

УДК 621.983.3.044.002

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*В. А. ОГОРОДНИКОВ, Н. С. ГРЕЧАНЮК, А. В. ГУБАНОВ*

*Винницкий национальный технический университет*

Исследован износ седельно-сцепного устройства автопоезда с целью определения его остаточного ресурса. Получен энергетический критерий его износа для установления параметров, влияющих на длительность эксплуатации.

**Ключевые слова:** ударное нагружение, экспериментально-расчетный метод, метод твердости.

Автомобильный транспорт играет важную роль в экономике страны. Однако с увеличением численности транспортных средств на дорогах растет и количество дорожно-транспортных происшествий. Чтобы их уменьшить и снизить степень тяжести, необходимо разработать безопасные конструкции. Для анализа таких происшествий, а следовательно, безопасности конструкций транспортных средств используют как скоростные, так и энергетические критерии [1–3].

К основным причинам аварий автопоездов можно отнести их опрокидывание, занос, а также расцепление полуприцепа [4]. Одним из важнейших элементов их конструкции, от которого зависит безопасная эксплуатация, является седельно-сцепное устройство, включающее пару шкворень–захват. В процессе эксплуатации этот элемент воспринимает знакопеременные динамические нагрузки, что вызывает интенсивный износ контактных цилиндрических трущихся поверхностей. Производители элементов седельно-сцепного устройства предусматривают предельные параметры износа, по достижению которых их следует заменить. Но эти параметры практически не установлены и определяются субъективно, зачастую априори.

**Методы исследования.** Для изучения напряженно-деформированного состояния в пластической области эффективен метод твердости [5], цель которого – получить экспериментальные данные о твердости изношенного материала. В процессе эксплуатации элементов конструкций в деформируемой зоне материал упрочняется, поэтому удастся восстановить его энергетические характеристики, а также энергию, затраченную на деформацию. Экспериментально обоснованы [6] возможности определения интенсивности напряжений  $\sigma_i$  по распределению твердости деформированного материала. В данной работе этот метод применен для изучения различных технологических задач [7–9].

Очень важно при экспериментальном обосновании метода выяснить, существует ли единая для различных напряженных состояний и историй деформирования кривая, связывающая твердость с интенсивностью напряжений. В большинстве случаев, чтобы решить этот вопрос, испытывали тонкостенные трубчатые образцы из различных материалов при совместном действии кручения, растяжения и внутреннего давления. Образцы изучали в условиях монотонного деформирования ( $\sigma_1/\sigma_2 = \text{const}$ ,  $-1 \leq \sigma_2/\sigma_1 \leq 0$ ). Выявили, что при различных напряженных состояниях и истории деформирования эту связь описывает единая кри-

вая  $HV = f(\sigma_i)$ . Более сложно установить, как влияет история деформирования в условиях немоного нагружения на связь между твердостью и интенсивностью деформаций. Наиболее достоверные результаты получены при испытании тонкостенных трубчатых образцов из стали, меди и латуни на кручение, а также на кручение с последующим раскручиванием [6].

Результаты этих экспериментов подтвердили возможность установить интенсивность напряжений при немоногом нагружении металла методом твердости. Однако определение интенсивности деформаций в случае проявления эффекта Баушингера [10] связано с погрешностью, зависящей от деформации Баушингера. Более точно интенсивность напряжений можно рассчитать по твердости; при этом приходится ограничиваться областью, в которой интенсивность деформаций на последней ступени нагружения превышает деформацию Баушингера. Это не усложняет эксперимент. Как и при исследовании монотонных процессов, здесь необходимо разграничить упругую и пластическую области. В качестве критерия для этого используют условие возрастания твердости при деформировании. Как правило, твердость измеряют после разгрузки, поэтому упругая деформация на нее не влияет. Когда разгрузка сопровождается пластической деформацией (например, раскручивание сплошного стержня, предварительно подверженного пластическому кручению), твердость будет изменяться, если остаточная деформация превысит деформацию Баушингера (~2%). Следовательно, определить интенсивность напряжений по твердости при немоногом деформировании возможно лишь в случае, когда материал находится в пластическом состоянии. При немоногом нагружении к этому условию добавляется еще одно ограничение: пластическая деформация на последней ступени должна сопровождаться изменением твердости.

