



УДК 631. 313: 631. 43

АНАЛИЗ ПРИЧИН ИЗНАШИВАНИЯ ДИСКОВЫХ РАБОЧИХ ОРГАНОВ И МОДЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ПОЧВЫ ПОД ИХ ДЕЙСТВИЕМ

А.В. Шовкопляс

ANALYSIS OF REASONS OF WEAR OF DISK WORKING BODIES AND MODELS OF CHANGE OF PROPERTIES OF SOIL UNDER THEIR ACTION

A.V. Shovkoplyas

Аннотация. Проанализированы условия работы дисковых рабочих органов и причины снижения их работоспособности. Рассмотрены основные виды изнашивания дисковых рабочих органов – абразивное, усталостное и окислительное, причем преобладающим является абразивное. Механическое воздействие на почву рабочих органов почвообрабатывающих машин приводит к изменению её физико-механических свойств, таких как плотность, пористость и удельный объем, которые в зависимости от цели обработки могут увеличиваться или уменьшаться. Приведены критерии прочности и модели изменения свойств почвы при действии на них деформаторов, в частности дисковых рабочих органов.

Ключевые слова: *дисковый рабочий орган; деформатор; абразивное изнашивание; отказ; критерий прочности; напряженно-деформированное состояние.*

Abstract. Analyzed the working conditions of the disk of the workers and causes decline in their performance. Describes the main types of wear of the working bodies of disk – abrasive, fatigue and oxidation, and the predominant abrasive. Mechanical impact on the soil working bodies of tillage machines leads to changes in its physical-mechanical properties, such as density, porosity and specific volume, which, depending on the aims of treatment can increase or decrease. The criteria of strength and model of changes in soil properties under the action of their deformers, in particular of disk working bodies.

Key words: *disk working body; a deformer; abrasive wear; failure; the criterion of strength; stress- strained state.*

Введение

Почва является основным средством производства в сельском хозяйстве. Работающие в абразивной почвенной среде рабочие органы почвообрабатывающих машин подвергаются интенсивному изнашиванию, изменяют свою форму, геометрию режущих кромок и размеры, из-за этого их часто приходится ремонтировать или заменять.

Многочисленные испытания серийных рабочих органов показывают, что средняя наработка на отказ дисков луцильников и дисковых борон составляет 12-25 га, лап культиваторов – 15-35 га. Это свидетельствует о том, что долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин не достаточна.

Изменения, которые происходят с рабочим органом, приводят к потере им работоспособности, связаны с внешними и внутренними воздействиями. Это: энергия окружающей среды, человеческий фактор; накопление повреждаемости в материалах деталей. Часть процессов, происходящих с рабочим органом и влияющих на его технические характеристики, являются обратимыми, например, упругая деформация. Наиболее характерными необратимыми процессами являются изнашивание, коррозия, усталость, внутренние напряжения, снижающие надёжность и долговечность.

Для определения надёжности машины необходимо оценить скорости протекания процессов, снижающие её работоспособность. Быстропротекающие процессы: вибрации узлов, изменения сил трения в подвижных соединениях, колебания рабочих нагрузок,



влияющих на взаимное положение узлов машины в каждый момент времени.

К процессам средней скорости относятся как обратимые процессы – изменение влажности среды, так и необратимые – износ режущего рабочего органа, который протекает значительно интенсивнее, чем изнашивание остальных деталей и узлов машины. К медленным процессам относятся: загрязнение трущихся поверхностей, изменение внутренних напряжений в деталях, коррозия и др. Все эти процессы воздействуют на машину или ее рабочие органы и приводят к возникновению отказа.

Ряд процессов, протекающих в машине, может вызвать отказы, которые связаны не с выходом из строя отдельных деталей и соединений, а с ухудшением характеристик машины и выходом их за допустимые пределы. Например, для сельскохозяйственных машин наряду с качеством работы основным показателем является их производительность, энергоемкость.

Геометрическая форма дискового рабочего органа также оказывает большое влияние на тяговое сопротивление бороны. Работы по совершенствованию конструкции дисковых рабочих органов сводятся к разработке: дисковых рабочих органов со сменными частями, зубчатых, самозатачивающихся и тонкослойных высокопрочных дисковых рабочих органов.

