

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ИЗНОСА СЕДЕЛЬНО-СЦЕПНОГО УСТРОЙСТВА¹Винницкий национальный технический университет

Выполнено исследование механизма износа седельно-сцепного устройства с целью установления параметров влияющих на длительность эксплуатации, при которой возрастает вероятность безотказной работы.

ВВЕДЕНИЕ

Грузовые автотранспортные средства играют важную роль в развитии экономики страны, что предопределяет его надежную и безопасную эксплуатацию. Несмотря на высокий уровень достижений в современном автомобилестроении, неизбежный рост количества аварий, связанных в том числе с надежностью узловых элементов конструкции седельно-сцепных устройств автопоездов в составе тягача и полуприцепа (далее под автопоездом будем понимать седельный тягач в соединении с трехосным полуприцепом), вызывает необходимость создания научно обоснованных методов расчёта их элементов на прочность, надежность, износостойкость.

К основным причинам дорожно-транспортных происшествий автопоездов, можно отнести их опрокидывание, занос а также расцепление полуприцепа [1]. Одним из важнейших элементов конструкции автопоезда, от которых зависит его безопасная эксплуатация, является седельно-сцепное устройство, включающее пару шкворень-захват.

В процессе его эксплуатации элемент конструкции воспринимает знакопеременные динамические нагрузки, что вызывает интенсивный износ контактных цилиндрических трущихся поверхностей. Производители элементов седельно-сцепного устройства предусматривают предельные параметры величины износа, по достижению которых элементы конструкции должны быть заменены. Вопросы установления этих предельных параметров практически не установлены и определяются субъективно, зачастую априори.

Целью работы является разработка критерия для оценки износа седельно-сцепных устройств, позволяющего феноменологическим путем оценить возможность эксплуатации седельно-сцепных устройств или его замены.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования был принят шкворень SAF HOLLAND 662101109, установленный на автопоезде в составе седельного тягача DAF XF 440 и полуприцепа Schmitz S.KO 24 (фотография бывшего в эксплуатации шкворня приведена на рис. 1, а его геометрические параметры на рис. 2).

С целью определения объема повреждённого в процессе эксплуатации металла, удельной потенциальной энергии, затраченной на износ деформируемых в контакте цилиндрических поверхностей, применен метод исследования упруго-пластических деформаций – метод твердости [2]. В работе [3] дано обоснование метода для определения напряженно-деформированного состояния, а также удельной потенциальной энергии при пластическом деформировании упрочняющихся материалов, а также при проведении автотехнических экспертиз при оценке энергии деформации, позволяющие определить скорость движения транспортных средств в момент столкновения.

Применение метода измерения твердости деформированного металла для определения потенциальной энергии возможно благодаря переносным твердомерам. Переносные твердомеры – модернизированные микропроцессорные программируемые приборы, в частности, ТЭМП-2, ТЭМП-3. Твердомеры предназначены для неразрушающего контроля твердости металлов в производственных и лабораторных условиях по шкалам Бринеля, Роквелла, Виккерса и Шора. Принцип работы прибора – динамический. Приборы зарегистрированы в государственных реестрах Украины, России и Белоруссии и позволяет оценивать возможности эксплуатации элементов конструкций. Нами твердомер ТЭМП-3 привлекается для исследования количественной оценки энергии, затраченной на пластическое деформирование, а также для проведения экспертиз, при

которых необходимо оценить степень упрочнения, распределение напряжения текучести, определения потенциальной энергии, затраченной при износе поврежденного изделия в связи с его эксплуатацией. Перечисленные методы исследования опубликованы в работе [4].



