

УДК 674.055:621.934:630.652

Влияние MoC покрытий на износ лезвий стальных ножей и параметры резания при фрезеровании древесины дуба

В.В. Чаевский¹, А.К. Кулешов², С. Барчик³, П. Коледа³, О.Г. Рудак¹, П.В. Рудак⁴

¹УО «Белорусский государственный технологический университет»,
ул. Свердлова, 13а, г. Минск 220006, Беларусь

²Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

³Технический университет в Зволене,
ул. Студенческая, 26, г. Зволен 96053, Словакия

⁴ООО «БалансКонтакт»,
ул. Смоленская, 15 – 3036, г. Минск 220088, Беларусь

Поступила в редакцию 18.10.2022.

После доработки 12.12.2022.

Принята к публикации 15.12.2022.

В статье исследованы характеристики ножей фрезы из быстрорежущей стали HS 18-0-2-5 с покрытием из карбидов молибдена MoC и Mo₂C и без него при плоском фрезеровании древесины дуба. Покрытие из карбидов молибдена осаждалось методом конденсации вещества с ионной бомбардировкой (КИБ). Износ лезвия ножа определяли путём измерения смещения режущей кромки вдоль оси угла заточки клина реза (WB_{\parallel}) с помощью контурно-измерительной системы. Покрытие из карбидов молибдена увеличивает износостойкость лезвий ножей и способствует практически на 40 % увеличению мощности резания при фрезеровании образцов из древесины дуба по сравнению с фрезой с ножами без покрытия. Фрезы с покрытиями из карбидов молибдена на лезвиях ножей показали уменьшение в среднем на 1,5–3 мкм параметра шероховатости R_a поверхности древесины дуба по сравнению с инструментом без покрытия во всем диапазоне применяемых скоростей подачи и длины фрезерования. Лабораторные испытания дереворежущего фрезерного инструмента с покрытием MoC показали, что при фрезеровании древесины дуба их период стойкости увеличивается в 1,3 раза по сравнению с инструментом без покрытия.

Ключевые слова: фрезерование древесины, износ лезвий ножей, покрытия MoC, мощность резания, шероховатость поверхности R_a .

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-565-574

Адрес для переписки:

В.В. Чаевский
УО «Белорусский государственный технологический университет»,
ул. Свердлова, 13а, г. Минск 220006, Беларусь
e-mail: chayevski@belstu.by

Address for correspondence:

V.V. Chayevski
Belarusian State Technological University,
Sverdlova str., 13a, Minsk 220006, Belarus
e-mail: chayevski@belstu.by

Для цитирования:

В.В. Чаевский, А.К. Кулешов, С. Барчик, П. Коледа, О.Г. Рудак,
П.В. Рудак.

Влияние MoC покрытий на износ лезвий стальных ножей и
параметры резания при фрезеровании древесины дуба.

Трение и износ.
2022. – Т. 43, № 6. – С. 565–574.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-565-574

For citation:

V.V. Chayevski, A.K. Kuleshov, S. Barcik, P. Koleda, O.G. Rudak,
and P.V. Rudak.

[Influence of MoC Coatings on Wear of Steel Knives Edges and
Cutting Parameters when Milling Oak Wood]

Trenie i Iznos.
2022, vol. 43, no. 6, pp. 565–574 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-565-574

Influence of MoC Coatings on Wear of Steel Knives Edges and Cutting Parameters when Milling Oak Wood

V.V. Chayevski¹, A.K. Kuleshov², Š. Barcik³, P. Koleda³, O.G. Rudak¹, and P.V. Rudak⁴

¹Belarusian State Technological University,
Sverdlova str., 13a, Minsk 220006, Belarus

²Belarusian State University,
Nezavisimosti av., 4, Minsk 220030, Belarus

³Technical University in Zvolen,
Študentská 26, Zvolen 96053, Slovak Republic

⁴LLC “BalansContact”,
Smolenskaya str., 15, room 303b, Minsk 220088, Belarus

Received 18.10.2022.

Revised 12.12.2022.

Accepted 15.12.2022.

Abstract

The article studies the characteristics of high speed steel (HS 18-0-2-5) mill knives with as well as without molybdenum carbides MoC and Mo₂C coating when plane milling of oak wood. The molybdenum carbides coating was deposited by arc vacuum physical vapor deposition (Arc-PVD) method. Knife edge wear was determined by measuring the displacement of cutting edge along the axis of the cutter wedge sharpness angle (WB_w) using a contour measuring system. The molybdenum carbides coating increases the wear resistance of the knife blades and contributes to increasing the cutting power by almost 40 % when milling oak wood samples compared to a milling cutter with knives without coating. The molybdenum carbides coated edges knives mills proved decreasing surface wood oak roughness R_a to be 1,5—3 μm lower in average than that of bare tools for all range of used feed rates and milling length. Laboratory tests of MoC coated wood-cutting milling tool proved their increasing durability period to be 1.3 times higher, if compared with bare tool, while milling of oak wood.

Keywords: milling wood, edges knives wear, coatings MoC, cutting power, surface roughness R_a .

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-565-574

Адрес для переписки:

В.В. Чаевский
УО «Белорусский государственный технологический университет»,
ул. Свердлова, 13а, г. Минск 220006, Беларусь
e-mail: chayevski@belstu.by

Address for correspondence:

V.V. Chayevski
Belarusian State Technological University,
Sverdlova str., 13a, Minsk 220006, Belarus
e-mail: chayevski@belstu.by

Для цитирования:

В.В. Чаевский, А.К. Кулешов, С. Барчик, П. Коледа, О.Г. Рудак,
П.В. Рудак.

