

И.В. Хрусталева

К ВОПРОСУ О ПРОЕКТИРОВАНИИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОКАТКИ ДРЕВЕСИНЫ

Введение. Одной из проблем лесного комплекса является неэффективное использование лесных ресурсов. В связи с истощением лесосырьевой базы весьма актуальной является проблема получения пригодной для использования продукции из тонкомерной древесины мягколиственных пород. Одним из вариантов технологий использования тонкомерной древесины является получение бруса из круглых заготовок путем деформирования. При этом уменьшаются отходы, возможным является получение высоких физико-механических свойств древесины. Установка может быть сравнительно проста, иметь малую материало- и энергоемкость. Процесс пластического (необратимого) деформирования при преобразовании круглого сечения в прямоугольное возможен за счет двух типов технологического воздействия: прямого прессования или прокатки в валках.

Одним из прогрессивных методов получения деловой древесины требуемых размеров и качества является прокатка. Несмотря на то, что метод известен давно [Боровиков и др., 1989], он до сих пор мало изучен. Была поставлена задача разработки прокатной установки для получения заготовок достаточно больших размеров (100 × 100 × 2000).

Применение теории прокатки [Рокотян, 1981; Смирнов, 1973] затруднительно, поскольку данные теории базируются на представлении материала как изотропного и пластического.

В работах [Казакевич, 1988; Грудев, 2001] проводится анализ напряженного анизотропного состояния волокнистых композиционных материалов. Однако на данном этапе разработки прокатной установки описанная методика для расчетов геометрических и кинематических параметров прокатки не применима, из-за отсутствия экспериментальных данных по древесине.

Цель работы. Проверка возможности использования прокатки для преобразования заготовки круглого сечения в прямоугольное, разработка методики определения усилий, действующих на валы установки в зависимости от степени уплотнения древесины.

Методика исследования. С целью проверки возможности использования прокатки была создана установка, которая представляет собой одно-клетьевой стан (рисунок). Валки 5, 6, 9 крепятся на уголках 1, 8 жестко, а валок 3 крепится в специальных щеках 2 и с их помощью устанавливается на уголках 1. Щеки имеют несколько пар крепежных отверстий, которые позволяют изменять расстояние между валами, для получения проката различного типоразмера.

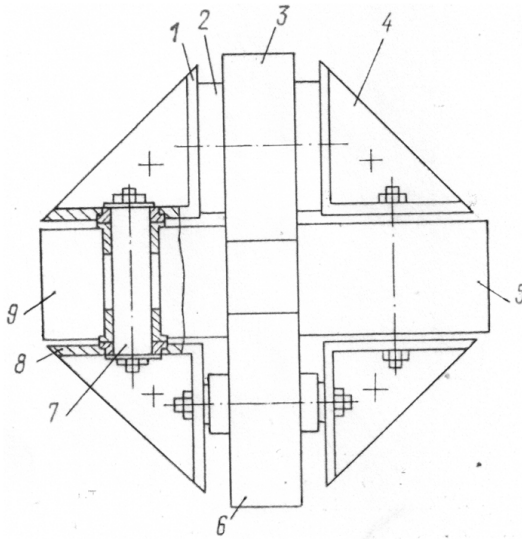


Схема экспериментальной установки.

1 – уголок; 2 – щека; 3 – валок; 4, 8 – уголок; 5, 6, 9 – валки; 7 – ось

Scheme of the experimental setup.

1 – corner; 2 – cheek; 3 – roll; 4, 8 – corner; 5, 6, 9 – rolls; 7 – axis

При проектировании возник ряд трудностей по определению кинематических и геометрических размеров, а также по определению силовых и прочностных характеристик. Оценка условия самозатягивания (при уменьшении размера с 100 до 70 мм) с коэффициентом трения $f \leq 0,2$ приводит к значительному увеличению (до 3000 мм) диаметра валков. Поэтому с целью уменьшения габаритных размеров установки была принята схема со свободно вращающимися валками с поджатием заготовки с какой-то осевой (тангенциальной) силой T . При этом возникает и действует на валки сила давления P .

При выводе формул для определения усилий использовался ряд допущений: гипотеза плоских сечений, выделенный элемент находится в плоском напряженном состоянии, не учитывается упругое восстановление деформации изделия и валков после снятия нагрузки, в первом приближении не учитывается наличие зон отставания и опережения, материал представляется как упруго-вязкая среда, характеристика материала $\sigma - \varepsilon$ аппроксимировалась кусочно-линейной функцией.