Анализ причин изнашивания дисковых рабочих органов

Исходя из современных представлений о видах изнашивания [1] рабочие органы почвообрабатывающих машин подвергаются следующим видам изнашивания:

- абразивному – в результате режущего или царапающего действия твердых тел или твердых частиц;
- усталостному – в результате усталостного разрушения при повторном деформировании микрообъемов материала поверхностного слоя при трении скольжения или качения;
- окислительному – в результате химической реакции материала с кислородом или окисляющей окружающей средой.

При перемещении детали в почве, крайне разнообразной в гранулометрическом отношении и способной создавать бесчисленные вариации слоя частиц по размеру контактных площадок и действующим нагрузкам, вероятнее всего протекание смешанных процессов изнашивания (микрорезание, полидеформационное разрушение, усталостное деформирование, химическое разупрочнение и др.).

Интенсивность износа поверхностей дисковых рабочих органов зависит от режимов изнашивания, изнашивающей способности почвы, свойств изнашиваемой поверхности и многих других факторов, влияющих на развитие процессов изнашивания.

Изменение размеров и формы рабочих поверхностей при изнашивании в большинстве случаев ухудшает функционирование рабочих органов, приводит к снижению их работоспособности. Предельный уровень работоспособности рабочих органов определяется прочностными, агротехническими или технико-экономическими показателями, пользуясь которыми устанавливают предельно допустимые значения износа.

Рабочие органы почвообрабатывающих машин подвергаются в основном абразивному изнашиванию и изнашиванию в результате трения контактирующих поверхностей сопрягаемых деталей. Существенное влияние на интенсивность изнашивания оказывают такие взаимозависимые параметры как твердость и влажность обрабатываемой почвы.

Результатом процесса обработки почвы является изменение её физико-механических свойств. За счет механического воздействия на почву рабочих органов почвообрабатывающих машин могут быть изменены функционально связанные между собой плотность, пористость и удельный объем. В зависимости от цели обработки почвы бывает необходимо изменять эти величины в сторону их увеличения или уменьшения [2, 3].

Модели изменения свойств почвы под действием деформаторов

Механическая обработка почвы осуществляется за счет взаимодействия рабочего

органа (деформатора) почвообрабатывающей машины с почвенной средой и ее можно разделить на два последовательных процесса. Первый – это создание напряженно-деформированного состояния и второй – обеспечение перемещения почвы в пространстве и времени. Как в первом, так и во втором процессе происходят изменения физико-механических свойств почвы.

Напряжения, которые создает рабочий орган, функционально связаны с деформациями $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) = f(\sigma_1(t), \sigma_2(t), \sigma_3(t), \psi(x_i))$. Эта функциональная связь устанавливает зависимость между упругостью, вязкостью и предельным напряжением разрушению. Условно влияние соотношений компонентов напряжений (деформаций) на изменение свойств зависит от нормальных напряжений σ_m и максимальных касательных напряжений τ_{\max} . Эти напряжения выражаются через напряжения [4, 5, 6]:

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_1 + 2\sigma_3); \quad (1)$$

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3), \quad (2)$$

где σ_1, σ_3 – соответственно наибольшее и наименьшее главное напряжение.

Деформации, происходящие в почве, могут быть обратимыми в пределах действия закона упругости Гука и остаточными при выполнении условия Сен-Венана [4, 7].

Под действием нормальной составляющей напряжений происходят объемные деформации (обратные или остаточные), при которых изменяются плотность, пористость и удельный объем. В зависимости от знака нормальных напряжений σ_m плотность и связанные с ней величины увеличиваются или уменьшаются. Кроме того, изменение плотности почвы может происходить под действием деформаций сдвигом (дилатации) [4, 8, 9].

Элементарный объем почвы под действием рабочего органа находится в напряженном состоянии, которое полностью определяется полным тензором напряжений [6, 10].

Для определения условий нарушения цельности почвы или наступления пластического течения необходимо определить критерии, которыми характеризуется критическое состояние среды.

