

УДК.539.736

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ СКРЫТОЙ ЭНЕРГИИ ОТ УСЛОВИЙ ПРОЦЕССА АБРАЗИВНОГО ТРЕНИЯ

В.Я. Коршунов

Брянский государственный аграрный университет

На основе термодинамического подхода к прочности и разрушению твёрдых тел рассмотрен расчётно-эмпирический метод прогнозирования скорости износа деталей при абразивном трении, который базируется на использовании термодинамического критерия разрушения материалов, а также относительной величины скрытой энергии. Представлена методика проведения экспериментальных исследований зависимости относительной величины скрытой энергии от условий процесса абразивного трения. Проведён анализ полученных результатов и сделаны соответствующие выводы

Ключевые слова: термодинамика, энергия, абразивное трение, скорость износа, экспериментальные исследования

Важнейшей задачей сельскохозяйственного машиностроения в условиях рыночной экономики является производство продукции высокого качества и надёжности при минимальной её себестоимости.

Значительное влияние на долговечность деталей сельскохозяйственных машин оказывает скорость износа при внешнем трении. Повышению износостойкости материалов различными технологическими способами посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований [1-7].

Эксплуатационные свойства различных сельхозмашин в большей степени определяются абразивной износостойкостью конкретных деталей. Поэтому прогнозирование износостойкости материалов при абразивном трении является актуальной научно-производственной проблемой.

Результаты исследований износа материалов при абразивном трении о закреплённые частицы представлены в работах [8-17].

Целью данной работы является экспериментальное исследование относительной величины скрытой энергии при абразивном трении материалов, которая во многом определяет скорость износа деталей сельхозмашин.

Одним из направлений исследований в области абразивного трения и изнашивания материалов является энергетический подход к описанию процессов разрушения при трении. Это направление представляет определенный интерес с точки зрения возможного использования для анализа процессов разрушения фундаментальных представлений, основанных на классических законах термодинамики. Развитие энергетического подхода к оценке процессов разрушения в области трения и изнашивания является одним из возможных путей получения математического описания процессов, позволяющих прогнозировать долговечность (износостойкость) деталей и узлов трения сельхозмашин в зависимости от условий эксплуатации.

Уровень упрочнения материала и сопротивления его пластической деформации определяется запасённой его кристаллической решеткой дефектами, прежде всего дислокациями и вакансиями. Увеличение дислокаций и вакансий в деформируемом объёме приводит к увеличению скрытой энергии деформирования в материале, а следовательно и твердости, а аннигиляция дислокаций и вакансий в процессе деформирования и остывания приводит к уменьшению скрытой энергии и разупрочнению материала. Согласно энергетическому принципу, основанному на первом законе термодинамики – законе сохранения энергии, баланс энергии в процессе пластической деформации твёрдых тел равен:

$$\frac{d\omega}{dt} - \frac{dq}{dt} - \frac{dU}{dt} = 0, \quad (1)$$

где ω – удельная работа деформирования; q – тепловой эффект пластической деформации; U – внутренняя энергия пластической деформации.

Согласно уравнению (1) скорость изменения внутренней энергии будет равна

$$\dot{U} = \dot{\omega} - \dot{q}. \quad (2)$$

При этом следует учитывать начальный уровень внутренней энергии U_o , накопленной материалом до деформирования, которая состоит из скрытой энергии U_{eo} и тепловой составляющей U_{mo} :

$$\dot{U} = U_o + \Delta\dot{U} = U_{eo} + U_{mo} + \Delta\dot{U}_{ei} + \Delta\dot{U}_{mi}. \quad (3)$$

Большая часть работы деформирования ω превращается в тепло \dot{q} и рассеивается в окружающей среде за счет теплообмена, незначительная её часть остаётся в твёрдом теле, повышая тепловую составляющую внутренней энергии U_{mi} . Меньшая часть накапливается в виде скрытой энергии деформации U_{ei} за счет накопления различного рода дефектов и повреждений. Начальный уровень внутренней энергии материала можно изменять термообработкой, упрочняющим деформированием, легированием, а также изменением температуры (плазматроном, лазерным лучом и т.д.).