Рисунок 1 – Шкворень SAF HOLLAND 662101109

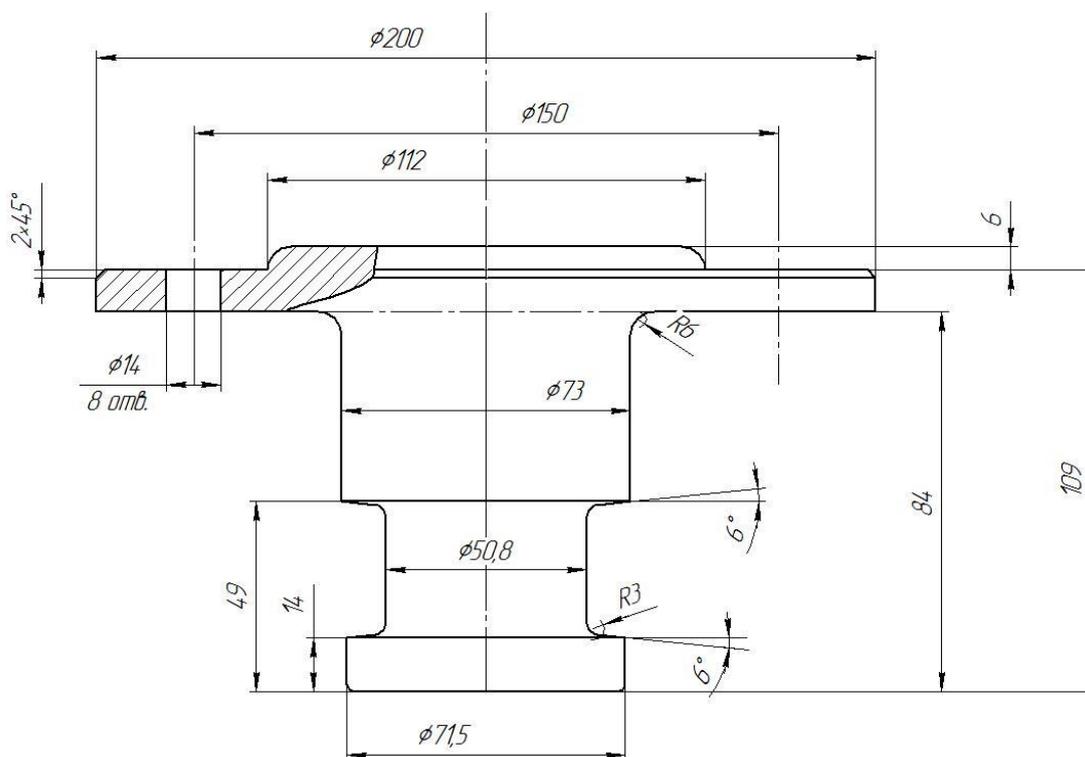


Рисунок 2 – Геометрические характеристики шкворня

Экспериментальные исследования.

На рисунке 3 показаны поверхности в сечениях 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6.

На указанных поверхностях измерялась твердость по Либу, в точках с интервалом смещения 15° (переносным твердомером ТЭМП-3). В таблице 1 представлены результаты измерения твердости по Либу на указанных поверхностях.

Заметим, что нас интересует не абсолютное число твердости, а его относительная величина в виде коэффициента $k_H = H_{def} / H_0$, где H_0 – исходная твердость металла до эксплуатации; H_{def} – твердость металла после эксплуатации. В дальнейшем полученные экспериментальные данные по твердости используем, следуя методике изложенной в работе [4], для определения энергии

деформации, затраченной на повреждение цилиндрических поверхностей сечений 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6.

