

УДК [621.793.79:621.914] : 674.02

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ ІНСТРУМЕНТІВ НА СИЛОВІ ПОКАЗНИКИ ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕРЕВИННИХ МАТЕРІАЛІВ

В. М. ГОЛУБЕЦЬ¹, В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ², М. І. ПАШЕЧКО³,
Ю. С. ШПУЛЯР¹

¹ Національний лісотехнічний університет України, Львів;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Люблінський технічний університет "Люблінська політехніка", Польща

Досліджено момент опору різанню під час фрезерування дуба і сосни вздовж та поперек волокон залежно від сухого або вологого стану дисковою фасонною фрезою зі сталі 9ХС з нанесеними на зубці електроіскровими покриттями. Проаналізовано вплив електроіскрових покриттів різного структурно-фазового стану, отриманих електродами з твердого сплаву Т15К6 і порошкових дрітів системи Fe–Mn–C–B та Fe–Cr–C–B, на силові показники фрезерування деревинних матеріалів.

Ключові слова: електроіскрове покриття, електроіскрове легування, електрод, дріт порошковий, момент опору різанню, фреза дискова.

The moment of resistance to cutting during milling of pine and oak along and across the fibers, depending on the dry or wet state, with a disc-shaped milling cutter made of 9 XC steel with an electric-spark coating applied to the teeth, was investigated. The influence of electric-spark coatings of different structural and phase composition, obtained by electrodes from T15K6 hard alloy and the Fe–Mn–C–B and Fe–Cr–C–B powder wires, on the strength indicators of the milling process of wooden materials was analyzed.

Keywords: electric-spark coating, electric-spark alloying, electrode, powder wire, moment of resistance to cutting, disk milling cutter.

Вступ. Основною вимогою до сталей, які використовують для виготовлення різального інструмента, є високі значення твердості, зносо- і теплостійкості, міцності та в'язкості. Вказані характеристики взаємопов'язані. Так, зі збільшенням твердості сталі, яка залежить від термообробки, зростає зносостійкість. Міцнісні характеристики інструмента зумовлені механічними, фізико-хімічними режимами, тепловими та іншими процесами, які відбуваються у зоні контакту з оброблювальним виробом під час різання. Важливою характеристикою для інструментальних сталей є їх прогартовуваність. Під час роботи різального інструмента працює дуже тонка смужка металу – лезо, яке залежно від питомого навантаження і швидкості різання нагрівається. Якщо робоча температура в зоні контакту перевищує температуру відпуску, твердість інструмента знижуватиметься через розпад мартенситу і укрупнення частинок карбідної фази, а інструмент затуплюватиметься. Тому для підвищення стійкості різального леза інструмента проти зношування потрібна твердість, яка буде більша за твердість оброблювального матеріалу, а для поверхневого зміцнення шару металу необхідна і висока адгезія.

Відомо групи матеріалів для різальних інструментів, їх марки і теплостійкість, види термічної обробки, твердість і структура. Для підвищення стійкості інструмента важливе значення мають технологічні методи модифікування різаль-

ного леза [1–3], зокрема, електроіскрове легування (ЕІЛ), яке дає можливість змінювати властивості поверхневого шару вихідного металу через формування на ньому нового за структурою та хімічним складом матеріалу.

Дослідженню зносостійкості електроіскрових покриттів (ЕІП) присвячена велика кількість праць. Як електрод для ЕІЛ використовують різні матеріали: тверді сплави на основі вольфраму та титану із додаванням вуглецю (ВК20У, Т15К6У), ферохром, білий чавун тощо, а також порошкові дроти (ПД).

Відомі також спроби пошуку недорогих електродних матеріалів із безвольфрамових [4, 5] і евтектичних сплавів [6, 7], ПД [8, 9] та комбінованих електродів [8]. Перспективними вважають комплексні технології: ЕІЛ з лазерною обробкою [7, 10], ЕІЛ з накладанням ультразвуку [11], інтенсифікація ЕІЛ прямою дією струму на електрод [12], комбіноване легування ферохромом у поєднанні з графітом [13]. Однак поведінка ЕІП, сформованих ЕІЛ із ПД, за дії силових показників під час різання майже не вивчена.