В термодинамической теории прочности и разрушения твёрдых тел за интегральную меру повреждаемости и критерий разрушения принята плотность внутренней энергии и её критическое (предельное) значение U_* , накапливаемое в деформируемых микрообъёмах и согласно структурно-энергетической теории прочности твёрдых тел, предложенной В.С. Ивановой, равна энтальпии плавления в жидком состоянии H_S . Для стали $U_* = H_S = 10$ Дж/мм³. Условие разрушения записывается в виде:

$$U_o + \Delta U = U_* = H_S = Const. \quad (4)$$

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила получить зависимость для расчёта величины начального уровня плотности скрытой энергии U_{eo} (Дж/мм³) в виде:

$$U_{eo} = 85 \cdot 10^{-5} HV_o, \quad (5)$$

где HV_o – начальная твёрдость материала.

Начальный уровень тепловой составляющей внутренней энергии определяется по формуле

$$U_{mo} = C_V T_i, \quad (6)$$

где C_V – теплоёмкость материала; T_i – начальная температура материала.

На основе термодинамического подхода к проблеме прочности и разрушения твёрдых тел, была предложена зависимость для расчёта скорости абразивного износа материалов \dot{V}_{mp}

$$\dot{V}_{mp} = \frac{\delta_{mp} \dot{W}_{mp}}{U_* - U_{eo} - U_{mo}} = \frac{\delta_{mp} f_{mp} P_{mp} V_{mp}}{U_* - U_{eo} - U_{mo}}, \quad (7)$$

где δ_{mp} – относительная величина скрытой энергии; \dot{W}_{mp} – мощность трения; f_{mp} – коэффициент трения; P_{mp} – нагрузка; V_{mp} – скорость трения.

Значение δ_{mp} определяется соотношением

$$\delta_{mp} = \frac{U_{ei}}{\dot{W}_{mp}} = \frac{\Delta U_{ei} V_{mp}}{\dot{W}_{mp}}. \quad (8)$$

Анализ формулы (7) показывает, что скорость износа при абразивном трении в значительной степени определяется величиной δ_{mp} , которую теоретически определять в настоящее время довольно затруднительно. Поэтому были проведены экспериментальные исследования для установления закономерностей изменения величины δ_{mp} в зависимости от условий абразивного трения: нагрузки и скорости.

Экспериментальные исследования проводились на установке МИ1-М, которая позволяет проводить испытания образцов о закреплённые и незакрепленные абразивные частицы.

Алмазный круг АСО 125/100 100% М1 при трении о закреплённые абразивные частицы крепится на вал, испытываемые образцы (колодка $b = 14$ мм, $h = 12$ мм, $L = 22$ мм) из стали 45, твёрдостью $HV1800$ монтируется в специальной державке откидной головки. Нагрузка на образец осуществляется с помощью нагрузочного устройства. В зону трения с помощью дозирующего устройства из специальной ёмкости подавалось масло индустриальное 20А по ГОСТ 20799-88. При изнашивании незакреплёнными абразивными частицами образцы использовались те же, что описаны выше, контр тело в виде диска из стали 45 твёрдостью $HV7200$ ($D = 50$ мм, $d = 12$ мм, $b = 14$ мм) крепилось на вал вместо алмазного круга. При изнашивании образцов незакреплёнными абразивными частицами использовалась абразивно-масляная взвесь с концентрацией абразива 10%. В качестве абразива использовался кварцевый песок размером частиц $d_{cp} \approx 0,05$ мм. Контр тела и образцы представлены на рис. 1.



