

В. М. Голубець<sup>1</sup>, М. І. Пашечко<sup>2</sup>, Ю. С. Шпуляр<sup>1</sup>

## ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕРЕВИНИ

<sup>1</sup> Національний лісотехнічний університет України

<sup>2</sup> Люблінський технічний університет "Люблінська політехніка"

*Проаналізовано вплив замірів багатьох параметрів в процесі лабораторних тестувань на достовірність отриманих експериментальних даних. Приведено структуру та фізико-механічні властивості деревини як конструкційного матеріалу. Звернено увагу на підвищення ресурсу роботи дереворізного інструменту при різанні деревини, зокрема, найбільш простою і ефективною технологією електроіскрового легування. Описано фізичну суть такої технології. Запропоновано метод інтерполяції і побудовано математичні моделі (функціональні залежності) зміни моменту опору різання при фрезеруванні деревини дисковими фрезами із сталі 9XC з нанесеними на робочу частину зубців електродами із порошкових дротів електроіскровими покриттями різного фазового складу. Підтверджено, що відповідність між експериментальними значеннями даних моменту опору різання лежить в межах від 1 до 3 %.*

*Ключові слова:* достовірність результатів, деревина, дереворізальний інструмент, порошковий дріт, електроіскрове покриття, момент опору різання, метод інтерполяції, математична модель.

V. M. Holubets, M. S. Pashechko, Yu. S. Shpuliar

## CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS FOR CONFIRMING THE RELIABILITY OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH FROM WOOD MILLING

*When conducting experimental scientific research, there is always a need to determine the accuracy of the obtained results to prove their reliability. Particular attention is paid to this in case of technical sciences, since the process of experiments involves many factors, parameters and other characteristics of the products subject to research. So, for example, in the specialties "Materials Science", "Industrial Mechanical Engineering", "Friction and Wear in Machines", and ultimately in many others, when conducting laboratory, bench or operational testing of certain characteristics of materials, modes of technological processes and processing, or surface hardening, a great number of parameters belonging to the object of research are covered. In addition to conducting a large number of experimental studies, numerical-tabular and numerical-graphical values of the studied quantities are always obtained. In this regard, there is a need to build mathematical models of the dependence of experimental studies, and sometimes even observations of the technological process, because it is not known in advance whether each of them is absolutely reliable due to the influence of a number of side factors that are considered random. Random factors include measurement errors, as well as factors resulting from the impossibility or expediency of perfectly accurate observance of the experimental conditions of each of the experimental values.*

*It is relevant, for example, to consider the methodology for constructing mathematical models in relation to the correspondence between the obtained experimental data [2] for the case of laboratory testing of the cutting resistance moment (CRM) during milling of oak and pine along and across the grain, depending on the dry or moist state, using a disc-shaped cutter made of 9XC steel with electrospark coatings applied to the teeth, where analyzed was the effect of ESC of different structural-phase states, obtained by electrodes from both T15K6 hard alloy and flux-cored wires of the Fe-Mn-B-C and Fe-Cr-B-C system, on the strength indicators of milling wood materials in comparison with 9XC steel, hardened and low-tempered, (without strengthening of teeth).*

*The refore, there is a need to describe the studied process in some way, i.e. to present it in a certain mathematical relationship (mathematical model).*

*Key words:* reliability of results, wood, wood-cutting tool, flux-cored wire, electrospark coating, cutting resistance moment, interpolation method, mathematical model.

**Вступ.** При проведенні експериментальних наукових досліджень завжди виникає потреба визначення точності отриманих результатів для підтвердження їх достовірності. Особливо звертається на це увага для технічних наук, оскільки у процесі експериментів приймають участь безліч чинників, параметрів та інших характеристик виробів, що підлягають дослідженням. Так, наприклад, у спеціальностях «Матеріалознавство», «Галузеве машинобудування», «Тертя та зношування в машинах», зрештою і у багатьох інших, при проведенні лабораторних, стендових чи експлуатаційних тестувань певних характеристик матеріалів, режимів технологічних процесів і обробки, або поверхневого зміцнення охоплюється величезна кількість параметрів, що належать об'єкту досліджень. Крім проведення багатьох кількостей експериментальних досліджень, завжди отримуються чисельно-табличні та чисельно-графічні значення досліджуваних величин. У зв'язку з цим виникає необхідність побудови математичних моделей залежності експериментальних досліджень, а іноді навіть спостережень технологічного процесу, бо наперед невідомо, чи кожне із

них є абсолютно достовірним внаслідок впливу ряду побічних факторів, які прийнято вважати випадковими. До випадкових факторів відносяться похибки вимірювання, а також фактори, що впливають з неможливості чи доцільності ідеально точного дотримання умов експерименту кожного з експериментальних значень.