Влияние MoC покрытий на износ лезвий стальных ножей и
параметры резания при фрезеровании древесины дуба.

Трение и износ.

2022. — Т. 43, № 6. — С. 565—574.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-565-574

For citation:

V.V. Chayevski, A.K. Kuleshov, Š. Barcik, P. Koleda, O.G. Rudak,
and P.V. Rudak.

[Influence of MoC Coatings on Wear of Steel Knives Edges and
Cutting Parameters when Milling Oak Wood].

Trenie i Iznos.

2022, vol. 43, no. 6, pp. 565—574 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-565-574

Введение

Современное развитие технологии деревообработки требует применения износостойкого фрезерного инструмента, выдерживающего большие динамические и вибрационные нагрузки в связи с использованием высоких скоростей резания. Одним из основных критериев оценки качества обрабатываемой поверхности является её шероховатость, которая определяет дальнейшую обработку и отделку поверхности, внешний вид и увеличивается по мере износа режущего инструмента [1, 2]. Доказано, что наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывают следующие основные факторы: порода древесины, способ фрезерования поверхности, радиус закругления режущей кромки лезвия ножа фрезы, скорости резания и подачи [2, 3]. Результаты исследований [4] показали, что основной причиной абразивного износа лезвия ножа фрезы при обработке древесины является трение поверхности лезвия ножа с древесиной. Показано [3, 5, 6], что химический состав инструментального материала, геометрия инструмента и кинематические параметры резания оказывают значительное влияние на износ кромки лезвия ножа инструмента и период стойкости инструмента, при этом более интенсивный износ кромок лезвий ножей инструмента сопровождается эффектом увеличения мощности резания при увеличении подачи на резец. В быстрорежущих инструментальных сталях больше легирующих элементов, что увеличивает твёрдость, прочность и износостойкость инструмента. Для многих процессов резания древесины интерес к быстрорежущим инструментальным сталям остаётся очень важным из-за возможности их высокой степени заострения для использования в качестве режущей кромки лезвия ножа инструмента. Тем не менее, возможен быстрый химический износ стального ножа инструмента из-за коррозии и механического износа, который объясняется присутствием экстрактивных веществ и кремнезёма в древесине и древесных композитах. Было обнаружено [7], что кремнезём и экстрактивные вещества определяют абразивный и коррозионно-окислительный износ быстрорежущей стали при резке древесины сосны, древесностружечной плиты, древесно-цементной плиты и др.

Установлено, что одним из наиболее эффективных способов обработки поверхности лезвий ножей фрезерного инструмента с целью сохранения остроты режущей кромки лезвия является

метод конденсации вещества из газо-плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ), с помощью которого сформированные покрытия увеличивают период стойкости инструмента [8]. Полученные методом КИБ покрытия из карбидов молибдена (MoC , Mo_2C) с подслоями сложных карбидов на образцах твёрдосплавного дереворежущего инструмента позволяли увеличить их твёрдость с 18 до 45—55 ГПа в зависимости от толщины покрытия, а также уменьшить объёмный износ при лабораторных испытаниях на износостойкость до 3 раз по сравнению с исходным сплавом [9]. При этом температура инструмента при ионной обработке превышала 1000 °С. Применение таких условий синтеза покрытий для инструментальных сталей нецелесообразно из-за возникающих эффектов отпуска, отжига и разупрочнения поверхностного слоя инструмента.

Поэтому, актуальной научной задачей является изучение влияния осаждения методом КИБ покрытий из карбидов молибдена, обладающих значительной твёрдостью на износостойкость деревообрабатывающего инструмента из быстрорежущей стали в условиях, исключающих разупрочнение инструмента.

Цель работы — определение влияния осаждения покрытия из карбидов молибдена на износ ножей торцевой фрезы из быстрорежущей стали HS 18-0-2-5, а также изменения параметров резания при плоском фрезеровании образцов древесины дуба.

Материалы и методы исследований

Для выполнения исследований были использованы образцы из черенков дуба (*Quercus robur* L.) со средним возрастом 95 лет толщиной 30 мм, полученные в Техническом университете в Зволене (ТУ в Зволене) (г. Зволен, Словацкая Республика). Лесоматериал был просушен при влажности 8 % и разрезан на заготовки, которые имели размеры: толщина — 25 мм, ширина — 100 мм, длина — 750 мм.

Применялась стандартная методика плоского продольного фрезерования образцов на фрезерном станке ZDS-2 производства *Liptovské Strojárne* фирмы *Staton* (Словацкая Республика) с использованием фрезерной головки, позволяющей фиксировать два ножа [10, 11]. Для фрезерования использовались стандартные бланкетные ножи (рисунок 1) с углом заточки $\beta = 45^\circ$ из быстрорежущей стали HS 18-0-2-5 (ISO 4957:2018), химический состав которой приведён в таблице 1.