В качестве исходных данных использовались результаты [Боровиков и др., 1989].

Рассматривались случаи двух- и четырехвалковой клетки, а также напряженное состояние при наличии сил трения.

Окончательные выражения для случая с учетом сил трения и кусочно-линейной аппроксимации зависимости $\sigma - \varepsilon$ тремя участками для суммарной нормальной силы P и осевой силы T примут вид:

$$P = \frac{Ha}{8 \operatorname{tg} \alpha} \left[k_1 \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2 (2k_1 \varepsilon_1 + k_2 \varepsilon_2) + \varepsilon_3 (2k_1 \varepsilon_1 + 2k_2 \varepsilon_2 + k_3 \varepsilon_3) \right],$$

$$T = \frac{Ha}{4} A \left[k_1 \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2 (2k_1 \varepsilon_1 + k_2 \varepsilon_2) + \varepsilon_3 (2k_1 \varepsilon_1 + 2k_2 \varepsilon_2 + k_3 \varepsilon_3) \right],$$

где H, h – размеры заготовки до и после прокатки; a – ширина заготовки; k_i – коэффициент пропорциональности на i -м участке при кусочно-линейной аппроксимации зависимости $\sigma - \varepsilon$; $\varepsilon_i = h_i/H$ – относительная деформация (уменьшение) на i -м участке кусочно-линейной функции,

$$A = \frac{\operatorname{tg} \alpha + f}{\operatorname{tg} \alpha (1 - f \operatorname{tg} \alpha)};$$

α – угол захвата; f – коэффициент трения.

Приведенные зависимости позволяют определить основные силовые характеристики, действующие на установку в зависимости от степени уплотнения δ .

Предварительные расчеты показали, что в зависимости от степени уплотнения возникающие усилия достигают значительных значений (до 100 кН) при прокатке древесины диаметром 100 мм.

Это обстоятельство послужило основанием для проектирования и изготовления многоклетьевого устройства для проката.

В такой установке в каждой i -й клетки происходит какое-то уплотнение заготовки, суммарная степень уплотнения

$$\delta_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \delta_i,$$

где N – количество клеток; δ_i – степень уплотнения в i -й клетки (пластическая деформация), которая связана с полной деформацией ε , согласно Справочнику [Боровиков и др., 1989], зависимостью $\delta = (1 - k)\varepsilon$; k – коэффициент пропорциональности, связывающий упругую и полную деформации.

В общем виде при проектировании многоклетевой установки имеем целый ряд в какой-то степени независимых друг от друга параметров: скорость прокатки v , расстояние между клетями l_i , просвет между валками Δh_i , а также диаметры валков D_i .

Среди выходных параметров (показателей эффективности) для установки проката древесины можно выделить: осевую (тангенциальную) T и нормальную P силы, потребляемую мощность N_y , степень уплотнения и соответствующие физико-механические свойства древесины, качество поперхности и параметры, характеризующие форму изделия.

Для задачи оптимального проектирования выбор целевой функции достаточно сложен, так как трудно выделить наиболее важный показатель эффективности.

При условии выполнения требований к полной степени уплотнения δ_Σ рациональным будет значение степени уплотнения на каждой i -й ступени δ_i ($i = 1(1)n$, где n – количество ступеней), обеспечивающее минимальное значение действующих сил и, в частности, тангенциальной силы T .

Легко убедиться, что при некоторых допущениях, не отражающихся существенно на точности проектных расчетов, определение оптимальных значений δ_i^* может быть сделано с помощью методов линейного программирования. Уточнение оптимальных значений, в свою очередь, может быть произведено после определения экспериментальных зависимостей сил от ряда факторов.

Тангенциальная сила нелинейно зависит от степени уплотнения δ_i . Однако, если известно предварительное распределение δ_i по ступеням, то при незначительных отклонениях можно допустить, что величина T_i на каждой ступени прямо пропорциональна δ_i , т. е.

$$T_i = c_i \delta_i = \frac{\partial T_i}{\partial \delta_i} \delta_i,$$

где $c_i = \partial T_i / \partial \delta_i$ – коэффициент чувствительности, численно равный приращению силы на единицу деформации.