Актуальним, наприклад, є розгляд методики побудови математичних моделей стосовно відповідності між отриманими експериментальними даними [2] для випадку лабораторних тестувань моменту опору різання  $M_r$  під час фрезерування дуба і сосни вздовж і поперек волокон залежно від сухого або вологого стану дисковою фасонною фрезою зі сталі 9ХС з нанесеними на зубці електроіскрових покриттів, де проаналізовано вплив ЕП різного структурно-фазового стану, отриманих електродами як з твердого сплаву Т15К6, так і порошкових дрітків системи Fe-Mn-B-C і Fe-Cr-B-C на силові показники фрезерування деревинних матеріалів в порівнянні зі сталлю 9ХС загартованою і низьковідпущеною (без зміцнення зубів). Відзначимо, що впродовж лабораторних тестувань одночасно фіксувалися зміни моменту опору індуктивним здавачем. Також записувалися вимірювальні параметри, зокрема, час, покази давача, та постійні фрези, а саме радіус, питоме навантаження, площа контакту зі зразком. Далі будувалися залежності моменту опору різання  $M_r$  від часу досліджень. На них визначалися етапи технологічного процесу: холостий хід фрези до початку контакту з деревиною, початок контакту, області різання, розвантаження та холостий хід після контакту.  $M_r$  обчислювали за певною формулою та будувалися гістограми залежностей  $M_r$  для кожного виду покриттів. Таким чином було встановлено, що найбільшого зниження  $M_r$  досягнуто під час фрезерування інструментом, зміцненим електродом комбінованим ПДГ (ПД 80Х20Р3Т системи Fe-Cr-B-C з додатком графіту МПГ-7). Виявлено, що в усіх випадках різання деревини вздовж волокон показник  $M_r$  є більшим ніж при різанні поперек волокон. Збільшення  $M_r$  зафіксовано також для дуба і сосни у вологому стані порівняно із сухим станом.

Тому постає потреба якимось чином описати досліджуваний процес, тобто представити його у певній математичній залежності (математичній моделі). В одних випадках така залежність може бути строго визначеною, тобто функціональною, а в інших - вона не є такою тісною і носить стохастичний характер. Отже задача встановлення типу залежності однієї величини від іншої є важливою, як в науковому, так і в практичному плані, при цьому не залежно від того чи є матеріал металічного стану, чи неметалічного.

**Мета роботи.** Встановлення відповідності між отриманими експериментальними даними силових показників у процесі різання деревини та побудованими моделями (функціональними залежностями) для підтвердження достовірності результатів досліджень.

**Характеристика деревини.** Деревина доволі відома як неметалевий матеріал [1]. Частка її у сучасних конструкціях зростає за рахунок зменшення у них частки металів. Деревинні матеріали повністю або частково виготовляють із деревини. Їх застосовують у будівництві, меблевій промисловості, рідше в машинобудуванні, суднобудуванні та багатьох інших галузях. Деревинні матеріали мають невелику густину, порівняно високу механічну міцність, надійно з'єднуються клеєм, шурупами, цвяхами, добре фарбуються, мають гарний текстурний рисунок й добрі теплоізоляційні властивості. До негативних властивостей деревинних матеріалів належать гігроскопічність, що спричиняє зміну розмірів, схильність до гниття, горіння і розтріскування. Щоб захистити деревину від гниття, її просочують розчинами солей (NaF, ZnCl<sub>2</sub>, CuSO<sub>4</sub> та ін.), покривають лакофарбними матеріалами, а елементи конструкцій, що контактують з вологою, захищають гідроізоляцією. Щоб знизити ризик займання на деревину наносять вогнезахисні фарби, або просочують її антипіренами (солі фосфорної чи борної кислот).

