

УДК 674.05:621.914.1

В. Н. Гаранин, Д. Л. Болочко

Белорусский государственный технологический университет

**ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА**

В представленной работе уделено внимание разработке модели, позволяющей обосновать применение высоких скоростей резания древесины и древесных материалов, которые используются в современном оборудовании.

Предлагаемая модель основана на взаимодействии ножа с анизотропным материалом с целью упрощения работ по нахождению оптимальных скоростей взаимодействия инструмента с древесиной по критерию качества деления материала.

В представленной работе особое внимание уделяется скорости распространения напряжений сжатия в анизотропном материале, позволяющей в упрощенном виде определить работу на сжатие материала в зоне резания. Предлагаемая модель дает возможность определить в том числе и для изотропного материала требуемые оптимальные скорости взаимодействия режущего лезвийного инструмента с обрабатываемым материалом. Использование слишком высоких скоростей будет приводить к увеличению затрат мощности, не связанных с процессом деления материала, а использование слишком малых скоростей – к чрезмерной деформации материала, которая может привести к возникновению дефектов обработки.

Таким образом, в работе делается обоснование необходимых минимальных скоростей резания при обработке различных материалов, обладающих определенными физико-механическими свойствами, что является важным при исследовании деления новых материалов в деревообработке.

Ключевые слова: резание, скорость, древесина, напряжение, качество, деформация.

V. N. Garanin, D. L. Bolochko

Belarusian State Technological University

INCREASING THE CUTTING SPEED DURING WOOD BOOSTER MILLING

In the present work, attention is paid to the development of a model that allows us to substantiate the use of high cutting speeds of wood and wood materials, which are used in modern equipment.

The proposed model is based on the interaction of the knife with an anisotropic material in order to simplify the work on finding the optimal interaction rates of the tool with wood by the criterion of the quality of the division of the material.

In the present work, special attention is paid to the speed of propagation of compressive stresses in an anisotropic material, which makes it possible to determine in a simplified form the work on compressing the material in the cutting zone. The proposed makes it possible to determine, including for an isotropic material, the required optimal interaction speeds of the cutting blade tool with the processed material. Using too high speeds will lead to an increase in power costs not related to the material division process, and using too low speeds will lead to excessive deformation of the material, which can lead to processing defects.

Thus, the study substantiates the necessary minimum cutting speeds when processing various materials with certain physical and mechanical properties, which is important in the study of fission of new materials in woodworking.

Key words: cutting, speed, wood, stress, quality, deformation.

Введение. Резание древесины, как изотропного материала, связано с необходимостью использования высоких скоростей резания, применение которых ведет к высоким затратам энергии и росту рисков получения травм. Применение в промышленности новых материалов на основе древесины требует использования новых режимов и нового инструмента для работы. В частности, обоснование скоростей резания при обработке новых материалов на основе древесины является важной задачей, позволяющей

оптимизировать процесс резания и тем самым получить требуемое качество обработки с минимальными затратами энергии на резание.

Таким образом, целью представленной работы является разработка упрощенной модели процесса деления материала сжимающими напряжениями, позволяющей оценить влияние и выбрать оптимальную скорость взаимодействия лезвийного инструмента с обрабатываемым материалом по критерию обеспечения качества резания.

Основная часть. При обработке древесины различными видами инструмента в настоящее время используются разные режимы резания. Для сравнения ниже в таблице приведем кинематические параметры обработки древесины различными видами обработки [1].

Механическая обработка любого материала связана с созданием необходимых разрушающих напряжений в зоне резания. Для этой цели при обработке древесины используется лезвийный инструмент, режущий элемент которого при резании концентрирует на лезвии нужное напряжение взаимодействия при резании на дуге контакта.

Обработка материалов с низкими параметрами жесткости в данном взаимодействии с инструментом ведет к трудностям, связанным с возникновением деформаций, которые не способствуют концентрации напряжений, а наоборот – к их рассредоточению, приводящему к суммарному увеличению сил, необходимых для обеспечения процесса деления материала в зоне резания (рис. 1).