Тому мета дослідження – проаналізувати ефективність ЕІЛ сталі 9ХС з використанням як електродів твердих сплавів на основі титану Т15К6, так і ПД різних систем, перевірити раціональні технологічні режими нанесення ЕІП на різальні крайки інструмента та оцінити їх вплив на силові показники фрезерування деревинних матеріалів.

Методика випробувань. Лабораторні тестування моменту опору різанню під час фрезерування деревини виконували на трибометрі СМЦ-2, який призначений для випробування матеріалів на тертя та зношування. До схеми випробувань підключали аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та персональний комп'ютер (ПК). Для досліджень використовували дискові фасонні фрези $\varnothing 50$ mm, товщиною 4 mm зі сталі інструментальної 9ХС зі зубцями після гартування і низького відпуску (HRC 62). На робочу частину зубців наносили ЕІП з порошкових дріт ПД і ПДГ системи Fe–Cr–C–B, ПД1 системи Fe–Mn–C–B, а також із твердого сплаву Т15К6. Основні дані про електроди для нанесення покриттів технологією електроіскрового легування наведені в таблиці.

Характеристика електродів для нанесення ЕІП

Електрод	Позначення зразка	Марка	Структура, система	Діаметр, mm	Твердість
Сталь	I	9ХС	мартенсит відпуску	50	62 HRC
Твердий сплав	II	Т15К6	TiC, Co, WC	необмежений	90...92 HRC
ПД	III	ПД1	Fe–Mn–C–B	2	504 HV ₅
ПД	IV	ПД (80Х20Р3Т)	Fe–Cr–C–B	3,2	1710 HV _{0,02}
ПД комбінований	V	ПДГ [80Х20Р3Т + Г (МПГ-7)]	Fe–Cr–C–B + графіт (Г)	6	2311 HV _{0,02}

Фрезерування здійснювали на нерухомих зразках з дуба і сосни розміром 50×60 mm як в сухому (10% вологи), так і у вологому (40%) станах вздовж і поперек волокон.

Для нерухомого кріплення зразка з деревини використовували пристосування, яке забезпечувало сталість геометричної площі контакту, незмінне розташування поверхонь контакту під час фрезерування. Швидкість різання була стала –

0,67 m/s (частота обертання фрези – 450 rpm). Навантаження P задавали рівномірно від 0 до 3 МПа, площа контакту становила 25 mm², ширину різання приймали за товщиною фрези (4 mm). Під час випробувань записували електричні сигнали від зміни вимірюваних параметрів у мілівольтах із кроком 0,25 s.

Впродовж досліджень одночасно фіксували зміну моменту опору різанню безконтактним індуктивним давачем, змонтованим на валу установки СМЦ-2, сигнал з якого за допомогою АЦП записували на ПК. Також записували зміни вимірювальних параметрів зокрема, часу фрезерування t , показів давача h та сталих для фрези, а саме: радіуса r , питомого навантаження P , площі S контакту зі зразком (рис. 1, поз. 3).

На отриманих залежностях моменту опору різанню M_r від часу t досліджень (рис. 2а) визначали: холостий хід фрези до початку контакту з дерев'яним зразком (а–А), початок контакту (точка А), області різання (А–В), розвантаження (В–С) та холостий хід фрези після контакту (С–D). Залежності $M_r = f(t)$ під час експериментів записували для фрези як з незміцненими зубцями (серійної), так і зі зміцненими. Зміцнені зубці отримали нанесенням ЕПП порошковими дротами і твердим сплавом Т15К6 для всіх умов випробувань – сухий і вологий стан деревини, фрезерування вздовж і поперек волокон.