Деревина як матеріал рослинного походження і як конструкційний матеріал складається у сухому стані з ~ 50 % целюлози (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub> природного полімеру лінійної будови, ~ 25 % геліцелюлози і ~ 25 % високов'язкої рідини густосітчастої будови – лігніну. Крім перелічених речовин у свіжозрізаному дереві є ще багато води. Деревина має волокнисту будову стовбура, характеризується анізотропією, тому макроструктуру доцільно розглядати у трьох перетинах: поперечному перпендикулярно до осі стовбура й до волокон, радіальному вздовж стовбура через його вісь і тангентальному паралельно до осі стовбура на деякій від неї відстані. До механічних властивостей, крім міцності, слід віднести високий опір ударним і вібраційним навантаженням, а також опір згину твердих порід, наприклад, дуба (листяної породи) при ударних навантаженнях в 1,5...3 рази вищий, ніж для м'яких (хвойних порід) – сосни. Невелика питома маса деревини, як фізична властивість  $\gamma = 0,34 - 0,98$  г/см<sup>3</sup> та залежить від вологості (суха деревина приймається з

вологістю до 10 %, волога – до 40 %). Отже деревина характеризується високою питомою міцністю, а також малою теплопровідністю і в 20 разів має менший, ніж у сталі температурний коефіцієнт лінійного розширення. До фізичних властивостей деревини належить також здатність до усихання і до водопоглинання, тепло- й електропровідність. Деревина має високу хімічну стійкість до деяких кислот, солей, мастил, газів.

Для порівняння наведемо основні фізико-механічні властивості твердої породи, наприклад дуба, в порівнянні з м'якою сосною: більша густина  $\gamma = 723 \text{ кг/м}^3$  проти 534 у сосни, границя міцності на розтяг вздовж волокон  $G_m = 145 \text{ МПа}$  проти 103; торцева твердість  $HV = 67,5 \text{ МПа}$  проти 28,5.

Проте обмаль даних про фрикційну поведінку деревини в умовах її контактної взаємодії при терті ковзання, про абсолютні значення величин зносу і коефіцієнта тертя та механізм зношування [3, 4].

До позитивних переваг деревини слід віднести факт легкого оброблення її різанням. При цьому використовуються інструменти різних груп сталей (вуглецевих, легованих, швидкорізальних високолегованих) та твердих сплавів груп ВК і ТК. Дані про їх характеристики (марки, прогартовуваність, теплостійкість, діаметр інструменту, термічну обробку, твердість, структуру, допустиму швидкість різання, вид інструменту або оброблення) подано у [5, 6]. Певний інтерес проявляється до проведення досліджень контактної взаємодії різального інструменту на силові показники при різанні деревини.

Актуальною при цьому постає необхідність підвищення ресурсу роботи дереворізального інструменту, оскільки витрати на його придбання та загострювання є досить значними. Інтенсифікація режимів оброблення деревини можлива при застосуванні твердих сплавів. Але їх використання значно підвищує вартість і ускладнює технологію виготовлення. Тому вигіднішим є застосування методів поверхневого зміцнення для підвищення зносостійкості різальних лез інструментів, виготовлених з однорідного матеріалу. Матеріал інструменту повинен мати необхідні технологічні властивості, зокрема хорошу оброблюваність різанням і тиском, термостійкість, прогартовуваність, стійкість до деформацій та утворення тріщин і певні властивості щодо шліфування.

Зміцнення лез інструментів та відновлення вихідних розмірів деталей відбувається шляхом нанесення на їх поверхню шару покриття, що відрізняється від основи підвищеними механічними характеристиками. Одним із шляхів зменшення витрат на вирішення цих проблем є обґрунтування вибору недорогих матеріалів та способів, які використовують у технологічному процесі зміцнення чи відновлення.

Найбільш простим і ефективним методом нанесення на робочі поверхні лез метало- та дереворізальних інструментів покриттів певного хімічного складу, який дає можливість значно підвищити їх зносостійкість, є електроіскрове легування.

**Сутність технології електроіскрового легування.** Основні переваги технології електроіскрового легування (ЕІЛ) полягають у можливості переносу на поверхню металів і сплавів будь-яких струмопровідних матеріалів, у високій міцності адгезії шару з основою, локальному нанесенні електроіскрового покриття без помітної деформації деталі, уникненні необхідності нагріву всього об'єму виробу.

