

УДК 674.055:621.934:630.652

В. В. Чаевский¹, кандидат физико-математических наук, доцент;**А. К. Кулешов**², кандидат физико-математических наук;**П. В. Рудак**³, кандидат технических наук;**С. Барчик**⁴, доктор наук, профессор;**П. Коледа**⁴, кандидат технических наук, доцент¹Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, 220006 Минск, Республика Беларусь, chayeuski@belstu.by²Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, 220030 Минск, Республика Беларусь³Общество с ограниченной ответственностью «БалансКонтакт», ул. Смоленская, 15, к. 303б, 220088 Минск, Республика Беларусь⁴Технический университет в Зволене, ул. Студенческая, 26, 96053 Зволен, Словацкая Республика

ВЛИЯНИЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ЛЕЗВИЙ НОЖЕЙ НА РЕЖУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ФРЕЗЫ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ

В статье исследованы параметры резания экспериментального инструмента при плоском фрезеровании древесины дуба. Экспериментальным инструментом являлась торцевая фреза со сменными ножами. Ножи были изготовлены из быстрорежущей стали HS 18-0-1-5 (ISO 4957:1999). Два фрезерных ножа были дополнительно обработаны различными ионно-плазменными покрытиями методом катодно-ионной бомбардировки. На поверхность ножа *B* было осаждено многослойное AlTiCrN-покрытие, ножа *C* — MoC-покрытие. Результаты измерений показали, что мощность резания для торцевого фрезерования увеличивается с увеличением длины фрезерования для всех трех исследуемых ножей фрезы. Максимальная мощность резания была измерена для фрезы с ножом *C*. Установлено, что параметр шероховатости *Ra* поверхности древесины практически не изменяется для ножей *B* и *C* во всем диапазоне применяемых скоростей подачи, а также незначительно уменьшается (до 5 мкм) при увеличении длины фрезерования и практически не зависит от обработки лезвий ножей фрезы.

Ключевые слова: ножи фрезы; древесина; мощность резания; шероховатость; покрытия; метод КИБ.

Рис. 5. Табл. 2. Библиогр.: 14 назв.

V. V. Chayeuski¹, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor;

A. K. Kuleshov², PhD in Physical and Mathematical Sciences;

P. V. Rudak³, PhD in Engineering (Technical) Sciences; **Š. Barčík**⁴, PhD, Professor;

P. Koleda⁴, PhD, Doctor, Engineer

¹Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova Str.,

220006 Minsk, the Republic of Belarus, chayeuski@belstu.by

²Belarusian State University, 4, Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, the Republic of Belarus

³Limited Liability Company “BalansContact”, room 303b, 15, Smolenskaya Str., 220088 Minsk, the Republic of Belarus

⁴Technical University in Zvolen, 26 Študentská Str., Zvolen, 96053 Slovak Republic

THE EFFECT OF ION-PLASMA TREATMENT OF THE BLADES ON THE CUTTING ABILITY OF THE MILLING CUTTER DURING WOOD MILLING

The article studies the cutting parameters of the experimental tool with a flat milling of oak wood. The experimental tool was an end mill with interchangeable knives. The knives were made of high speed steel HS 18-0-1-5 (ISO 4957:1999). Two milling knives were additionally treated with different ion-plasma coatings by Arc-PVD method. Multilayer AlTiCrN coating was deposited on the surface of the knife *B*, MoC coating was deposited on the surface of the knife *C*. The results of measurements have shown that the cutting power for end milling is increased with the increase in the length of milling for all three investigated knives of cutter. Maximum cutting power was achieved with knife *C*. It was found out that the roughness parameter *Ra* of the wood surface practically does not change for knives *B* and *C* in the entire range of applied feed rates, and also slightly decreases (up to 5 μm) with an increase in the milling length and does not depend on the processing of the cutter knives edges.

Key words: knives of mill; wood; cutting power; roughness; coatings; Arc-PVD method.

Fig. 5. Table 2. Ref.: 14 titles.