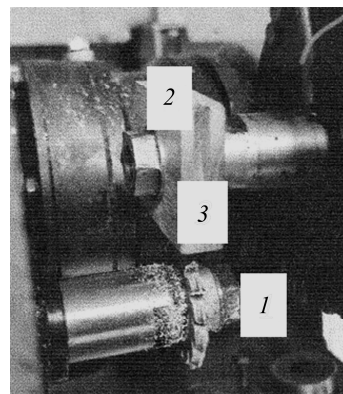


Рис. 1. Різальний інструмент:
1 – фреза; 2 – дерев'яний зразок;
3 – вифрезерована глибина канавки.
Fig. 1. Cutting tool: 1 – milling cutter;
2 – wooden sample;
3 – milled groove depth.

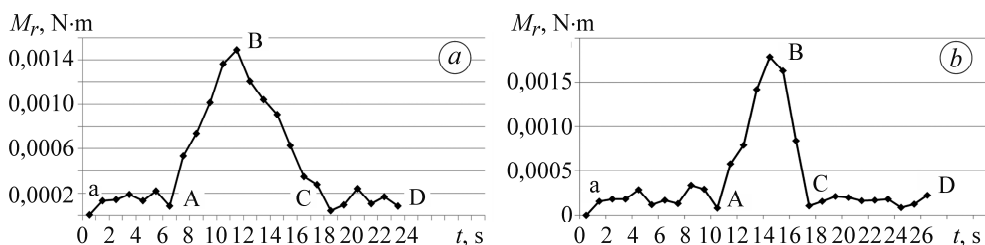


Рис. 2. Залежність моменту опору різанню M_r від часу t досліджень під час різання сухої сосни поперек (а) і вздовж (б) волокон фрезою зі зміцненими зубцями ЕПП, нанесеним порошковим дротом V (див. таблицю).

Fig. 2. Dependence of the moment of resistance to cutting M_r on the time t during cutting of dry pine across (a) and along (b) the fibers with a milling cutter with reinforced electric-spark coating (ESC) teeth with applied powder wire V (see Table).

Далі обчислювали за формулою так. Якщо момент опору M_r виразити поправковою формулою АЦП через

$$I = 78,7N - 0,88, \quad (1)$$

а діаметр фрези через її радіус r , тоді кінцева формула визначення моменту опору різанню M_r набуде вигляду

$$M_r = \frac{2l}{d \cdot F} = \frac{2(78,7N - 0,88)}{2r \cdot P \cdot S} = \frac{(78,7N - 0,88)}{r \cdot P \cdot S}, \quad (2)$$

де F – показник сили, N; d , r – діаметр і радіус фрези, відповідно, mm; P – навантаження, МПа; S – площа контакту, mm²; N – покази давача; I – відношення сили до площі.

Результати та їх аналіз. Результати розрахунків моменту опору різанню дуба в сухому і вологому станах подані на рис. 3а, б, а сосни – на рис. 3с, d, відповідно.

Для аналізу зусилля під час фрезерування деревинних матеріалів використовували твердження: що менша сила різання, то менший момент опору.

Аналізуючи різання сосни і дуба серійною фрезою та зі зміцненими зубцями фрези твердим сплавом T15K6 і порошковими дротами ПД1, ПД і ПДГ, можна відзначити, що нанесення електроіскровим легуванням ЕІП запропонованими електродами призводить до зменшення абсолютних значень моменту опору різанню порівняно з результатами M_r , отриманими за різання незміцненими зубцями фрези.