Рис. 1. Алмазный круг АСО 125/100 100% М1 (тёмный), диски и колодочные образцы из стали 45 $HV1800$

При изнашивании образцов о закреплённые и незакреплённые абразивные частицы было проведено две серии опытов. В первой, при постоянной скорости процесса трения $V_{mp} = 1,1$ м/с изменялась последовательно нагрузка $P_{mp} = 250; 300; 350; 400; 450$ Н, в пересчёте на удельную нагрузку $P_{y\delta} = 75; 100; 125; 150; 175$ Н/см². Во второй серии при постоянном давлении $P_{mp} = 250$ Н менялась скорость трения $V_{mp} = 1,1; 1,4; 1,7; 2,0; 2,3$ м/с. Мощность процесса трения определялась ваттметром, с учётом холостого хода. Замеры линейного износа образцов за один час проведения эксперимента проводились микрометром с ценой деления 0,01 мм. После чего рассчитывались скорость объёмного износа, скорость накопления скрытой энергии и её относительная величина δ_{mp} (8).

Зависимости относительной величины скрытой энергии δ_{mp} в виде графиков представлены на рис. 2 и 3. На основе полученных экспериментальных данных установлено, что относительная величина скрытой энергии δ_{mp} при изнашивании образцов закреплёнными абразивными частицами изменяется от 1,8 до 3%, а при изнашивании незакреплёнными - от 0,6 до 1,4%, т.е. в несколько раз меньше.

Анализ полученных данных также показал, что с увеличением нанонагрузки относительная величина скрытой энергии δ_{mp} растёт и, наоборот, при увеличении скорости трения значение δ_{mp} начинает плавно уменьшаться независимо от степени закреплённости абразивных частиц.

Полученные эмпирические зависимости относительной величины скрытой энергии δ_{mp} от нагрузки и скорости дают возможность прогнозировать износ деталей сельхозмашин при заданных условиях абразивного трения и на основе полученных данных принимать конструктивно-технологические решения для повышения их долговечности.

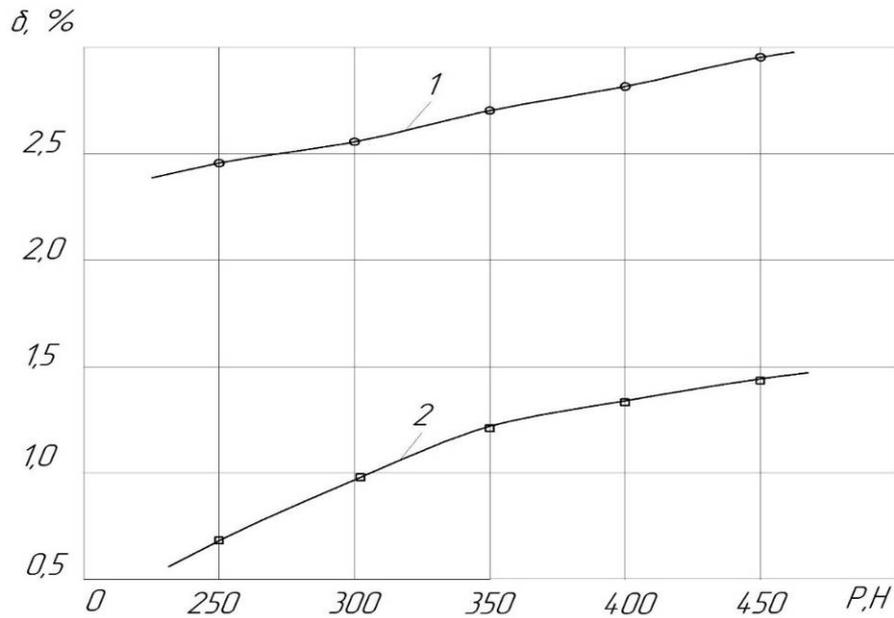


Рис. 2. Зависимость относительной величины скрытой энергии $\delta_{тр}$ от нагрузки $P_{тр}$:
 1 – изнашивание о закреплённые абразивные частицы; 2 – изнашивание о незакреплённые абразивные частицы. Материал – сталь 45, твёрдость $HV1800$