Принципово метод ґрунтується на використанні електричної енергії, що виділяється миттєво і характеризується високою температурою каналу іскри (до  $1000^\circ\text{C}$ ) та іонізацією міжелектродного проміжку. Оскільки під час одиночного розряду протікають короткі за часом імпульси електричного струму від  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  сек., то відвід тепла не забезпечується теплопровідністю металу і тому його малі об'єми зазнають коливань температури від температури кипіння металів до  $20 \dots 30^\circ\text{C}$ .

Схема процесу ЕІЛ представлена на рис. 1.

Сутність його полягає у наступному. При зближенні електродів 1 і 2 збільшується напруженість електричного поля. Відстань між електродами 5...20 мм буде достатня для виникнення електричного розряду (зона 3), під час якого утворюється канал наскрізної провідності.

Сфокусований потік електронів 4 з катода 2 потрапляє на поверхню анода 1 і за рахунок виділення теплової енергії (тобто система миттєво звільнює накопичену енергію) проходить випаровування 5 найбільш розігрітої частини анода, а від анода відриваються частини 7 (краплі) розплавленого металу, які рухаються до катода 2 зі швидкістю, що є більшою за швидкість руху

анода. Ці продукти викидаються у міжелектродний простір 3. Більш віддалена частина електрода 6 і, відповідно, менш розігріта, оплавлюється.

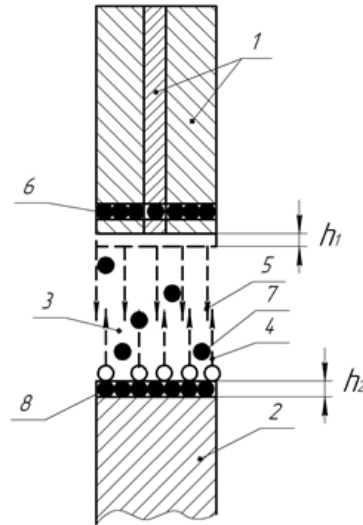


Рис. 1. Схема процесу електроіскрового легування: 1 – анод (комбінований електрод ПДГ [2])

2 – катод (деталь), 3 – зона розряду, 4 – потік електронів з катода до поверхні анода, 5 – потік випаровування найбільше розігрітої частини електродів в зоні розряду, 6 – оплавлена більш віддалена і менш розігріта частина електрода, 7 – продукт оплавленої частини в міжелектродному просторі, 8 – електроіскрове покриття;  $h_1$  – об'єм витраченого аноду в процесі легування,  $h_2$  – об'єм відкладеного шару на катоді за час легування в повітряному середовищі на 9-му режимі роботи

При механічному контакті електродів 1 і 2 частинки 7 зварюються між собою, частинки анода дифундують в метал катода, відбувається взаємодія між обома частинами. Після цього анод відводиться, а на катоді залишається шар 8 міцно зчеплених з катодом частинок аноду (електроіскрове покриття).

Наведене вище свідчить про зміни у структурі поверхневого шару металу: подрібнюється структура, підвищується твердість металу. Завдяки високій іонізації міжелектродного проміжку створюються умови для хімічної взаємодії, що веде до зміни фазового складу поверхневого шару. При ЕІЛ на повітрі утворюються оксиди і в меншій мірі нітриди металів, які беруть участь у технологічному процесі легування. В хімічну взаємодію з матеріалом катода вступають також і компоненти матеріалу анода, на поверхні металу утворюється новий шар зі зміненою структурою, яка не визначається при дії на неї стандартними травниками - так званий «білий шар». При легуванні чистих металів під шаром знаходиться область термічного впливу тобто область відпущеного металу і білий шар (дві області), при легуванні сталевих виробів - 3 області: білий шар, область збагачена вуглецем і область термічного впливу.