К критериям прочности предъявляются такие основные требования [11]:

- критерий должен создавать условия разрушения для почвенного элемента, находящегося в произвольном напряженном состоянии;
- в аналитическое выражение критерия прочности вместе с тензором напряжений должны входить величины, которые характеризуют свойства почвы;
- критерий должен учитывать разницу пределов прочности на сжатие и растяжение;
- критерий прочности не должен зависеть от выбора системы координат.

Для определения адекватной для почвы теории прочности следует проанализировать наиболее распространенные критерии.

Для изотропных сред используется теория наибольших нормальных напряжений и линейных деформаций.

При использовании критерия наибольших нормальных напряжений пластические деформации или разрушение хрупких материалов наступает тогда, когда наибольшее главное напряжение достигает некоторого предельного значения:

$$|\sigma_1| = \sigma_T \Rightarrow |\sigma_1| \leq [\sigma] \quad (3)$$

Этот критерий не отображает условия перехода в пластическое состояние и его

разрушение, которые характерны для процесса обработки почвы. Для условий сложноподвижного состояния критерий использовать нельзя, так как не отображается соотношения между компонентами или между главными напряжениями.

Согласно критерию наибольших линейных деформаций – разрушение происходит тогда, когда наибольшая по абсолютной величине линейная деформация достигает некоторого предельного значения (гипотеза Мариота). Для среды, физические уравнения состояния которой описываются законом Гука, разрушение происходит при выполнении условия [11, 12]:

$$\frac{1}{E} \cdot [\sigma_1 - \nu \cdot (\sigma_2 + \sigma_3)] = \sigma_B / E. \quad (4)$$

Критерий не учитывает неравенство предельных напряжений сжатия и растяжения, которые характерны для почвы. Для более сложных случаев нагрузки критерий не дает адекватных результатов.

Критерий наибольших касательных напряжений (критерий Кулона, Навье, Треска, Бельтрами) [4, 13]. В соответствии с этим критерием пластическая деформация среды появляется тогда, когда наибольшее касательное напряжение достигает некоторого предельного значения:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \geq [\tau]. \quad (5)$$

Этот критерий широко применяется для анализа сложных напряженно-деформированных состояний сред. Однако для случаев отличных напряжений растяжения и сжатия критерий неадекватен, то есть для почвы не приемлем.

Согласно энергетическому критерию среда переходит в состояние пластического деформирования в случае, когда полная удельная энергия деформации достигает некоторого предельного значения (гипотеза Бельтрами) [14].

Для среды до наступления пластичного течения уравнение полной удельной энергии деформации имеет вид:

для случая чистого растяжения:

$$A = \frac{\sigma_x \cdot \varepsilon_x}{2} + \frac{\sigma_y \cdot \varepsilon_y}{2} + \frac{\sigma_z \cdot \varepsilon_z}{2} + \tau_{xy} \cdot \varepsilon_{xy} + \tau_{xz} \cdot \varepsilon_{xz} + \tau_{zy} \cdot \varepsilon_{zy}; \quad (6)$$

для случая сложного напряженного состояния.

$$A = \sigma^2 / 2E \leq [\sigma]^2 / 2E. \quad (7)$$

Этот критерий имеет очень сложную функцию для его определения, не подтверждается результатами экспериментальных исследований и имеет лишь историческое значение.

Критерий удельной энергии изменения формы гласит, что пластическое состояние наступает при достижении удельной энергией изменения формы определенного предельного значения (гипотеза Губера-Генки-Мизеса) [15].

В пространстве напряжений критерий представляет собой круговой цилиндр. Этот критерий построен на основе анализа интенсивности касательных напряжений и не

учитывает влияния нормальных напряжений на площадках скольжения. Применение энергетических критериев для анализа условий прочности почвы не дает адекватных результатов [4, 8, 9].

Критерий Мора базируется на предположении, что среднее главное напряжение несущественно влияет на наступление предельного состояния и может не учитываться. Критерий имеет вид [14]:

$$\sigma_1 - K \cdot \sigma_3 \leq [\sigma]_P, \quad K = \frac{\sigma_P}{\sigma_C}, \quad (8)$$

где σ_P , σ_C – предельные напряжения соответственно при чистом растяжении и чистом сжатии.

