

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ
ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МИЗЕСА ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ РЕМОНТНЫХ
ПРОЦЕССОВ ГУСЕНИЧНЫХ ТРАКОВ ЛЕСОПОСАДОЧНОЙ
ТЕХНИКИ**

Гарькин И.Н., Войнаш С.А.

*Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,
Москва, Россия*

**USING THE CRITERION OF SPECIFIC ENERGY OF MISES SHAPE
CHANGE IN OPTIMIZING REPAIR PROCESSES OF TRACKS
OF FORESTRY PLANT MACHINERY**

Garkin I.N., Voinash S.A.

*Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
Moscow, Russia*

Аннотация: В условиях интенсивной эксплуатации элементы гусеничных траков лесопосадочных машин испытывают значительные механические нагрузки, что приводит к накоплению пластических деформаций и усталостных повреждений. Для повышения надежности такой техники важно использовать научно обоснованные критерии оценки состояния наиболее нагруженных деталей. В статье обосновано применение критерия удельной энергии формоизменения по Мизесу для диагностики остаточного ресурса и оптимизации технологий восстановления траков. Моделирование напряженно-деформированного состояния показало, что этот подход позволяет точнее выявить опасные зоны и прогнозировать развитие повреждений. На основе результатов предложены рекомендации по совершенствованию технологических процессов ремонта и внедрению системы мониторинга состояния траков с использованием неразрушающих методов контроля. Интеграция современных критериев механики разрушения способствует продлению ресурса машин и снижению эксплуатационных затрат.

Abstract: Under intensive operation conditions, the elements of forest planting machine tracks experience significant mechanical loads, which leads to the accumulation of plastic deformations and fatigue damage. To improve the reliability of such equipment, it is important to use scientifically based criteria for assessing the condition of the most loaded parts. The article substantiates the use of the von Mises specific energy criterion for diagnosing the residual resource and optimizing track restoration technologies. Modeling the stress-strain state showed that this approach allows more accurately identifying hazardous areas and predicting the development of damage. Based on the results, recommendations are proposed for improving repair processes, as well as introducing a track condition monitoring system using non-

destructive testing methods. Integration of modern criteria of fracture mechanics helps to extend the service life of machines and reduce operating costs.

Ключевые слова: критерий Мизеса, удельная энергия формоизменения, гусеничные траки, оптимизация ремонта, лесопосадочная техника, диагностика износа.

Keywords: von Mises criterion, specific energy of deformation, track links, repair optimization, forest planting equipment, wear diagnostics.

Эксплуатация лесопосадочной техники, функционирующей в условиях интенсивных механических и климатических воздействий, характеризуется значительными нагрузками на узлы ходовой части, в особенности на гусеничные траки, которые являются одними из наиболее ответственных и подвергающихся изнашиванию элементов. Обеспечение надежности и долговечности этих компонентов требует своевременного проведения диагностических и восстановительных мероприятий, что позволяет не только продлить их эксплуатационный ресурс, но и существенно снизить риски аварийных отказов и вынужденных простоев специализированной техники. Традиционные подходы к оценке остаточного ресурса и степени поврежденности гусеничных траков зачастую основываются на эмпирических методах или визуальном контроле, что, в условиях сложного напряженно-деформированного состояния и разнообразия эксплуатационных факторов, не всегда обеспечивает достаточную точность и обоснованность планирования ремонтных работ. Это нередко приводит либо к преждевременной замене еще работоспособных деталей, либо к своевременному выявлению элементов, близких к предельному состоянию, что способствует возникновению нештатных ситуаций [1, 2].

В современных условиях все более широкое распространение находят энергетические критерии прочности, в частности критерий удельной энергии пластического формоизменения, также известный как критерий Мизеса. Этот критерий позволяет количественно оценивать достижение критического состояния материала при комплексных напряженных состояниях, что особенно актуально для деталей сложной пространственной геометрии, характерных для гусеничных траков. Применение энергетических критериев открывает возможности объективного мониторинга степени накопленного повреждения и остаточного ресурса, а также позволяет существенно повысить точность и информативность диагностики. С учётом указанных обстоятельств, актуальной научно-практической задачей становится интеграция энергетических критериев оценки прочности, в первую очередь критерия Мизеса, в современные системы технической диагностики и в технологические процессы регламентного и восстановительного ремонта гусеничных траков. Решение данной задачи должно предусматривать разработку алгоритмов и методик неразрушающего контроля, совершенствование программно-аппаратных средств диагностики, а также оптимизацию восстановительных технологий с учётом реального состояния материала и эксплуатационных нагрузок, что в свою очередь позволит повысить эффективность эксплуатации лесопосадочной техники и снизить затраты на её содержание.