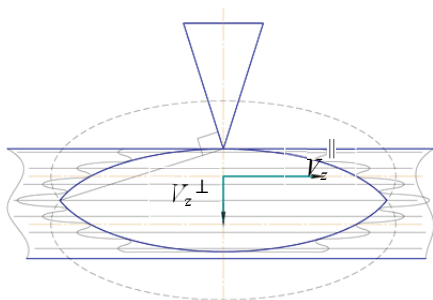


Рис. 1. Распределение напряжений при воздействии ножа на древесину

В данной ситуации обрабатываемый материал необходимо «замораживать», т. е. предпринимать меры по снижению деформирования во время деления.

Способ «замораживания» при обработке древесины обеспечивается благодаря использованию высоких скоростей резания, не позволяющих материалу успеть изменить свои геометрические параметры в зоне резания. В таком случае имеет место в зоне резания удар, который и оказывает основное влияние на выбор материала лезвия инструмента. С точки зрения

энергии, удар следует рассматривать как процесс рассредоточения кинетической энергии ударяемого тела между взаимодействующими объектами.

Рассмотрим более простую модель создания напряжений сжатия у материала с анизотропными свойствами (рис. 2). При этом введем предположения, что режущая кромка является абсолютно острой (радиус округления равен нулю), а плоскости ножа являются абсолютно гладкими (коэффициент трения древесины о поверхности равен нулю). Процесс резания приобретает форму распространения трещины [2].

Работа на сжатие материала A , Дж, в зоне резания будет выражаться следующей зависимостью согласно [3]:

$$dA = \frac{\sigma^2}{2E} dV, \quad (1)$$

где σ – напряжение в зоне V , Па; E – модуль упругости, Па; V – объем материала в напряженном состоянии, м^3 .

Объем материала, который подвергается воздействию сжимающих напряжений, будет зависеть от скорости распространения напряжения сжатия, которую, в свою очередь, можно приравнять к скорости звука в материале. На основании рис. 2, a объем материала в напряженном состоянии V , м^3 , будет выражаться зависимостью (2):

$$V = \int_0^{x_m} B(\pi - \beta)x dx = \frac{B(\pi - \beta)X_m^2}{2}, \quad (2)$$

где B – ширина ножа, мм; β – угол заострения, град.; x – координата распространения волны сжатия в материале по оси x , мм; X_m – координата деформации слоя, мм.

Переводя выше представленную модель на процесс резания со стружкообразованием (рис. 2, b), зависимость (2) можно преобразовать в следующий вид:

$$V = \int_0^{x_m} B\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right)x dx = \frac{B(\pi/2 + \gamma)X_m^2}{2}, \quad (3)$$

где γ – передний угол, град.

Скорости при обработке древесины лезвийным инструментом

| Вид обработки | Скорость резания V_p , м/с | Скорость подачи V_s , м/мин | Частота вращения n , мин^{-1} |
|---------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---|
| Пиление рамными пилами | 3–8 | 4–20 | 200–800 |
| Пиление ленточными пилами | 30–50 | 1–120 | 1000–2000 |
| Пиление дисковыми пилами | 50–120 | 1–150 | 3000–4500 |
| Фрезерование | 20–50 | 8–150 | 3000–24 000 |
| Сверление | 1–12 | 1–5 | 2000–6000 |