Критерий Мора учитывает разницу предельных напряжений пластичности при растяжении и сжатии и широко используется для анализа напряженного состояния среды для плоских задач. К относительно новым критериям прочности относятся критерии Шлейхера, Баландина, Миролубова, Янга и другие.

По Шлейхеру за критерий прочности среды, которая оказывает не одинаковое сопротивление сжатию и растяжению, должна быть принята величина полной удельной энергии деформации, причем предельное ее значение должно быть функцией среднего напряжения [4]:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3}. \quad (9)$$

Критерий Шлейхера не нашел широкого приложения из-за недостаточной адекватности результатов экспериментальных исследований разрушения почвы [16].

По критерию П. П. Баландина – для однородной изотропной среды мерой прочности является удельная потенциальная энергия, которая связана с изменением формы тела, причем предельное состояние её не постоянно, а зависит от напряженного состояния.

Для одноосного растяжения:

$$\frac{(1 + \nu)}{3E} \cdot \sigma_P^2 = a \cdot \frac{\sigma_P}{3} + b. \quad (10)$$

Для одноосного сжатия:

$$\frac{(1 + \nu)}{3E} \cdot \sigma_C^2 = -a \cdot \frac{\sigma_C}{3} + b. \quad (11)$$

Граница прочности на сдвиг:

$$\tau_b = \sqrt{\frac{\sigma_P + \sigma_C}{3}}. \quad (12)$$

Применение этого критерия для разных сред дает достаточно высокую адекватность. К сожалению, проверить адекватность критерия для определения прочности почвы обнаружить не удалось.

Критерий Миролюбова И. М. выражается в виде полинома, представляющим собой однополосный гиперboloид. Эта поверхность имеет отрицательную кривизну, что противоречит постулату Друкера. Поэтому этот критерий не нашел применения.

Критерий Янга Ю. И. представляет собой полином второй степени, симметричный относительно всех трех главных напряжений. Поэтому, поверхности критерия в пространстве главных напряжений могут быть разными: параболоид, гиперboloид или цилиндр. Соответственно и адекватность этого критерия прочности зависит от условий.

В целом, проблема выбора критерия прочности сводится к определению некоторой функции, например, вида:

$$K = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, m_i). \quad (13)$$

Функция при предельных состояниях должна сохранять свое значение K независимо от соотношения компонентов тензора напряжений при нагрузке.

Всем требованиям, которые относятся к критерию прочности, может отвечать критерий, предложенный Лебедевым А. А. [17]:

$$\chi \cdot \sigma_i + (1 + \chi) \cdot \sigma_1 = \sigma_p; \quad (14)$$

где χ – параметр, который характеризует степень ответственности за микроразрушения сдвигающим деформациям, которые создают благоприятные условия для разрыхления материала и образования трещин, $\chi = \sigma_p / \sigma_c$; σ_i – интенсивность напряжений; σ_1 – максимальное нормальное напряжение:

$$\sigma_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \tau_{\text{ост}}. \quad (15)$$

Структура критерия согласовывается с современными представлениями о двух механизмах разрушения – отрывом и сдвигом. Для почвы критерий χ , характеризующий её связность, имеет значение, которое находится в пределах $\chi=6-8$ в зависимости от типа и физического состояния почвы [7]. Этот критерий близок по физической сути к критерию Мизеса-Шлейхера-Боткина, который широко используется для анализа прочности почвы в механике почв [8, 9, 18].

В процессе обработки почвы дисковым рабочим органом, подводимая к рабочему органу мощность для придания ему поступательного движения, расходуется на деформирование почвы и может расцениваться как критерий оценки энергоемкости процесса обработки почвы. При этом мощность деформирования состоит из мощности объемного деформирования и сдвиговых деформаций. Величины этих составляющих мощности определяются как интеграл по объему деформирования среды перед рабочим органом, а именно:

$$N_\varepsilon = \iiint_{\Omega} \left(\dot{\varepsilon}_x \cdot \sigma_x + \dot{\varepsilon}_y \cdot \sigma_y + \dot{\varepsilon}_z \cdot \sigma_z \right) dx dy dz; \quad (16)$$



$$N_{\gamma} = \iiint_{\Omega} \left(\dot{\gamma}_{xy} \cdot \tau_{xy} + \dot{\gamma}_{xz} \cdot \tau_{xz} + \dot{\gamma}_{zy} \cdot \tau_{zy} \right) dx dy dz; \quad (17)$$

$$N = N_{\varepsilon} + N_{\gamma}. \quad (18)$$

где N , N_{ε} , N_{γ} – мощности, соответственно, суммарная, объемных и сдвиговых деформаций; $\Omega = X Y Z$ – объем деформированной почвы.