Введение. Фрезы разнообразных конструкций являются основным признанным в мировой практике инструментом [1; 2]. Отличительной чертой этого инструмента считается широкое разнообразие размеров, профилей, типов, форм и сфер применения. Фрезерный инструмент, работая в условиях статических и динамических нагрузок, повышенных температур, что вызывает повышенный износ режущих элементов инструмента, обладает высокими эксплуатационными характеристиками и в полной мере обеспечивает возрастающие требования к точности и качеству обработки в условиях высокопроизводительного резания. Обработка материалов методом фрезерования является одной из наиболее распространенных технологических операций в деревоперерабатывающей промышленности и машиностроении.

Современное развитие технологии деревообработки требует применения износостойкого материала инструмента, выдерживающего большие динамические и вибрационные нагрузки в связи с использованием высоких скоростей резания. При использовании в качестве материала инструмента быстрорежущих сталей большое значение приобретает их теплостойкость.

Известно, что твердость материала лезвия ножа инструмента имеет важное значение для сохранения остроты режущей кромки лезвия. С другой стороны, кромка лезвия ножа не должна испытывать хрупкий излом или скалывание в процессе работы [3]. Поэтому для создания лучшей комбинации указанных двух характеристик применяют различные виды обработки материала лезвия (термообработка, шлифовка и т. п.) или ее поверхности (метод конденсации из газо-плазменной фазы с катодно-ионной бомбардировкой (далее — КИБ), магнитно-импульсная обработка и др.). Установлено, что одним из наиболее эффективных способов модификации поверхности стальных и твердосплавных лезвий ножей инструментов является метод КИБ, с помощью которого сформированные ионно-плазменные покрытия на базе нитридов тугоплавких металлов (Ti, Mo, Zr, Cr и др.) существенно увеличивают период стойкости инструмента [4; 5].

Кроме того, кинематические параметры резания существенно влияют на период стойкости лезвия ножа. При оптимальном подборе кинематических параметров резания увеличивается период стойкости ножа [6]. Шероховатость поверхности как одно из важнейших свойств конечных изделий из дерева во многом зависит от особенностей структуры древесины, направления волокон древесины и характеристик режущего инструмента [7].

Поэтому целью работы было исследование влияния КИБ обработки ножей торцевой фрезы на ее режущую способность.

Материалы и методы исследования. Для целей эксперимента были использованы образцы черенков дуба (*Quercus robur* L.) со средним возрастом 95 лет. Пиломатериалы толщиной 30 мм были получены в Техническом университете (ТУ) в Зволене (Словацкая Республика). Пиломатериал был просушен в печи до влажности 8 %. После сушки пиломатериал был разрезан на заготовки. Конечные размеры образцов: толщина — 25 мм, ширина — 100 мм, длина — 750 мм.

Плоское фрезерование образцов проводилось на деревообрабатывающем вертикальном фрезерном станке ZDS-2 производства Liptovské Strojárne (Словацкая Республика). Экспериментальные измерения мощности резания и шероховатости проводились на оборудовании, расположенном в опытно-конструкторских мастерских и лабораториях ТУ в Зволене.

В экспериментальных измерениях в качестве инструмента использовалась фрезерная головка производства Staton (Словацкая Республика), в которой устанавливалось два ножа (рисунок 1, а). Один нож был зажат только для динамической балансировки инструмента и не менялся во время экспериментальных измерений. Исследуемые ножи зажимались так, чтобы диаметр режущей окружности фрезерной головки $D = 125$ мм. Фрезерные ножи (см. рисунок 1, б) были изготовлены из инструментальной высоколегированной Cr-V-Mo-стали HS 18-0-2-5 (ISO 4957:2018) и отшлифованы. Они поочередно зажимались на фрезерной головке.

