УДК 630*232.315 EDN XVGCMJ

О некоторых конструктивных особенностях рубильной машины для измельчения отходов лесопиления с использованием пильных дисков

А.В. Князев*, Н.А. Бородин, С.В. Малюков, К.А. Доманин, Д.А. Иванов

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Россия

*E-mail: mashina.76@mail.ru

Аннотация. Оптимизация лесопользования в деревообрабатывающей отрасли в значительной степени зависит от внедрения технологий с минимальным образованием или полным отсутствием отходов при переработке древесины. Одним из наиболее перспективных направлений решения поставленной задачи является переработка отходов лесопильного производства и низкосортной древесины в щепу и опилки путем использования не только удобной, небольшой, но и бюджетной рубильной машины, ключевыми элементами которой являются пильные диски. Данное оборудование имеет широкий спектр применения, позволяя превращать вторичное сырье в ценный ресурс: помимо лесного хозяйства и древообрабатывающего производства, его можно использовать в энергетике, ландшафтных работах и сельском хозяйстве. Создание и подтверждение работоспособности предложенной конструкции рубильного агрегата предполагает глубокий анализ рабочих механизмов, подкрепленный математическим моделированием, в частности, вращающегося вала и пильных дисков. В ходе данного исследования разработана методика расчета прочности вала рубильной машины, представлены соответствующие эпюры изгибающих моментов, а также проведен тщательный анализ сил срезания с учетом их распределения при обработке заготовок максимальных габаритов.

Ключевые слова: рубильная машина, отходы лесопиления, пеллеты, опилки, конструкция.

Some design features of a chipping machine for shredding sawmill waste using saw blades

A.V. Knyazev*, N.A. Borodin, S.V. Malyukov, K.A. Domanin, D.A. Ivanov

Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Timiryazev St., 8, Voronezh, 394087, Russia

*E-mail: mashina.76@mail.ru

Abstract. Making forest management in the woodworking industry more efficient relies heavily on adopting technologies that generate little to no waste during wood processing. One of the most promising approaches to solving this problem is the recycling of sawmill waste and low-quality wood into wood chips and sawdust using a convenient, small, and cost-effective chopping machine, which is equipped with saw blades as its key components. This equipment has a wide range of applications, allowing for the conversion of secondary raw materials into valuable resources. In addition to its use in forestry and woodworking industries, it can also be employed in the energy sector, landscaping, and agriculture. The development and validation of the proposed chopping machine design involves a thorough analysis of its working mechanisms, supported by mathematical modeling, particularly of the rotating shaft and saw blades. This study develops a method for evaluating the strength of the chopping machine's shaft, presents the associated bending moment diagrams, and provides a detailed examination of the cutting forces, considering how they are distributed when processing workpieces of maximum size.

Keywords: chopping machine, sawmill waste, pellets, sawdust, construction.

1. Введение

В лесной промышленности в настоящее время остро встает вопрос необходимости применения более разумного подхода к использованию природных, а особенно древесных ресурсов. Это подразумевает активное внедрение технологий переработки древесины, направленных на минимизацию или полное исключение образования отходов. Ключевым методом достижения поставленной цели является преобразование некондиционной древесины в щепу технологического назначения или опилки [1].

В глобальном масштабе энергетический сектор, основанный на использовании растительной и древесной биомассы, демонстрирует тенденцию к становлению экономически выгодной, рентабельной отрасли, являющейся альтернативой энергетического комплекса, работающего на традиционном (ископаемом) топливе. Сегодня одним из наиболее известных твердых видов такого топлива является топливный пеллет, представляющий собой спрессованные гранулы, изготовленные из опилок хвойных пород деревьев, длиной около 15-35 мм и диаметром в районе 6-8 мм.

Проблема утилизации отходов деревообработки – от мелких обрезков и коры до опилок, которые скапливаются в цехах – является насущной для многих предприятий. Для решения этой проблемы была разработана рубильная машина КБ-1. Данное оборудование позволяет измельчать отходы лесопилочного производства с помощью пильных дисков. Основная цель – минимизировать количество обрезков, а главным результатом работы машины являются опилки, которые имеют очень широкий спектр применения [2, 3].

2. Цель исследования

Цель проведенного исследования – теоретическое обоснование оптимальной конструкции рубильной машины, комплексное изучение функциональных аспектов ее работы, включая динамику вращения вала и пильных дисков. Отдельное внимание уделяется созданию математической модели, описывающей рабочие процессы.

3. Методы и материалы исследования

На начальной стадии проектирования вала разрабатываются их эскизные чертежи, где фиксируются общие особенности его конструкции и определяются размеры.

