

## ОСОБЕННОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ

И. Г. Грабар<sup>1</sup>, С. Г. Фришев<sup>2</sup>, С. Н. Кульман<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Житомирский НАУ, г. Житомир, Украина

<sup>2</sup>НУ биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина

<sup>3</sup>НПФ "Компания ИНТЕРДИЗАЙН", г. Житомир, Украина

На основании методов исследования реологического поведения древесины при ползучести предложен комбинированный способ фрезерования древесины. Способ отличается тем, что срезаемая стружка подвергается предварительной деформации сжатия. Предложена конструкция инструмента, которая осуществляет данный способ обработки древесины с учетом ее реологии. Приведены данные проведенных экспериментов, которые подтверждают теоретические модели реологического поведения древесины при фрезеровании. Использование способа позволяет повысить качество обрабатываемой поверхности. Способ требует дальнейших углубленных исследований.

**Ключевые слова:** реология древесины, ползучесть древесины, фрезерование древесины, кинематическая волнистость.

**Введение.** Механическая обработка древесины путем резания имеет как свои преимущества, так и недостатки. К преимуществам следует отнести простоту процесса формообразования, по сравнению, например, с профильным прессованием, для осуществления которого требуется специальный дорогостоящий формообразующий инструмент и сложное технологическое оборудование.

Особенность резания древесины как технологического процесса состоит в намеренном разрушении поверхностного ее слоя с целью получения обработанной поверхности нужной степени шероховатости.

При этом теория резания древесины рассматривает разрушение поверхностного слоя путем снятия стружки с целью получения качественной обработанной поверхности, как правило, только с точки зрения кинематики резания и неоднородности строения древесины (косослой и пр.). Древесина при этом рассматривается в упругом состоянии.

Однако, как известно, реологическое поведение древесины гораздо сложнее просто упругого поведения при сопротивлении нагрузке любого вида, – как постоянной, так и пульсирующей.

Поэтому учет реологического поведения древесины в процессе ее механической обработки, а именно, резания, может стать основой новых способов ее обработки.

На практике особенности реологии древесины используются не часто. Например, можно вспомнить процесс "прифуговки" многолезвийных фрезерных инструментов на станках фирмы Вайниг, позволяющий поднять величину подачи при обработке до 100 м/мин при сохранении качества поверхности.

Исследования реологии древесины при резании позволили учитывать упругое восстановление поверхности среза древесины (Manzhos, 1959).

**Цель исследования** – моделирование процесса (способа) резания с учетом реологических свойств древесины, и создание инструмента для его реализации.

**Методика исследования** базируется на результатах исследований ползучести древесины, которые показывают существенную зависимость характеристик

ползучести при различных видах приложения нагрузки и различных уровнях нагрузки. Таким образом, экспериментальные данные по кривым характеристик ползучести древесины указывают на необходимость учета нелинейной ползучести, а также влияния диаграммы мгновенного деформирования в уравнениях ползучести.

Для описания ползучести древесины предложено несколько интегральных уравнения линейной ползучести. Например, уравнение наследственной теории пластичности, предложенное А. Р. Ржаницыным к описанию ползучести древесины (Rzhanicyn, 1968)

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_0} + \frac{E_0 - H}{E_0^2 n} \int_0^t \sigma(\tau) e^{-\frac{H(t-\tau)}{E_0 n}} d\tau, \quad (1)$$

где:  $E_0$  – мгновенный модуль упругости ( $E_0 = 1,48 \cdot 10^4$  МПа);  $H$  – длительный модуль упругости, который принимает значения  $H = (0,6 \div 0,75) E_0$ ;  $n$  – время релаксации, зависимости от вида напряженного состояния.

**Результаты исследования.** Рассмотрим инверсную схему резания при цилиндрическом фрезеровании в виде неподвижной заготовки и движущейся силы резания вдоль балки на упругом основании. Если допустить, что нагрузка (т. е. сила резания), оставаясь постоянной по величине, движется с постоянной скоростью  $v$  вдоль балки на упругом основании (т.е. поверхностного слоя обрабатываемой заготовки), то и все деформации будут передвигаться в сторону движения нагрузки с той же скоростью  $v$  (рис.). Тогда можно считать, что прогибы  $u$  и реакции оснований  $P$  являются функциями ( $z - vt$ ) и при сохранении постоянным значения этого аргумента не будут изменять свою величину.