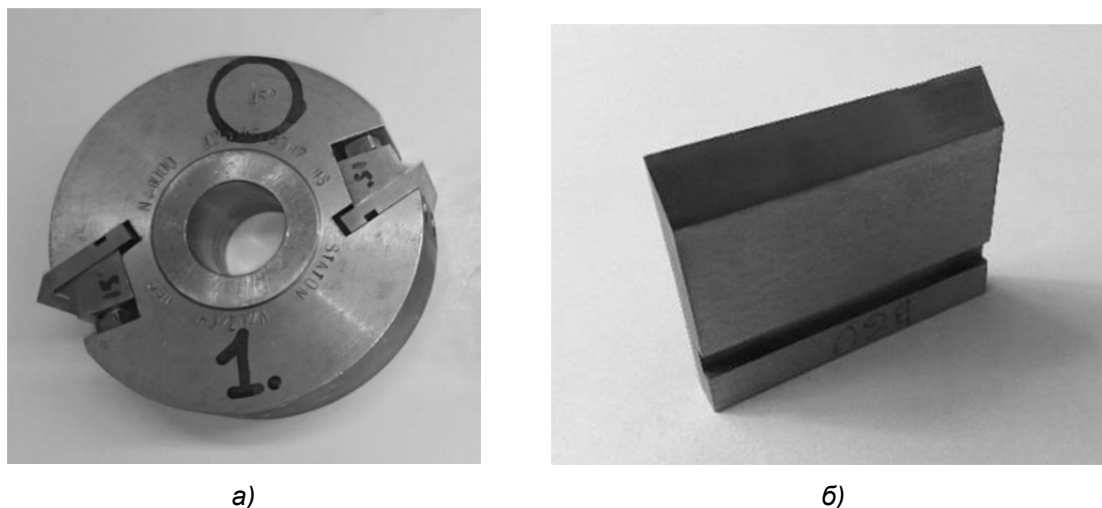


Рисунок 1. — Фрезерная головка (передний угол — 15°) (а) и сменный нож фрезы (б)

Фрезерные ножи *B* и *C* были дополнительно обработаны с помощью метода КИБ, в то время как нож *A* (контрольный) не подвергался дополнительной обработке поверхности. Процесс нанесения покрытия на нож *B* проводился в лаборатории государственного научного учреждения «Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси». Нанесение покрытия на нож *C* осуществлялось в лаборатории кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета совместно с кафедрой физики учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Твердость лезвий всех ножей *A*, *B* и *C* была измерена в ТУ в Зволене с помощью твердомера Škoda RB1 (с алмазным конусом 120°). Твердость лезвия ножа *A* составила 64 HRC. Характеристики покрытий ножей приведены в таблице 1. Технические и технологические параметры процесса фрезерования приведены в таблице 2.

Т а б л и ц а 1. — Характеристики покрытий ножей *B* и *C*

Показатель	Нож <i>B</i>	Нож <i>C</i>
Тип покрытия	AlTiCrN	MoC
Толщина покрытия	1...4 μm	1 μm
Температура осаждения	450...500 °C	600 °C
Средняя твердость покрытия	62 HRC	57 HRC

Т а б л и ц а 2. — Технические и технологические параметры процесса фрезерования

Параметр		Значение
Геометрия ножа, °	Угол задней грани γ	15
	Угол заточки лезвия β	45
	Угол клиренса α	30
	Угол резания δ	75
Скорость вращения n фрезы, об. / мин		3 000, 4 000, 5 000
Скорость подачи V_F , м / мин		6, 8, 10, 12, 14
Глубина резания a_e , мм		1, 2

Измерение мощности резания проводилось с помощью прибора, изготовленного на кафедре технологии производства и автоматизации ТУ в Зволене. Устройство состояло из преобразователя частоты, который регулировал скорость трехфазного асинхронного двигателя [8]. Другой частью устройства был синусоидальный фильтр, который сглаживал импульсное напряжение от инвертора таким образом, чтобы приблизиться к идеальной синусоидальной фазе со сдвигом фазы $\varphi = 120^\circ$. Преобразователь частоты измерял активную потребляемую мощность двигателя без потерь (мощность холостого хода) P_{c0} и оценивал общую мощность двигателя P_c по току I_c , напряжению U_c и КПД двигателя. Мощность резания P вычислялась по формуле

$$P = P_c - P_{c0}, \quad (1)$$

где $P_c = I_c U_c \cos\varphi$.

Для определения качества шероховатости поверхности был использован бесконтактный лазерный профилометр (LPM-4), работающий по оптическому методу [9]. В этом методе лазерное излучение (лазерный диод) проецируется под углом 45° к измеряемой поверхности и затем сканируется с помощью ЖК-камеры (Marlin F131B). Лазерный луч создает след света на контролируемой поверхности, который сканируется и после ЖК-камеры преобразуется в двоичную форму изображения.

