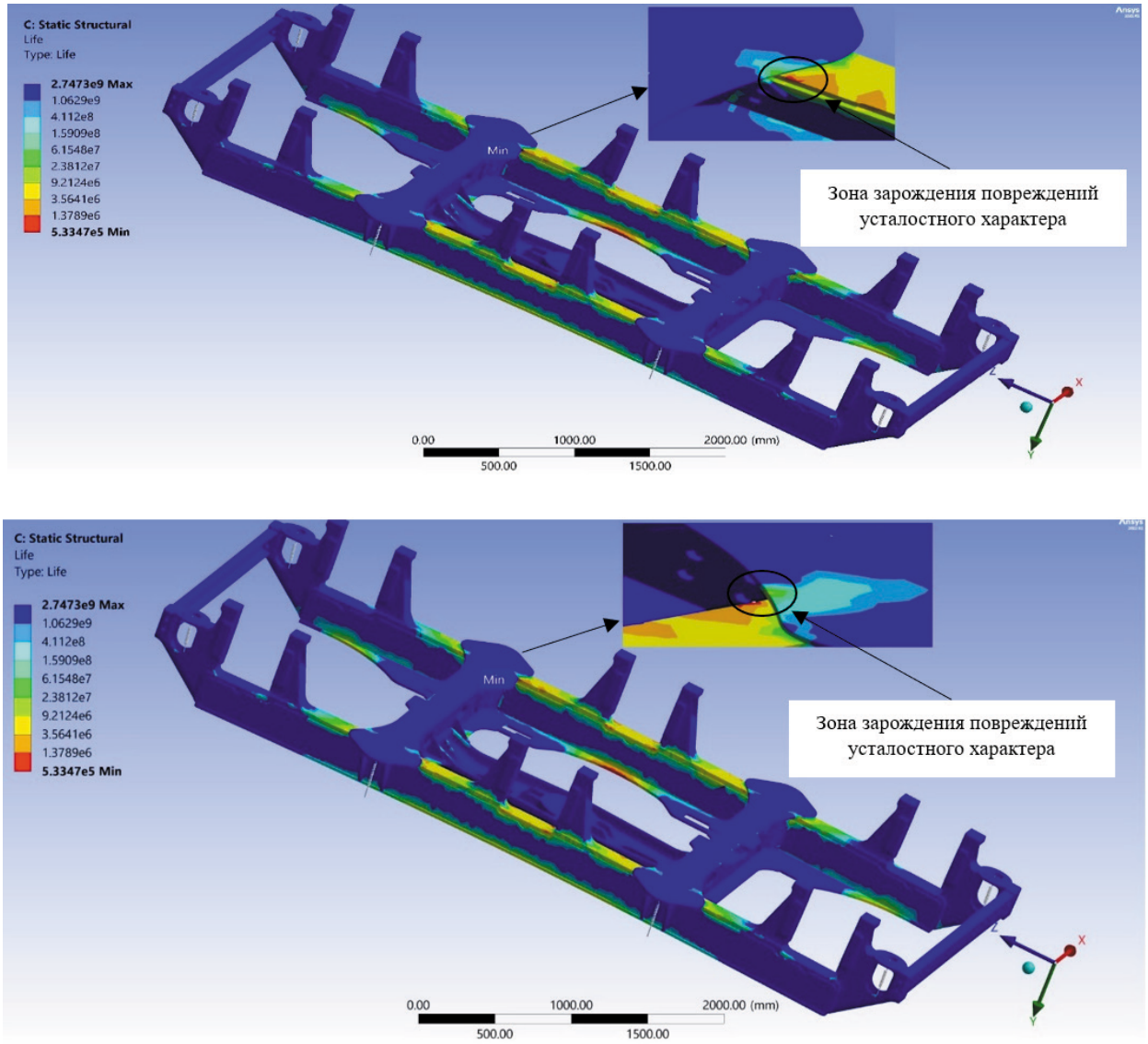


Рис. 6. Анализ усталостной долговечности рамы тележки тепловоза ТЭМ2 в модуле Fatigue при прохождении расчетных неровностей пути: верхний рисунок — по РД 32.68—96; нижний рисунок — по ПНСТ 511—2020

Прогноз ресурса осуществлялся по классической формуле:

$$T = \frac{L_p}{L_{\text{год}}},$$

где $L_p$ — предельный пробег до появления усталостных трещин;

$L_{\text{год}}$ — среднегодовой пробег тепловоза, принятый равным 41 000 км.