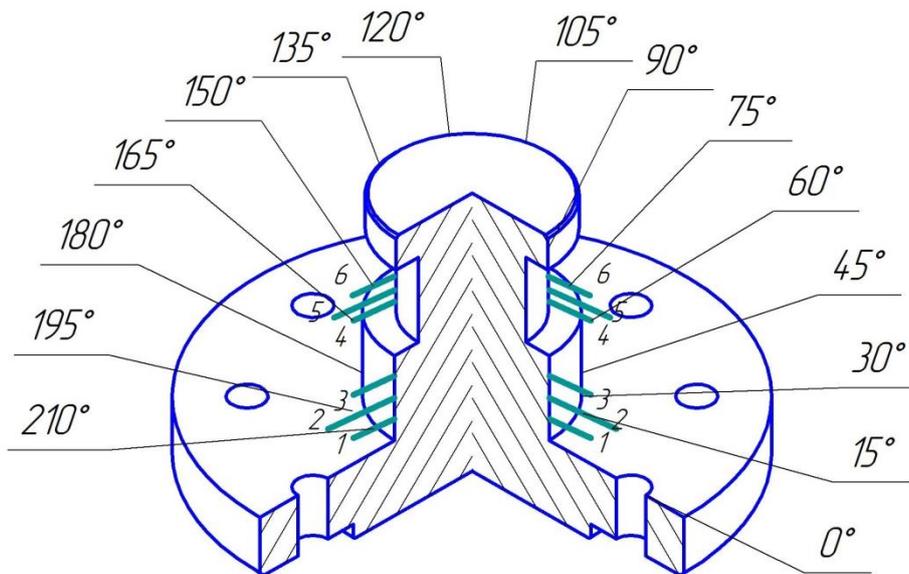


Рисунок 3 – Сечения шкворня

Сформируем карту исследуемого материала (сталь SAE 4140, аналогом которой является сталь 40ХФА) [5] по алгоритму [6].

Определим предел текучести материала по твердости [4]

$$\sigma_{0,2} = 176 + 0,33 \cdot H_0, \quad (1)$$

где $H_0 = 462$ – исходная среднестатистическая твердость стали 40ХФА, определенная экспериментально (см. табл. 1). Следовательно, предел текучести указанной стали в сечениях 4-4, 5-5, 6-6 составил

$$\sigma_{0,2} = 329 \text{ МПа.}$$

Для поверхности диаметром 73 мм, в сечениях 1-1, 2-2, 3-3 $\sigma_{0,2} = 308$ МПа.

Карта материалов [6] включает в себя важнейшую универсальную механическую характеристику – кривую течения материала в координатах – интенсивность напряжений

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \quad (2)$$

интенсивность деформаций

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}, \quad (3)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные деформации.

Таблица 1 – Результаты измерения твердости

Угол, °	Величина твердости на сечениях, Н					
	Ø73 мм			Ø50,8 мм		
	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6
0	632	534	596(max)	633(max)	630	462(min)
15	641	540	582	586	600	519
30	571	539	571	596	520	477
45	543	545	562	577	588	521
60	602	564	519	558	660	610
75	568	587	493	597	500(min)	590
90	571	637	484	591	568	628
105	580	605	479	546	513	639
120	557	639	472	550	558	656
135	540	624	524	597	559	672(max)
150	516	644	541	616	598	648
165	512(min)	635	521	617	538	651
180	538	678(max)	576	621	593	647
195	537	630	536	591	565	631
210	574	598	554	617	587	658
225	557	595	583	549	612	644
240	612	631	547	467(min)	588	649
255	602	620	400(min)	566	675	664
270	610	656	422	573	557	652
285	655	597	553	599	564	659
300	641	524	400(min)	474	610	620
315	625	494 (min)	486	555	665	585
330	666(max)	501	492	560	634	560
345	614	510	585	600	679(max)	592
360	632	534	596(max)	633(max)	630	462(min)

Кривую течения в указанных координатах аппроксимируем выражением

$$\sigma_u = A \cdot \varepsilon_u^n, \quad (4)$$

где для изотропных материалов коэффициенты аппроксимации имеют физический смысл.

Коэффициент A – интенсивность напряжений при интенсивности деформация равной единице; n – показатель степени интенсивности деформаций при максимальной нагрузке на условной диаграмме растяжения.

Коэффициент A определяли с помощью соотношения [4]

$$A = 1000 \cdot \exp(-0,0008 \cdot \sigma_{0,2}), \quad (5)$$

а коэффициент n

$$n = 0,35 \cdot \exp(-0,0008 \cdot A). \quad (6)$$

В таблице 2 представлены усредненные результаты расчета указанных коэффициентов для поверхностей диаметром 50,8 и 73 мм. Достоверность полученных результатов подтверждается близким совпадением результатов определения параметров модели материала.

Таблица 2 – Результаты вычисления коэффициентов аппроксимации

Показатель	$\sigma_{0,2}$, МПа	A , МПа	n
Значение по твердости для $\varnothing 50,3$ мм	329	769	0,190
Значение по твердости для $\varnothing 73$ мм	308	782	0,187
Справочные данные	395	729	0,195

Так предел текучести стали 40ХФА по справочным данным составил $\sigma_{0,2} = 395$ МПа. Представленная на рисунке 4 кривая течения стали 40ХФА построена по твердости (сплошная линия) и по справочным данным практически совпали, что подтверждает достоверность изложенной методики.