Результаты исследования и их обсуждение. Установлено, что скорость подачи V_F и состав покрытия ножа влияют на мощность резания P фрезы. На рисунке 2 показан анализ изменения мощности резания в зависимости от скорости подачи.

Для каждого образца продемонстрирована зависимость снижения мощности резания от снижения скорости подачи в интервале значений скорости подачи $V_F = 6 \dots 11$ м / мин, особенно при малых значениях скорости подачи ($V_F = 6 \dots 8$ м / мин). Это происходит, потому что уменьшение скорости подачи уменьшает количество материала (стружки древесины), удаляемого за один раз.

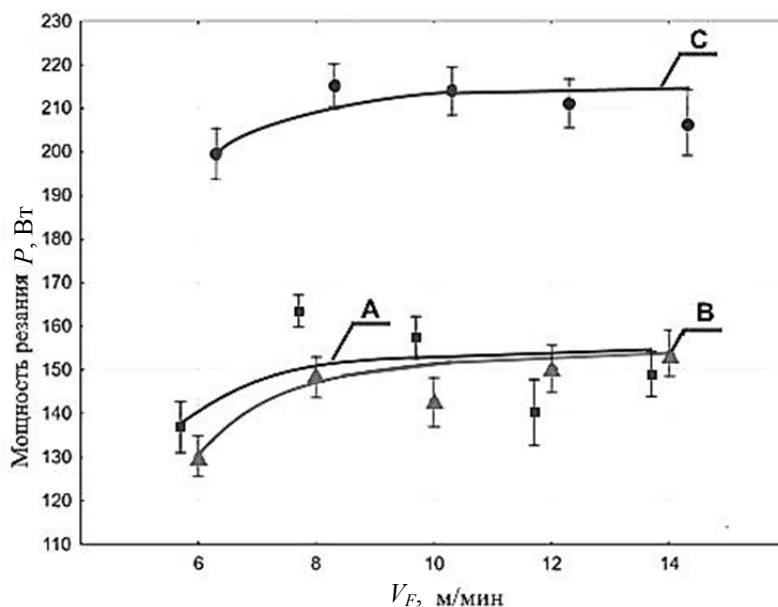


Рисунок 2. — Влияние скорости подачи на мощность резания фрезы с исследуемыми ножами ($n = 5\,000$ об. / мин; $a_e = 1$ мм; длина фрезерования $L = 11,25 \dots 270,00$ м)

В результате сила резания и, следовательно, мощность резания уменьшаются, так как мощность резания зависит от силы резания [10]. При значениях скорости подачи $V_F = 9 \dots 11$ м / мин на рисунке 2 наблюдается увеличение значения мощности резания P фрезы (в среднем в 1,1...1,2 раза больше, чем при значениях скорости подачи $V_F = 6 \dots 8$ м / мин).

Данные результаты подтверждают полученный на основании исследований [11] вывод о том, что с увеличением средней толщины стружки в процессе фрезерования древесины кромки инструмента изнашиваются более интенсивно, так как с увеличением толщины стружки увеличивается сила трения и контактный путь скольжения стружки (длина контакта) по задней поверхности инструмента. Рисунок 2 также показывает, что при значениях скорости подачи более 11 м / мин мощность резания практически не меняется для всех образцов. Это объясняется зависимостью мощности резания от износа кромки лезвия ножа фрезы [12] и, вероятно, наличием монотонной фазы износа (без крошения кромок лезвий ножей) для всех исследуемых ножей фрезы при значениях скорости подачи более 11 м / мин.

На рисунке 2 можно наблюдать, что полученные значения мощности резания для фрезы с необработанным ножом и с ножом с AlTiCrN-покрытием практически не отличаются друг от друга. Кроме того, значения мощности резания для фрезы с ножом С (с MoC-покрытием) были практически на 40 % выше, чем для фрезы с необработанным ножом А и с ножом В (с AlTiCrN-покрытием), что указывает на повышенное потребление энергии для фрезы с ножом С.