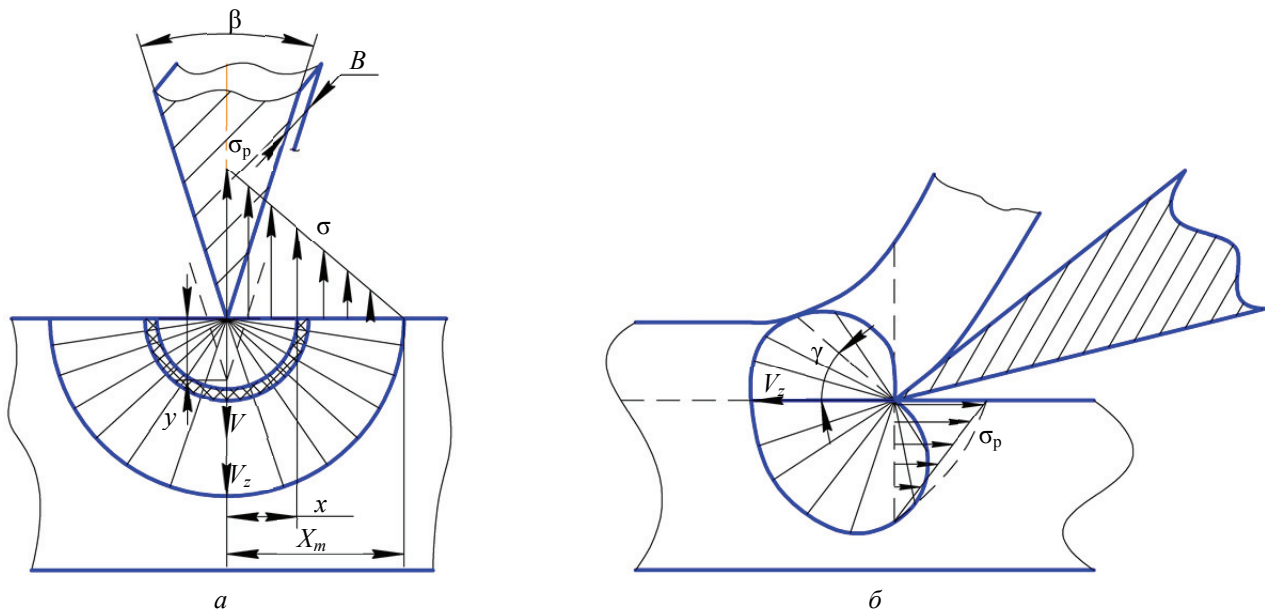


Рис. 2. Распределение напряжения сжатия у материала с анизотропными свойствами: а – без стружкообразования; б – со стружкообразованием

С целью рассмотрения статического характера распределения напряжений в материале, пропорционально зависящего от деформации, используем для дальнейших расчетов следующую линейную зависимость роста напряжений сжатия σ , Па, в материале (рис. 2, а):

$$\sigma = \sigma_p \left(1 - \frac{x}{X_m} \right), \quad (4)$$

где σ_p – разрушающее напряжение сжатия материала, Па.

Подставляя зависимость (2) в (1), получим следующую закономерность:

$$A = \frac{\sigma_p^2 B (\pi - \beta)}{48 E^2} X_m^2. \quad (5)$$

В данной ситуации условную длину распространения волны сжимающих напряжений можно представить в виде следующей схемы (рис. 3).

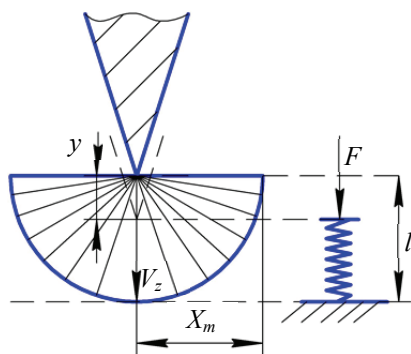


Рис. 3. Схема распространения волны сжимающих напряжений

Длина деформируемого слоя l , мм, определяется по зависимости

$$l = X_m = V_z t, \quad (6)$$

где V_z – скорость звука в материале, м/с; t – время распространения напряжения, с.

$$t = \frac{y}{V_p} = \frac{\sigma_p l}{E V_p}, \quad (7)$$

где y – координата распространения волны сжатия по оси y , мм; V_p – скорость резания, м/с.

Таким образом, подставляя данные (6) в (7) и сокращая время воздействия на материал со стороны инструмента, можно получить скорость воздействия на анизотропный материал V_p , м/с, лезвием инструмента, при которой будет обеспечена оптимальная скорость резания с точки зрения градиента сжимающих напряжений:

$$V_p = \frac{V_z \sigma_p}{E}. \quad (8)$$

Превышение данной скорости (не рассматривая скорости близкие к скоростям звука) будет приводить к увеличению затрат мощности, не связанных с процессом деления материала, а использование меньших скоростей – к чрезмерной деформации материала, которая может привести к возникновению дефектов обработки.