Данный пробег был получен путем обработки данных, предоставленных эксплуатирующими подразделениями железных дорог Узбекистана.

На основании анализа показателей напряжений и усталостной прочности получены следующие значения остаточного ресурса тележки (табл. 3).

ТАБЛИЦА 3. Значения остаточного ресурса тележки

| Норматив неровностей | Пробег до разрушения, км | Остаточный ресурс, лет |
|---|---|---|
| РД 32.68—96 | 533 000 | 13 |
| ПНСТ 511—2020 | 580 000 | 14 |

Таким образом, даже при условии длительной эксплуатации (40–45 лет) рама тележки ТЭМ2 сохраняет остаточный запас ресурса, однако его величина напрямую зависит от состояния пути, интенсивности пробега и реальных эксплуатационных нагрузок.

## Выводы и обсуждение

Выполненные расчеты показали, что для достоверной оценки остаточного ресурса несущих конструкций маневровых локомотивов одних лишь расчетов коэффициентов запаса прочности недостаточно. Несмотря на то, что значения $n \geq 1{,}5$ выполняются в конструкциях, отработавших свыше 40 лет, реальное сопротивление усталости может оказываться существенно ниже требуемого значения. Причиной служит совокупность факторов: деградация металла, накопленные микроповреждения в сварных швах и основном материале, а также увеличение амплитуды напряжений из-за низкого качества железнодорожного состояния пути.

Особое внимание заслуживают выявленные зоны концентрации напряжений, таких как участки сварки поперечной балки с боковинами и сопряжения коробчатых сечений с нижним поясом. В этих местах наблюдается повышенный уровень напряжений 47,7 МПа, что в условиях многоциклового нагружения способствует формированию очагов усталостного разрушения.

Принципиально важным элементом используемой методологии стала разработка скорректированной кривой усталости для материала, находившегося в эксплуатации не менее 40 лет. Использование реальных данных вместо справочных значений позволило существенно повысить точность прогноза ресурса. Интересно, что полученное значение предела выносливости — 35 МПа — оказалось почти в два раза ниже табличного значения для стали Ст3, принятого для свежих образцов. Это подтверждает необходимость корректировки нормативных коэффициентов для конструкций, находящихся в эксплуатации более 30 лет. Результатом расчета по такому методу явились результаты, отражающие остаточный ресурс несущей конструкции маневрового локомотива в пределах 13–14 лет.

Кроме того, было установлено, что динамическое нагружение, возникающее при движении по более точным неровностям пути, оказывает критическое влияние на результат расчета ресурса конструкции. Разница в остаточном ресурсе, рассчитанная по двум профилям неровностей, составила около одного года.

Таким образом, можно сделать следующие ключевые выводы:

1. Стандартные методы расчета запаса прочности не обеспечивают достаточной точности для прогнозирования остаточного ресурса тележек, отработавших более 40 лет.

2. Необходима локальная оценка напряжений [18] в зонах концентрации, а также учет состояния поверхности и масштабного эффекта, особенно в сварных соединениях.

3. Применение скорректированной кривой усталости позволяет получить более реалистичную оценку ресурса несущей конструкции маневрового локомотива.

4. Динамические нагрузки, обусловленные неровностями пути, существенно влияют на усталостный ресурс и должны учитываться при продлении срока службы.

5. Полученные результаты могут лечь в основу корректировки нормативных документов для оценок ресурса и разработки программ диагностики конструкций подвижного состава.

Отдельно стоит отметить, что одним из направлений развития предложенного подхода представляется использование различных методов неразрушающего контроля при проведении работ по продлению сроков службы и ремонтных мероприятий для раннего выявления усталостных трещин, а также учета реальных температурных и климатических факторов, влияющих на долговечность.