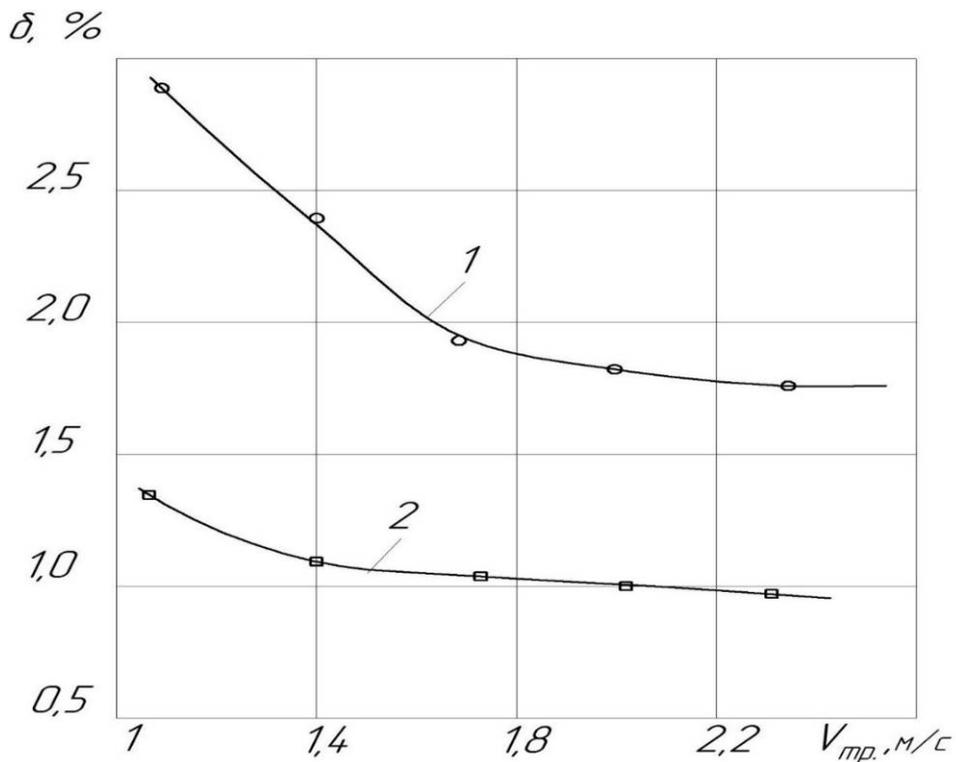


Рис. 3. Зависимость относительной величины скрытой энергии $\delta_{тр}$ от скорости трения $V_{тр}$:
 1 – изнашивание о закреплённые абразивные частицы; 2 – изнашивание о незакреплённые абразивные частицы. Материал – сталь 45, твёрдость $HV1800$

Список литературы

1. Погоньшев, В.А. Повышение износостойкости восстановленных узлов трения сельскохозяйственных машин фрикционным нанесением плёнок пластичных металлов: Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.02.03 / КПИ. – Калинин: 1990. – 16 с.