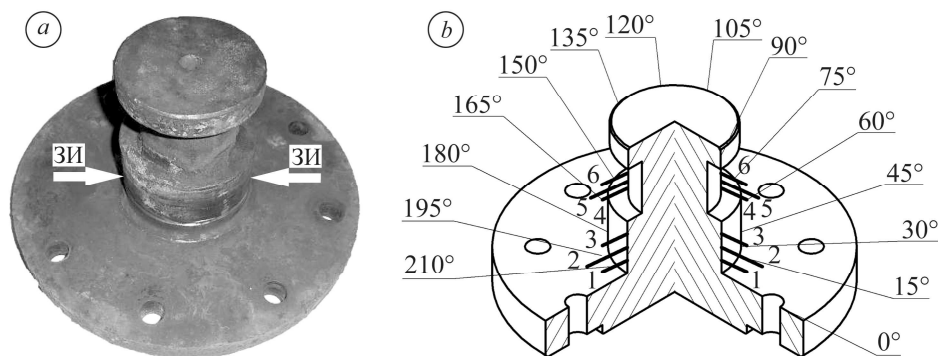
Если в некоторой области тела материал разгружается, то интенсивность напряжений, определенная по твердости, окажется завышенной. Твердость “следит” только за монотонным возрастанием значений  $\sigma_i$ , превышающих предел текучести материала. По показаниям ведомой стрелки силоизмерительных устройств возможно зафиксировать отсутствие нагрузки. Кроме того, оценивая твердость деформированного металла, существует возможность установить напряжения, действующие на него до разгрузки. Таким образом, учитывая известные результаты [5, 6], можно сделать вывод о существовании связи твердости с интенсивностью напряжений, а на основе гипотезы о единой кривой течения  $\sigma_i = f(\epsilon_i)$  – с интенсивностью деформаций.

**Результаты и их обсуждение.** Энергетические критерии использовали для оценки износа шкворня седельно-цепного устройства полуприцепа седельного автопоезда (рис. 1). Основываясь на результатах изменения твердости вследствие механического износа, применили энергию деформации  $W_{\text{def}}$ , при которой ожидается разрушение цепной системы автопоезда. Отметим, что на поверхностях зафиксированы зоны износа (ЗИ) (рис. 1а).

Объем поврежденного при эксплуатации металла, удельную потенциальную энергию, затраченную на износ деформируемых в контакте цилиндрических поверхностей, определяли методом упругопластических деформаций – методом твердости [6]. На поверхностях в сечениях 1–1, 2–2, 3–3, 4–4, 5–5, 6–6 (рис. 1б) измеряли твердость по Либу в точках с интервалом смещения  $15^\circ$  (переносным твердомером ТЭМП-3).

Для этого построили карту исследуемого материала (сталь SAE 4140, аналог стали 40ХФА) по известному алгоритму [9]. Предел текучести материала по твердости [5] определяли из соотношения  $\sigma_{0,2} = 176 + 0,33 \cdot H_0$ , где  $H_0 = 462$  – исходная среднестатистическая твердость стали 40ХФА, найденная экспериментально. Карта материалов [9] содержит важнейшую универсальную механическую

характеристику – кривую течения материала в координатах интенсивность напряжений  $\sigma_i$  – интенсивность деформаций  $\epsilon_i$ , которую аппроксимировали выражением  $\sigma_i = A \cdot \epsilon_i^n$ , где для изотропных материалов коэффициенты аппроксимации имеют физический смысл. Здесь коэффициент  $A$  – интенсивность напряжений при интенсивности деформации, равной единице;  $n$  – показатель степени интенсивности деформаций при максимальной нагрузке на условной диаграмме растяжения.



Шкворень SAF HOLLAND 662101109.

King-pin SAF HOLLAND 662101109.

Коэффициент  $A$  определяли из соотношения [5]

$$A = 1000 \cdot \exp(-0,0008 \cdot \sigma_{0,2}), \quad (1)$$

а коэффициент

$$n = 0,35 \cdot \exp(-0,0008 \cdot A). \quad (2)$$

Коэффициенты аппроксимации кривой течения, полученные по твердости, таковы:  $A = 769$  МПа,  $n = 0,19$ . Для кривой, построенной по справочным данным,  $A = 729$  МПа,  $n = 0,195$ . По этим данным можно рассчитать удельную потенциальную энергию, затрачиваемую на износ поверхностей шкворня SAF HOLLAND 662101109.