## Список источников

1. Кодиров Н. С. Анализ технического состояния и прогнозирования ресурса несущих конструкций маневровых локомотивов, эксплуатирующихся на железных дорогах Республики Узбекистан / Н. С. Кодиров, П. С. Григорьев // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Омск, 18 ноября 2022 г. — Омск: ОмГУПС, 2022. — С. 270–276.

2. ГОСТ Р 55513—2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. — М.: Стандартинформ, 2013. — 75 с.

3. ГОСТ 34939—2023. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2023. — 45 с.

4. Махутов Н. А. Методы определения ресурса конструкций локомотивов / Н. А. Махутов, В. С. Коссов, Э. С. Оганьян и др. // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ — 2016): труды конф., Москва, 26–28 окт. 2016 г. — М.: ИМАШ РАН, 2016. — С. 76–81.

5. Гасюк А. С. Расчетно-экспериментальные методы оценки ресурса базовых частей подвижного состава / А. С. Гасюк, Э. С. Оганьян // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2019. — Т. 16. — № 2. — С. 285–291. — DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-285-291.

6. Оганьян Э. С. Безопасная эксплуатация локомотивов по ресурсу их базовых частей / Э. С. Оганьян, А. С. Гасюк, Г. М. Волохов и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 6. — С. 54–58. — DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58.

7. Берендеев Н. Н. Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности: учеб.-метод. пособие / Н. Н. Берендеев. — Нижний Новгород: НГУ, 2006. — 83 с.

8. Григорьев П. С. Подходы к оценке ресурса несущих конструкций подвижного состава с применением различных систем конечно-элементного анализа / П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров // Интеллектуальные транспортные системы: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 25 мая 2023 г. — М.: РУТ (МИИТ), 2023. — С. 570–577. — DOI: 10.30932/9785002182794-2023-570-577.

9. Майнер М. А. Накопление повреждений при усталости / М. А. Майнер // Journal of Applied Mechanics. — 1945. — Т. 12. — № 3. — С. A159–A164.

10. ГОСТ 380—2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2005.

11. Нормы для расчета прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог колеи 1520 мм. — М.: ВНИИЖТ, 1998. — 145 с.

12. Григорьев П. С. Оценка механических свойств материала несущей конструкции маневрового локомотива после истечения срока службы / П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров, А. М. Юсуфов, Г. Р. Измайлова // Железнодорожный подвижной состав: проблемы, решения, перспективы: материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Ташкент, 17–20 апр. 2024 г. — Ташкент: Ташкент. гос. трансп. ун-т, 2024. — С. 134–141.

13. ГОСТ 25.101—83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. — М.: Изд-во стандартов, 1983. — 25 с.

14. Smith R. A. A review of the fatigue strength of railway axle materials / R. A. Smith, S. Hillmansen // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. — 2004.

15. Kumar S. Fatigue life prediction of automotive chassis using finite element analysis / S. Kumar, I. V. Singh // International Journal of Fatigue. — 2015.

16. Sonsino C. M. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety / C. M. Sonsino // International Journal of Fatigue. — 2007.

17. Luo R. K. Dynamic stress analysis of an open-shaped railway bogie frame / R. K. Luo, B. L. Gabbitas, B. V. Brickle // Engineering Failure Analysis. — 1996. — Vol. 3. — Iss. 1. — Pp. 53–64.

18. Григорьев П. С. Оценка ресурса несущих конструкций подвижного состава при помощи динамико-прочностных испытаний / П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров // Вестник транспорта Поволжья. — 2023. — № 3(99). — С. 18–24.

Дата поступления: 22.04.2025
Решение о публикации: 10.05.2025

**Контактная информация:**
ГРИГОРЬЕВ Павел Сергеевич — канд. техн. наук, доц. кафедры «Электропоезда и локомотивы»; grigorev.p@gmail.com
КОДИРОВ Нозимжон Солиевич — аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы»; nazimzhank@bk.ru

# Estimation of the Service Life of the TEM2 Shunting Locomotive Main Frame on the Uzbekistan Railways

**P. S. Grigorev, N. S. Kodirov**

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova str., OCP-4, Moscow, 127994, Russian Federation