Например, рассмотрим в некотором приближении древесину как анизотропный материал с характеристиками [4]:

- разрушающее напряжение сжатия сосны вдоль волокон – $\sigma_p = 46$ МПа;
- модуль упругости – $E = 11,3$ ГПа;
- плотность сосны ($W = 12\%$) – $\rho = 500$ кг/м³.

Скорость распространения звука в материале V_z , м/с, согласно [5] находим по зависимости

$$V_z = \sqrt{\frac{1,35E}{\rho}}, \quad (9)$$

$$V_z = \sqrt{\frac{1,35 \cdot 11,3 \cdot 10^9}{500}} = 5524 \text{ м/с.}$$

Причем, если рассмотреть характеристики материала поперек волокон согласно [2], скорость распространения звука составит 1560–2167 м/с (в зависимости от направления радиального или тангенциального), т. е. при $\sigma_p = 5,1$ МПа, $E = 1,74$ ГПа.

Скорость резания V_p , м/с, необходимую для создания волны напряжений в материале, не зависящей от времени взаимодействия, используя зависимость (8), составит:

– вдоль волокон

$$V_p = \frac{5524 \cdot 46 \cdot 10^6}{11,3 \cdot 10^9} = 22,5 \text{ м/с;}$$

– поперек волокон

$$V_p = \frac{2167 \cdot 5,1 \cdot 10^6}{1,74 \cdot 10^9} = 6,35 \text{ м/с.}$$

Исходя из полученных результатов, при обработке древесины фрезерованием взаимодействие ножа с материалом происходит не в чистом виде (вдоль или поперек). По этой причине необходимо руководствоваться максимальными скоростями, полученными при исследовании направлений взаимодействия. В нашем случае это скорость 22,5 м/с.

Таким образом, представленная выше закономерность (8) в определенном приближении позволяет оценить необходимые скорости для взаимодействия лезвийного инструмента с обрабатываемым материалом, который предполагается обрабатывать впервые. Полученные числовые значения подтверждают те оптимальные скорости резания, которые рекомендуются исследователями, которые занимались изучением процесса резания древесины [6–8], в том числе данным, представленным в таблице.

Использование высоких скоростей резания древесины и древесных материалов в таком случае является необходимым фактором создания разрушающих напряжений в зоне резания при лезвийной обработке.

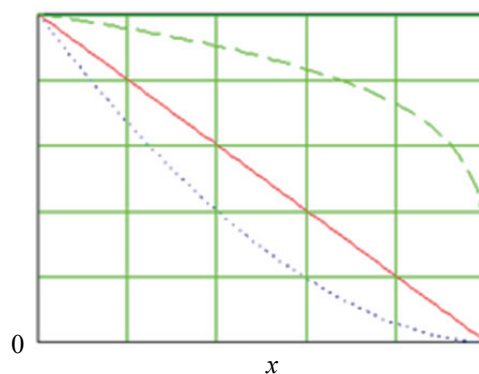
Однако представленная модель на основании зависимости (8) не отражает влияние скорости взаимодействия на характер распределе-

ния напряжений сжатия. Напряжения носят статический характер, характерный в большей степени для мало скоростных процессов резания материалов.

Предложим внести изменения в зависимость (4) включением показателя степени, характеризующей нелинейность зависимости напряжений сжатия в материалы от зоны вокруг режущей кромки. С учетом (8) зависимость (4) примет следующий вид:

$$\sigma = \sigma_p \left(1 - \frac{x}{X_m}\right)^{\frac{V}{V_p}} = \sigma_p \left(1 - \frac{x}{X_m}\right)^{\frac{VE}{V_z \sigma_p}}. \quad (10)$$

Таким образом, зависимость кривой напряжений от скорости резания V_p , м/с, будет иметь характер, представленный на рис. 4.



$$\sigma(V_p, x, X_m); \quad \sigma(V_p + 20, x, X_m); \quad \sigma(V_p - 20, x, X_m)$$