Согласно математическому описанию данной модели, воздействия подвижной нагрузки на балку на упругом основании получим, что максимальное значение деформации сжатия будет достигаться не под нагрузкой, а несколько позади нее. При этом производится работа сил, вызывающих движение, которая выражается разницей площадей петель гистерезиса, возникающих на диаграмме зависимости напряжений от де-

формаций в балке и основании, ввиду переменной нагрузки и разгрузки элементарных объемов материала.

Таким образом, при воздействии предварительной сжимающей нагрузки на поверхностный слой обрабатываемой заготовки, максимальное значение деформации поверхности резания будет отставать от напряжения, вызывающего эти деформации, на некоторый угол  $\varphi$ , величина которого определяется выражением

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{n\omega(E_0 - H)}{H + E_0 n^2 \omega^2}, \quad (2)$$

где:  $n$  – время релаксации древесины заготовки;  $\omega$  – частота изменения нагрузки;  $E_0$  – мгновенный модуль упругости материала заготовки;  $H$  – длительный модуль упругости;  $\varphi$  – угол сдвига фаз колебаний деформаций относительно фазы колебаний напряжений.

Максимальное значение угла сдвига фаз, равное

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{E_0 - H}{H + E_0} \text{ будет при } n\omega = H / E_0. \text{ Следовательно,}$$

зная из опыта значения  $E_0$ ,  $H$ ,  $n$ , можно определить величину  $\omega$ , при которой величина  $\varphi$  будет максимальной, или определить расстояние  $z$ , на котором нагрузка должна располагаться впереди режущего лезвия.

Предварительное воздействие нагрузки на срезаемый слой определенным усилием с последующим срезанием слоя ножом позволит уменьшить толщину срезанной стружки, уплотнить древесину в зоне резания, и тем самым повысить чистоту обработки, добиться условий обработки, приближающихся к установившимся, так как материал перед резанием будет уже предварительно деформирован на определенную величину. Уплотнение древесины в зоне резания уменьшит влияние неблагоприятных условий резания, например, уменьшит влияние направления волокон на чистоту обработки.

Таким образом, в процессе резания подпор волокон древесины происходит не за счет увеличения скорости резания, а за счет предварительного деформирования срезанного слоя. При продольном резании с образованием многоугольной стружки величина дополнительного подпора устраняет образование опережающей трещины. В этом случае поверхность резания формируется непосредственно лезвием, что позволит повысить качество обработки.

Описанная схема резания была реализована в конструкции инструмента, показанного на рис.

Инструмент для фрезерования древесины содержит цилиндрический корпус 1 с пазами 2. В пазы 2 свободно устанавливаются плоские ножи 3. С торцов корпуса 1 крепятся боковые фланцы 4, имеющие ограничительные буртики 5. Между пазами 2 для ножей 3 выполнены дополнительные пазы 6, в которых размещены цилиндрические ролики 7, концы 8 которых упрутся при вращении в ограничительные буртики 5 боковых фланцев 4.

Инструмент работает следующим образом. Обрабатываемая деталь 9 устанавливается, например, неподвижно. Инструменту задается вращение, обеспечивающее необходимую скорость резания. Опережающая деформация поверхностного слоя осуществляется роликом 7. По передней поверхности ножа 3 дви-

жется срезанная часть поверхностного слоя 10 (стружка).

Величина воздействия ролика 7 на обрабатываемый материал 9 может изменяться в зависимости от центробежной силы  $P$ , с которой ролик отжимается от оси вращения. В частном случае воздействия ролика может вызывать не только упругие деформации древесины, но и пластические (остаточные) ее деформации на некоторую величину, меньшую, чем глубина резания  $t$ , т.е. часть поверхностного слоя в этом случае будет иметь остаточные деформации. Таким образом, ролик совершает часть работы резания, т.е. работы, направленной на создание упругих напряжений в стружке. Следовательно, затраты энергии при резании в данном случае будут меньше.