Упругая потенциальная энергия

$$W_0 = \frac{\sigma_{0,2}^2}{2E}, \quad (3)$$

где  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа – модуль упругости первого рода.

Удельная потенциальная энергия в области пластических деформаций

$$W_{sp} = \int_0^{\epsilon} \sigma_i \cdot d\epsilon_i. \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) интенсивность напряжений  $\sigma_i = A \cdot \epsilon_i^n$ , получим:

$$W_{sp} = A \int_0^{\epsilon} \epsilon_i^n d\epsilon_i = A \frac{\epsilon_i^{n+1}}{n+1}. \quad (5)$$

Верхний предел интеграла найдем из экспериментальной кривой  $k_n = f(\epsilon_i)$ , полученной для стали 40ХФА.

Коэффициент

$$k_n = H_{def} / H_0, \quad (6)$$

где  $H_{def}$  – твердость упрочненного металла по Либу, измеренная после эксплуатации на поверхностях шкворня (рис. 1b).

Полная потенциальная энергия

$$W_{\text{def}} = W_{\text{sp}} \cdot V, \quad (7)$$

где  $V$  – объем изнашиваемой поверхности, охваченной пластической деформацией:

$$V = 2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot b / 2. \quad (8)$$

Здесь  $R_0$  – радиус поверхности;  $b$  – глубина проникновения деформации, которую для цилиндрических поверхностей определяли по известным соотношениям [11]:

$$b = 2,15 \sqrt{q \left( \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) / \left( \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} \right)}, \quad (9)$$

где  $q$  – давление на поверхности в процессе эксплуатации;  $E_1, E_2$  – модули упругости материала;  $R_0, R_1$  – радиусы цилиндров соединения.

Давление определяли из соотношения

$$q = F / h, \quad (10)$$

где  $F$  – сила, действующая на соединение;  $h = 35$  мм – длина участка, воспринимающего нагрузку.

Следуя работе [12],

$$F = g \frac{0,6TR}{T + R - U}, \quad (11)$$

где  $T, R$  – технически допустимая максимальная масса тягача и полуприцепа;  $U$  – вертикальная нагрузка, передаваемая на седельно-сцепное устройство полуприцепа, имеющим технически допустимую максимальную массу.

Для исследуемого автопоезда (седельного тягача DAF XF 440 и полуприцепа Schmitz S.KO 24) сила  $F = 70,31$  кН, а давление  $q = 200,86$  Н/м. Параметр  $b$ , рассчитанный по формуле (9), составлял  $1,1 \cdot 10^{-3}$  м. Тогда объем, охваченный деформацией и рассчитанный по формуле (8), равнялся  $8,64 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>. Окончательно получили энергию деформации  $W_{\text{def}}$  по формуле (7), а результаты свели в таблицу.

**Энергия деформации  $W_{\text{def}}$**

Показатель	$W_{\text{def}}$	$W_{\text{def}}^e$
	кДж	
Значение в зоне износа	42,59	51,81
Справочные данные	39,32	75,12

Располагая значениями  $k_n, W_0$ , кривой течения  $\sigma_i = f(\epsilon_i)$ , тарифовочным графиком  $HV-\sigma_i-\epsilon_i$ , для стали 40ХФА получили зависимости  $k_n-\epsilon_i$  и  $k_n-W_{\text{sp}}/W_0$ . Тарифовочный график  $HV-\sigma_i-\epsilon_i$  строили после осаживания цилиндрических образцов, вырезанных из шкворня седельно-сцепного устройства. Образцы осаживали в условиях

линейного напряженного состояния до различных степеней деформации. Каждой степени соответствовала твердость по Либу, измеряемая в 5–6 точках меридиального сечения образца. Так получили тарифовочную кривую  $HV-\sigma_i-\epsilon_i$ . Выявили [6], что она не зависит от вида напряженного состояния.

