

**ГАСАНОВ М.І., ОХРИМЕНКО О.А., КЛОЧКО О.О., ПЕРМЯКОВ Є.О., ГУБСЬКИЙ С.О., ТИМОШЕНКО Б.Я., СТАРЧЕНКО В.В.**

## **ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМУ ЗАОКРУГЛЕННЯ РІЖУЧИХ КРОМОК ЧЕРВ'ЯЧНИХ ТВЕРДОСПЛАВНИХ МОДУЛЬНИХ І НЕМОДУЛЬНИХ ФРЕЗ ПРИ ЗУБЧАСТІЙ ОБРОБЦІ**

Наукові основи досліджень процесів заокруглення кромки твердосплавних інструментів при зубчастій обробці базуються на ключових положеннях теорії зносу, механіки різання та трибології. Формування прогнозованих округлень з радіусом у межах 20–200 мкм залежить від режимів різання та умов обробки. Уменьшення микросколов на кромках і оптимізація геометрії режущих елементів дозволяють підвищити прочність і зносостійкість інструментів. В початковій стадії віброабразивної обробки переважає макрорухливе руйнування кромки з нелінійною кінетикою – відділення зернових щєбня, порівнянних з радіусом округлення, в кінцевій стадії – микрорухливе з лінійною – відділення одиночних зерен, порівнянних з висотою неровностей. Момент переходу визначається величиною округлення, яка критична для макроміцності. Показана перевага експоненціальної моделі, отриманої при розв'язанні диференціального рівняння для опису залежності радіуса округлення від початкового радіуса, кута заточування і тривалості обробки для різних комбінацій наповнювачів і оброблюваних твердих сплавів. Кінетика інших мікрогеометричних параметрів описується тією ж моделлю, але з кінцевим загасанням замість лінійного перетину.

**Ключові слова:** заокруглення кромки, абразивний знос, зубчаста обробка, режими різання, твердосплавний інструмент, кінетика.

**HASANOV M.I., OKHRYMENKO O.A., KLOCHKO O.O., PERMYAKOV E.O., GUBSKY S.O., TYMOSHENKO B.YA., STARCHENKO V.V.**

## **STUDY OF THE MECHANISM OF EDGE ROUNDING OF HARD-ALLOY MODULAR AND NON-MODULAR WORM CUTTERS DURING GEAR MACHINING**

The scientific foundations of research into the processes of rounding the edges of carbide tools during gear cutting are based on the key principles of wear theory, cutting mechanics and tribology. The formation of predicted roundings with a radius of 20–200 μm depends on cutting modes and processing conditions. The reduction of microchips on the edges and the optimization of the geometry of the cutting elements make it possible to increase the strength and wear resistance of the tools. In the initial stage of vibroabrasive processing, macrobrittle destruction of the edges with nonlinear kinetics prevails - the separation of rubble grains comparable to the rounding radius, in the final stage - microbrittle with linear - the separation of single grains comparable to the height of the irregularities. The moment of transition is determined by the amount of rounding, which is critical for macrostrength. The advantage of the exponential model obtained by solving the differential equation for describing the dependence of the rounding radius on the initial radius, the sharpening angle and the duration of processing is shown for various combinations of fillers and machined hard alloys. The kinetics of other microgeometric parameters is described by the same model, but with a finite damping instead of a linear cross section.

**Key words:** rounding of edges, wear mechanisms, gear hobbing, cutting modes, hard alloy tools, kinetics.

**Вступ.** Розвиток технологій зубчастої обробки вимагає глибокого розуміння механізмів зношування та заокруглення кромки твердосплавних інструментів. Ці процеси мають критичне значення для забезпечення надійності та ефективності різальних інструментів, що використовуються у високоточних операціях, таких як хоббінг зубчастих коліс. Заокруглення кромки є наслідком абразивного зносу, який проявляється в умовах високих контактних навантажень і температур [1, 2].

Експериментальні дослідження показують, що заокруглення кромки характеризується двома основними стадіями: початковою швидкою нелінійною фазою та стабільною лінійною фазою [3, 4, 5]. Ці стадії визначаються комплексом параметрів, включаючи геометрію ріжучого клина, властивості матеріалів інструменту і заготовки, а також режими різання [6, 7, 8, 9]. Наприклад, оптимізація геометричних параметрів кромки може значно зменшити концентрацію напруг у місцях її дотику із заготовкою, що сприяє підвищенню експлуатаційної довговічності інструментів [10].

Особливістю заокруглення кромки є його зв'язок із механізмами утворення мікропошкоджень, таких як відколи, які можуть негативно впливати на концентрацію напруг. Проте на пізніх стадіях процесу ці пошкодження вирівнюються, що дозволяє досягти сприятливого профілю ріжучої частини [8]. Крім того, експерименти підтверджують, що властивості твердих сплавів, таких як ВК8 і Т15К6, безпосередньо впливають на характер зношування. Для більш крихких матеріалів спостерігається інтенсивніше утворення мікротріщин при низьких температурах обробки.

Значну роль у процесі заокруглення кромки відіграють режими обробки. Наприклад, підвищення температури або зниження жорсткості системи може призводити до змін у характері зношування, таких як перехід від крихкого до пластичного руйнування [2, 10]. Це особливо актуально для високопродуктивних процесів зубчастого хоббінгу, де стабільність параметрів заокруглення визначає якість кінцевого продукту [6].