**Методика побудови математичних моделей досліджуваних процесів.** Зупинимось на побудові їх функціональних залежностей (аналітичних формул), яким на даний час, присвячено великий обсяг наукових та навчальних розробок. Математичним апаратом цих методик є методи інтерполяції та апроксимації, які широко описані у всіх підручниках, що стосуються висвітлення чисельних методів. Зокрема, метод інтерполяції полягає в тому, що у більшості випадків для відображення функціональної залежності досліджуваного технологічного процесу використовують многочлени Лагранжа або Ньютона. Проте ці формули мають певні недоліки. Формула Лагранжа є досить громіздкою і не настільки загальною, оскільки, якщо виникає потреба у покращенні точності інтерполяції, то при збільшенні експериментальних значень, потрібно наново проводити всі обчислення, бо на одну із змінних формули Лагранжа вони не зберігаються. Стосовно формули Ньютона - то тут не маємо тих проблем, вона є досить зручною, проте у випадку, якщо значення експериментальних даних, які є аргументами змінних формули і утворюють арифметичну прогресію, то не завжди можемо про них так стверджувати.

Вважаємо, що у деяких випадках, де не вимагається висока точність збіжності побудованих функціональних залежностей з експериментальними, можемо інтерполювати ці залежності у вигляді звичайного многочлена певного порядку, проте не вище п'ятого, оскільки з ростом кількості вузлів інтерполяції росте і степінь многочлена. Але від цього, взагалі кажучи, інтерполяційний

многочлен не стає більш точним наближенням табличної функції. Більше того, з таким многочленом важче працювати через його громіздкість.

Нехай величина  $y$  функціонально залежить від деякої величини  $x$ . Це означає, що кожному значенню  $x$  з певної множини  $X$  відповідає одне значення  $y$  із множини  $Y$ . На практиці часто є невідомою залежність між  $x$  і  $y$ , тобто неможливо записати цю залежність у вигляді  $y = f(x)$ . Якщо ж таку залежність і можна встановити, то в багатьох випадках функція  $f(x)$  є настільки складною, що її використання в подальших практичних обчисленнях є недоцільним. Дуже поширеним і практично важливим випадком, коли вид зв'язку між величинами  $x$  і  $y$  є невідомий, є задання відповідності деяких значень величин  $x_i$  величинам  $y_i$  у вигляді таблиці.

Як правило, таблично задані функції виникають в результаті обчислень при експериментальних дослідженнях. Часто потрібно знайти чому рівна величина  $y$  при значеннях величини  $x$ , відмінних від значень  $x_i$ . Отримати такі значення можна лише шляхом складних обчислень або проведенням дорогих експериментів. Тому потрібно вміти хоча б приблизно знаходити значення  $y$  при будь-якому значенні  $x$  із деякої множини  $X$ , маючи в наявності лише деяку кількість значень величини  $x$ .

Це можемо здійснити згідно методів інтерполяції або апроксимації, причому метод апроксимації доцільно застосовувати у випадку великої кількості експериментальних значень досліджуваного процесу.

Розглянемо суть методу інтерполяції, тобто побудови математичної моделі (формули функціональної залежності) для таблично заданих експериментальних значень досліджуваного процесу.

Побудуємо математичну модель за допомогою звичайного многочлена, степінь якого на  $1$  менша від кількості вузлів, тобто якщо вузлів маємо  $n$ , то це буде многочлен  $n-1$  порядку. В практичних задачах такий випадок інтерполяції зустрічається дуже часто.

Нехай заданий таблично деякий досліджуваний процес, тобто функція  $y(x)$ :

Табл. 1

$x_i$	$x_1$	$x_2$	...		$x_n$
$y_i$	$y_1$	$y_2$	...		$y_n$

Побудуємо математичну модель цього процесу, який відповідатиме наближенню  $g(x)$ :

$$g(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 x^2 + \dots + a_{n-1} x^{n-1}, \quad (1)$$

причому будемо вимагати, щоби в точках  $(x_i, y_i)$  (інакше вони ще називаються вузлами інтерполяції) значення многочлена  $g(x)$  співпадали із значеннями таблично заданої функції, тобто щоб виконувались умови:

$$g(x_i) = y_i, i = \overline{1, n} \quad (2)$$

При цьому вважається, що всі точки  $x_i$  є різні:  $x_i \neq x_j$  при  $i \neq j$ . Графічно це означає, що графік многочлена  $g(x)$  проходить через точки з координатами  $(x_i, y_i)$  (рис. 2).