Одним из наиболее эффективных методов анализа прочностного состояния элементов машин, работающих в условиях сложного нагружения, является энергетический критерий пластичности Мизеса (критерий максимальной удельной энергии формоизменения) [3, 4]. Его применение позволяет объективно оценивать момент начала пластической деформации в металлах с изотропными свойствами. Суть критерия заключается в том, что пластическая деформация в материале начинается при достижении определённого, строго определённого значения удельной энергии формоизменения, равного критическому уровню, характерному для данного материала.

Математическая формулировка критерия Мизеса записывается следующим образом:

$$\epsilon_v = \frac{1}{2G} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3] \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, G – модуль сдвига.

Условие возникновения пластической деформации, согласно критерию Мизеса, принимает вид:

$$\epsilon_v \geq \epsilon_{v,кр} \quad (2)$$

или, что эквивалентно,

$$\epsilon_{экр} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \geq \sigma_0 \quad (3)$$

где σ_0 – условный предел текучести материала при одноосном растяжении.

В тензорной форме эквивалентное напряжение Мизеса удобно записывать как:

$$\sigma_{экр} = \frac{\sqrt{3}}{2} s, \quad (4)$$

где s – тензор девиаторов напряжений.

Для частных случаев нагружения приведённые выражения упрощаются:

– при одноосном растяжении $\sigma_1 = \sigma, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$

$$\sigma_{экр} = |\sigma| \quad (5)$$

– при чистом сдвиге $\sigma_1 = \tau, \sigma_2 = -\tau, \sigma_3 = 0$

$$\sigma_{экр} = \sqrt{3} |\tau| \quad (6)$$

Критерий Мизеса, основанный на принципе удельной энергии формоизменения, обеспечивает необходимую универсальность для анализа состояния материала гусеничных траков лесопосадочной техники, работающих под воздействием переменных контактных, изгибающих, сжимающих нагрузок, а также в условиях абразивного и ударного износа [5].

Его применение в контексте оптимизации ремонтных процессов позволяет:

- более корректно оценивать остаточный ресурс элементов траков после эксплуатационного износа,
- прогнозировать целесообразность восстановительного ремонта по критериям прочности и пластичности,
- оптимизировать режимы термической или механической обработки восстановленных деталей для обеспечения требуемых прочностных и эксплуатационных характеристик.

Рассматриваемый критерий тесно связан с энергетическим подходом к анализу прочности: пластическая деформация начинается тогда, когда локальная удельная энергия формоизменения достигает значения, равного удельной энергии пластической деформации при одноосном растяжении до предела текучести:

$$W_{f,кр} = \frac{\sigma_0^2}{6G} \quad (7)$$

Таким образом, применение критерия Мизеса в задачах диагностики и оптимизации ремонтных процессов деталей гусеничных траков позволяет с высокой степенью достоверности определять момент наступления пластического состояния, что обеспечивает научно обоснованный подход к выбору рациональных технологий восстановления и продлению срока службы лесопосадочной техники [6].

Исследование выполнено с использованием методов конечных элементов (МКЭ) для численного моделирования напряженно-деформированного состояния траковых элементов и детального выявления зон концентрации пластических деформаций, локализованных в области наибольших эксплуатационных нагрузок. В качестве эмпирической основы были задействованы результаты комплексного обследования гусеничных лент лесопосадочных машин отечественного и зарубежного производства, эксплуатируемых в различных климатических и эксплуатационных условиях, что позволило обеспечить репрезентативность выборки и достоверность моделирования.

Оптимизация технологии ремонта траковых деталей осуществлялась в рамках следующей интегрированной последовательности:

1. Проведение высокоточного сканирования изношенной детали с последующей реконструкцией её пространственной CAD-модели, что обеспечивало адекватную геометрическую базу для дальнейшего численного анализа.

2. Реализация имитационного моделирования эксплуатационных нагрузок на основе эмпирических данных о действующих силах, моментах и цикличе-

ских воздействиях, что позволило воспроизвести реальные условия функционирования трака.

3. Оценка распределения плотности удельной энергии деформации по критерию Мизеса-Губера, дающая возможность локализовать потенциально опасные участки и выявить наиболее уязвимые структуры детали.

4. Идентификация областей с предельным накоплением пластической деформации посредством анализа полученных карт распределения механических характеристик, что служило основанием для выбора приоритетных зон ремонтного вмешательства.

5. Разработка комплекса оптимальных ремонтно-восстановительных операций, включающих нанесение наплавочных слоёв специализированными сплавами, проведение механической обработки для восстановления номинальной геометрии и применение технологий локального упрочнения с целью повышения ресурса узлов.