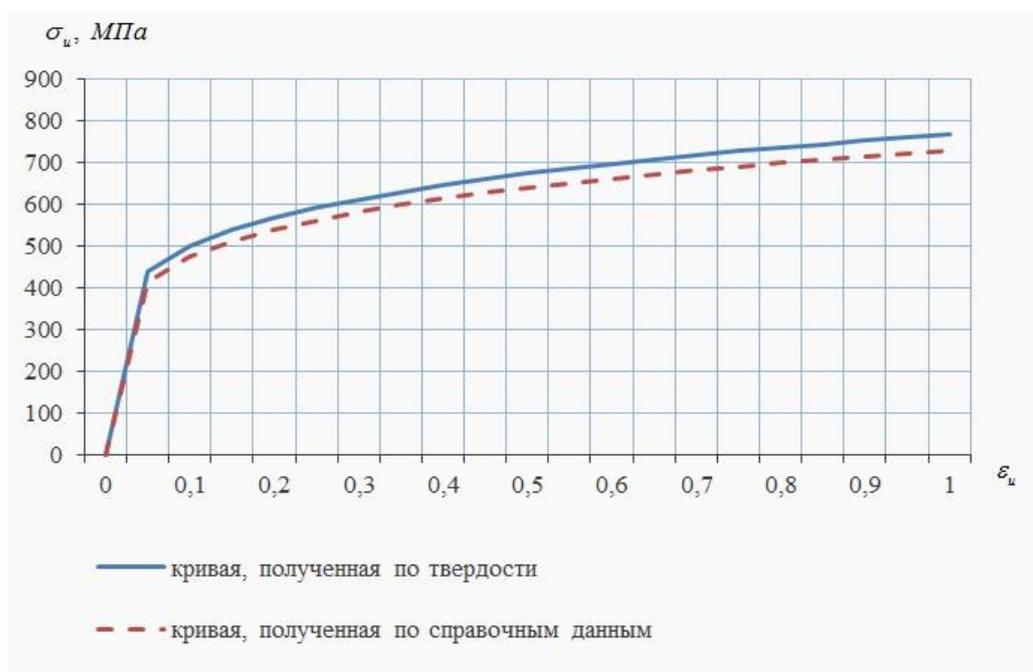


Рисунок 4 – Кривая течения стали 40 ХФА

Коэффициенты аппроксимации кривой течения, полученные по твердости, равны соответственно: $A = 769$ МПа, $n = 0,19$. Для кривой, полученной по справочным данным, $A = 729$ МПа, $n = 0,195$.

Полученные данные позволяют рассчитать удельную потенциальную энергию, затрачиваемую на износ поверхностей шкворня SAF HOLLAND 662101109.

Упругая потенциальная энергия

$$W_0 = \frac{\sigma_{0,2}^2}{2 \cdot E}, \quad (7)$$

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

Величина удельной потенциальной энергии в области пластических деформаций

$$W_{y\partial} = \int_0^{\varepsilon} \sigma_u \cdot d\varepsilon_u. \quad (8)$$

Подставив (4) в (8), получим

$$W_{y\partial} = A \int_0^{\varepsilon} \varepsilon_u^n d\varepsilon_u = A \frac{\varepsilon_u^{n+1}}{n+1}. \quad (9)$$

Величину верхнего предела интеграла найдем из экспериментальной кривой $k_n = f(\varepsilon_u)$, полученной для стали 40 ХФА. Коэффициент

$$k_n = \frac{H_{def}}{H_0}, \quad (10)$$

где H_{def} – твердость упрочненного металла по Либу, измеренная после эксплуатации на поверхностях шкворня, (см. рис. 3).

В таблице 3 представлены полученные результаты расчёта удельной потенциальной энергии. Полная потенциальная энергия получена по формуле

$$W_{def} = W_{y\partial} \cdot V, \quad (11)$$

где V – объем изнашиваемой поверхности, охваченной пластической деформацией.

$$V = 2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot \frac{b}{2}, \quad (12)$$

где R_0 – радиус криволинейной поверхности, охваченной деформацией; b – глубина проникновения деформации.