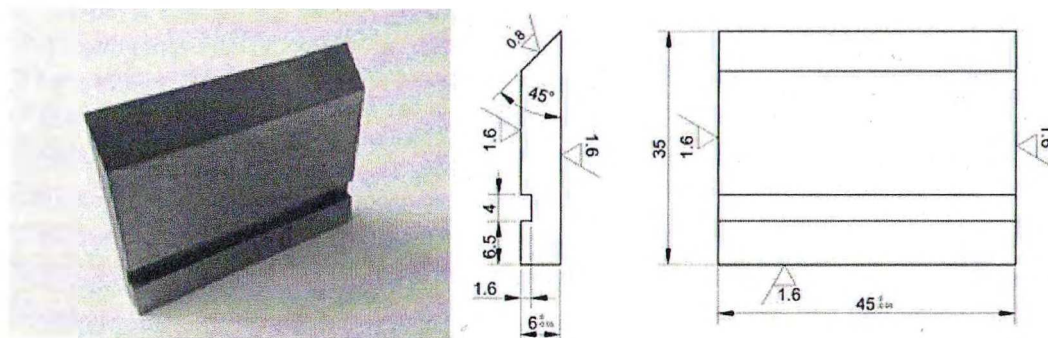


Рисунок 1 — Сменный нож фрезы

Figure 1 — Mill interchangeable knife

Таблица 1 / Table 1

Химический состав быстрорежущей стали HS 18-0-2-5 (ISO 4957:2018)

Chemical composition of high speed steel HS 18-0-2-5 (ISO 4957:2018)

Химический состав, мас. % / Chemical composition, wt. %							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	V
1,40—1,65	0,20—0,45	0,20—0,45	≤ 0,030	≤ 0,035	11,0—12,5	0,60—0,95	0,80—1,20

Один нож крепили к головке только для балансировки, исследуемые ножи поочерёдно зажимались так, чтобы диаметр резания составлял 125 мм. Технологические параметры плоского фрезерования составили: частота вращения фрезы $n = 3000$; 4000; 5000 (мин^{-1}); скорость подачи $V_F = 6$; 8; 10; 12; 14 (м/мин); глубина резания $h = 1$; 2 (мм).

Фрезерный нож *B* имел покрытие из карбидов молибдена, в то время как нож *A* не подвергался дополнительной обработке поверхности. На поверхность ножа *B* покрытие было осаждено методом КИБ по следующей методике: с предварительной обработкой подложки ионами молибдена в вакууме 10^{-3} Па при потенциале подложки -1 кВ и последующим нанесением покрытия при опорном напряжении -100 В и токах горения дуги катода 180 — 200 А в атмосфере углеводорода CH_4 при давлении 10^{-1} Па. Температура при ионной обработке не превышала 700 °С. Толщина покрытия составляла $1,5$ мкм. По данным рентгеноструктурного анализа фазовый состав полученных покрытий представлял собой соединения карбидов молибдена MoC и Mo_2C [13].

Твёрдость ножей *A* и *B* была измерена при нагрузках 25 и 50 г по методу Виккерса с помощью твердомера *Wilson Instruments 402MVD* (Голландия) и составила для ножа *B* в среднем $12,3$ ГПа (максимальная глубина проникновения индентора при нагрузке в 50 г не превышала $1,2$ мкм). Средняя твёрдость исходного ножа *A*

составила $6,2$ ГПа. Погрешность в измерении твёрдости не превышала 10% .

Измерения износа лезвий фрезерных ножей были проведены в лаборатории *Ironal* (предместье *Banska Bystrica*, г. Зволена) на контурографе модели *Hommel — Etamic C8000 Contour* немецкой фирмы *Hommel* (рисунок 2, *a*). Параметр износа лезвия ножа оценивался по смещению режущей кромки вдоль оси угла заточки β клина реза (WBW) [12] на контурных графиках (рисунок 2, *b*) с использованием программы *Evovis*.

Экспериментальные измерения мощности резания фрезы *Pc* проводились на кафедре технологии производства и автоматизации ТУ в Зволене на оборудовании с помощью преобразователя частоты, измеряющего разницу активной мощности двигателя без потерь (мощность холостого хода) и рабочей мощности двигателя по току и напряжению [3].

Для определения качества шероховатости поверхности был использован бесконтактный лазерный профилометр *LPM-4* (Словакия), работающий по оптическому методу [3]. В этом методе лазерное излучение (лазерный диод) проецируется под углом 45° к измеряемой поверхности и затем сканируется с помощью ЖК-камеры (*Marlin F-131B*, Германия). Лазерный луч создаёт след света на контролируемой поверхности, который сканируется и после ЖК-камеры преобразуется в двоичную форму изображения.

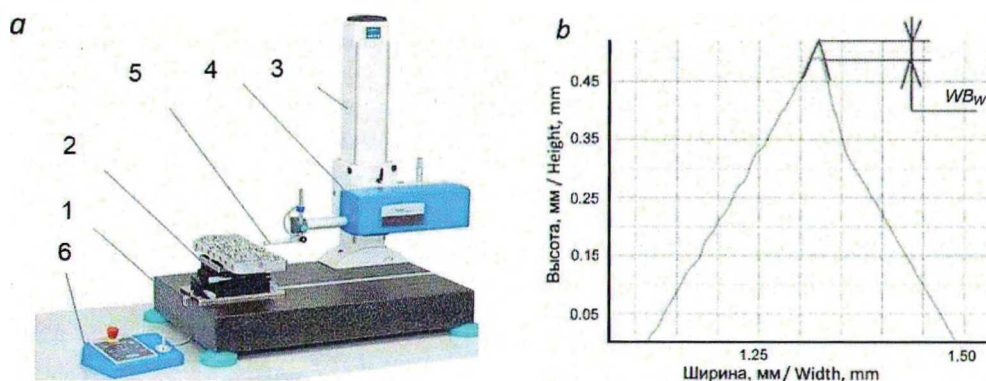


Рисунок 2 — Система измерения контура лезвия ножа: *a* — контурограф (1 — гранитное основание; 2 — стол; 3 — консоль; 4 — кронштейн; 5 — сенсорная (сканирующая) головка; 6 — панель управления); *b* — профилограмма лезвия ножа с указанием смещения режущей кромки вдоль оси угла заточки β клина резца (WB_w)