**For citation:** Grigorev P. S., Kodirov N. S. Estimation of the Service Life of the TEM2 Shunting Locomotive Main Frame on the Uzbekistan Railways. *Bulletin of scientific research results*, 2025, iss. 2, pp. 77–92. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2025-2-77-92

**Summary**

**Purpose:** The estimation of the residual life of the TEM2 shunting locomotive bearing structure is to be conducted for the bogie frame, with consideration given to the operating loads and degradation of the structure material. **Methods:** The present paper evaluated the residual life of the shunting locomotive bearing structure considering its bogie frame from the standpoint of fatigue strength. The stress-strain state of the structure was determined at a combination of static and dynamic loads, based on the dynamic effects from track irregularities. An adjusted material fatigue curve was constructed taking into account the degradation of its properties after 40–45 years of operation. The fatigue resistance safety factor was calculated. **Results:** The research results demonstrated that variable loads, mileage and technical condition of the track are critically important for an accurate forecast of the durability of the locomotive main parts. The results can be applied in extending the rolling stock service life, as well as in developing regulatory requirements for its strength. **Practical significance:** The approach proposed allows improving the methods for determining the locomotive's bearing structure service life. The finite element analysis is important for assessing the technical condition of the locomotive parts. It will allow early detection of fatigue damage, which will significantly increase the durability of frame structures. The approach can be recommended for practical use. It will enhance the safety of rolling stock operation, and reduce repair and modernization costs. This approach will increase the safety of rolling stock operation, and reduce the repair and modernization costs.

**Keywords:** Shunting locomotive, bogie, dynamic loading, fatigue curve, stress-strain state, multi-cycle fatigue, safety factor, fatigue life, residual resource, track irregularities.

## References

1. Kodirov N. S., Grigor'ev P. S. Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya i prognozirovaniya resursa nesushchikh konstruktsiy manevrovykh lokomotivov, ekspluatiruyushchikhsya na zheleznykh dorogakh Respubliki Uzbekistan [Analysis of the technical condition and forecasting the resource of supporting structures of shunting locomotives operated on the railways of the Republic of Uzbekistan]. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' lokomotivnogo parka i povyshenie effektivnosti tyagi poezdov: materialy VII Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem, Omsk, 18 noyabrya 2022 g.* [Operational reliability of the locomotive fleet and improving the efficiency of train traction: Proc. VII All-Russian scientific and technical conf. with international participation, Omsk, November 18, 2022]. Omsk: OmGUPS Publ., 2022, pp. 270–276. (In Russian)

2. *GOST R 55513—2013. Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST R 55513—2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2013, 75 p. (In Russian)

3. *GOST 34939—2023. Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam* [GOST 34939—2023. Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities]. Moscow: Standartinform Publ., 2023, 45 p. (In Russian)

4. Makhutov N. A., KossovV. S., Ogan'yan E. S. Metody opredeleniya resursa konstruktsiy lokomotivov [Methods for determining the service life of locomotive structures]. *Zhivuchest' i konstruktsionnoe materialovedenie (ZhivKoM — 2016): trudy konf., Moskva, 26–28 okt. 2016 g.* [Survivability and structural materials science (ZhivKom — 2016): conf. proceedings, Moscow, October 26–28, 2016]. Moscow: IMASh RAN Publ., 2016, pp. 76–81. (In Russian)

5. Gasyuk A. S., Ogan'yan E. S. Raschetno-eksperimental'nye metody otsenki resursa bazovykh chastey podvizhnogo sostava [Calculation and experimental methods for assessing the service life of basic parts of rolling stock]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Petersburg University of Railway Engineering]. 2019, vol. 16, Iss. 2, pp. 285–291. DOI: 10.20295/1815-588X-2019-2-285-291. (In Russian)

6. Ogan'yan E. S., Gasyuk A. S., Volokhov G. M. et al. Bezopasnaya ekspluatatsiya lokomotivov po resursu ikh bazovykh chastey [Safe operation of locomotives based on the resource of their base parts]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry]. 2017, Iss. 6, pp. 54–58. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58. (In Russian)