Как показано на рисунке 3, глубина резания a_e , а также скорость подачи V_F и длина фрезерования L влияют на значение мощности резания фрезы P в ходе эксперимента для фрезы со всеми исследованными ножами.

На рисунке 3 а, б, видно, что с увеличением скорости вращения шпинделя значение мощности резания увеличивается. Для всех скоростей вращения фрезы ($n = 3\ 000$ об. / мин; $4\ 000$ об. / мин; $5\ 000$ об. / мин) значение мощности резания на глубине резания $a_e = 2$ мм (рисунок 3, б) практически в 2 раза больше, чем на глубине резания $a_e = 1$ мм (рисунок 3, а).

Качество поверхности обработанного образца оценивается параметрами шероховатости поверхности (Ra , Rz , R_{max} и др.). Выбранный параметр Ra определяет или накладывает дополнительные требования на обработку поверхности древесины для достижения желаемого значения шероховатости поверхности.

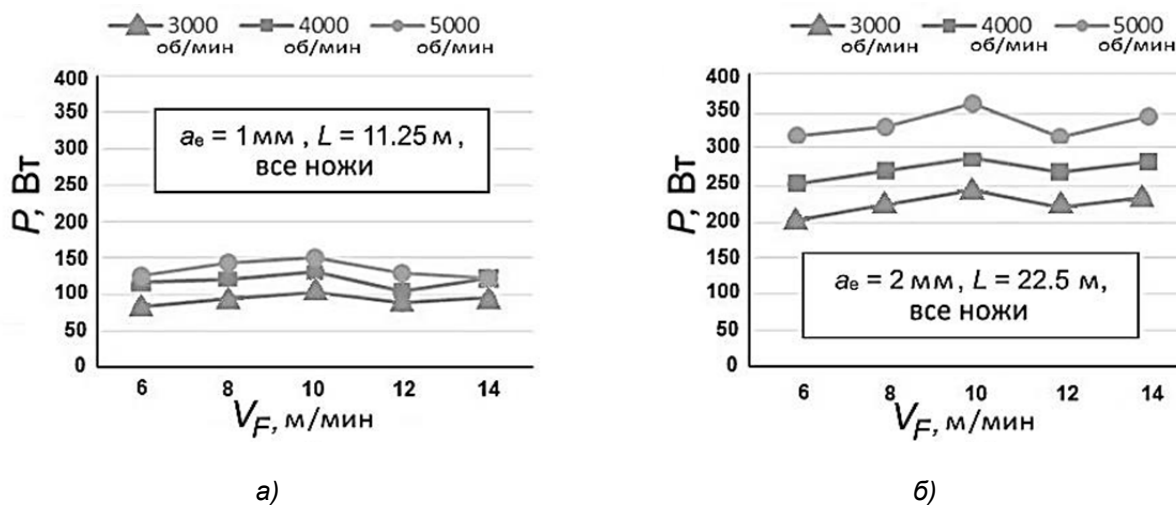


Рисунок 3. — Влияние глубины резания a_e и скорости подачи V_F на значение мощности резания фрезы P

На рисунке 4 показаны зависимости среднеарифметических значений параметра шероховатости поверхности Ra обработанных поверхностей фрезерованных образцов древесины дуба от скорости подачи для всех исследованных ножей фрезы. На основании анализа показанной на рисунке 4 зависимости для всех исследованных ножей при параметрах фрезерования $n = 5\,000$ об./мин, $a_e = 1$ мм, длине фрезерования $L = 11,25 \dots 270,00$ м можно сделать вывод, что в результате нанесения покрытий В и С на лезвия ножей фрезы шероховатость поверхности Ra фрезерованных образцов древесины практически не изменилась, но увеличилась в среднем на 1,5 мкм на образцах древесины дуба не модифицированной фрезой во всем диапазоне применяемых скоростей подачи V_F .

Таким образом, ионно-плазменная обработка лезвий ножей фрезы, увеличивая их износостойкость, способствует также сохранению значений параметра шероховатости поверхности Ra древесины как критерия качества.