Figure 2 — Knife edge contour measuring system: *a* — contour system (1 — granite foundation slab; 2 — table; 3 — console; 4 — arm; 5 — sensor (scan) head; 6 — controlling desk); *b* — contour graph of the knife edge indicating the displacement of cutting edge along the axis of the cutter wedge sharpness angle β (WB_w)

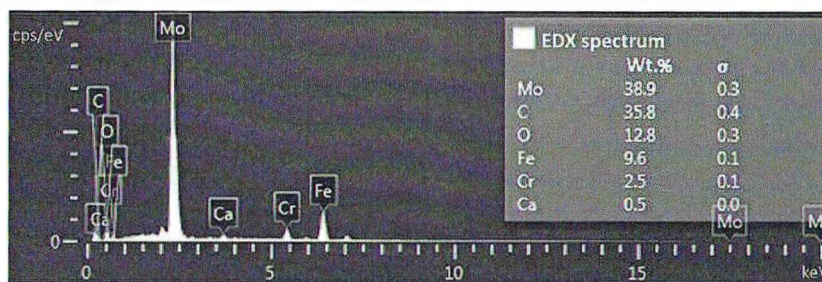


Рисунок 3 — Энергодисперсионный спектральный рентгеновский анализ (ЭДС) и элементный состав ножа с покрытием из карбидов молибдена

Figure 3 — Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDS) and elemental composition of a knife coated molybdenum carbides

Морфология и элементный состав сформированных покрытий исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) с использованием электронного микроскопа *LEO-1455 VP* (Германия) с рентгеноспектральным микроанализатором *RONTEG*.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты РСМА и элементный состав образца ножа с покрытием из карбидов молибдена показаны на рисунке 3.

Рисунок 4 показывает, что начальное состояние износа режущих кромок лезвий ножей *A* и *B* фрезы было различным: износ кромки лезвия ножа *A* значительно превосходил износ кромки лезвия ножа *B*. Это объясняется тем, что режущие кромки лезвий ножей *A* и *B* были отшлифованы с

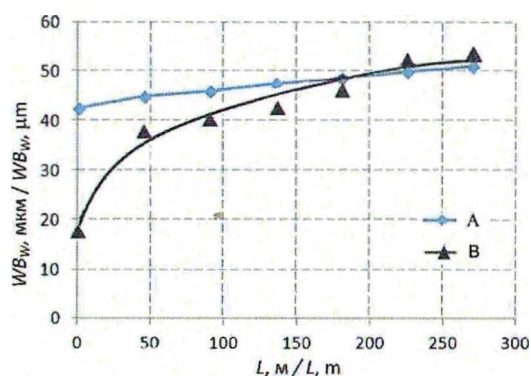


Рисунок 4 — Зависимость износа режущих кромок лезвий ножей (WB_w) от длины фрезерования L ($n = 5000 \text{ мин}^{-1}$; $h = 1 \text{ мм}$; $V_F = (6; 8; 10; 12; 14) \text{ м/мин}$)

Figure 4 — Dependence of cutting edges knives wear (WB_w) on milling length L ($n = 5000 \text{ min}^{-1}$; $h = 1 \text{ мм}$; $V_F = (6; 8; 10; 12; 14) \text{ m/min}$)