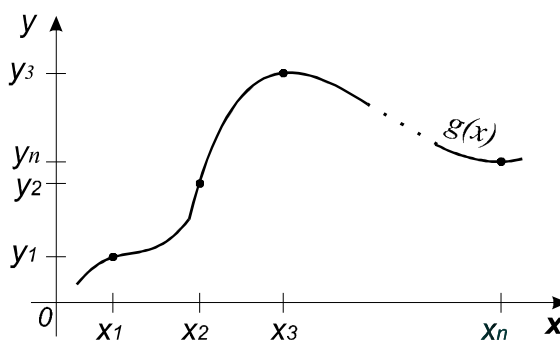


Рис. 2.

Таким чином, при інтерполяції за ступінь близькості таблично заданої функції та інтерполянти  $g(x)$  береться умова співпадання їх значень у вузлах інтерполяції  $x_i$ . Запишемо умови (2) в розгорнутому вигляді:



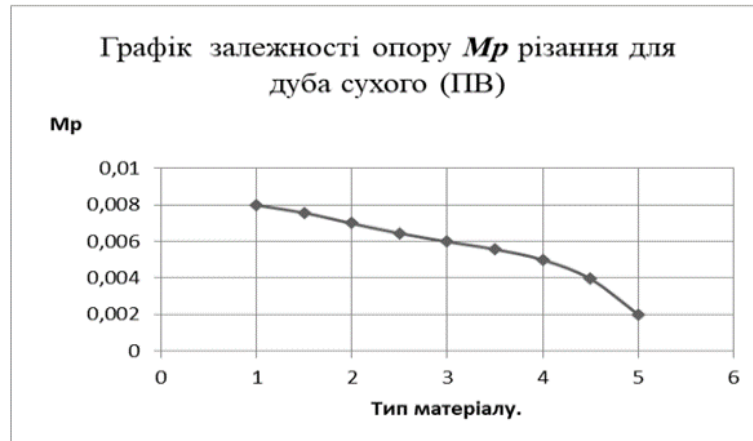
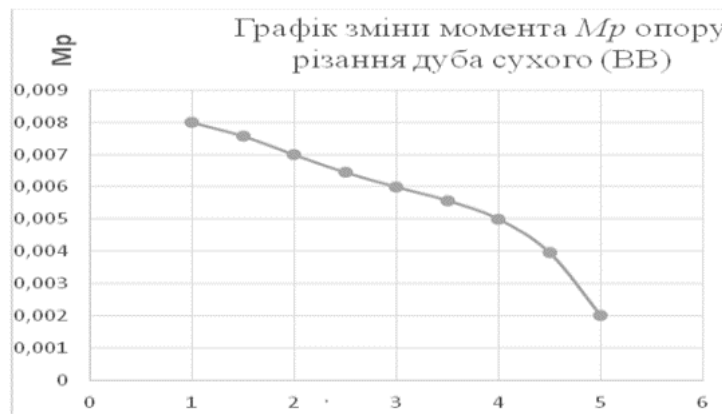


Рис. 3 а

Математична модель для дуба вологого (ПВ):

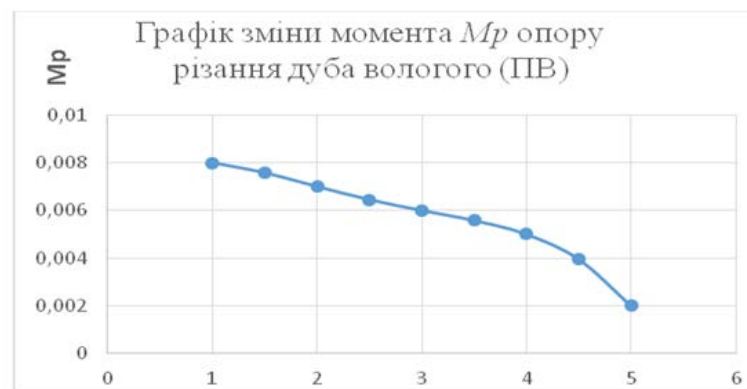
$$M_r = 0,130 - 0,216 \cdot x + 0,150 \cdot x^2 - 0,043 \cdot x^3 + 0,004 \cdot x^4$$



Тип матеріалу

Рис. 3 б

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 4 а):