Проведенные исследования [13] также показали незначительное изменение параметра шероховатости поверхности Ra в зависимости от скорости подачи (4,5; 9; 13,5 и 18 м/мин) при глубине резания 1 мм при плоском фрезеровании образцов древесины бука (*Fagus sylvatica* L.).

На рисунке 5 показаны средние арифметические значения параметра шероховатости поверхности Ra фрезерованных образцов древесины в зависимости от длины фрезерования L для всех исследованных ножей фрезы при параметрах фрезерования $n = 5\,000$ об./мин, $a_e = 1$ мм, $V_F = 6, 8, 10, 12, 14$ м/мин.

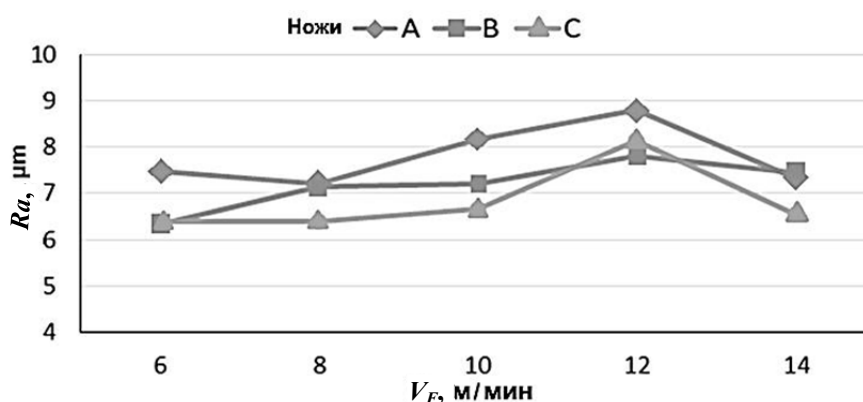


Рисунок 4. — Влияние скорости подачи V_F на значение шероховатости Ra образцов древесины (параметры фрезерования: $n = 5\,000$ об./мин, $a_e = 1$ мм, длина фрезерования $L = 11,25 \dots 270,00$ м)

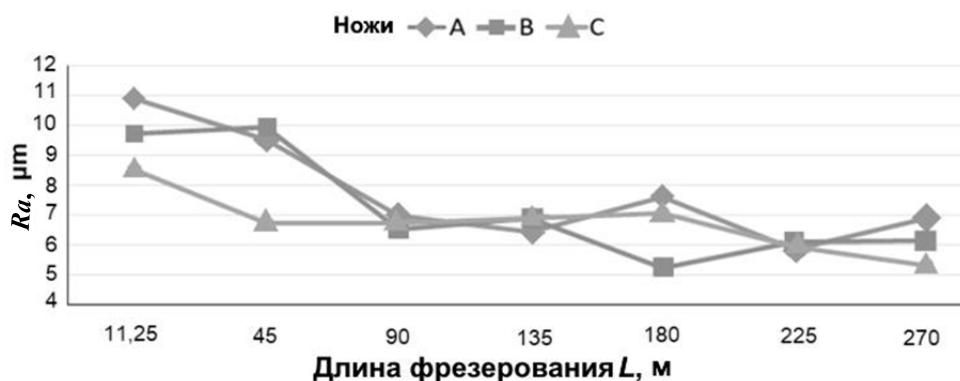


Рисунок 5. — Влияние длины фрезерования на значение шероховатости Ra образцов древесины (параметры фрезерования: $n = 5\,000$ об./мин, $a_e = 1$ мм, $V_F = 6, 8, 10, 12, 14$ м/мин)

Видно, что значение параметра контролируемой шероховатости Ra поверхности образцов древесины имеет тенденцию к снижению в небольшом диапазоне ($\approx 3 \dots 5$ мкм) при увеличении длины фрезерования от 11,25 до 270,00 м и не зависит от нанесенных покрытий на лезвия ножей фрезы.

У большинства проанализированных немодифицированных стальных (HS 6-5-2) ножей и ножей с ионно-плазменным CrCN/CrN-покрытием фрезы зафиксировано снижение среднего значения параметра шероховатости на поверхностях ножей после обработки древесины сосны [14]. Уменьшение значения параметра шероховатости в основном определялось абразивным износом лезвий ножей инструмента.