7. Berendeev N. N. *Primenenie sistemy ANSYS k otsenke ustalostnoy dolgovechnosti: ucheb.-metod. posobie* [Application of the ANSYS system to assess fatigue life: a teaching aid]. Nizhniy Novgorod: NGU, 2006, 83 p. (In Russian)

8. Grigor'ev P. S., Kodirov N. S. Podkhody k otsenke resursa nesushchikh konstruktsiy podvizhnogo sostava s primeneniem razlichnykh sistem konechno-elementnogo analiza [Approaches to assessing the resource of supporting structures of rolling stock using various finite element analysis systems]. *Intellektual'nye transportnye sistemy: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 25 maya 2023 g.* [Intelligent transport systems: proc. II Int. scientific-practical. conf., Moscow, May 25, 2023]. Moscow: RUT (MIIT) Publ., 2023, pp. 570–577. DOI: 10.30932/9785002182794-2023-570-577. (In Russian)

9. Mayner M. A. Nakoplenie povrezhdeniy pri ustalosti [Accumulation of damage due to fatigue]. Journal of Applied Mechanics, 1945, vol. 12, Iss. 3, pp. A159–A164.

10. *GOST 380—2005. Stal' uglerodistaya obyknovennogo kachestva* [GOST 380—2005. Carbon steel of ordinary quality]. Moscow: IPK Izd-vo standartov Publ., 2005. (In Russian)

11. *Normy dlya rascheta prochnosti nesushchikh elementov, dinamicheskikh kachestv i vozdeystviya na put' ekipazhnoy chasti lokomotivov zheleznykh dorog kolei 1520 mm* [Standards for calculating the strength of load-bearing elements, dynamic qualities and impact on the track of the undercarriage part of locomotives of 1520 mm gauge railways]. Moscow: VNIIZhT Publ., 1998, 145 p. (In Russian)

12. Grigor'ev P. S., Kodirov N. S., Yusufov A. M., Izmaylova G. R. Otsenka mekhanicheskikh svoystv materiala nesushchey konstruktsii manevrovogo lokomotiva posle istecheniya sroka sluzhby [Evaluation of mechanical properties of the material of the supporting structure of a shunting locomotive after the expiration of its service life]. *Zheleznodorozhnyy podvizhnoy sostav: problemy, resheniya, perspektivy: materialy III Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Tashkent, 17–20 apr. 2024 g.* [Railway rolling stock: problems, solutions, prospects: materials of the III Int. scientific-technical conf., Tashkent, April 17–20, 2024]. Tashkent: Tashkent. gos. transp. un-t Publ., 2024, pp. 134–141. (In Russian)

13. *GOST 25.101—83. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody skhematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruktsiy i statisticheskogo predstavleniya rezul'tatov* [GOST 25.101—83. Strength calculations and tests. Methods for schematizing random loading processes of machine elements and structures and statistical presentation of results]. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 1983, 25 p. (In Russian)

14. Smith R. A., Hillmansen S. A review of the fatigue strength of railway axle materials. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004.

15. Kumar S., Singh I. V. Fatigue life prediction of automotive chassis using finite element analysis. International Journal of Fatigue, 2015.

16. Sonsino C. M. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. International Journal of Fatigue, 2007.

17. Luo R. K., Gabbitas B. L., Brickle B. V. Dynamic stress analysis of an open-shaped railway bogie frame. Engineering Failure Analysis, 1996, vol. 3, Iss. 1, pp. 53–64.

18. Grigor'ev P. S., Kodirov N. S. Otsenka resursa nesushchikh konstruktsiy podvizhnogo sostava pri pomoshchi dinamiko-prochnostnykh ispytaniy [Assessment of the service life of rolling stock load-bearing structures using dynamic strength tests]. *Vestnik transporta Povolzh'ya* [Bulletin of Transport of the Volga Region]. 2023, Iss. 3(99), pp. 18–24. (In Russian)

Received: April 22, 2025
Accepted: May 10, 2025

**Author's information:**
Pavel S. GRIGOREV — PhD in Engineering, Associate Professor,
"Electric Trains and Locomotives" Department; grigorev.p@gmail.com
Nozimzhon S. KODIROV — Postgraduate Student, "Electric Trains and Locomotives" Department; nazimzhank@bk.ru