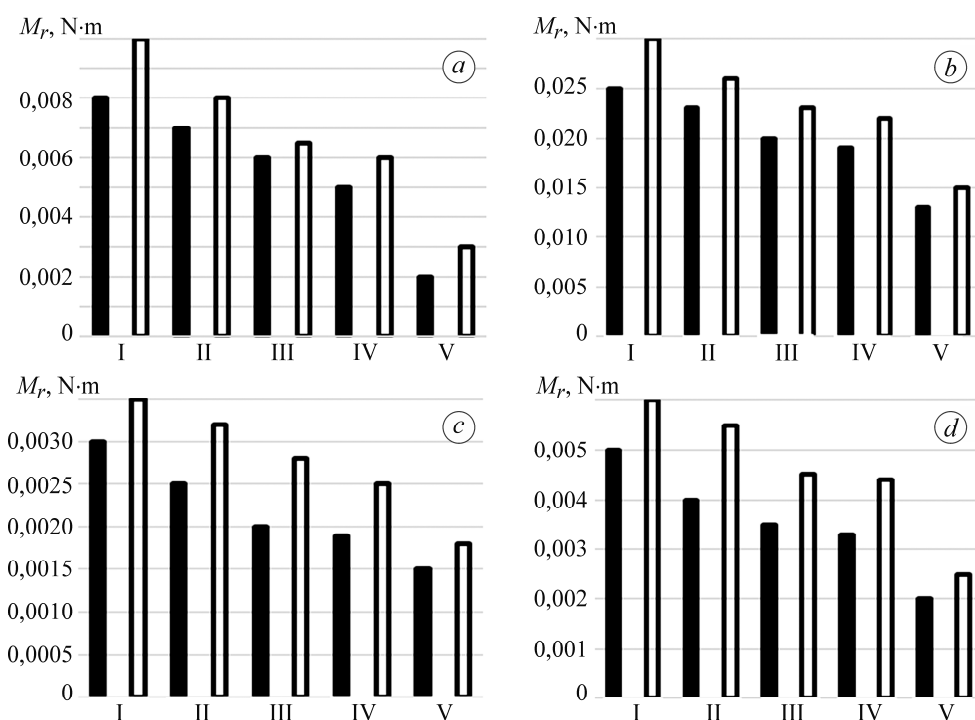


Рис. 3. Усереднені значення зміни моменту M_r опору різанню зубців сталі 9XC після фрезерування дуба у сухому і вологому станах поперек (■) і вздовж (□) волокон: 9XC – без ЕІП (I); з нанесеним ЕІП електродами із T15K6 (II); ПД1 (III); ПД (IV) і ПДГ (V); навантаження P від 0 до 3 МПа; швидкість різання 0,67 м/с; а, б – дуб сухий і вологий, відповідно; с, d – сосна суха і волога, відповідно.

Fig. 3. Averaged values of the change in the moment M_r of resistance to cutting teeth of steel 9XC after oak milling in dry and wet conditions across (■) and along (□) the fibers: 9XC – without ESC (I); with applied ESC electrodes with T15K6 (II); PW1 (III); PW (IV) and PWG (V); load P from 0 to 3 MPa; cutting speed 0.67 m/s; а, b – dry and wet oak, respectively; с, d – dry and wet pine, respectively.

Встановлено більші значення M_r у всіх випадках фрезерування сосни і дуба вздовж волокон порівняно з різанням поперек волокон як в сухому, так і вологому станах деревини.

Найбільші значення моменту опору різанню як вздовж, так і поперек волокон зафіксовано за фрезерування вологого дуба. Спостерігали також більші абсолютні значення M_r за фрезерування сосни у стані вологості 40% порівняно зі сухою сосною, як вздовж, так і поперек волокон фрезами з нанесеними на зубці ЕІП, в т. ч. і серійною без покриття. Надалі в сторону зменшення показника M_r ,

відзначається різання сухого дуба і сухої сосни. Збільшення силових показників під час фрезерування дуба і сосни у вологому стані не суперечить літературним джерелам, адже відомо, що сила різання вологої деревини завжди на 5...10% є більшою, ніж сухої [14].

Окрім цього, під час оброблення дуба слід звертати увагу на суттєву різницю його фізико-механічних характеристик порівняно зі сосною, а саме: більшу густину $\gamma = 723 \text{ kg/m}^3$ проти 534 у сосни; границю міцності на розтяг вздовж волокон $\sigma_B = 145 \text{ МПа}$ проти 103; торцеву твердість $HB = 67,5 \text{ МПа}$ проти 28,5.