Заключение. Результаты исследований показали, что мощность резания для торцевого фрезерования увеличивается с увеличением длины фрезерования для всех трех исследуемых ножей фрезы. Максимальная мощность резания была измерена для фрезы с ножом *C*. Установлено, что параметр шероховатости Ra поверхности древесины практически не изменяется для ножей *B* и *C* во всем диапазоне применяемых скоростей подачи, а также незначительно уменьшается (до 5 мкм) при увеличении длины фрезерования и практически не зависит от обработки лезвий ножей фрезы. Ионно-плазменная обработка лезвий ножей фрезы, увеличивая их износостойкость, способствует сохранению значений параметра шероховатости поверхности Ra древесины дуба как критерия качества.

Список цитируемых источников

1. ЛЕКСИКОН Лейтц : каталог фирмы Leitz. — 4-е изд. — М. : Лейтц Инструменты, 2011. — 838 с.
2. New Products catalog : каталог компании Iscar Ltd. — Metric Version 3. — 2016. — 301 p.
3. Янюшкин, А. С. Качественные показатели поверхностей и состояние режущей кромки твёрдосплавного дереворежущего инструмента, заточенного различными методами затачивания / А. С. Янюшкин, Д. В. Лобанов, А. М. Кузнецов // Тр. Брат. гос. техн. ун-та. — Братск : БрГУ, 2005. — Т. 2. — С. 153—156.
4. Влияние ZrN, Mo-N покрытий, сульфацианирования на износ ножей дереворежущего инструмента / А. К. Кулешов [и др.] // Трение и износ. — 2014. — Т. 35, № 3. — С. 276—286.
5. Эффективность применения TiN-, ZrN-, Ti-Zr-N- и Ti-покрытий на твердосплавных резцах при обработке ламинированных древесно-стружечных плит концевыми фрезами / А. А. Гришкевич [и др.] // Тр. БГТУ. Сер. 6 : Физ.-мат. науки и информатика. — 2008. — Вып. XVI. — С. 52—54.
6. Исследование физико-механических свойств ножей с ZrN-покрытиями для агрегатной обработки древесины сосны и ели / А. А. Гришкевич [и др.] // Тр. БГТУ. Сер. 6 : Физ.-мат. науки и информатика. — 2013. — С. 63—65.
7. Keturakis, G. Tool Wear Evolution and Surface Formation in Milling Various Wood Species / G. Keturakis, R. Bendikine, A. Baltrusaitis // BioResources. — 2017. — Vol. 12, № 4. — P. 7943—7954.
8. Influence of Cutting Wedge Treatment on Cutting Power, Machined Surface Quality, and Cutting Edge Wear When Plane Milling Oak Wood / P. Koled [et al.] // BioResources. — 2019. — Vol. 14, № 4. — P. 9271—9286.
9. Effects of technical and technological parameters on the surface quality when milling thermally modified European oak wood / M. Korčok [et al.] // BioResources. — 2018. — Vol. 13, № 4. — P. 8569—8577.
10. Cutting power during lengthwise milling of thermally modified oak wood / P. Koleda [et al.] // Wood Research. — 2019. — № 64 (3). — P. 537—548.
11. Effect of Technological Parameters on Energetic Efficiency When Planar Milling Heat-treated Oak Wood / P. Koleda [et al.] // BioResources. — 2021. — Vol. 16, № 1. — P. 515—528.
12. Bendikine, R. The influence of technical characteristics of wood milling tools on its wear performance / R. Bendikine, G. Keturakis // J. of Wood Science. — 2017. — Vol. 63. — P. 606—614.
13. Milling of heat-treated beech wood (*Fagus sylvatica* L.) and analysis of surface quality / M. Ispas [et al.] // BioResources. — 2016. — Vol. 11, № 4. — Pp. 9095—9111.
14. Experimental Studies on Durability of PVD-Based CrCN/CrN-Coated Cutting Blade of Planer Knives Used in the Pine Wood Planing Process / K. Nadolny [et al.] // Materials. — 2020. — Vol. 13, iss. 10. — P. 2398—2420.