Рис. 4. Влияние скорости резания на напряжения сжатия

Работа на разрушение материала уже будет иметь следующий вид:

$$A = \frac{\sigma_p^2 B(\pi - \beta)}{4E^2} \int_0^{X_m} x \left(1 - \frac{x}{X_m}\right)^{\frac{2V}{V_p}} dx. \quad (11)$$

В представленных выше зависимостях основным неизвестным является параметр X_m , от величины которого зависит площадь распространения напряжений сжатия в материале. От величины этого параметра будет зависеть работа и мощность на резание. Данный параметр можно определить, сопоставляя работу на разрушение материала с формулой (9). Так, рассматривая результаты исследований [9], удельная работа (к ширине ножа) на деление сосны вдоль и поперек волокон (при устремлении угла резания к нулю) составит 7 мДж/мм. Проведенные исследования позволяют определить параметр X_m при скорости резания 2,5 м/с, т. е.

$X_m = 0,31$ мм, который показывает, что основные сжимающие напряжения (без учета влияния передней и задней поверхностей ножа) находятся около зоны резания на расстоянии 0,31 мм.

Зависимость работы на создание напряжений сжатия от скорости резания будет иметь вид, представленный на рис. 5.

Рассматривая влияние скорости резания согласно работе Любченко [10], увеличение скорости резания с 40–50 до 100 м/с может вызвать увеличение силы резания на 30–40%. Считается, что это приращение силы резания связано с преодолением сил инерции стружки, повышением прочностных показателей древесины в условиях больших скоростей нагружения, изменением условий трения древесины о лезвие и влиянием других факторов.

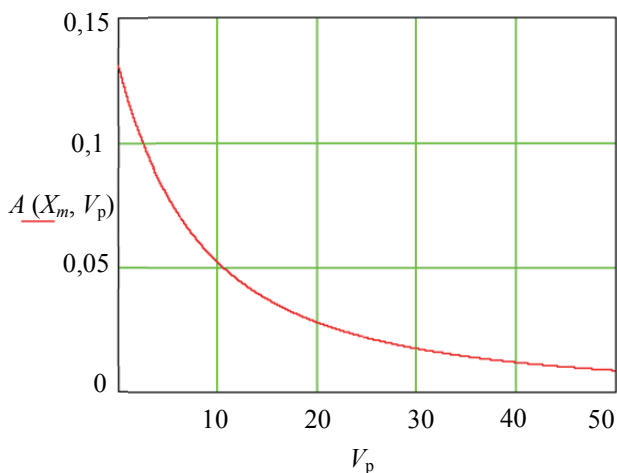


Рис. 5. Влияние скорости V_p на работу создания напряжений сжатия $A(X_m, V_p)$

Представленная в данной работе модель показывает, что с увеличением скорости резания работа на разрушение материала снижается из-за уменьшения объема деформируемого материала в зоне резания и утверждение Любченко об изменении прочностных показателей древесины не находит здесь объяснений.

В нашем случае следует обратить внимание на одно обстоятельство. С увеличением скорости резания увеличивается кривизна траектории напряжений сжатия, что приводит к увеличению градиента напряжений. В таких условиях наблюдается рост касательных напряжений в материале, что в условиях изотропности обрабатываемого материала (древесины) может приводить к дефектам обработки вдоль волокон. Этим обстоятельством в основном и объясняется необходимость выбора угла резания при обработке различных пород древесины с целью обеспечения качества обработки. А с учетом предлагаемой модели можно утвер-

ждать, что углы резания, используемые для обработки древесины, зависят не только от физико-механических свойств обрабатываемого материала, но и от скорости резания.

Рассмотрим работоспособность предлагаемой модели влияния скорости резания на энергетическую разрушения материала на результатах исследования мощностных характеристик процесса резания древесины.

Согласно [7] мощность, потребляемая на ускорение отхода стружки, превышает 20% от общей мощности резания при скорости резания 55,5 м/с. С увеличением скорости резания эта доля возрастает. Предполагается, что изменение скорости резания влияет на оценочные показатели резания через противоречиво действующие факторы (например, увеличиваются силы инерции стружки, но уменьшается коэффициент трения) и совокупный эффект при некоторых условиях резания может быть минимальным.

