

Расчётный метод оптимизации конструкции лезвий почвообрабатывающих рабочих органов

Т.Ф. Ахметшин, к.т.н., ФГБОУ ВПО Уфимский ГАУ

Теория оптимального проектирования относится к одному из наиболее быстро развивающихся разделов механики деформируемых сред [1]. Она сочетает достижения в области теории упругости и теории пластичности с теорией оптимизации, в результате чего разрабатываются методики целенаправленного проектирования формы упругих тел, обладающих высокими эксплуатационными свойствами. Часто целями проектирования служат минимальная масса и минимальная стоимость конструкции. Одновременно формулируются ограничения на податливость, геометрию и т.п., которые играют важную роль в теории оптимального управления [2].

Задачи, решаемые теорией оптимального проектирования, можно разделить на следующие классы [3]:

- отыскание оптимальной формы упругих тел для заданных внешних силовых факторов;
- отыскание оптимальной структуры внутренних свойств деформируемого твёрдого тела заданной формы;
- совместная оптимизация формы и структуры тела.

К настоящему времени имеются надёжные методы решения задач первого и второго класса, в то время как третий класс задач имеет лишь проблемную постановку.

Постановка задач оптимизации формы включает в себя формулировку основных уравнений, описывающих напряжённо-деформированное состояние тела или конструкции, ограничений на переменные состояния и переменные проектирования (управляющие функции [2]), а также выбор критерия качества. Математическим аппаратом для них является теория оптимизации систем с распределёнными параметрами [4] и вариационное исчисление. В качестве ограничений могут выступать [1] уравнения равновесия (движения), условия совместности деформации, граничные условия, геометрические ограничения в виде неравенств, законы деформирования материала и т.п.

При проектировании рабочих органов почвообрабатывающих машин необходимо учитывать самозатачиваемость их лезвий в процессе эксплуатации [5].

Изучение профилей лезвий лемехов показывает, что при изнашивании на лезвии образуется затылочная фаска, которая наклонена к дну борозды под небольшим отрицательным углом (рис. 1), т.е. режущая кромка лезвия приподнята над дном борозды. Сама режущая кромка получается острой или закруглённой (притуплённой) в зависимости от

типа и состояния почвы. Острая кромка и плоская, наклонённая под углом α до 10° , затылочная фаска характерны при изнашивании лезвия на лёгких песчаных почвах. Получаются они за счёт интенсивного износа нижней стороны лемеха. Обычно такой износ оценивают как своеобразное самозатачивание на песке. На связных глинистых почвах режущая кромка имеет значительно больший радиус закругления, фаска бочкообразная, наклонённая к дну борозды в среднем под углом $20\text{--}25^\circ$.

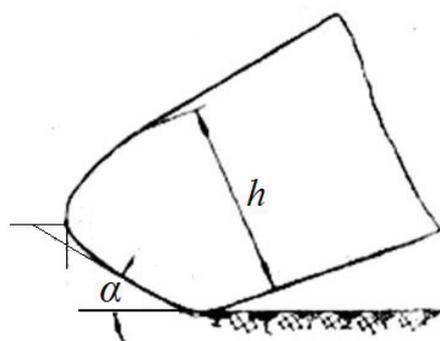


Рис. 1 – Профиль лезвия изношенного лемеха

Вследствие клиновидной формы сечения лезвия ширина его затылочной фаски по мере износа лемеха растёт. Одновременно наблюдается медленный поворот этой фаски в сторону увеличения отрицательного угла наклона к дну борозды.

В отличие от многих режущих деталей, осуществляющих процесс разделения материала путём среза или скалывания сминающим клином, почворежущие детали работают главным образом своим лезвием, вдавливающимся в материал и создающим в нём предельные напряжения. Поэтому лезвия почворежущих деталей воспринимают большие нагрузки и быстро изнашиваются о почву.

Как установлено, соприкасающиеся с почвой поверхности лемеха изнашиваются главным образом абразивными частичками – кварцевыми песчинками, которые царапают и пластически деформируют (выдавливают с последующим разрушением) металл. Чем больше кварца в почве, тем больше частиц проходит в единицу времени по поверхности лезвия. Чем твёрже почва, тем с большей силой эти частички прижимаются к поверхности лезвия и глубже изнашивают её.