2. Погоньшев, В.А. Триботехника в сельском хозяйстве / В.А. Погоньшев, Н.А. Романеев, М.В. Панов. – Брянск: 2010. – 320 с.
3. Петягов, П.Д. Исследование триботехнических характеристик металлических покрытий, нанесённых наплавкой, электродуговым и плазменным напылением / П.Д. Петягов, В.А. Погоньшев, Е.П. Самсонович, Г.Д. Анциферов // Трение и износ. – 1989. – Т.10 – №5. – С. 909–913.
4. Погоньшев, В.А. Физика фреттинг-изнашивания / В.А. Погоньшев – Брянск: БГСХА, 1999. – 285 с.
5. Погоньшев, В.А. Повышение износа и фреттингостойкости деталей машин модифицированием поверхностей: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.03 / БГТУ. – Брянск: 2000. – 428 с.
6. Погоньшев, В.А. Технологические способы повышения износостойкости поверхностей трения вследствие улучшения их демпфирующих свойств / В.А. Погоньшев, Н.А. Романеев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – №1 – С. 26-28.
7. Погоньшев, В.А. Повышение износостойкости шеек коленчатого вала путём нанесения плёнок пластичных металлов / В.А. Погоньшев, В.В. Логунов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №6 – С. 47-48.
8. Хачатурьян, С.В. Методика экспериментальных исследований энергетического баланса процесса изнашивания металлов при внешнем трении / С.В. Хачатурьян, В.Я. Коршунов, В.В. Фёдоров // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 1977. – №7 – С. 892-893.
9. Федоров, В.В. Исследование взаимной связи закономерностей износа металлов с энергетическими характеристиками процесса внешнего трения / В.В. Федоров, С.В. Хачатурьян, В.Я. Коршунов // Вестник Всесоюзного научно-исследовательского ин-та ж-д транспорта. – 1977. – №4. – С. 30-34.
10. Коршунов, В.Я. Повышение эксплуатационных свойств машин прогнозированием и технологическим обеспечением физико-механических параметров материалов на основе принципов синергетики / В.Я. Коршунов // Вестник машиностроения. – 2000. – №6, – С. 48-53.
11. Коршунов, В.Я. Расчет допустимого износа инструмента по заданным физико-механическим и геометрическим параметрам поверхностного слоя обрабатываемой детали / В.Я. Коршунов // Изв. вузов Сев.- Кав. регион. Техн. науки. – 2001. – №1. – С. 48-50.
12. Коршунов, В.Я. Повышение износостойкости деталей сельскохозяйственных машин при абразивном трении / В.Я. Коршунов, В.С. Комаров // МГАУ. – 2010. – №2 – С. 137-139.
13. Коршунов, В.Я. Прогнозирование допустимого износа резцов в процессе обработки / В.Я. Коршунов, А.М. Случевский // МГАУ. – 2010. – №2 – С. 135-137.
14. Коршунов, В.Я. Повышение долговечности деталей сельхозмашин на основе разработки научных основ упрочняющих технологий / В.Я. Коршунов, П.Н. Гончаров, Д.А. Новиков // Вестник БГСХА. – 2012. – №2 – С. 35-38.
15. Коршунов, В.Я. Прогнозирование износостойкости и усталостной прочности деталей сельхозмашин на основе кинетического подхода к процессу разрушения металлов / В.Я. Коршунов, П.Н. Гончаров, Д.А. Новиков // Вестник БГСХА. – 2013. – №2 – С. 33-36.
16. Гончаров, П.Н. Методика проведения экспериментальных исследований износа образцов на машине трения МИ-1М / П.Н. Гончаров, В.Я. Коршунов // Вестник БГСХА. – 2014. – №3 – С. 67-69.
17. Коршунов, В.Я. Прогнозирование относительной абразивной износостойкости металлов на основе механико-термодинамического подхода к процессу разрушения твёрдых тел / В.Я. Коршунов, В.С. Комаров // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014. – №3 – С. 45-48.

Сведения об авторе

Коршунов Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологии материалов, надежности, ремонта машин и оборудования ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет», *dok.kor@mail.ru*.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEPENDENCE OF THE RELATIVE MAGNITUDE OF LATENT ENERGY FROM THE PROCESS CONDITIONS OF ABRASIVE FRICTION

V.Ya. Korshunov

Bryansk State Agricultural University

On the basis of the thermodynamic approach to strength and fracture of solids is considered design-empirical method of predicting the wear rate of the DETA-lay under abrasive friction, which is based on using thermodynamic failure criteria of materials, as well as the relative magnitudes of stored energy. Present the methodology of experimental studies based on the relative magnitude of latent energy from the process conditions, the abrasive friction. The analysis of the obtained results and draw appropriate conclusions.