Затем следует этап детализации, в ходе которого происходит уточнение габаритов вала. Эти размеры должны быть полностью согласованы с параметрами деталей, монтируемых на вал. Особое внимание уделяется выбору и расположению опор, проектированию

уплотнительных элементов, а также выбору оптимальной технологии изготовления изделия [4].

Первостепенное значение на этапе подготовки к разработке конструкции вала имеют вопросы выбора метод передачи крутящего момента и определения устройства концевых участков. Критически важным условием является совпадение диаметров концов вала и посадочных мест шкивов.

Механическая прочность выступает в качестве ключевого критерия для оценки надежности исследуемого вала. Вертикальная нагрузка, приложенная к валу рубильного агрегата, складывается из веса самого вала (Gв), веса ножевого диска (Gд) и веса ведомого шкива клиноременной передачи (G). Поскольку вал рубильной машины обладает незначительной протяженностью, его вес допустимо считать в виде сосредоточенной силы.

Сила резания, появляющаяся во время работы рубильного оборудования, обозначается как Pp. Вектор силы определяется углом наклона подающего питание механизма и положением в пространстве по отношению к оси вращения диска. Синхронная работа ножей в зоне рубки обеспечивают выполнение процесса обработки заготовки, причем увеличение скорости резания приводит к возникновению силы (Pp_1, Pp_2, Pp_3) на каждом ноже, которая напрямую связана с сопротивлением материала резанию и длиной режущей кромки, которая контактирует с обрабатываемой деталью.

Используя следующий метод построения многоугольника сил в надлежащем масштабе, можно определить общую режущую силу Pp: $P_p = P_{p1} + P_{p2} + P_{p3}$. Силу Pp можно представить как сумму двух сил: вертикальной ($Pp^в$) и горизонтальной ($Pp^г$).

При этом следует учитывать, что при наличии определенных условий имеет место быть два возможных варианта расчета. Рабочая нагрузка оценивается вдвое больше превышающей вес в случае, когда вертикальная сила противодействует гравитации и способствует снижению суммарного давления на вал. При ином развитии событий без рабочей нагрузки (например, при остановке пильного механизма) расчет учитывает лишь собственный вес элементов рубильной конструкции.

4. Полученные результаты

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что вращательное движение вала обеспечивается посредством воздействия крутящего момента, возникающего в процессе работы электродвигателя в купе с клиновым ремнем и шкивами.

Определение суммарного расчетного момента осуществляется с помощью применения указанной формулы [5]:

$$M_{расч} = \sqrt{M_и^2 + 0{,}75\ T^2}, \quad (1)$$

где Т – крутящий момент на валу, Нм;

$M_и$ – наибольший изгибающий момент, Нм.

Расчет диаметра вала базируется на значении эквивалентного момента, изгиба и кручения. При определении диаметра вала в наиболее нагруженном месте учитываются требования к его сопротивлению при изгибающих нагрузках:

$$W \leq [\sigma_и], \quad (2)$$

где $W = 0{,}1\ d^3$ - осевой момент сопротивления сечения вала.

$[\sigma_и]$ – допускаемое напряжение при изгибающих нагрузках, $[\sigma_и] = 55$ МПа.

Исходя из этого, минимальный диаметр вала определяется как:

$$d \geq \sqrt[3]{M\ расч/(0{,}1\ [\sigma_и])} \quad (3)$$

Размер поперечного сечения детали, находящейся ниже ведомого ролика ременного привода, вычисляется следующим образом:

$$d \geq \sqrt[3]{T_{max}/\left(0{,}2\ [\tau_{кр}]\right)}\ , \quad (4)$$

где $[\tau_{кр}]$ – предельное напряжение при деформации кручения, МПа.

Кроме того, необходимо увеличить полученную величину поперечного размера до ближайшего подходящего типоразмера.

Анализ коэффициента запаса прочности предполагает определение зоны, в которой возникает наибольший изгиб, т.е. критического участка вала. Вычисление коэффициента основано на следующей формуле:

$$S = \frac{S_\sigma \cdot S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \geq [S], \quad (5)$$

где S_σ – коэффициент допустимого изгиба;

S_τ – коэффициент допустимого кручения;

[S] – допустимое значение общего коэффициента запаса прочности, [S] = 2,5.