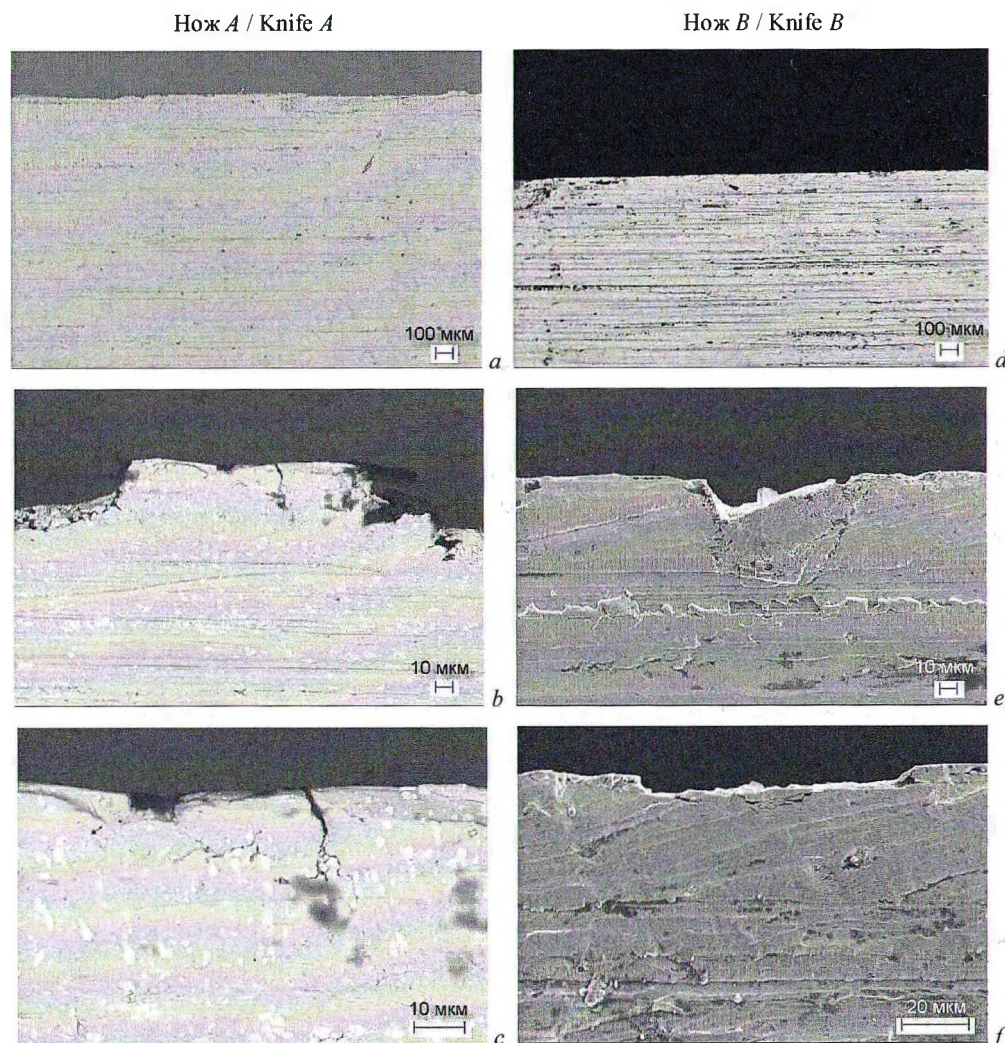


Рисунок 5 — СЭМ-изображения передней поверхности лезвий ножей: *a* — исходная поверхность лезвия ножа *A*; *d* — исходная поверхность лезвия ножа *B* с покрытием из карбидов молибдена; *b—c* — изображения износа кромки лезвия ножа *A* и *e—f* — изображения износа кромки лезвия ножа *B*

Figure 5 — SEM-images of the rake face of knives edges: *a* — initial face of knife edge *A*; *d* — initial face of knife edge *B* coated molybdenum carbides; *b—c* — images of knife *A* edge wear and *e—f* — images of knife *B* edge wear

помощью шлифовального станка с ЧПУ (*Helitronic Power*, Германия), затем после шлифовки на лезвие ножа *B* было осаждено покрытие и измерено закругление его режущей кромки в сравнении с смещением кромки лезвия ножа *A* после обработки шлифованием. Кроме того, на рисунке 4 представлены полученные зависимости значений износа WB_w кромок лезвий ножей от длины фрезерования L , которые подтвердили проведенные исследования износа лезвий ножей дереворежущего инструмента [5, 6] по измерениям радиуса и рецессии режущей кромки лезвия ножа, показавшие наличие двух характерных зон

износа ножей: на начальном участке обработки материала зону увеличения износа лезвий ножей — зону приработки, и при дальнейшем фрезеровании — зону нормального износа, для которой износ всех лезвий ножей имел достаточно монотонный характер. В нашем случае на рисунке 4 можно наблюдать зону приработки при длине фрезерования L от 0 м до 90 м и зону нормального износа при длине фрезерования L от 90 м до 270 м. Кроме того, можно заключить, что лезвие ножа без обработки поверхности имело интенсивный износ без существенных изменений значения его величины во всем исследуемом

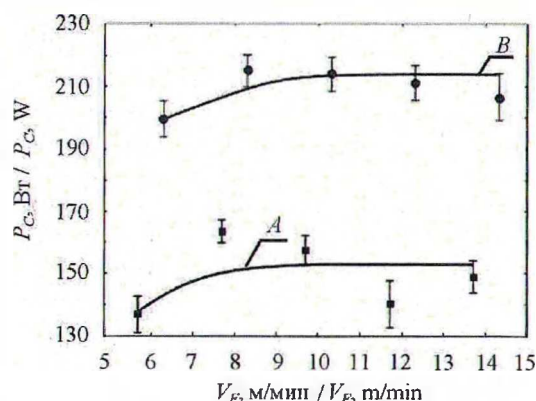


Рисунок 6 — Влияние скорости подачи V_F на мощность резания P_C фрезы с ножами A и B ($n = 5000 \text{ мин}^{-1}$; $h = 1 \text{ мм}$; длина фрезерования $L = 11,25\text{—}270,00 \text{ м}$)

Figure 6 — Influence of feed rate V_F on the mills' cutting power P_C for knives A and B ($n = 5000 \text{ мин}^{-1}$; $h = 1 \text{ мм}$; milling length $L = 11,25\text{—}270,00 \text{ м}$)

диапазоне фрезерования древесины дуба и превосходящий величину износа лезвия ножа с MoC покрытием, достигая практически одинакового значения с обработанным лезвием на конечном участке фрезерования L от 230 м до 270 м.

Для качественного анализа износа кромки лезвий ножей также были получены СЭМ-изображения режущей кромки лезвий ножей в условиях до и после резания древесины дуба. Отдельные результаты по износу кромки лезвия ножа без покрытия и модифицированного ножа с покрытием из карбидов молибдена представлены на рисунках 5, $a\text{—}c$ и 5, $d\text{—}f$ соответственно. Исследования с помощью микроскопа поверхностей лезвий ножей выявили различия, обусловленные разными формами их износа и величиной их интенсивности. Исследования показали меньшую интенсивность износа на ножах с покрытием из карбидов молибдена по сравнению с ножами без покрытия. На передней поверхности ножей без покрытия преобладал абразивный износ, трещины и сколы (рисунок 5, b, c), в то время как сколы с некоторым истиранием покрытия были основной формой износа, наблюдаемой на передней поверхности ножей с покрытием (рисунок 5, e, f).