Тип матеріалу

Рис. 4 а

Математична модель для дуба вологого (ВВ)

$$M_r = 0,300 + 0,0045 \cdot x - 0,0061 \cdot x^2 + 0,0018 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічний вигляд згідно побудованої математичної моделі має наступний вигляд (рис. 4 б):

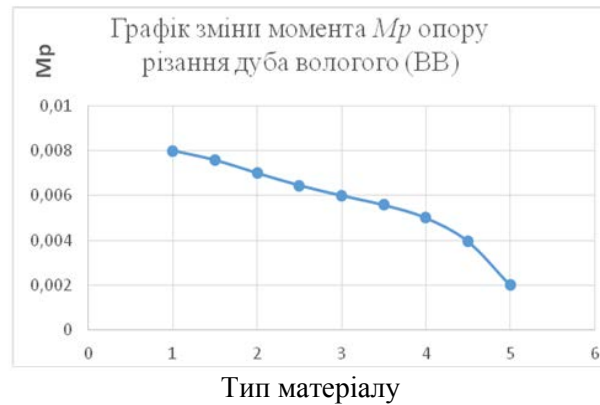


Рис. 4 б

Побудовано математичні моделі на основі обробки експериментальних досліджень усереднених значень зміни моменту ( $M_r$ ) опору різання зубців фрези сталі 9ХС в процесі фрезерування сосни у вологому стані, поперек (ПВ) і вздовж (ВВ) волокон, та наведена їх графічна інтерпретація.

Математична модель для сосни сухої (ПВ):

$$M_r = 0,0020 + 0,0023 \cdot x - 0,0016 \cdot x^2 + 0,0004 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 5 а):

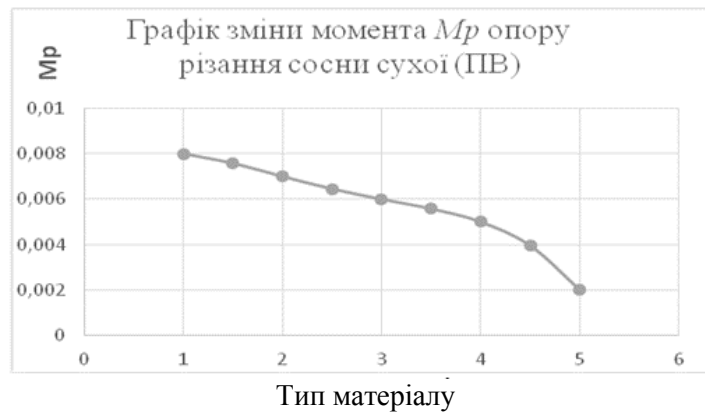


Рис. 5 а

Математична модель для сосни сухої (ВВ):

$$M_r = 0,0016 + 0,0042 \cdot x - 0,0030 \cdot x^2 + 0,0008 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 5 б):

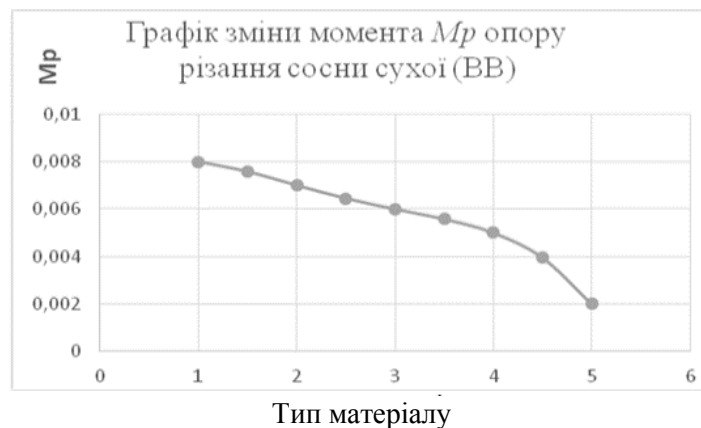


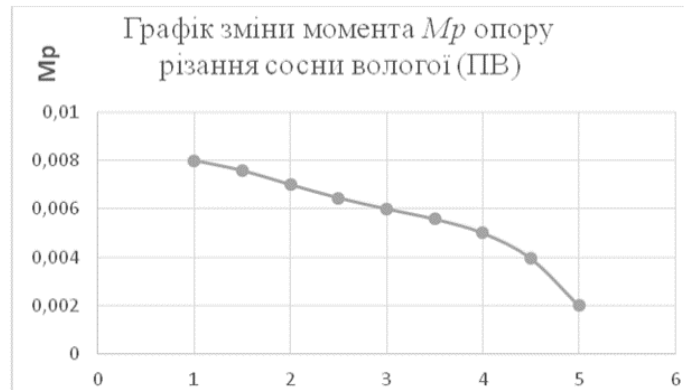
Рис. 5 б



Математична модель для сосни вологої (ПВ):

$$M_p = 0,0050 + 0,0014 \cdot x - 0,0021 \cdot x^2 + 0,0007 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 6 а):