В практических расчетах сил влияние скорости резания учитывают поправочными множителями, найденными для конкретных процессов сложного резания по результатам экспериментов.

Качество обработки с увеличением скорости резания повышается. Положительное влияние увеличения скорости объясняется появлением «добавочного подпора» за счет силы инерции, который получают перерезаемые волокна древесины в дополнение к естественному сцеплению между ними. С появлением такого подпора волокна не успевают отклониться под давлением лезвия и перерезаются им раньше, чем нарушится связь их с соседними волокнами. В результате уменьшаются неровности разрушения на обработанной поверхности. Понятие подпора в данном случае рассматривается как фактор, позволяющий улучшить качество обработки.

В предлагаемой нами модели функцию подпора выполняет часть материала, которая находится рядом с зоной деления материала (из-за чего снижается риск неуправляемого разрушения материала вне зоны резания (рис. 2)), но с другой стороны находится под высокими касательными (из-за высокого градиента напряжений сжатия), что может привести к неконтролируемому разрушению древесины около зоны резания под действием касательных напряжений. В этом случае использование скоростей резания, близких к скорости V_p (зависимость (8)), является оптимальным по критерию качества обработки, поскольку при меньших и больших скоростях резания увеличивается риск неконтролируемого деления материала вне зоны резания.

Подставляя в зависимость (8) скорости резания с 0 до 50 м/с и принимая одинаковый путь, пройденный инструментом в материале, и X_m , с некоторым допущением будет наблюдаться следующий вид увеличения мощности на деление материала по отношению к скорости V_p , определяемый по зависимости

$$K = \frac{A(V)V}{A(V_p)V_p}. \quad (12)$$

На рис. 6 представлена кривая зависимости мощности P , кВт, от скорости резания V_p , м/с.

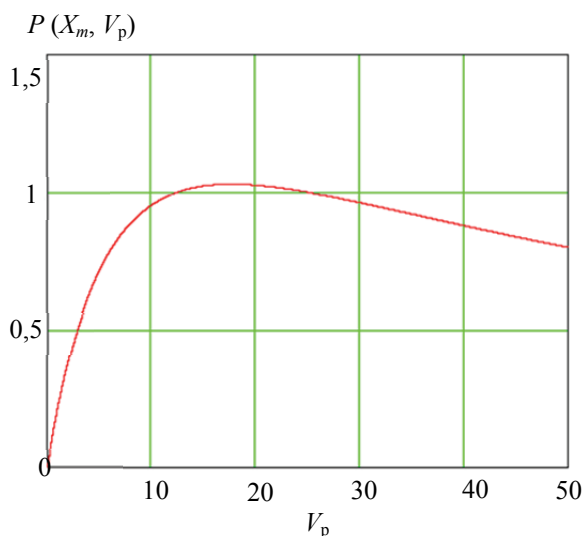


Рис. 6. Мощность создания напряжений сжатия $P(X_m, V_p)$ в зависимости от скорости резания V_p

Таким образом, предложенная в данной работе упрощенная модель показывает, что при превышении скорости резания V_p практически не наблюдается увеличение мощности на создание сжимающих напряжений в зоне резания. Требуемая макси-

мальная накачка энергии для создания необходимых напряжений сжатия в зоне резания происходит уже при скорости выше 10 м/с, что видно из графика на рис. 6, когда коэффициент достигает максимальных значений. Практические результаты роста мощности резания следует уже искать в увеличении затрат на выброс стружки, а также в затратах энергии в приводах резания оборудования.

Так, согласно полученным экспериментальным данным [11], затраты мощности на холостой ход привода механизма резания фрезерного оборудования растут с увеличением частот вращения узлов. Величина мощности холостого хода в быстроходных приводах достаточно существенна и растет с увеличением частоты вращения.

В представленных исследованиях затраты мощности на холостой ход при 9000 мин⁻¹ составили 18,4% от номинальной мощности электродвигателя. Указанные затраты энергии не имеют никакого отношения к работе на разрушение древесины. Это лишь затраты на обеспечение требуемых скоростей резания, которые при появлении нагрузки при обработке древесины увеличиваются.