Установлено, что состав покрытия и скорость подачи V_F ножа влияют на мощность резания P_C фрезы. На рисунке 6 показана зависимость мощности резания P_C от скорости подачи V_F ножа фрезы.

На рисунке 6 можно наблюдать, что значения мощности резания P_C для фрезы с ножом B

(покрытием из карбидов молибдена) были практически на 40 % выше, чем для фрезы с ножом A (без покрытия), что указывает на повышенное потребление энергии для фрезы с ножом с покрытием. Полученную закономерность можно объяснить увеличением силы резания ножа фрезы с износостойким покрытием и, следовательно, увеличением количества материала (стружки древесины), удаляемого за один проход. В результате мощность резания увеличивается, так как мощность резания зависит от силы резания [14].

При значениях скорости подачи $V_F = 9\text{—}11 \text{ м/мин}$ на рисунке 6 наблюдается увеличение значения мощности резания P_C фрезы (в среднем в 1,1—1,2 раза больше, чем при значениях скорости подачи $V_F = 6\text{—}8 \text{ м/мин}$). Данные результаты подтверждают полученный на основании исследований [15] 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 6 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 [5] и, вероятно, наличием монотонной фазы износа (без крошения кромок лезвий ножей) для всех исследуемых ножей фрезы при значениях скорости подачи более 11 м/мин.

Качество поверхности обработанного образца оценивалось параметром шероховатости поверхности R_a . На рисунке 7 показаны зависимости среднеарифметических значений параметра шероховатости поверхности R_a обработанных поверхностей фрезерованных образцов древесины дуба от скорости подачи V_F и длины фрезерования L для всех исследованных ножей фрезы.

На основании анализа показанных на рисунке 7, a зависимостей при параметрах фрезерования $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, $h = 1 \text{ мм}$, длине фрезерования $L = 11,25\text{—}270,00 \text{ м}$ можно сделать вывод, что в результате нанесения покрытия на лезвия ножей фрезы шероховатость поверхности R_a фрезерованных образцов древесины дуба уменьшилась в среднем на 1,5 мкм по сравнению с не модифицированной фрезой во всем диапазоне применяемых скоростей подачи V_F . Установлено, что средние арифметические значения параметра контролируемой шероховатости поверхности R_a фрезерованных образцов древесины с помощью

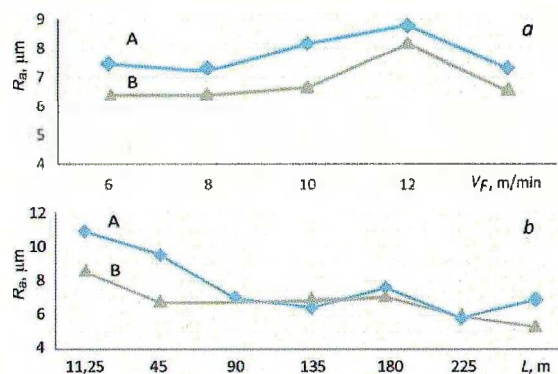


Рисунок 7 — Зависимости шероховатости R_a образцов древесины: *a* — от скорости подачи V_F (параметры фрезерования: $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, $h = 1 \text{ мм}$, $L = 11,25—270,00 \text{ м}$); *b* — от длины фрезерования L (параметры фрезерования: $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, $h = 1 \text{ мм}$, $V_F = 6; 8; 10; 12; 14 \text{ м/мин}$)

Figure 7 — Dependences of the roughness R_a of wood samples: *a* — on the feed rate V_F (milling parameters: $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, $h = 1 \text{ мм}$, $L = 11,25—270,00 \text{ м}$); *b* — on the milling length L (milling parameters: $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, $h = 1 \text{ мм}$, $V_F = 6; 8; 10; 12; 14 \text{ м/мин}$)

инструмента с покрытием при параметрах фрезерования $n = 5000 \text{ мин}^{-1}$, $h = 1 \text{ мм}$, $V_F = 6; 8; 10; 12; 14 \text{ м/мин}$ меньше до 3 мкм по сравнению с инструментом без покрытия в диапазоне длины фрезерования от $11,25$ до 270 м (рисунок 7, *b*). Кроме того рисунок 7, *b* показывает, что параметр R_a шероховатости обработанной поверхности образцов имеет тенденцию к снижению в зависимости от длины фрезерования L . Проведенные исследования [16] также показали снижение среднего значения параметра шероховатости на поверхностях большинства проанализированных немодифицированных стальных (HS 6–5–2) ножей и ножей с ионно-плазменным CrCN/CrN покрытием фрезы после обработки древесины сосны. При этом уменьшение значения параметра шероховатости в основном определялось абразивным износом лезвий ножей инструмента. Таким образом, ионно-плазменная обработка лезвий ножей фрезы, увеличивая их износостойкость, способствует также сохранению значений параметра шероховатости поверхности R_a древесины дуба как критерия качества.

Выводы

Осаждённое методом КИБ на поверхность стальных HS 18-0-2-5 лезвий ножей фрезерного инструмента покрытие из карбидов молибдена

MoC и Mo_2C увеличивает твёрдость и износостойкость лезвий ножей. Проведенные на кафедре технологии производства и автоматизации Технического университета в Зволене (Technical University in Zvolen) лабораторные испытания фрезерного инструмента с ножами с MoC покрытием показали, что его период стойкости в 1,3 раза больше по сравнению с необработанным инструментом при резании древесины дуба.