Далее приступаем к расчету коэффициентов S_σ, S_τ:

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a \cdot \frac{K_\sigma}{\beta \cdot \varepsilon_\sigma} + \psi_\sigma \cdot \sigma_m}, \quad (6)$$

$$S_\tau = \frac{\tau_{-1}}{\tau_a \cdot \frac{K_\tau}{\beta \cdot \varepsilon_\tau} + \psi_\tau \cdot \sigma_\tau}, \quad (7)$$

где σ_{-1}, τ_{-1} – максимальные показатели прочности при деформации изгиба и кручения:

$$\sigma_{-1} = (0{,}4\ldots0{,}5)\ \sigma_a \quad (8)$$

$$\tau_{-1} = (0{,}4\ldots0{,}5)\ \tau_a, \quad (9)$$

где σ_a, τ_a – амплитуды переменных составляющих циклов напряжений

$$\sigma_a = \frac{M}{W_{\text{нетто}}}; \qquad \tau_a = \frac{T}{2\,W_{\text{К нетто}}}, \quad (10)$$

где $W_{\text{нетто}}$, $W_{\text{К нетто}}$ – величины сопротивления поперечного сечения вала нагрузкам изгиба и кручения (исключая влияние шпоночного паза), рассчитываемые по нижеприведённым формулам:

$$W_{\text{нетто}} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} - \frac{b \cdot t_1 \cdot (d - t_1)^2}{2 \cdot d}, \quad (11)$$

$$W_{\text{К нетто}} = \frac{\pi \cdot d^3}{16} - \frac{b \cdot t_1 \cdot (d - t_1)^2}{2 \cdot d}, \quad (12)$$

где b – ширина шпоночного паза, мм;

t_1 – глубина шпоночного паза, мм;

K_σ, K_τ – коэффициенты концентрации напряжений при изгибе и кручении;

β – коэффициент шероховатости поверхности (для сталей: β = 0,99);

ε_σ, ε_τ – параметры, учитывающие влияние изгиба и скручивания, зависящие от диаметра критического сечения вала и свойств материала;

ψ_σ, ψ_τ – коэффициенты асимметрии циклов напряжений на изгиб и кручение (для вала из легированной стали можно принять ψ_σ =0,1, ψ_τ =0,05);

σ_m, τ_m – средние значения напряжений изгиба и кручения, МПа.

5. Выводы

Исходя из анализа имеющихся данных, можно подвести следующий итог: применение пильных дисков в качестве основного режущего инструмента откроет возможности для утилизации оставшихся 40% древесных отходов лесопильного производства. Получаемое сырье, а именно опилки, может быть успешно использовано для изготовления пеллет. Эти топливные гранулы представляют собой весьма перспективную замену традиционным видам топлива, таким как дизельное топливо, уголь и дрова, демонстрируя конкурентоспособность на рынке. Учитывая стремительное развитие строительства загородных домов, наблюдается постоянный рост потребности в опилках для производства пеллет, что, в свою очередь, создает благоприятные условия и гарантирует стабильное и процветающее будущее для соответствующего бизнес-направления.

Список литературы

1. Fokin, S. On technical means of obtaining wood chips, as a way to increase soil fertility / S. Fokin, D. Eskov, P. Medvedeva, O. Shportko, O. Fomina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 723. – Issue 4. – 042025. – DOI: 10.1088/1755-1315/723/4/042025. – EDN: BWAKIW.
2. Князев, А.В. Совершенствование конструкции рубильной машины с использованием пильных дисков в качестве режущего рабочего органа для измельчения отходов лесопиления / А.В. Князев, Н.А. Бородин //Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. –2018. – Т. 6. – № 4 (40). – С. 170-172.
3. Laitila, J. Selection of a chipper technology for small-scale operations – a Finnish case / J. Laitila, R. Prinz, L. Sikanen // Journal of Forest Science. – 2019. – Vol. 65. – Issue 4. – P. 121-133. – DOI: 10.17221/26/2019-JFS.
4. Spinelli, R. Trends and perspectives in the design of mobile wood chippers / R. Spinelli, E. Marchi // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2021. – Vol. 42. – Issue 1. – P. 25-38. – DOI: 10.5552/crojfe.2021.787. – EDN: EAGYZD.
5. Гончаров, В.Н. Основы теории и расчета оборудования для подготовки бумажной массы, Часть 2. Рубительные машины: учебное пособие / В.Н. Гончаров, А.А. Гаузе, М.В. Аввакумов. – СПб: СПбГТУРП, 2012. – 50 с.
6. Малюков, С.В. Анализ конструкций и режимов работы дисковых рубительных машин / С.В. Малюков, А.А. Аксенов, М.А. Малюкова // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 4 (44). – С. 139-149. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/12. – EDN: XKNNUP.
7. Reczulski, M. Optimization of cutting speed and clearance angle in the disc chipper / M. Reczulski // Wood Research. – 2021. – Vol. 65. – Issue 6. – P. 951-962. – DOI: 10.37763/WR.1336-4561/65.6.951962. – EDN: EMOOLI.