Это физически очевидное представление о сущности явления выражается многократно проверенной опытным путём математической формулой [5]:

$$\frac{d\tau}{dT} = C_p, \quad (1)$$

где τ – линейный износ по толщине, замеренный перпендикулярно к поверхности металла;

T – путь трения почвы (абразивной массы) по поверхности металла;

C – коэффициент изнашивания, зависящий от свойств почвы (количества, размеров и формы песчинок), износостойкости материала и условий изнашивания;

p – удельное давление почвы, действующее перпендикулярно к поверхности режущего органа.

Следовательно, скорость износа поверхности лемеха, вызванного прошедшей по ней почвенной массой, прямо пропорциональна давлению p , с которым эта масса прижимается к истираемой поверхности.

Стабилизация профиля лезвия и её закономерности наблюдаются также в опытах по изнашиванию лап культиваторов, ножей фрез и других режущих деталей в полевых условиях и на образцах в лабораторных условиях.

При изнашивании стабилизированного лезвия его профиль не изменяется, все его точки сдвигаются в направлении износа лезвия по ширине, параллельно тыльной неизнашиваемой стороне на одинаковую величину. Это подтверждается и лабораторными исследованиями.

Стальные монометаллические пластины с толщиной H (рис. 2) перемещались в изотропной почвенной массе со скоростью, соответствующей скорости рабочих органов в условиях эксплуатации. Передние поверхности пластин имели различные формы: прямолинейную AB и клинообразные ACB с различными углами при вершине i . В результате многочасовых экспериментов передняя поверхность пластин независимо от первоначальной конструкции приобретает выпуклую форму с дугой окружности радиуса r с центром в точке O , расположенной на оси симметрии опытного образца. Если продолжить испытания, форма поверхности ACB не изменяется, т.е. стабилизируется, но перемещается по мере износа параллельно относительно первоначальной стабилизированной дуги. Соединив точки A и B с точкой O , получаем сектор круга с углом при вершине φ .

Стабилизация формы лезвия любого конструкционного исполнения при эксплуатации в конкретных условиях – это готовое решение задачи оптимизации её формы для данного характера нагружения. Однако этот метод решения оптимизационной задачи требует больших затрат времени и материальных ресурсов. Поэтому математическое

моделирование взаимодействия лезвия и почвы, позволяющее прогнозировать стабилизированный профиль проектируемого лезвия, является актуальной задачей.

Рассмотрим случай воздействия на кромку лезвия ударной нагрузки. Для этого используем известное решение [3] для бесконечного упругого клина с углом при вершине, равным $i = |\beta_0|$, при этом $|\beta_0| = \beta_0$ (рис. 3), находящегося в состоянии плоской деформации под действием силы R .

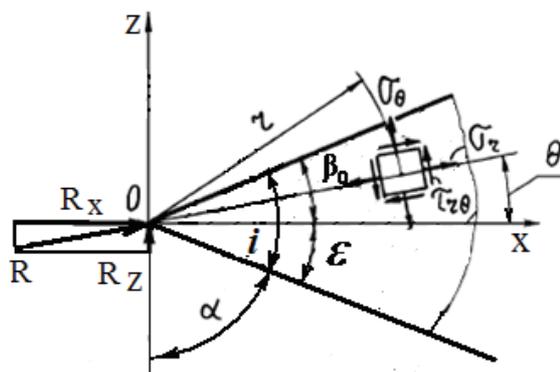


Рис. 3 – Схема нагружения кромки по [3]

Составляющие силы, отнесённые к единице ширины кромки, обозначим через R_x и R_z . Тогда в изотропной однородной кромке ($E = \text{const}$, $\nu = \text{const}$) имеет место радиальное распределение напряжений вида [6]:

$$\begin{cases} \sigma_r = (A \cdot \cos\theta + B \cdot \sin\theta)/r; \\ \sigma_\theta = \tau_{r\theta} = 0, \end{cases} \quad (2.1)$$

где r, θ – полярные координаты (рис. 4);

A, B – коэффициенты, определяемые из следующего условия равновесия части кромки, вырезанной дугой произвольного радиуса r :

$$\begin{aligned} \int_{-\varepsilon}^{\beta_0} \sigma_r \cdot r \cdot \cos\theta \cdot d\theta &= -R_x; \\ \int_{-\varepsilon}^{\beta_0} \sigma_r \cdot r \cdot \sin\theta \cdot d\theta &= -R_z. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Подставив (2.1) в (2.2), получим

$$\begin{aligned} \int_{-(\pi/2-\alpha)}^{\beta_0} (A \cdot \cos\theta + B \cdot \sin\theta) \cdot \cos\theta \cdot d\theta &= -R_x; \\ \int_{-(\pi/2-\alpha)}^{\beta_0} (A \cdot \cos\theta + B \cdot \sin\theta) \cdot \sin\theta \cdot d\theta &= -R_z. \end{aligned} \quad (2.3)$$