Аналізуючи вплив вологи на параметри різання, слід мати на увазі, що йдеться не про вільну воду, яка утримується силами капілярної взаємодії у порожнинах клітин на міжклітковому просторі і мало впливає на фізико-механічні властивості деревини, а про зв'язану (або гігроскопічну) воду, яка поділяється на адсорбційну та мікрокапілярну, утримується у клітинних стінках і суттєво впливає на зміну згаданих властивостей [15]. Оскільки вологе поглинання деревиною полягає у сорбції парів основними органічними речовинами клітинної стінки, то на поверхні структурних утворень із целюлози, лігніну та геміцелюлози концентруються молекули адсорбційної води. При цьому спостерігаємо ефект контракції, коли об'єм вологої деревини стає меншим, ніж сума об'ємів сухої деревини та поглиненої води.

Згідно із теорією будови звичайної води, до її складу, крім вільних молекул, входять кластери – агрегати молекул, які постійно утворюються та руйнуються. Густина кластерів – 920 kg/m^3 , а неагрегатованої води – 1120 kg/m^3 . Компоненти деревини руйнують кластери і збільшують частку неагрегатованої води. Цей процес призводить до підвищення загальної густини деревини, а адсорбційна вода за пружними властивостями наближається до твердого тіла [16].

Підвищення вмісту зв'язаної води у деревині супроводжується набуханням, тобто збільшенням лінійних розмірів і об'єму. Внаслідок цього внутрішній тиск у тангенціальному напрямку у сосни досягає 1,98 МПа, у дуба – 3,1 МПа, а в радіальному напрямку – в 1,5–2 рази менший [17].

На поверхні різального інструмента над шаром оксидів знаходяться вторинні структури, які складаються з адсорбованих шарів газів, води та полярних молекул органічних речовин і зазнають періодичного руйнування та відновлення. За порушення суцільності оксидного шару відкривається доступ до ювенільної поверхні металу, яка володіє високою адсорбційною та хімічною активністю. Адсорбовані цією поверхнею речовини заглиблюються у внутрішні шари металу. Що більше у деревині води, то більше проявляється її агресивний вплив на стан поверхні інструмента. Цей процес інтенсифікується за поверхнево-активних речовин, які утворюються під час різання внаслідок термічної деструкції деревини [17].

Найбільшого ефекту зі силових показників різання порівняно з незміцненими зубцями, а саме, суттєвого зменшення значень M_r під час різання поперек і вздовж волокон, досягнуто за фрезерування сосни (у 2–2,5 рази порівняно з серійною фрезою) і дуба (у 2–4 рази) за зміцнення зубців ЕІП нанесеним комбінованим електродом V. З певним наближенням можна відзначити однаковий ефект зміцнення зубців нанесенням ЕІП електродами III системи Fe–Mn–C–B і IV системи Fe–Cr–C–B під час фрезерування поперек і вздовж волокон як сухої, так і вологої деревини.

Щодо якості фрезерування можна відзначити, що під час випробувань спостерігали попутне фрезерування, товщина зрізу змінювалась від заданого значення до нуля. Незважаючи на те, що зусилля різання зменшувалось, рівномірність процесу не порушувалась, вібрація не виникала. Врізання зубців і вихід їх з контакту забезпечувало плавну роботу фрези.

ВИСНОВКИ

Встановлено зменшення абсолютних значень моменту опору різанню під час фрезерування деревинних матеріалів фрезами зі зміцненими зубцями нанесенням ЕП запропонованими електродами порівняно з аналогічними показниками серійних фрез з незміцненими зубцями за збереження всіх інших умов експериментів. Найбільшого зниження M_r досягнуто під час фрезерування інструментом, зміцненим електродом V. Виявлено, що в усіх випадках різання деревини вздовж волокон показник M_r є більшим, ніж за різання поперек волокон. Збільшення моменту опору різанню зафіксовано також для дуба і сосни у вологому стані порівняно зі сухим.