Глубину проникновения деформации цилиндрических поверхностей определяли по известным соотношениям [7]

$$b = 2,15 \sqrt{q \frac{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1}}}, \quad (13)$$

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

Таблица 3 – Расчет удельной потенциальной энергии

Показатель	k_n	ε_u	W_0	$W_{y\partial}$	$W_{y\partial}^e$
			МПа		
Значение по твердости для Ø50,3 мм	1,4	0,114	0,269	49,32	60,00
Значение по твердости для Ø73 мм	1,4	0,114	0,240	89	53,50
Справочные данные	1,4	0,114	0,390	45,54	87

Давление q определяли из соотношения

$$q = \frac{F}{h}, \quad (14)$$

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

Следуя [8] сила F

$$F = g \frac{0,6TR}{T + R - U}, \quad (15)$$

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

Для автопоезда, выбранного в качестве объекта исследования, (седельного тягача DAF XF 440 и полуприцепа Schmitz S.KO 24) на основе технических характеристик его составляющих определена сила $F = 70,31$ кН. Тогда давление $q = 200,86$ Н/м.

Для выбранного в качестве объекта исследования седельно-сцепного устройства, установленного на автопоезде в составе седельного тягача DAF XF 440 и полуприцепа Schmitz S.KO 24 расчёт параметра b по формуле (13) дает результат $b = 1,1 \cdot 10^{-3}$. Тогда объем, охваченный деформацией и рассчитанный по (12), равен $V = 8,64 \cdot 10^{-7}$ м³.

Окончательно получим энергию деформации W_{def} по формуле (11) и результаты сведем в таблицу 4.

Таблица 4 – Энергия деформации W_{def}

Показатель	W_{def} , кДж	W_{def}^e , кДж
Значение по твердости для Ø50,3 мм	42,59	51,81
Значение по твердости для Ø73 мм	76,85	46,20
Справочные данные	39,32	75,12

Располагая значениями k_n , W_0 кривая течения $\sigma_u = f(\varepsilon_u)$, по экспериментально построенному для стали 40ХФА тарировочному графику $H - \sigma_u - \varepsilon_u$, получены зависимости $k_n - \varepsilon_u$

и $k_n - \frac{W_{y0}}{W_0}$. Тарировочный график $H_V - \sigma_u - \varepsilon_u$ строили осадкой цилиндрических образцов,

вырезанных из стали 40ХФА шкворня седельно-сцепного устройства автопоезда. Образцы осаживали в условиях линейного напряженного состояния до различных степеней деформаций. Каждой степени деформации соответствовала твердость по Либу, измеряемая в 5–6 точках меридиального сечения образца. Таким образом, получена тарировочная кривая $H - \sigma_u - \varepsilon_u$. В работе [2] показано, что кривая $H - \sigma_u - \varepsilon_u$, построенная в условиях линейного напряженного состояния, не зависит от вида напряженного состояния.

В дальнейшем зависимости $k_n = f\left(\frac{W_{y0}}{W_0}\right)$ и $k_n = f(\varepsilon_u)$ аппроксимировали выражениями

$$W_{y0} = W_0 \exp\left(\frac{\ln k_n D}{C}\right), \quad (16)$$

где D , C – коэффициенты аппроксимации оказались равными для стали 40ХФА $D = 0,357$; $C = 0,235$;

$$\varepsilon_u = \exp \left(\frac{\ln \frac{k_n}{B}}{F} \right), \quad (17)$$

где $B = 1,9$; $F = 0,17$.

Значение W_{yd} можно рассчитать либо по формуле (16), либо интегрированием функции кривой течения (9), зная верхний предел интеграла – интенсивность деформации, рассчитанной по формуле (17).

Энергию W_{def} , затраченную на износ шкворня SAF HOLLAND 662101109, определили умножив полученное значение W_{yd} на объем, охваченный пластической деформацией. В таблице 4 приведены результаты расчета W_{def} для исследуемого нами шкворня седельно-цепного устройства автопоезда.

