

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ НОЖЕЙ РОТОРА

Моисеенков Д. В.

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Россия

Измельчение – наиболее распространенный механический процесс, используемый человечеством на протяжении всего существования. В промышленном масштабе данный вид обработки сырья внедрен во множество отраслей, начиная от пищевой и сельскохозяйственной промышленности, заканчивая нефтеперерабатывающим производством. Ключевым элементом при измельчении является режущий инструмент – нож. Современные технологии позволяют изготовить режущий элемент, способный измельчить практически любое сырье до заданной фракции. Комбинируя форму ножей, угол заточки режущей кромки, металл и технологическую обработку можно добиться индивидуальных характеристик под определенные цели и задачи. В производственном масштабе наиболее востребованным оборудованием для измельчения является дробилка. Как показывает практика, самая распространенная дробилка – роторная. Данный вид оборудования, в зависимости от характеристик, позволяет измельчить как зерновые культуры и сырье пищевых производств, так и уголь, кокс и прочие составляющие горной и нефтеперерабатывающих отраслей [1]. Основными режущими элементами дробилки являются роторные и статорные ножи. При утилизации автомобильных покрышек механическим методом, ведущим оборудованием в технологической линии является роторная дробилка, так как именно в камере дробления данного оборудования резиновая крошка измельчается до конечной фракции. От производительности дробилки зависит производительность всей линии по производству резиновой крошки из автомобильных покрышек [2]. Также, используя роторную дробилку появляется возможность контролировать размер фракции получаемого продукта, посредством установки сита, с необходимым размером ячеек. Измолотое сырье, меньшее чем ячейка сита, поступает на следующий этап технологической схемы, а более крупные куски дробимого материала повторно измельчаются до заданного размера. В данной статье произведен анализ напряженно-деформируемого состояния ножей ротора.

Проведем математическое моделирование процесса движения рассматриваемой механической системы, а также составим расчетную схему для аналитического исследования процессов, возникающих в процессе измельчения.

В работе предлагается динамическая модель, состоящая из ротора 1, вращающегося вокруг неподвижной горизонтальной оси с угловой скоростью ω в установившемся режиме работы ротора, статорного ножа 2, установленного в камере дробления. Куски, предварительно измельченной автомобильной покрышки 3 разрезаются посредством контакта с роторными и статорными ножами (рисунок 1).

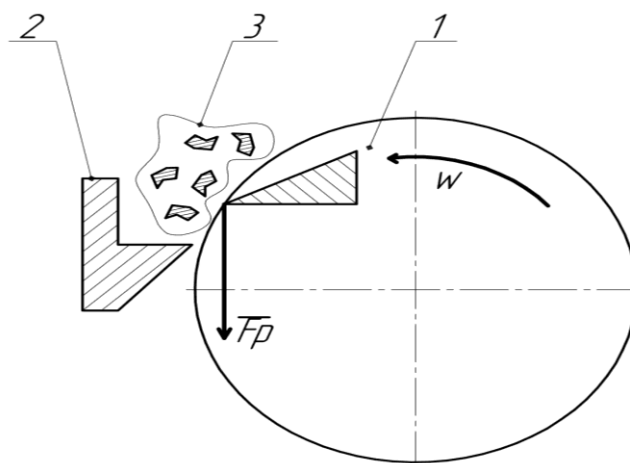


Рис. 1. Модель процесса измельчения резиновой крошки

В предлагаемой модели в роли ротора выступает выходной вал редуктора, с насаженными на него роторными ножами, посредством шлицевого и шпилечного соединений. Вал имеет две опоры качения – конические шарикоподшипники.