В дальнейшем зависимости  $k_n = f(W_{\text{sp}}/W_0)$  и  $k_n = f(\epsilon_i)$  аппроксимировали выражениями

$$W_{\text{sp}} = W_0 \exp \left( \ln \frac{k_n}{D} / C \right). \quad (12)$$

Для стали 40ХФА коэффициенты аппроксимации  $D = 0,357$ ;  $C = 0,235$  и

$$\epsilon_i = \exp \left( \ln \frac{k_n}{B} / F \right), \quad (13)$$

где  $B = 1,9$ ;  $F = 0,17$ .

Значение  $W_{sp}$  можно рассчитать либо по формуле (12), либо интегрированием функции кривой течения (5), зная верхний предел интеграла – интенсивность деформации, рассчитанной по формуле (13). Энергию  $W_{def}$ , затраченную на износ шкворня SAF HOLLAND 662101109, определили, умножив полученное значение  $W_{sp}$  на объем, охваченный пластической деформацией. Таким образом, критерием износа шкворня седельно-сцепного устройства автопоезда является энергия деформации, при которой ожидается разрушение его сцепной системы.

## ВЫВОДЫ

Предложен энергетический критерий оценки износа элементов конструкции транспортных средств, позволяющий прогнозировать остаточный ресурс прочности. В его основе – феноменологический подход, базирующийся на экспресс-методе измерения твердости изнашиваемых частей.

*РЕЗЮМЕ.* Досліджено знос сидельно-зчпного пристрою автопоїзда для визначення його залишкового ресурсу. Отримано енергетичний критерій зносу, за яким встановлено параметри, що впливають на тривалість експлуатації.

*SUMMARY.* The fifth's wheel coupling wear of the articulated road-train was investigated to determine its residual life. The energy criterion of the fifth's wheel coupling device was obtained aiming in determination of parameters that affect the duration of its operation.

1. *Proposed vehicle impact speed: severe injury probability relationships for selected crash types / C. Jurewicz, A. Sobhani, J. Woolley, J. Dutschke, and B. Corben // 1<sup>st</sup> Australasian Road Safety Conf. (Queensland, October 14–16, 2015). – P. 1–11.*
2. *Shelby S. G. Delta-V as a measure of traffic conflict severity // 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Road Safety and Simulati (September, 2011). – Washington, DC: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2011. – P. 14–16.*
3. *Várkonyi-Kóczy A. R., Rövid A., and Várlaki P. Intelligent methods for car deformation modeling and crash speed estimation // The 1<sup>st</sup> Romanian–Hungarian Joint Symp. Appl. Computational Intelligence (Timisoara, Romania, 2004).*
4. *Поляков А., Гречанюк М. Критерії стійкості вантажних автомобілів з напівпричепами // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2010. – Вип. 7 (149). – С. 24–28.*
5. *Огородников В. А., Киселев В. Б., Сивак И. О. Энергия. Деформация. Разрушение (Задачи автотехнической экспертизы). – Винница: Универсум, 2005. – 196 с.*
6. *Continuous failure prediction model for nonlinear load paths in successive stamping and crash processes / H. Dell, H. Gese, L. Kessler, H. Werner, and H. Hooputra // SAE-paper 2001-01-1131, New Sheet Steel Products and Sheet Metal Stamping (SP-1614). SAE 2001 World Congress (Michigan, March 5–8, 2001). – P. 113–122.*
7. *Огородников В. А. Спосіб визначення швидкості транспортних засобів у момент зіткнення: Деклараційний патент; 14.04.2003. – 8 с.*
8. *Огородников В. А., Побережний М. И., Киселев В. Б. Оценка точности определения энергии деформации и разрушения по распределению твердости в условиях чистого изгиба // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ: Вид-во Донбаськ. держ. машинобудівельної академії, 2005. – С. 24–32.*
9. *Огородников В. А., Деревенько И. А., Побережний М. А. Карты материалов в процессах обработки материалов давлением // Вісник Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”. Сер. машинобудування. – К.: НТУУ КПІ, 2011. – С. 88–91.*
10. *Тальцов Г. А. Исследование эффекта Баушингера // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1964. – № 6. – С. 87–91.*
11. *Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с.*
12. *ДСТУ UN/ECE R 55-01:2004. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження механічних зчпних пристроїв до поїздів транспортних засобів. – К.: Держстандарт України, 2004. – 64 с.*

Получено 20.04.2017