Выполненные эксперименты показали, что во время фрезерования мощность резания увеличивается с увеличением скорости подачи V_F . Выявлено, что мощность резания модифицированной фрезы возрастает практически на 40 % по сравнению с фрезой с ножами без покрытия.

Установлено, что лезвие ножа без покрытия имело интенсивный абразивный износ без существенных изменений значения его величины во всем исследуемом диапазоне фрезерования древесины дуба и превосходящий величину износа лезвия ножа с покрытием из карбидов молибдена в зоне приработки (при длине фрезерования $L = 0—90 \text{ м}$), достигая практически одинакового значения с лезвием ножа с покрытием в зоне нормального износа ($L = 90—270 \text{ м}$).

Нанесение карбидного покрытия на лезвия ножей фрезы способствует уменьшению в среднем на $1,5—3 \text{ мкм}$ параметра шероховатости обработанной поверхности R_a древесины дуба по сравнению с инструментом без покрытия во всем диапазоне применяемых скоростей подачи V_F и длины фрезерования L , способствуя улучшению качества обработки древесины дуба.

Обозначения

КИБ — конденсация вещества из газо-плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой; HSS — быстрорежущая сталь; β — угол заточки, °(градус); n — частота вращения, мин^{-1} ; V_F — скорость подачи, м/мин; h — глубина резания, мм; мас.% — массовые проценты; WB_W — смещение режущей кромки вдоль оси угла заточки клина резца; P_C — мощность резания; ЖК-камера — жидкокристаллическая камера; СЭМ — сканирующая электронная микроскопия; РСМА — рентгеноспектральный микроанализ; ЭДС — энергодисперсионный спектральный рентгеновский анализ; ЧПУ — числовое программное управление; L — длина фрезерования, м; R_a — параметр шероховатости поверхности, мкм.

Nomenclatures

Arc-PVD — arc vacuum physical vapor deposition; HSS — high speed steel; β — sharpness angle, °(degree); n — rotation speed, min^{-1} ; V_F — feed rate, m/min ; h — cutting depth, mm ; $\text{wt.}\%$ — mass percent; WB_W — displacement of cutting edge along the axis of the cutter wedge sharpness angle; P_C — cutting power; LCD-camera — liquid crystal camera; SEM — scanning electron microscopy; EPMA — energy-dispersive electron probe microanalysis; EDX — energy dispersive X-ray analysis; CNC — computer numerical control; L — milling length, m ; R_a — surface roughness parameter, μm .

Список использованных источников

1. **Kuljich S., Cool J., and Hernandez R.E.** Evaluation of Two Surfacing Methods on Black Spruce Wood in Relation to Gluing Performance // *Journal of Wood Science*. — 2013 (59), 185—194
2. **Keturakis G., Bendikiene R., and Baltrusaitis A.** Tool Wear Evolution and Surface Formation in Milling Various Wood Species // *BioResources*. — 2017 (12), no. 4, 7943—7954
3. **Koleda P., Barcik Š., Svoren J., Naščák L., and Dobrik A.** Influence of Cutting Wedge Treatment on Cutting Power, Machined Surface Quality, and Cutting Edge Wear When Plane Milling Oak Wood // *BioResources*. — 2019 (14), no. 4, 9271—9286
4. **Beer P.** In Situ Examinations of the Friction Properties of Chromium Coated Tools in Contact with Wet Wood // *Tribology Letters*. — 2005 (18), no. 3, 373—376
5. **Bendikine R. and Keturakis G.** The Influence of Technical Characteristics of Wood Milling Tools on its Wear Performance // *Journal of Wood Science*. — 2017 (63), 606—614
6. **Kowaluk G., Szymanski W., Palubicki B., and Beer P.** Examination of Tools of Different Materials Edge Geometry for MDF Milling // *European Journal of Wood and Wood Products*. — 2009 (67), no. 2, 173—176
7. **Darmawan W., Rahayu I., Nandika D., and Marchal R.** The Importance of Extractives and Abrasives in Wood Materials on the Wearing of Cutting Tools // *BioResources*. — 2012 (7), no. 4, 4715—4729
8. **Nadolny K., Kapłonek W., Sutowska M., Sutowski P., Myśliński P., and Gilewicz A.** Experimental Studies on Durability of PVD-Based CrCN/CrN-Coated Cutting Blade of Planer Knives Used in the Pine Wood Planing Process // *Materials*. — 2020 (13), no. 10, 2398—2420
9. **Kuleshov A.K., Uglov V.V., and Rusalsky D.P.** Hard and Wear-Resistant Niobium, Molybdenum Carbide Layered Coatings on WC-Co Tools Produced by Ion Bombardment and Cathodic Vacuum