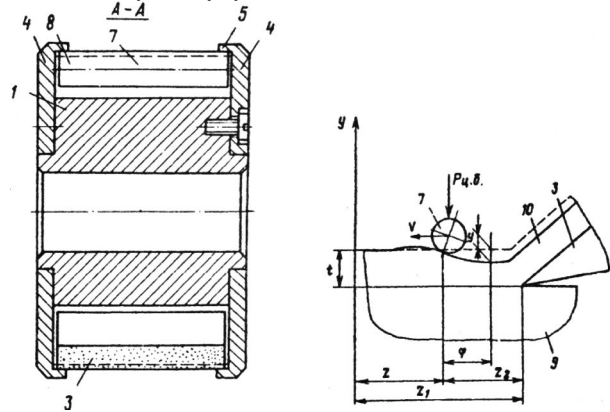


Рис. Схема резания и принципиальная схема инструмента для фрезерования древесины с учетом ее реологических свойств [3]

Испытания предложенной схемы резания проводились на станке фирмы Weing модели Profimat 17. Инструмент устанавливался на седьмом шпинделе для чистового фрезерования заготовок из дуба размерами 620×60×25 мм. Влажность 8...10 %. Фрезерование вдоль волокон. Число оборотов шпинделя  $N = 6000 \text{ мин}^{-1}$ . Продольная подача  $V = 30 \text{ м/мин}$ . Радиус резания  $R = 60 \text{ мм}$ . Переменными факторами в эксперименте выступали: количество режущих элементов  $Z = 2,4$ ; глубина резания  $t = 1,3 \text{ мм}$ .

Конструкция инструмента учитывала реологические особенности древесины в процессе фрезерования. Так, расстояние между точкой приложения нагрузки и режущим лезвием было рассчитано с учетом величины  $\varphi$  по формуле (2). Составило с учетом режимов резания и конструкции инструмента

$$\begin{aligned} Z_2 &= R \sin(\varphi) = \\ &= 70 \cdot \sin \left( \arctg \left( \frac{0,001 \cdot 600 \cdot (14800 - 8880)}{8880 + 14800 \cdot 0,001^2 \cdot 600^2} \right) \right) = 17,14 \text{ мм} \end{aligned}$$

В качестве целевой функции была принята величина кинематической волнистости обработанной поверхности, определяемая согласно ГОСТ 7016-2013 (Изделия из древесины и древесных материалов. Параметры шероховатости поверхности) как регулярно повторяющиеся, близкие по размерам неровности, имеющие форму траектории лезвия реза в виде волн.

Высота волнистости, замеренная после обработки, сравнивалась с высотой волны, рассчитанной согласно кинематической схеме резания по формуле

$$h = R - \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - \left(\frac{L}{Z}\right)^2}, \quad (3)$$

где:  $R$  – радиус резания, мм;  $L$  – расстояние между вершинами волн, мм;  $Z$  – число зубьев фрезы.

Было проведено две серии экспериментов: с деформируемыми роликами и без деформирующих роликов. Результаты экспериментов представлены в таблице.

**Табл. Условия проведения и результаты экспериментов при фрезеровании древесины с учетом ее реологических свойств**

№ з/п	Постоянный фактор		Переменные факторы		Результаты экспериментов			
			глубина резания $t$ , мм	число зубьев, $Z$	длина кинематической волнистости $L$ , мм		высота кинематической волнистости $h$ , мкм	
					теория	факт	по формуле (3)	факт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	N = 6000 об/мин U = 30 м/мин Радиус резания R = 60 мм	Фреза без роликов	1	2	2,5	5,1	13,02	53
2				4	1,25	2,4	3,3	14
3			3	2	2,5	5,3	13,02	56
4				4	1,25	2,7	3,3	16
5		Фреза с роликами	1	2	2,5	2,6	13,02	14
6				4	1,25	1,3	3,3	4
7			3	2	2,5	2,7	13,02	15
8				4	1,25	1,4	3,3	4

Анализ результатов испытаний, представленных в табл., позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Высота кинематических неровностей при фрезеровании с предварительным деформированием срезаемой стружки уменьшается более чем в 1,5...2 раза в зависимости от режимов резания и конструкции инструмента.
2. Обработанная поверхность не имеет характерных для обычного фрезерования мшистости и ворсистости, что позволяет уменьшить количество последующих

технологических переходов, в частности предварительного шлифования обработанной поверхности.