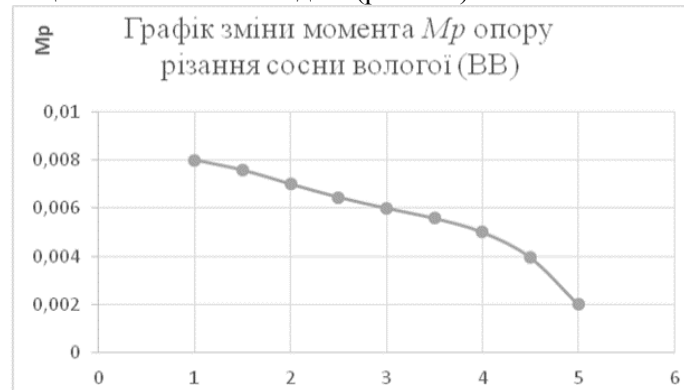
Тип матеріалу

Рис. 6 а

Математична модель для сосни вологої (ВВ):

$$M_p = 0,0020 + 0,0023 \cdot x - 0,0016 \cdot x^2 + 0,0004 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 6 б):



Тип матеріалу

Рис. 6 б

Аналогічний підхід для встановлення достовірності отриманих експериментальних даних можливий для результатів роботи [3] по встановленню закономірностей фрикційної поведінки трибологічних характеристик (величин зносу і коефіцієнтів тертя) інструментальної сталі 9ХС після гартування і низького відпуску з нанесеними на робочу поверхню електродами з порошкових дротів ЕП в контакт з деревиною залежно від породи (листяна, хвойна), її вологості (суха, волога) та напрямку волокон (вздовж, поперек) при зворотно-поступальному рухові.

**Висновок:** На підставі аналізу побудованих математичних моделей та відповідних їм графічних інтерпретацій можемо констатувати, що відповідність між експериментальними значеннями даних моменту опору різання в процесі фрезерування дисковими фасонними фрезами зі зміцненими електроіскровими покриттями зубцями дуба і сосни у сухому і вологому стані, вздовж і поперек волокон, та побудованими моделями (функціональними залежностями) лежить в межах від 1% до 3%.

### Література

1. Василь Попович. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Навч. посібник для ВНЗ: у 2-х кн. Книга 1. (Частина I, II, III). – Львів: Вид-во Папуга, 2003. – 264 с.
2. Голубець В. М. Вплив електроіскрових покриттів інструментів на силові показники процесу фрезерування деревинних матеріалів / Голубець В. М., Гвоздецький В. М., Пашечко М. І., Шпуляр Ю. С // Фіз.-хім. механіка матеріалів, 2022, том 58, № 6. - С. 115-120.

3. Голубець В. М. Зносостійкість електроіскрових покриттів отриманих із порошкових дрітів у контакті з деревиною / Голубець В. М., Пашечко М. І., Гончар І. М., Шпуляр Ю. С., Гасій О.Б. // Проблеми тертя та зношування. – К.: НАУ. – 2022, №2. – С. 4-18.
4. Білоус О.В. Технологічні засади підвищення зносостійкості дереворізального інструменту комплексною електроіскровою і лазерною обробкою: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Хмельницький: ХНУ, 2002.
5. Голубець В. М., Пашечко М. І., Гасій О.Б., Шпуляр Ю. С. Електродні матеріали для електроіскрового легування у контексті трибоматеріалознавства: монографія / Львів: ВД «Панорама», 2023. – 104 с.
6. Кірик М. Д. Інструмент для оброблення деревини та деревних матеріалів: навч. посібн. – Львів. – Коломия, 1999. – 190 с.