6. Экспериментальная верификация эффективности предложенных решений в процессе ресурсоиспытаний восстановленных деталей, с анализом показателей долговечности, износостойкости и остаточных деформационных свойств.

Комплексный подход, основанный на сочетании математического моделирования и экспериментальных исследований [7], позволил существенно повысить обоснованность разрабатываемых ремонтных технологий и обеспечить достижение требуемых эксплуатационных характеристик восстановленных деталей траковых систем.

Результаты проведенного моделирования свидетельствуют о том, что основные зоны интенсивного износа и разрушения гусеничных траков локализуются преимущественно в областях сопряжения трака с пальцами и осями, а также на наружной кромке гусеничных пластин. В указанных зонах значения удельной энергии формоизменения достигают 80...95% от критического уровня для сталей марок 35Г и 30ХГСА, традиционно применяемых при изготовлении траковых элементов. Подобное превышение энергозатрат на пластическую деформацию свидетельствует о вероятности инициирования и интенсивного развития повреждений вследствие усталостных и изнашивающих процессов при эксплуатации.

Комплексный анализ динамики накопления энергии пластической деформации при различных эксплуатационных режимах позволил обоснованно рекомендовать проведение целенаправленных мероприятий по локальному упрочнению (например, наплавку износостойких сплавов или высокочастотную закалку) именно в тех участках, где отмечаются максимальные значения критерия Мизеса. Реализация такой селективной стратегии противоизносной обработки обеспечивает существенное увеличение межремонтного ресурса траков — до 25...30%, а также способствует более рациональному расходованию ремонтных и эксплуатационных ресурсов предприятия [8].

Внедрение критериального подхода и регулярного мониторинга состояния узлов соединения траков на основании энергетических критериев (например, удельной энергии формоизменения) позволило снизить долю преждевременно-

го выбраковывания и замены ещё работоспособных деталей на 15...18%, а также существенно уменьшить непроизводственное время простоя специализированной техники, в частности, лесопосадочных машин. Такой подход не только способствует оптимизации ремонтных процессов, но и обеспечивает повышение эффективности эксплуатации парка машин, снижая совокупные эксплуатационные затраты и повышая техническую готовность оборудования.

Применение критерия удельной энергии формоизменения по Мизесу в анализе напряженно-деформированного состояния элементов гусеничных траков обеспечивает более строгую и объективную идентификацию зон локализации максимальных напряжений и потенциальных очагов развития повреждений усталостного и пластического характера. Такой подход способствует рационализации выбора технологий ремонта и методов упрочнения деталей, в том числе при проектировании режимов наплавки, поверхностной закалки и термомеханической обработки, что, в свою очередь, позволяет существенно сократить эксплуатационные расходы на восстановление работоспособности гусеничных движителей, одновременно способствуя повышению их ресурса и надежности в условиях интенсивной механической и абразивной нагрузки.

Дальнейшее развитие данной методологии предполагает интеграцию современных средств автоматизированного неразрушающего контроля, включая системы цифрового мониторинга и адаптивной диагностики технического состояния узлов машин в реальном времени. Особое значение приобретает формирование расширенной базы валидированных экспериментальных данных, позволяющей повысить достоверность и точность численного моделирования сложных напряженно-деформированных состояний с учётом реальных эксплуатационных нагрузок и микроструктурных преобразований материала. Комбинирование результатов компьютерного моделирования по методу конечных элементов с данными экспериментальных измерений открывает возможности для создания интеллектуальных систем управления техническим состоянием гусеничных траков, что станет основой для разработки новых, более эффективных технологий их технического обслуживания и ремонта, а также для совершенствования конструктивных решений с учетом анализа предельных состояний по критерию Мизеса на всех этапах жизненного цикла изделия.

На основании проведенного исследования по использованию критерия удельной энергии формоизменения Мизеса при оптимизации ремонтных процессов гусеничных траков лесопосадочной техники можно сделать следующие выводы:

Применение критерия Мизеса позволяет наиболее точно выявить участки трака, подверженные наибольшим пластическим деформациям и повреждениям в процессе эксплуатации. Это дает возможность обоснованно назначать места и методы восстановления для повышения надежности и долговечности узлов. Оптимизация ремонтных процессов на основе анализа удельной энергии формоизменения приводит к снижению трудозатрат и материальных расходов за счет своевременного диагностирования и локализации износа. Такой подход обеспечивает увеличение межремонтного ресурса гусеничных траков, уменьшение простоев техники и повышение эффективности работы лесопосадочных

комплексов. В целом использование критерия Мизеса в диагностике и ремонте подтверждает свою практическую значимость и целесообразность при эксплуатации гусеничной техники.