Arc Deposition // *Surface and Coatings Technology*. — 2020 (395), 125920

10. **Kazlauskas D., Jankauskas V., Kreivaitis R., and Tučkuteb S.** Wear Behaviour of PVD Coating Strengthened WC-Co Cutters During Milling of Oak Wood // *Wear*. — 2022 (498–499), 204336
11. **Rajko L., Koleda P., Barcik Š., and Koleda P.** Technical and Technological Factors' Effects on Quality of the Machined Surface and Energetic Efficiency when Planar Milling Heat-Treated Meranti Wood // *BioResources*. — 2021 (16), no. 4, 7884—7900
12. **Porankiewicz B., Sandak J., and Tanaka Ch.** Factors Influencing Steel Tool Wear when Milling Wood // *Wood Science and Technology*. — 2005 (39), no. 3, 225—234
13. **Кулешов А.К., Углов В.В., Русальский Д.П.** Формирование износостойких слоистых покрытий из карбидов молибдена, вольфрама и кобальта на твердосплавном инструменте // *Вестник БарГУ. Серия «Технические науки»*. — 2019, вып. 7, 64—69
14. **Koleda P., Barcik Š., Naščák L., Svoren J., and Štefková J.** Cutting Power During Lengthwise Milling of Thermally Modified Oak Wood // *Wood Research*. — 2019 (64), no. 3, 537—548
15. **Koleda P., Barcik Š., Korčok M., Jamberová Z., and Chayevski V.** Effect of Technological Parameters on Energetic Efficiency When Planar Milling Heat-Treated Oak Wood // *BioResources*. — 2021 (16), no. 1, 515—528
16. **Nadolny K., Kapłonek W., Sutowska M., Sutowski P., Myśliński P., and Gilewicz A.** Experimental Studies on Durability of PVD-Based CrCN/CrN-Coated Cutting Blade of Planer Knives Used in the Pine Wood Planing Process // *Materials*. — 2020 (13), no. 10, 2398—2420

References

1. **Kuljich S., Cool J., and Hernandez R.E.** Evaluation of Two Surfacing Methods on Black Spruce Wood in Relation to Gluing Performance // *Journal of Wood Science*. — 2013 (59), 185—194
2. **Keturakis G., Bendikiene R., and Baltrusaitis A.** Tool Wear Evolution and Surface Formation in Milling Various Wood Species // *BioResources*. — 2017 (12), no. 4, 7943—7954
3. **Koleda P., Barcik Š., Svoren J., Naščák L., and Dobrik A.** Influence of Cutting Wedge Treatment on Cutting Power, Machined Surface Quality, and Cutting Edge Wear When Plane Milling Oak Wood // *BioResources*. — 2019 (14), no. 4, 9271—9286
4. **Beer P.** In Situ Examinations of the Friction Properties of Chromium Coated Tools in Contact with Wet Wood // *Tribology Letters*. — 2005 (18), no. 3, 373—376
5. **Bendikine R. and Keturakis G.** The Influence of Technical Characteristics of Wood Milling Tools on

- its Wear Performance // *Journal of Wood Science*. — 2017 (63), 606—614
6. **Kowaluk G., Szymanski W., Palubicki B., and Beer P.** Examination of Tools of Different Materials Edge Geometry for MDF Milling // *European Journal of Wood and Wood Products*. — 2009 (67), no. 2, 173—176
 7. **Darmawan W., Rahayu I., Nandika D., and Marchal R.** The Importance of Extractives and Abrasives in Wood Materials on the Wearing of Cutting Tools // *BioResources*. — 2012 (7), no. 4, 4715—4729
 8. **Nadolny K., Kaplonek W., Sutowska M., Sutowski P., Myśliński P., and Gilewicz A.** Experimental Studies on Durability of PVD-Based CrCN/CrN-Coated Cutting Blade of Planer Knives Used in the Pine Wood Planing Process // *Materials*. — 2020 (13), iss. 10, 2398—2420
 9. **Kuleshov A.K., Uglov V.V., and Rusalsky D.P.** Hard and Wear-Resistant Niobium, Molybdenum Carbide Layered Coatings on WC-Co Tools Produced by Ion Bombardment and Cathodic Vacuum Arc Deposition // *Surface and Coatings Technology*. — 2020 (395), 125920
 10. **Kazlauskas D., Jankauskas V., Kreivaitis R., and Tučkuteb S.** Wear Behaviour of PVD Coating Strengthened WC-Co Cutters During Milling of Oak Wood // *Wear*. — 2022 (498–499), 204336
 11. **Rajko L., Koleda P., Barcik Š., and Koleda P.** Technical and Technological Factors' Effects on Quality of the Machined Surface and Energetic Efficiency when Planar Milling Heat-Treated Meranti Wood // *BioResources*. — 2021 (16), no. 4, 7884—7900
 12. **Porankiewicz B., Sandak J., and Tanaka Ch.** Factors Influencing Steel Tool Wear when Milling Wood // *Wood Science and Technology*. — 2005 (39), no. 3, 225—234
 13. **Kuleshov A.K., Uglov V.V., and Rusal'skiy D.P.** Formation of Wear-Resistant Layered Coatings from Molybdenum, Tungsten and Cobalt Carbides on a Carbide Tool // *BarSU Herald. Engineering Series*. — 2019 (7), 64—69
 14. **Koleda P., Barcik Š., Naščák L., Svoreň J., and Štefková J.** Cutting Power During Lengthwise Milling of Thermally Modified Oak Wood // *Wood Research*. — 2019 (64), no. 3, 537—548
 15. **Koleda P., Barcik Š., Korčok M., Jamberová Z., and Chayevskii V.** Effect of Technological Parameters on Energetic Efficiency When Planar Milling Heat-Treated Oak Wood // *BioResources*. — 2021 (16), no. 1, 515—528
 16. **Nadolny K., Kaplonek W., Sutowska M., Sutowski P., Myśliński P., and Gilewicz A.** Experimental Studies on Durability of PVD-Based CrCN/CrN-Coated Cutting Blade of Planer Knives Used in the Pine Wood Planing Process // *Materials*. — 2020 (13), no. 10, 2398—2420