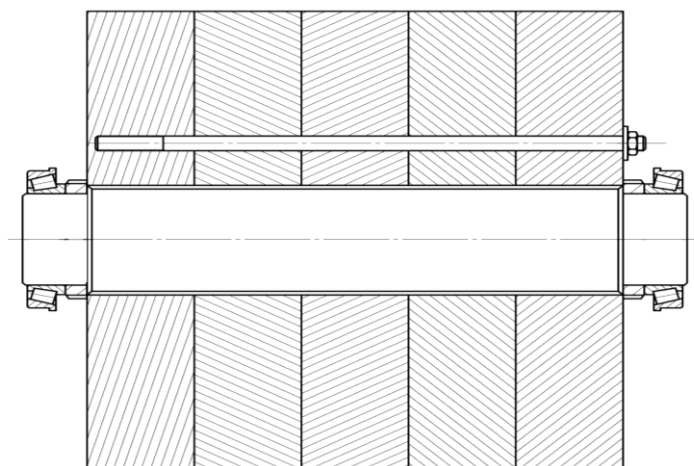


Рис. 2. Модель ротора

Для исследования механических процессов, возникающих при переработке автомобильных покрышек в резиновую крошку рассмотрим ротор, который закреплен на выходном валу редуктора и вращается с заданной угловой скоростью ω . Конструкция ротора состоит из вала и насаженных на него роторных ножей. Предварительно разрезанные куски автомобильной покрышки подаются в камеру дробления с помощью ленточного конвейера со скоростью v . В данной работе расчет параметров ленточного конвейера не рассматривается. Измельчение кусков автомобильной покрышки в резиновую крошку происходит при попадании их между роторными и статорными ножами. Далее измельченный продукт проходит сквозь сито, установленное в камере дробления, и попадает в приемный контейнер.

Первым этапом исследования напряженно-деформированного состояния роторной дробилки является определение сил резания, возникающих на роторных ножах. В процессе дробления на нож действуют две силы \vec{F}_1 , \vec{F}_2 , расположенные в плоскости ножа. Лезвие ножа подвергается изгибу, вызываемым действием силы \vec{F}_1 растяжению,

вызываемым силой \vec{F}_2 [1, 3,5]. Принимаем, что сила резания равномерно распределена по всей плоскости лезвия ножа. Следовательно, можно выразить F_1 и F_2 (рисунок 3):

$$F_1 = F \cdot \cos \alpha, \quad F_2 = F \cdot \sin \alpha,$$

где α – угол установки ножа.

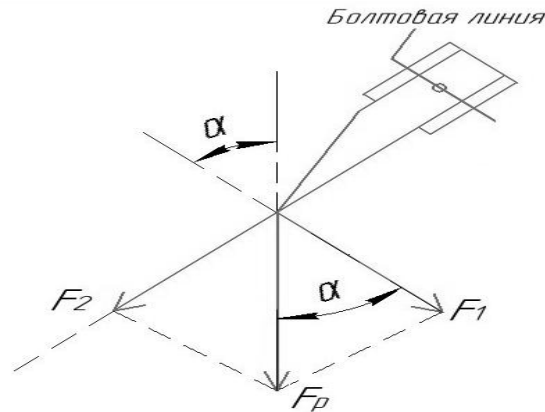


Рис. 3. Схема сил, действующих на лезвие ножа

Рассмотрим изгиб лезвия ножа. Данную деформацию с некоторыми допущениями можно рассматривать, как консольную балку с жесткозакрепленным концом [1, 4]. Полагаем, что рассматриваемая балка имеет прямоугольное сечение одинаковой переменной высоты y и ширины ℓ (рисунок 4).