Заключение. Разработанная модель позволяет определить оптимальную скорость резания материала в зависимости от его физико-механических свойств. Предлагаемая модель подходит для материалов, которые обрабатываются лезвийным инструментом и разрушаются сжимающими напряжениями, при этом обеспечивается минимальное влияние угловых характеристик инструмента на условия создания требуемых напряжений в зоне резания. Это обстоятельство позволяет путем выбора нужной скорости резания повысить универсальность дереворежущего инструмента и, как результат, его адаптивность к обрабатываемому материалу.

Список литературы

1. Амалицкий В. В., Санев В. И. Оборудование и инструмент деревообрабатывающих предприятий. М.: Экология, 1992. 480 с.
2. Николаева Е. А. Основы механики разрушения. Пермь: ПГТУ, 2010. 103 с.
3. Писаренко Г. С. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Научная мысль, 1988. 736 с.
4. Уголев Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Академия, 2004. 272 с.
5. Гаранин В. Н. Влияние вибрации лезвия инструмента на резание древесины и древесных материалов // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2007. Вып. XV. С. 239–242.
6. Бершадский А. Л. Резание древесины. Минск: Выш. шк., 1975. 303 с.
7. Кох П. П. Процессы механической обработки древесины / пер. с англ. и ред. канд. техн. наук В. В. Амалицкого. М.: Лесная пром-сть, 1969. 328 с.
8. Кряжев Н. А. Фрезерование древесины. М.: Лесная пром-сть, 1979. 200 с.
9. Гаранин В. Н. Результаты экспериментальных исследований, определяющие влияние угла атаки на силу и мощность процесса открытого резания древесины // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. 2008. Вып. XVI. С. 209–214.
10. Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов. М.: Лесная пром-сть, 1986. 296 с.

11. Гаранин В. Н. Исследование затрат мощности на холостой ход в приводе механизма резания станка Unimat 23 EL // Труды БГТУ. Сер. 2, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2011. № 2 (140). С. 241–244.

References

1. Amalitsky V. V., Sanev V. I. *Oborudovaniye i instrument derevoobrabatyvayushchikh predpriyatiy* [Equipment and tools for woodworking enterprises]. Moscow, Ekologiya Publ., 1992. 480 p.
2. Nikolaeva E. A. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* [Fundamentals of fracture mechanics]. Perm', PSTU Publ., 2010. 103 p.
3. Pisarenko G. S. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook of resistance to materials]. Kiev, Nauchnaya mysl' Publ., 1988. 736 p.
4. Ugolev B. N. *Drevesinovedeniye i lesnoye tovarovedeniye* [Wood science and forest commodity science]. Moscow, Academia Publ., 2004. 272 p.
5. Garanin V. N. The effect of vibration of the tool blade on cutting wood and wood materials. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2007, issue XV, pp. 239–242 (In Russian).
6. Bershadskiy A. L. *Rezaniye drevesiny* [Wood cutting]. Minsk, Vysheyschaya shkola Publ., 1975. 303 p.
7. Kokh P. P. *Protsessy mekhanicheskoy obrabotki drevesiny* [Processes of mechanical processing of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 328 p.
8. Kryazhev N. A. *Frezerovaniye drevesiny* [Wood milling]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1979. 200 p.
9. Garanin V. N. The results of experimental studies determining the influence of the angle on the strength and power of the process of open cutting of wood. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series II, Forestry and Woodworking Industry, 2008, issue XVI, pp. 209–214 (In Russian).
10. Lyubchenko V. I. *Rezaniye drevesiny i drevesnykh materialov* [Cutting wood and wood material]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 296 p.
11. Garanin V. N. Study of idle power consumption in the drive of the cutting mechanism of the Unimat 23 EL machine. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry and Woodworking Industry, 2011, pp. 241–244 (In Russian).

Информация об авторах

Гаранин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Болочко Дмитрий Леонидович – аспирант кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dima.bolochko.94@mail.ru

Information about the authors

Garanin Victor Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Bolochko Dmitry Leonidovich – PhD student, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dima.bolochko.94@mail.ru

Поступила 12.03.2020