При этом, если зависимость T_i (δ) имеет нелинейный характер то коэффициенты c_i берутся как тангенсы касательных к кривой T_i (δ) в соответствующих точках δ_i или аппроксимирующей ее ломаной линии. Оконча-

тельно задача определения оптимальных значений степеней уплотнения по ступеням δ_i может быть сформулирована в следующем виде: найти значения δ_i^* , образующих вектор управляемых переменных $\Delta_{(n)}^* = \langle \delta_1^*, \delta_2^*, \dots, \delta_n^* \rangle$, доставляющих минимум целевой функции $T_\Sigma = f(c_i, \delta_i)$ при заданных ограничениях, образующих допустимую область Ω_n , т. е.

$$T_\Sigma = \min \sum_{i=1}^n T_i(c_i, \delta_i^*), \quad \Delta_{(n)}^* \in \Omega_n.$$

С учетом сделанных выше допущений, целевая функция будет иметь вид

$$T_\Sigma = \sum_{i=1}^n c_i \delta_i.$$

В свою очередь, функциональное ограничение записывается в виде очевидного соотношения:

$$\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n = \delta_\Sigma.$$

Кроме того, очевидно, что должны выполняться областные ограничения и условие неотрицательности вида

$$\delta_i \geq 0, \quad \delta_i \leq \delta_{\text{пр } i},$$

где $\delta_{\text{пр } i}$ – предельные значения деформаций ступени, определяемые из условия требуемого качества детали (отсутствие трещин и т. д.).

Поскольку при сделанных допущениях и целевая функция, и ограничения линейны, то задача поиска δ_i^* может быть решена с помощью методов линейного программирования.

Прежде, чем переходить к конкретному решению задачи, представим ее в стандартной форме. При этом очевидно, что целевая функция и ограничения ей соответствуют. Ограничения же требуют преобразования путем введения избыточных переменных s_i . Например, для любой ступени:

$$\delta_{\text{пр } i} - \delta_i \geq 0 \quad \text{или} \quad \delta_{\text{пр } i} - \delta_i + s_i = 0, \quad s_i \geq 0.$$

Тогда в стандартной форме задача будет сформулирована следующим образом:

$$\text{найти } \delta_i^*, \text{ обеспечивающее } \min T_\Sigma = \sum_{i=1}^n c_i \delta_i + \sum_{i=1}^n \alpha s_i;$$

$$\text{при ограничениях: } \sum_{i=1}^n \delta_i = \delta_\Sigma,$$

$$\delta_{\text{пр } i} - \delta_i + s_i = 0, \quad \delta_i, s_i \geq 0.$$

Данная задача легко решается с помощью стандартных программ на ЭВМ.

Выводы. При проектировании установки была дана оценка условия самозатягивания. Уменьшении размера с 100 до 70 мм с коэффициентом трения меньше 0,2 приводит к значительному увеличению (до 3000 мм) диаметра валков. С целью уменьшения габаритных размеров установки была принята схема со свободно вращающимися валками с поджатием заготовки с определенной осевой силой. Сделан вывод о необходимости использования многоклетевой установки.

Разработанная методика позволяет определять нормальную и тангенциальную силы, а также требуемую мощность привода установки в зависимости от требуемой степени уплотнения древесины. Сделан вывод о необходимости использования многоклетевой установки.

Разработана методика оптимального проектирования многоклетевой установки, обеспечивающая рациональное распределение степеней уплотнения по ступеням при минимальном усилии поджатия заготовки.

Библиографический список

Боровиков А.М., Уголев Б.Н. Справочник по древесине. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 294 с.

Грудев А.П. Теория прокатки. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 280 с.

Казакевич Г.С. Прогнозирование прочности и анизотропного состояния деформируемых конструкционных материалов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 180 с.

Рокотян С.Е. Теория прокатки и качество металла. М.: Metallurgy, 1981. 223 с.

Смирнов В.С. Теория обработки металлов давлением. М.: Metallurgy, 1973. 497 с.

References

Borovikov A.M., Ugolev B.N. Handbook of wood. M.: Forest industry, 1989. 294 p. (In Russ.)

Grudev A.P. Theory of rolling. M.: Internet Engineering, 2001. 280 p. (In Russ.)

Kazakevich G.S. Forecasting the strength and anisotropic state of deformable structural materials. L.: Publishing House of LSU, 1988. 180 p. (In Russ.)

Rokotyán S.E. The theory of rolling and the quality of metal. M.: Metallurgy, 1981. 223 p. (In Russ.)