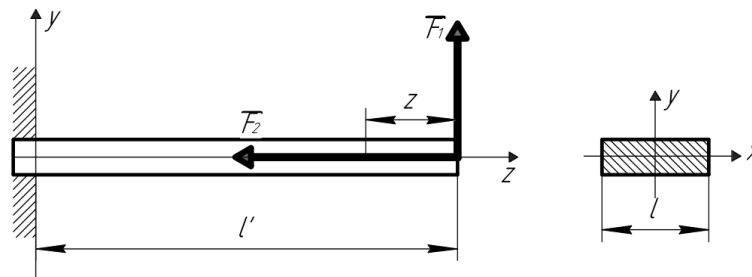


Рис. 4. Расчетная схема лезвия ножа

За счет вертикальной составляющей силы резания по длине лезвия ноже определяется изгибающий момент:

$$M_x = F_1 \cdot z, \tag{1}$$

осевой момент сопротивления прямоугольного сечения лезвия ножа:

$$W_x = \frac{y \cdot \ell^2}{6}, \tag{2}$$

где y – величина, зависящая от угла заточки лезвия ножа β , ℓ – длина лезвия ножа. Напряжение в каждом сечении при деформации изгиба определяется [4]:

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} = \frac{6 \cdot k \cdot F_p \cdot \cos \alpha \cdot z}{y \cdot \ell^2}, \quad (3)$$

где $M_x = M_{xmax}$ – максимальное значение изгибающего момента.

$$M_{xmax} = \frac{6 \cdot k \cdot F_p \cdot \cos \alpha \cdot \ell'}{h \cdot \ell^2}. \quad (4)$$

Подставив полученное выражение в условие прочности, можно определить технические характеристики ножа:

$$\sigma_{max} \leq [\sigma]. \quad (5)$$

Рассмотрим деформации растяжения лезвия ножа, с переменной величиной u . Определим критическое значение стержня прямоугольного поперечного сечения. Гибкость стержня:

Вычислим радиус инерции:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot \ell'}{i_{min}}; \quad (6)$$

$$i_{min} = \sqrt{\frac{J_{min}}{S}}, \quad (7)$$

где J_{min} – минимальное значение момента инерции, S – площадь поперечного сечения ножа.

Предположим, что в рассмотренной модели лезвия ножа коэффициент приведения длины $\mu = 1$. Следовательно, можно определить предельную гибкость по формуле:

$$\lambda_{пред} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{пц}}}. \quad (8)$$

Исходя из материала роторного ножа и угла заточки лезвия, определим возможность использования формулы Эйлера:

$$\lambda \geq \lambda_{пред} = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{\sigma_{пц}}}. \quad (9)$$

В случае, если условие выполняется, то для расчета критической силы применяют формулу Эйлера:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{min}}{(\mu \cdot \ell')^2}, \quad (10)$$

В противном случае, используют формулу Ясинского.

Таким образом, получены аналитические выражения, которые можно использовать для определения составляющих сил для силы резания ножей роторной дробилки.

Анализируя напряженно-деформированное состояния рабочих органов роторной дробилки, используемой для переработки автомобильных покрышек в резиновую крошку, предложена динамическая модель рабочего органа дробилки. Представленная модель позволяет оптимизировать технические характеристики режущего инструмента, в промышленных масштабах получать резиновую крошку необходимой фракции и заданном объеме, которую применяют в качестве амортизационного слоя, как при строительстве дорог, так и при проектировании спортивных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев Г. В., Головацкий Г. А., Краснов И. В. Некоторые направления повышения эффективности технологического оборудования для переработки пищевого сырья / Известия Санкт-Петербургского.
2. Куликова М. Г., Кончина Л. В. Моделирование технологического оборудования в пищевой промышленности. Естественные и технические науки. 2017. №5 (107). С. 126–127.
3. Родзевич П. Е., Миренков В. В., Хиженок В. Ф., Шельманова Е. П. Влияние углов установки на напряженно-деформируемое состояние ножа измельчающего барабана кормоуборочного комбайна // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2016. № 1. С. 32–37.
4. Бауман В. А. Роторные дробилки. Исследование, конструирование, расчет и эксплуатация. – М: «Машиностроение». 1973. 272 с.
5. Konchina L. V., Kulikova M. G., Tulegenova K. B. Modeling of the Stress-Deformed State of Working Bodies of Technological Equipment. Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_43

Поступила: 31.03.2022