1. *Електродугові відновні та захисні покриття* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік та ін. – Львів: Фіз. мех. ін-т, 2005. – 192 с.
2. *Burakowski T. and Wiczychon T. Inżynieria powierzchni metali.* – Warszawa: WNT, 1995. – 556 s.
3. *Трибомеханика. Триботехника. Триботехнологии: в 3-х т.* / М. В. Чернец, Л. П. Клименко, М. И. Пашечко, А. Невчас. – Николаев: Изд-во Черноморского нац. ун-та им. Петра Могили, 2008. – Т. 2. – 304 с.
4. *Электроискровое легирование стали безвольфрамовыми сплавами* / М. С. Ковальченко, А. В. Паустовский, С. Н. Кириленко // Порошковая металлургия. – 1984. – № 6. – С. 47–50.
5. *Использование безвольфрамовых электродных материалов для упрочнения различной оснастки и инструмента методом электроискрового легирования* / Ф. Ф. Егоров, А. Д. Верхотуров, И. А. Подчерняева, В. И. Повещенко // Электрон. обраб. материалов. – 1987. – № 4. – С. 79–81.
6. *Properties of eutectic electrode materials for electrospark alloying* / М. I. Pashenko, V. M. Golubets', O. B. Gasii, and B. P. Chaikovs'kii // Soviet Materials Science. – 1991. – 27. – P. 47–51.
7. *Голубець В. М., Білоус О. В. Розробка нового евтектичного електродного сплаву для нанесення зносостійких покриттів на ріжучий інструмент комплексним електроіскровим легуванням і лазерною обробкою* // Проблеми трибології. – 2001. – № 2. – С. 56–61.
8. *Micromechanical characteristics of the surface layer of 45 steel after electric-spark treatment* / V. M. Holubets', M. I. Pashechko, M. Barszcz, and J. Borc // Materials Science. – 2019. – 55, № 3. – P. 409–416.
9. *Wear resistance of electrospark-deposited coating in dry sliding friction conditions* / V. M. Holubets', M. I. Pashechko, J. Borc, O. V. Tisov, and Yu. S. Shpuliar // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2021. – 60. – P. 90–96.
10. *Ботвинко О. П. Підвищення працездатності інструменту з швидкоріжучих сталей шляхом комбінованого впливу електроіскрового легування та лазерної обробки: Автореферат ... дис. канд. техн. наук.* – К.: ІПМ НАНУ, 1998. – 19 с.
11. *Электроискровое легирование с наложением ультразвука* / А. А. Бугаев, И. А. Перевертун, В. А. Скороход, А. Е. Гитлевич // Электрон. обраб. материалов. – 1984. – № 4. – С. 82–84.
12. *Михайлов В. В., Перетятку П. В. Интенсификация электроискрового легирования путем прямого действия тока на рабочие электроды* // Электрон. обраб. материалов. – 1987. – № 2. – С. 90–92.
13. *Створення функціональних покриттів на поверхні маловуглецевої сталі багатостадійним електроіскровим легуванням хромом та графітом у насичувальних середовищах* / Є. В. Іващенко, Г. Г. Лобачова, Н. А. Шаповалова, К. Є. Ігнатюк // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – № 2 (71). – С. 62–64.
14. *Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов: учебник.* – М.: МГУЛ, 2004. – 306 с.
15. *Уголев Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение: учебник.* – М.: МГУЛ, 2007. – 352 с.
16. *Бейнарт И. И., Ведерников Н. А., Громов В. С. Клеточная стенка древесины и неизменение при химическом воздействии.* – Рига: Зинатне, 1972. – 511 с.
17. *Моисеев А. В. Износостойкость дереворежущего инструмента.* – М.: Лесная промышленность, 1981. – 112 с.

Одержано 17.06.2022