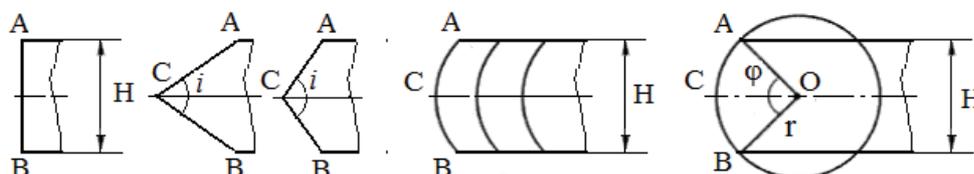


Рис. 2 – Схема стабилизации лезвий при перемещении в изотропной почвенной массе

Интегрирование (2.3) и решение полученной системы уравнений даёт следующие формулы для расчёта коэффициентов в (2.1):

$$A = \frac{2 \cdot (P_y \cdot b + P_z \cdot c)}{c^2 - a \cdot b};$$

$$B = -\frac{2 \cdot (P_y \cdot c + P_z \cdot a)}{c^2 - a \cdot b}, \quad (2.4)$$

где $a = -(\sin 2\varepsilon + \sin 2\beta_0)/2 + i$;
 $b = (\sin 2\beta_0 + \sin 2\varepsilon)/2 + i$;
 $c = -(\sin^2 \varepsilon + \cos^2 \beta_0)$.

$$\sigma_r = 2 \cdot \frac{P_x \cdot [\cos(0,5i) \cdot \sin(0,5i + \theta) + \cos(0,5i) \cdot \sin(0,5i - \theta) + i \cdot \cos \theta] - P_z \cdot [\cos(0,5i) \cdot \cos(0,5i - \theta) - \cos(0,5i) \cdot \cos(0,5i + \theta) - i \cdot \sin \theta]}{-r \cdot [i^2 + (2 \sin i)^2]} \quad (2.5)$$

Условие оптимальности для (2.5) имеет вид

$$\sigma_r = k \cdot \sigma_b \text{ при } \theta = \beta_0 = i/2,$$

где σ_b – предел прочности материала кромки (на ударную вязкость, на растяжение, на сжатие и др.);

$k \leq 1$ – коэффициент запаса, учитывающий колебания величины и направлений силы ударных воздействий, их многократность, вибрацию лезвия и других факторов.

Подставим это условие в выражение (2.5):

$$r = -2 \cdot \frac{P_x \cdot \cos i / 2 + P_z \cdot \sin i / 2}{k \cdot \sigma_b \cdot \left[i + \frac{(2 \sin i / 2)^2}{i} \right]} \quad (2.6)$$

Принимаем, что энергия удара почвенных частиц по кромке составляет $R = 0,05$ Нм. Ударная вязкость: для стали $KC = 27$ Нм/см² = 0,27 Нм/мм², для чугуна – 5 Нм/см² = 0,05 Нм/мм². Предел прочности на растяжение: для железа $\sigma_b = 25$ кгс/мм²; для малоуглеродистой стали (0,2% С) $\sigma_b = 450$ МПа = 45 кгс/мм² = 450 Н/мм²; для серого чугуна $\sigma_b = 17 \div 30$ кгс/мм² = 170 ÷ 300 Н/мм².

Если предположить, что определяющим фактором в формировании стабилизированного профиля является ударная вязкость материала кромки KC , то, подставив справочные данные в формулу, определим оптимальный радиус кромки лезвия. Для стали: при $KC = 0,27$ Нм/мм² и $k = 0,75$ величина r изменяется от 3,3 мм при $i = 5^\circ$ до 0,2 мм при $i = 85^\circ$. Для чугуна: при $KC = 0,05$ Нм/мм² и $k = 0,75$ величина r изменяется от 17,7 мм при $i = 50^\circ$ до 1,1 мм при $i = 85^\circ$.

Анализ расчётных данных показывает, что радиус кромки с увеличением угла заострения уменьшается. Графически эта зависимость представлена на рисунке 4.