**Перечень использованных источников**

Manzhos, F. M. (1959). *Tochnost mexanicheskoy obrabotki drevesiny*. Moscow: Goslesbumizdat, p. 265. [in Russian].  
 Rzhancyn, A. R. (1968). *Teoriya polzuchesti*. Moscow: Strojizdat, p. 418. [in Russian].

*I. G. Grabar, S. G. Fryshev, S. M. Kulman*

**ОСОБЛИВОСТІ РЕОЛОГІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ДЕРЕВИНИ ПІД ЧАС ФРЕЗЕРУВАННЯ**

На підставі методів дослідження реологічної поведінки деревини під час повзучості запропоновано комбінований спосіб фрезерування деревини. Спосіб відрізняється тим, що стружка піддається попередній деформації стиснення. Запропоновано конструкцію інструмента, яка здійснює цей спосіб оброблення деревини з урахуванням її реології. Наведено дані проведених експериментів, які підтверджують теоретичні моделі реологічної поведінки деревини під час фрезерування. Використання способу дає змогу підвищити якість обробленої поверхні. Спосіб вимагає подальших поглиблених досліджень.

**Ключові слова:** реологія деревини, повзучість деревини, фрезерування деревини, кінематична хвилястість.

*I. G. Grabar, S. G. Fryshev, S. M. Kulman*

**SOME FEATURES OF RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF WOOD AT MILLING**

Keeping the rheological behavior of wood in the process of machining, namely cutting can form the basis of new ways of treating it. In practice, rheology characteristics of wood are not often used. Consequently, we aim at studying simulation process (method) based on rheological properties of wood and provide a tool for its implementation. We applied some integral equations of the linear creep proposed to describe the creep of wood such as the equation of hereditary plasticity theory proposed by AR Rzhancyn to describe creep wood. The results obtained are as follows. Firstly, under the influence of pre-compressive stress on the surface layer of the workpiece, the maximum value of the deformation of cut surface will keep the strain causing the deformation at an angle  $\varphi$ . Secondly, preliminary impact load on cut layer of a certain force, followed by cutting bed knife will reduce the thickness of cut chips sealed timber in the cutting area and thereby increase the purity of machining, to achieve processing conditions approaching steady, since the material before cutting is already pre deformed on certain amount. Seal timber in the cutting zone will reduce the adverse effect of cutting conditions, for example, reduce the effect of treatment on the fiber direction purity. Thus, in the process of cutting the wood fibers backwater does not occur due to increased cutting speed and a preliminary deformation due to the shear layer. Tool design takes into account the rheological characteristics of wood in the process of milling. Since the distance between the point of load application and the cutting edge was calculated value  $\varphi$  given by formula. Two series of experiments with the deforming rollers and the rollers without deforming were conducted. Analysis of the test results leads to the following conclusions. The height of the kinematic roughness when machining with pre-deformation of cut chips is reduced by more than 1.5... 2 times, depending on the cutting conditions and tool design. The treated surface is not typical for ordinary milling mossiness and hairiness, which reduces the number of subsequent technological transitions, in particular the pre-grinding of the treated surface.

**Keywords:** rheology; creep of wood; cut surface; sealed timber; adverse effect.

**Інформація про авторів:**

**И. Г. Грабар**, д-р техн. наук, професор, Житомирський НАУ, г. Житомир, Україна. **E-mail:** ivan-grabar@ Rambler.ru  
**С. Г. Фришев**, д-р техн. наук професор, НУ біоресурсов и природопользования України, г. Київ, Україна.  
**С. Н. Кульман**, канд. техн. наук, директор, НПФ "Компанія ІНТЕРДИЗАЙН", г. Житомир, Україна. interdesign@ukr.net