Key words: *thermodynamics, energy, abrasive friction, rate of wear, experimental study*

References

1. Pogonyshv V.A. Improvement of wear resistance of friction units of restored agricultural machinery friction plastic film deposition of metals. Cand. Diss. (Engineering). Kalinin. 1990. 145 p.
2. Pogonyshv V.A., Romaneev N.A., Panov M.V. *Tribology in agriculture*. Bryansk, 2010. 320 p.
3. Petkov P.D., Pogonyshv V.A., Samsonovich E.P., Antsiferov G.D. Investigation of tribological characteristics of metallic coatings deposited by welding, electric arc and plasma-Menno spraying. *Friction and wear*, Vol. 10, No. 5, pp. 909-913.
4. Pogonyshv V.A. *Physics of fretting wear*. Bryansk, Publishing house of the BSAA, 1999. 285 p.
5. Pogonyshv V.A. Improvement of wear and mettingerstrasse DETA-lay machines modification of surfaces. Doct. Diss. (Engineering). Bryansk. 2000. 428 p.
6. Pogonyshv V.A., Romaneev N.A. Technological methods of improving wear resistance of friction surfaces due to the improvement of their properties. *Hardening technology and coatings*, 2006, No. 1, pp. 26-28.
7. Pogonyshv V.A., Logunov V.V. Improvement of the wear resistance of crankshaft journals by drawing of plastic films of metals. *Hardening technology and coatings*, 2013, No. 6, pp. 47-48.
8. Khachatryan S.V., Korshunov V.Ya., Fedorov V.V. An experimental method energy balance of the process of wear of metals under external friction. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 1977, No.7, pp. 892-893.
9. Fedorov V.V., Khachatryan S.V., Korshunov V.Ya. The study of the mutual relations of the laws of wear metals with the energy characteristics of the process of external friction. *Bulletin of All-Union scientific-research Institute of railway transport*, 1977, No. 4, pp. 30-34.
10. Korshunov V.Ya. Improvement of operation properties machines and technological forecasting to ensure physical and mechanical parameters of the materials based on principles of synergy. *Bulletin of engineering*, 2000, No. 6, pp. 48-53.
11. Korshunov V.Ya. Calculation of permissible wear of the tool on the given physical-mechanical and geometrical parameters of the surface layer of the workpiece. *Izv. universities of North-Kav. region. Tekhn. sciences*, 2001, No. 1, pp. 48-50.
12. Korshunov V.Ya., Komarov S.V. Improvement of wear resistance parts for agricultural machines under abrasive friction. *MGAU*, 2010, No. 2, pp. 137-139.
13. Korshunov V.Ya., Sluchevsky A.M. Prediction of the allowable wear of the cutters during the machining process. *MGAU*, 2010, No. 2, pp. 135-137.
14. Korshunov V.Ya., Goncharov P.N., Novikov D.A. Increase of durability of details sal-hotra-Shin through the development of scientific bases of a hardening technologies. *Vestnik of BSAA*, 2012, No. 2, pp. 35-38.

15. Korshunov V.Ya., Goncharov P.N., Novikov D.A. Prediction of wear resistance and fatigue durability of details of machines on the basis of kinetic approach to the process of destruction of metals. *Vestnik of BSAA*, 2013, No. 2, pp. 33-36.

16. Goncharov P.N., Korshunov V.Ya. The methodology of the experimental studies of the wear of the samples on the machine friction MI-1M. *Vestnik of BSAA*, 2014, No.3, pp. 67-69.

17. Korshunov V.Ya., Komarov V.S. Prediction of relative abrasive metals on the mechanical and thermodynamic approach to the process of destruction of solid bodies. *Friction and lubrication in machines and mechanisms*, 2014, No. 3, pp. 45-48.

Author' information

Vladimir Ya. Korshunov – Doctor of Technical Sciences, Professor at Bryansk State Agricultural University, *dok.kor@mail.ru*.