На рисунке видно, что при углах заострения i меньше 10° не приведёт к снижению радиуса r . С другой стороны, увеличение угла заострения свыше 40° будет сопровождаться несущественным

Так как $\alpha = \pi/2 - (-\varepsilon) = \pi/2 + \varepsilon$, то $\sin \alpha = \sin(\pi/2 + \varepsilon) = \cos \varepsilon$ и $\sin 2\alpha = \sin 2(\pi/2 + \varepsilon) = \sin(\pi + 2\varepsilon) = -\sin 2\varepsilon$. Если учесть, что $\varepsilon = \beta_0 = i/2$, то можем записать:

$$a = -\sin i + i;$$

$$b = \sin i + i;$$

$$c = -1.$$

Подставив (2.4) в (2.1) и проведя ряд преобразований, имеем выражение для радиальных напряжений в режущей кромке следующего вида:

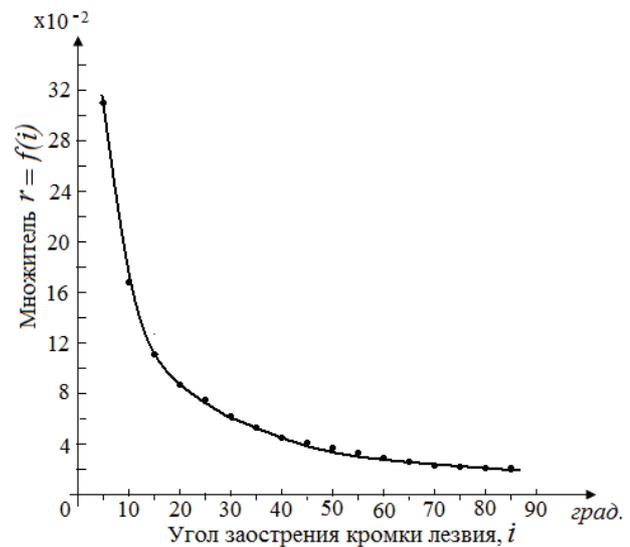


Рис. 4 – Зависимость радиуса закругления стабилизированного профиля кромки r от угла заострения i

уменьшением радиуса кромки. Поэтому оптимальными углами заострения лезвий, работающих в условиях с ударными нагрузками, можно считать углы $10 \div 40^\circ$.

Кромка лезвия приобретает стабилизированный профиль, описываемый уравнением окружности с радиусом r . При этом величина радиуса не зависит от толщины H пластины. Если $H \leq 2r$, то профиль кромки будет представлять собой дугу АСВ (рис. 2), которая является сектором круга с радиусом r и с углом при вершине ϕ . В этом случае профиль кромки является профилем всего лезвия. Угол ϕ равен углу коэффициента трения почвы о материал кромки. Если $H > 2r$, то высота дуги АСВ меньше толщины пластины, и лезвие приобретает фаски по обе стороны от кромки, профиль которых выражен уравнением, отличающимся от уравнения окружности кромки (рис. 5).

Расчётный способ нахождения радиуса кромки стабилизированной при изнашивании лезвий позволяет для заданных условий эксплуатации (каме-

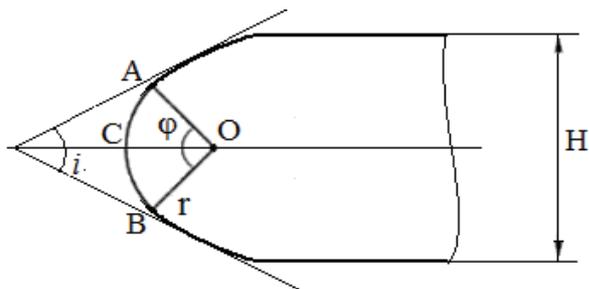


Рис. 5 – Схема профиля стабилизированного лезвия, образованного кромкой и двумя фасками

нистость, механический состав почвы), известных свойствах материала детали (износостойкость, ударная прочность) подобрать такой угол заострения лезвия, который обеспечит минимальное значение

радиуса. Для решения оптимизационной задачи по обеспечению остроты лезвий не потребуются дорогостоящие исследования и длительное время на испытания в лабораторных и полевых условиях.

Литература

1. Рейтман И.И., Шапиро Г.С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел. М.: Наука, 1976. 258 с.
2. Понтрягин Л.С., Болтянский В.К., Гамкелидзе Р.В. и др. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1969. 366 с.
3. Баничук Н.В. Оптимизация формы упругих тел. М.: Наука, 1980. 145 с.
4. Гринев В.Б., Филиппов А.П. Оптимизация элементов конструкций по механическим характеристикам. Киев: Наукова думка, 1975. 178 с.
5. Рабинович А.Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворезущие детали машин. М. ГОСНИТИ, 1962. 107 с.
6. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977. 416 с.