Smirnov V.S. Theory of metal processing by pressure. M.: Metallurgy, 1973. 497 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 01.04.2022

Хрусталева И.В. К вопросу о проектировании установки для прокатки древесины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 212–219. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.212-219

Одним из видов технологий использования древесины мягколиственных пород может быть прокатка в валках. При этом уменьшаются отходы, возможно получение высоких физико-механических свойств древесины. Установка может быть сравнительно проста, иметь малую материал- и энергоёмкость. Метод прокатки древесины в валках мало изучен. Применение теории прокатки металлов затруднительно. Данные теории базируются на представлении материала как изотропного и пластического. При проектировании установки была дана оценка условия самозатягивания. При уменьшении размера с 100 мм до 70 мм с коэффициентом трения меньше 0,2 приводит к значительному увеличению (до 3000 мм) диаметра валков. С целью уменьшения габаритных размеров установки была принята схема со свободно вращающимися валками с поджатием заготовки с какой-то осевой силой. Выражения, полученные для определения суммарной и осевой силы, показали, что в зависимости от степени уплотнения возникающие усилия достигают значительных значений. Это обстоятельство послужило основанием для проектирования многоклетевой установки для прокатки. В общем виде при проектировании многоклетевой установки есть целый ряд в какой-то степени независимых параметров: скорость прокатки, расстояние между клетями, просвет между валками, диаметры валков. Среди показателей эффективности можно выделить: осевую (тангенциальную) и нормальную силы, потребляемую мощность, степень уплотнения и соответствующие физико-механические свойства древесины, качество поверхности и параметры, характеризующие форму изделия. Для задачи оптимального проектирования в качестве целевой функции можно принять зависимость тангенциальной силы от степени уплотнения. При сделанных допущениях целевая функция и ограничения линейны и задача поиска оптимальных значений степени уплотнения по ступеням может быть сделано с помощью методов линейного программирования. Разработанная методика позволяет определять нормальную и тангенциальную силы, а также требуемую мощность привода установки в зависимости от требуемой степени уплотнения древесины. Разработана методика оптимального проектирования многоклетевой установки, обеспечивающей рациональное распределение степеней уплотнения по ступеням при минимальном усилии поджатия заготовки.

Ключевые слова: древесина, прокатка, валки, степень уплотнения, тангенциальная сила, нормальная сила.

Khrustaleva I.V. On the design of a wood rolling machine. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoi Akademii*, 2022, iss. 239, pp. 212–219 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.239.212-219

One of the types of technologies for using soft-leaved wood can be rolling in rolls. At the same time, waste is reduced, it is possible to obtain high physical and mechanical properties of wood. The installation can be relatively simple, have a low material and energy consumption. The method of rolling wood in rolls is little studied. The

application of the theory of metal rolling is difficult. These theories are based on the representation of the material as isotropic and plastic. When designing the installation, an assessment of the self-tightening condition was given. When the size is reduced from 100 mm to 70 mm with a coefficient of friction less than 0.2, it leads to a significant increase (up to 3000 mm) in the diameter of the rolls. In order to reduce the overall dimensions of the installation, a scheme with freely rotating rolls with preloading of the workpiece with some axial force was adopted. The expressions obtained to determine the total and axial forces showed that, depending on the degree of compaction, the resulting forces reach significant values. This circumstance served as the basis for the design of a multicellular rolling plant. In general, when designing a multicellular installation, there are a number of somewhat independent parameters: the rolling speed, the distance between the stands, the clearance between the rolls, the diameters of the rolls. Among the efficiency indicators can be distinguished: axial (tangential) and normal forces, power consumption, degree of compaction and corresponding physical and mechanical properties of wood, surface quality and parameters characterizing the shape of the product. For the optimal design problem, the dependence of the tangential force on the degree of compaction can be taken as an objective function. With the assumptions made, the objective function and constraints are linear and the task of finding optimal values of the degree of compaction by steps can be done using linear programming methods. The developed technique makes it possible to determine the normal and tangential forces, as well as the required drive power of the installation, depending on the required degree of compaction of wood. A method of optimal design of a multicellular installation has been developed, which provides a rational distribution of degrees of compaction by stages with minimal preload force.

Keywords: wood, rolling, rolls, degree of compaction, tangential force, normal force.

ХРУСТАЛЕВА Инесса Владимировна – доцент кафедры прикладной механики и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID 0000-0003-1564-8048, SPIN-код: 8636-3860

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: innessachrustaliova@gmail.com

KHRUSTALEVA Inessa V. – Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics of the St.Petersburg State Forestry University. ORCID 0000-0003-1564-8048, SPIN code: 8636-3860

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: innessachrustaliova@gmail.com