Соотношение мощностей сдвиговых и объемных деформаций могут использоваться в качестве приближенный критерий оценки качества выполнения процесса обработки почвы:

$$K_N = \frac{N_{\gamma}}{N_{\varepsilon}}. \quad (19)$$

Выводы

Преобладающим видом изнашивания дисковых рабочих органов является абразивное изнашивание, характеризующееся значительным массовым износом и изменением формы рабочих органов и их геометрии. Геометрическая форма дискового рабочего органа оказывает большое влияние на тяговое сопротивление бороны. Анализ вида разрушения почвы свидетельствует о том, что почва разрушается при сжатии, растяжении и сдвиге. При этом, преобладающим видом разрушения выступает разрушение при растяжении и сдвиге, что отвечает критерию прочности Лебедева А. А.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шевченко І.А., Рогач Ю.П. Теоретичне обґрунтування поверхні ґрунтообробного робочого органа // Механізація с.-г. виробництва: Зб. наук. праць. Київ: НАУ, 2001. Т. 12. С. 187-194.
2. Огрызков Е.П. Влияние физико-механических свойств почв на их изнашивающую способность // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1969. №7. С. 35-41.
3. Огрызков Е.П., Огрызков В.Е., Огрызков П.В. Абразивное изнашивание почворезущих лезвий в полевых условиях // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки, 2006. №2. С. 106-112.
4. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
5. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
6. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. М.: Наука, 1980. 512 с.
7. Кулен А., Куиперс Х. Современная земледельческая механика. М.: Агропромиздат, 1986. 349 с.
8. Бишоп А.У. Параметры прочности при сдвиге ненарушенных и перемятых образцов грунта // Определяющие законы механики грунтов. М.: Мир, 1975. С. 7-75.
9. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. М.: Издательство литературы по строительству, 1971. 368 с.
10. Наумов В. А. Механика движения неоднородных сред. Калининград: Изд-во КГТУ, 2005. 124 с.
11. Трощенко В. В., Лебедев А. А., Стрижало В. А., Степанов Г. В., Кривенюк В. В. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения. Киев: Логос, 2000. 571 с.



12. Мороз Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
13. Гениев Г. А., Курбатов А. С., Самедов Ф. А. Вопросы прочности и пластичности анизотропных материалов. М.: Интербук, 1993. 187 с.
14. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров. М.: Машиностроение, 1979. 568 с.
15. Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. 224 с.
16. Кравчук В. І., Гуков Я. С. Енерговитрати при розпушенні ґрунту механічним способом // Вісник аграрної науки, 2001. №5. С. 56-59.
17. Лебедев А. А. О возможности совмещения условия пластичности и хрупкого разрушения // Прикладная механика, 1968. Вып. 4. С. 85-93.
18. Малышев М. В. Об использовании для сыпучих грунтов условия прочности Губера-Мизеса-Боткина // Основания, фундаменты и механика грунтов, 1969. №5. С. 3-5.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шовкопляс Александр Викторович

Государственное образовательное учреждение Луганской народной республики «Луганский национальный аграрный университет», г. Луганск, кандидат технических наук, доцент кафедры машиноиспользования в земледелии, ремонта машин и охраны труда.

E-mail: silkdance@meta.ua.

Shovkoplyas Alexander Victorovich

Public educational institution of the Luhansk republic of People's is the «Luhansk national agrarian university», Luhansk, candidate of engineering sciences, associate professor of the department of parking management in agriculture, repair of machines and labour protection.

E-mail: silkdance@meta.ua.

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи:

91008, Луганск, городок ЛНАУ дом 24, кв. 24 Шовкопляс А. В.

+38(066)44-72-874