Из таблицы 4 следует, что значение W_{def} является критическим.

Таким образом, критерием износа шкворня седельно-цепного устройства автопоезда является величина энергии деформации, при которой ожидается разрушение системы сцепки автопоезда

$$W_{def} \leq [W_{def}]. \quad (18)$$

ВЫВОДЫ

С целью оценки состояния износа трущихся поверхностей седельно-цепного устройства, в частности шкворня, предлагается на стадии эксплуатации седельно-цепного устройства автопоезда измерять твердость по Либу, геометрические параметры системы сцепки и с помощью энергетического критерия оценивать возможность дальнейшей эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляков А. Критерії стійкості вантажних автомобілів з напівпричепами / Андрій Поляков, Микола Гречанюк // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2010. – Вип. 7(149). – С. 24–28.
2. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1971. – 200 с.
3. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнической экспертизы) : монография / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – Винница : Универсум-Винница, 2005. – 204 с.
4. Огородніков В. А. Визначення енергії пластичної деформації елементів конструкцій транспортних засобів і параметрів відкриття подушок безпеки при ДТП / В. А. Огородніков, В. Є. Перлов // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2009. – Вип. 3. – С. 5–9.
5. Failure Analysis of a Hot Forged SAE 4140 Steel Kingpin / J. B. Marcomini, C. A. R. P. Baptista, J. P. Pascon, R. L. Teixeira, P. C. Medina // International Journal of Engineering Research & Science. – 2016. – V. 2, Issue 6. – P. 102–109.
6. Огородников В. А. Карты материалов в процессах обработки материалов давлением / В. А. Огородников, И. А. Деревенько, М. А. Побережный // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія машинобудування. – К.: НТУУ КПІ. – 2011. – С. 88-91.
7. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, – К. : Наукова думка, 1988. – 736 с.
8. Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження механічних зчіпних пристроїв до поїздів транспортних засобів: ДСТУ UN/ECE R 55-01:2004. – [Чинний від 2005-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2004. – 64 с.

REFERENCES

1. Polyakov A. Stability criteria of articulated roadtrains trucks / Andriy Polyakov, Mikola Hrechaniuk // *Visnik Shidnoukrayinskogo natsionalnogo universitetu im.V. Dalya*. – 2010. – Vol. 7(149). –P. 24–28.
2. Del G. D. Determination of the stresses in the plastic zone by hardness distribution / G. D. Del. – M.: Mashinostroenie, 1971. – 200 p.
3. Ogorodnikov V. A. Energy. Deformation. Destruction (problems of the autotechnical expertise): monography / V. A. Ogorodnikov, V. B. Kiselev, I. O. Sivak. – Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, 2005. – 204 p.
4. Ogorodnikov V. A. Determining of the plastic energy of deformation of structural elements and parameters opening of the vehicle airbag in an accident / V. A. Ogorodnikov, V. E. Perlov // *Zbirnik naukovih prats Vinnitskogo natsionalnogo agrarnogo universitetu. Seriya: Tehnichni nauki*. – 2009. Vol. 3. – P. 5-9.
5. Marcomini J. B. Failure Analysis of a Hot Forged SAE 4140 Steel Kingpin / J. B. Marcomini, C. A. R. P. Baptista, J. P. Pascon, R. L. Teixeira, P. C. Medina // *International Journal of Engineering Research & Science*. – 2016, Vol. 2, Issue 6. – P. 102-109.
6. Ogorodnikov V. A. Material's maps in the forming material processes / V. A. Ogorodnikov, I. A. Derevenko, M. A. Poberezhnyiy // *Visnik Natsionalnogo tehničnogo universitetu Ukrayini «Kiiivskiy politehničniy Institut»*. Seriya mashinobuduvannya. – K. : NTUU KPI. – 2011. – P. 88-91.
7. Pisarenko G. S. The reference book on resistance of the materials / G. S. Pisarenko, A. P. Yakovlev, V. V. – Kiev : Nauk. dumka, 1988. – 736 p.
8. Uniform provisions concerning the approval of mechanical coupling components of combinations of vehicles: DSTU UN/ECE R 55-01:2004. – [Chinniy vid 2005-01-01]. – K. : Derzhstandart Ukrayini, 2004. – 64 p.