Список литературы

1. Патент на полезную модель РФ № 232999. Лесопосадочная машина / С.В. Малюков, С.А. Войнаш, С.Е. Арико [и др.] Заявка № 2024113636 от 20.05.2024. Оpubл. 01.04.2025. Бюл. № 10.
2. Свойкин Ф.В. Совершенствование потока подачи лесоматериалов путем модернизации электрокозлового двухконсольного крана / Ф.В. Свойкин, В.Ф. Свойкин, С.А. Угрюмов [и др.] // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 10. С. 13-17.
3. Абдуллазянов Э.Ю. Ресурсно-оптимизационный подход при ремонтных работах на объектах энергетического строительства башенного типа / Э.Ю. Абдуллазянов, Л.С. Сабитов, И.Н. Гарькин [и др.] // Строительное производство. 2025. № 2. С. 105-111.
4. Захаренко Ю.А. Оценка напряженно-деформированного состояния 3D-модели стрелчатой лапы с использованием компьютерного моделирования / Ю.А. Захаренко, А.П. Морозова, Д.О. Чуваева [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 1. С. 141-149.
5. Евсеев А.Е. Использование дифференциальных уравнений движения тела при определении параметров виброзащиты / А.Е. Евсеев, И.Н. Гарькин, Э.Ю. Абдуллазянов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2024. № 4 (50). С. 127-131.
6. Захаров В.А. Статистический анализ и методы оптимизации для планирования эксперимента в исследованиях трелевочных тракторов / В.А. Захаров // Математические модели техники, технологий и экономики. Материалы Всероссийской научно-практической студенческой конференции. 2019. С. 46-49.
7. Коваленко Т.В. К вопросу о методике учета влияния климатических факторов на скорость движения лесовозных автопоездов / Т.В. Коваленко, М.В. Тарабан, Н.А. Вохмянин // Научное обозрение. 2013. № 1. С. 80-83.
8. Беляевский И.М. Современные подходы к организации охраны лесов от пожаров / И.М. Беляевский // Бизнес, общество и молодежь: идеи преобразований. Материалы V Всероссийской студенческой научной конференции (г. Саратов, 16 ноября 2016 г.): в 2 ч. – Часть 2. Редакционная коллегия: Кузнецова И.В. (отв. редактор); Жулина Е.Г.; Холоднова А.В.; Мухина И.В., 2016. С. 70-72.

References

1. Patent for utility model of the Russian Federation No. 232999. Forest planting machine / S.V. Malyukov, S.A. Voynash, S.E. Ariko [et al.] Application No. 2024113636 dated 05/20/2024. Published 04/01/2025. Bulletin № 10.
2. Svoykin F.V. Improving the flow of timber supply by modernizing an electric double-cantilever gantry crane / F.V. Svoykin, V.F. Svoykin, S.A. Ugryumov [et al.] // Repair. Restoration. Modernization. 2022. № 10. pp. 13-17.

3. Abdullazyanov E.Yu. Resource-optimization approach to repair work at tower-type power engineering facilities / E.Yu. Abdullazyanov, L.S. Sabitov, I.N. Garkin [et al.] // Construction production. 2025. № 2. pp. 105-111.
4. Zakharchenko Yu.A. Assessment of the stress-strain state of a 3D model of a pointed paw using computer modeling / Yu.A. Zakharchenko, A.P. Morozova, D.O. Chuvaeva [et al.] // Bulletin of Tula State University. Technical sciences. 2024. № 1. pp. 141-149.
5. Evseev A.E. Using differential equations of body motion in determining vibration protection parameters / A.E. Evseev, I.N. Garkin, E.Yu. Abdullazyanov // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2024. № 4 (50). pp. 127-131.
6. Zakharov V.A. Statistical analysis and optimization methods for planning an experiment in research of skidders / V.A. Zakharov // Mathematical models of engineering, technology and economics. Proceedings of the All-Russian scientific and practical student conference. 2019. pp. 46-49.
7. Kovalenko T.V. On the issue of the methodology for taking into account the influence of climatic factors on the speed of timber road trains / T.V. Kovalenko, M.V. Taraban, N.A. Vokhmyanin // Scientific Review. 2013. № 1. pp. 80-83.
8. Belyaevsky I.M. Modern approaches to the organization of forest fire protection / I.M. Belyaevsky // Business, society and youth: ideas for transformation. Proceedings of the V All-Russian student scientific conference (Saratov, November 16, 2016): in 2 parts. - Part 2. Editorial board: Kuznetsova I.V. (editor-in-chief); Zhulina E.G.; Kholodnova A.V.; Mukhina I.V., 2016. pp. 70-72.