В. А. Огородніков¹, М. С. Гречанюк¹, А. П. Поляков¹

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КРИТЕРІЙ ЗНОСУ СІДЛОВО-ЗЧІПНОГО ПРИСТРОЮ

¹Вінницький національний технічний університет

Досліджено механізм зносу сідлово-зчіпного пристрою з метою встановлення параметрів, що впливають на тривалість експлуатації, при яких зростає ймовірність безвідмовної роботи.

Оцінено напружено-деформований стан, що виникає при повторно-змінних навантаженнях, а також енергію, що витрачається при зносі бічних циліндричних поверхонь. Як критерій оцінки зносу прийнято потенційну енергію, яка витрачається на знос об'єму металу, охопленого пружно-пластичною деформацією. Зі збільшенням енергії деформації зростає час експлуатації зчіпного пристрою.

Ключові слова: енергетичний критерій зносу, питома потенційна енергія, крива текучості, твердість по Лібу.

Огородніков Віталій Антонович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри опору матеріалів і прикладної механіки, Вінницький національний технічний університет, e-mail: va.ogorodnikov@mail.ru

Гречанюк Микола Сергійович, кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри системного аналізу, комп'ютерного моніторингу та інженерної графіки, Вінницький національний технічний університет, e-mail: mgrechanyk@rambler.ru

Поляков Андрій Павлович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, e-mail: farv@vntu.edu.ua

ENERGY CRITERION OF THE FIFTH WHEEL WEARING

¹Vinnitsa National Technical University

Studied the wear mechanism of the fifth wheel in order to find out the parameters affecting the duration of the exploitation, and this can increase the reliability probability.

Was estimated stress-strain state, which occurs when the repeated stresses, as well as the energy expended for the wear sides of the cylindrical surfaces. As the wear evaluation criterion was accepted potential energy which expended on the wear volume of the metal, covered by elastic-plastic deformation. With the growing of the strain energy, increases exploitation time of the turntable coupling.

Key words: energy criterion of the wearing, specific potential energy, flow curve, Lib-hardness.

Ogorodnikov Vitaliy, Sc. D. (Eng.), Professor, Head of Strength of Materials and Applied Mechanics Department, Vinnitsa National Technical University, e-mail: va.ogorodnikov@mail.ru.

Hrechaniuk Mykola, Ph. D., Senior Lecturer of the Systems Analysis, Computer Monitoring and Engineering Graphics Department, Vinnitsa National Technical University, e-mail: mgrechanyk@rambler.ru

Polyakov Andriy, Sc. D. (Eng.), Professor, Professor of Automobiles and Transportation Management Department, Vinnitsa National Technical University, e-mail: farv@vntu.edu.ua

В. А. Огородников¹, Н. С. Гречанюк¹, А. П. Поляков¹

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ИЗНОСА СЕДЕЛЬНО-СЦЕПНОГО УСТРОЙСТВА

¹Винницкий национальный технический университет

Исследован механизм износа седельно-сцепного устройства с целью установления параметров, влияющих на длительность эксплуатации, при которой возрастает вероятность безотказной работы.

Оценено напряженно-деформированное состояние, возникающее при повторно-переменных нагрузках, а также энергия, затрачиваемая при износе боковых цилиндрических поверхностей. В качестве критерия оценки износа принято потенциальную энергию, затрачиваемую на износ объема металла, охваченного упругой пластической деформацией. С увеличением энергии деформации растет время эксплуатации сцепного устройства.

Ключевые слова: энергетический критерий износа, удельная потенциальная энергия, кривая течения, твердость по Либу.

Огородников Виталий Антонович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов и прикладной механики, Винницкий национальный технический университет, e-mail: va.ogorodnikov@mail.ru

Гречанюк Николай Сергеевич, кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры системного анализа, компьютерного мониторинга и инженерной графики, Винницкий национальный технический университет, e-mail: mgrechanyk@rambler.ru

Поляков Андрей Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобилей и транспортного менеджмента, Винницкий национальный технический университет, e-mail: farv@vntu.edu.ua