Вивчення кінетики заокруглення має не лише практичну, але й теоретичну цінність. Воно дозволяє розробити математичні моделі, які описують взаємозв'язок між режимами обробки, властивостями матеріалу та характеристиками зносу. Такі моделі стають основою для оптимізації технологічних процесів, що забезпечують прогнозовану якість оброблених поверхонь [4].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідження механізмів заокруглення кромки твердосплавних інструментів підтверджують, що процес абразивного зносу має дві основні фази: нелінійну початкову і стабільну лінійну. Залежність між радіусом округлення  $\rho$  та тривалістю обробки  $\tau$  демонструє вплив температурних, механічних і геометричних факторів [3, 4].

Мета дослідження. Метою дослідження є встановлення закономірностей формування заокруглень на кромках твердосплавних інструментів під час зубчастої обробки, визначення оптимальних режимів хоббінгу, що забезпечують підвищення зносостійкості та міцності інструменту.

Основна частина. Кінетика заокруглення кромки твердосплавного інструменту при зубчастій обробці.

При зубчастій обробці кромки зуборізальних інструментів округляються, і при різних параметричних параметрах режимів різання [1] виходить прогнозований радіус заокруглення  $\rho$  від 20 до 200 мкм, округлення має правильну геометричну форму (циліндр), високу однорідність і низьку шорсткість (рис. 1). Це встановлюється за допомогою інструментального мікроскопа, методу світлового розрізу на подвійному мікроскопі, металографічного аналізу мікромембран, а також профілювання. Відколи на краях розміром до 40...60 мкм в залежності від умов різання повністю виключаються, а більші набувають сприятливий рельєф з меншою глибиною і гладкістю переходів, що різко знижує їх негативний вплив як концентраторів напруги (рис.2).

Заокруглення кромки є наслідком процесу абразивного зносу на матеріалах різної твердості і пластичності [2]. Однак кінетика заокруглення вивчена недостатньо, що не дозволяє розкрити механізм заокруглення і уточнити режими хоббінга в залежності від коефіцієнта фрезерування і тривалості зубчастої обробки. При хоббінгу твердосплавним інструментом процес формування округлості і кромки є основним фактором підвищення міцності і зносостійкості інструменту [7].

До кінетики заокруглення кромки інструменту при зубчастій хоббінгу металів [2] відносяться стадії швидкого нелінійного округлення і відносно повільні лінійні, схожий характер мають процеси зносу, які, як правило, мають обкатну область [5, 8]. На всіх залежностях  $\rho(t)$  Початковий нелінійний перетин «нестационарне» (за аналогією, наприклад, з процесом повзучості; округлення і кінцеве лінійне - «стійке» округлення (рис. 3, 4, 5). Залежність швидкості округлення від значення радіуса при початковому електронному крані вказує на значну роль в міцності ріжучого клина, що говорить про крихко-механічному або втомно-механічному зносі. Відсутність такої залежності на завершальному етапі, незначна роль в обсязі міцності свідчить про мікрокрихких переломах. З фрезеруванням зубів сплави ВК8 і Т15К6 при зниженні температури і жорсткості системи починає переважає крихке незернисте руйнування [6].

На початку процесу вирішальну роль відіграють і геометричні параметри ріжучого клина як консольного бруса змінного перерізу (рис. 6). Встановити наявність втоми при вібраційному аналізі прямим фізичним експериментом складно, так як мова йде про ріжучу кромку. Вона вивчала вплив «передісторії» на інтенсивність ребер з різним початковим радіусом, отриманих вручну за допомогою мази осла (рис.7). Виникаючі залежності практично справляються. При цьому технологічна залежить в початковому періоді тільки і спадковість не впливає на інтенсивність біологічної активності, яка від величини радіуса, а в заключний період вона постійна. Мабуть, поділ частинок відбувається в результаті одиночних ударів. Аналітичний опис лінійного перетину тривіально, для нелінійного можна використовувати відомі моделі: силові (використовуються для опису віброабразивної обробки твердого сплаву [6], а також процес повзучості з малими швидкостями [1, 3], що є його узагальненням полінома (використовується для опису обкатного зносу [4]), а також нестійка повзучість з великими швидкостями [5] і експоненціальний (використовується для опису швидкості потоку [5], а також прискореного «катастрофічного» зносу [7]).

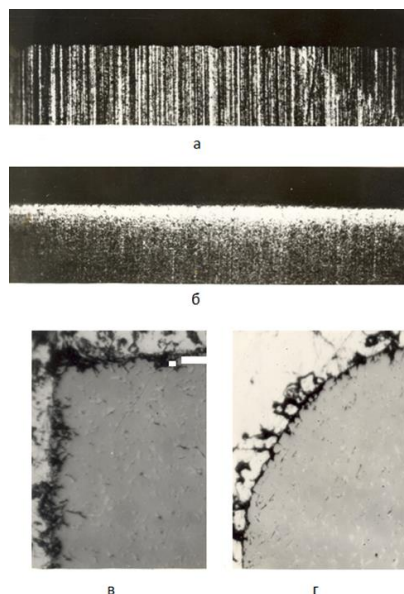


Рис. 1 – Вплив віброабразивної обробки на форму ріжучої кромки складальної фрези : а,б – у плані ( $\times 200$ ); в,г – у перерізі ( $\times 1600$ ); а,в – до обробки; б,г – після обробки (ВМ40С; Т5К10; кераміка ПТ 15 $\times$ 15; амплітуда 0,6 мм; частота 46 Гц; час обробки – 60 хв.)

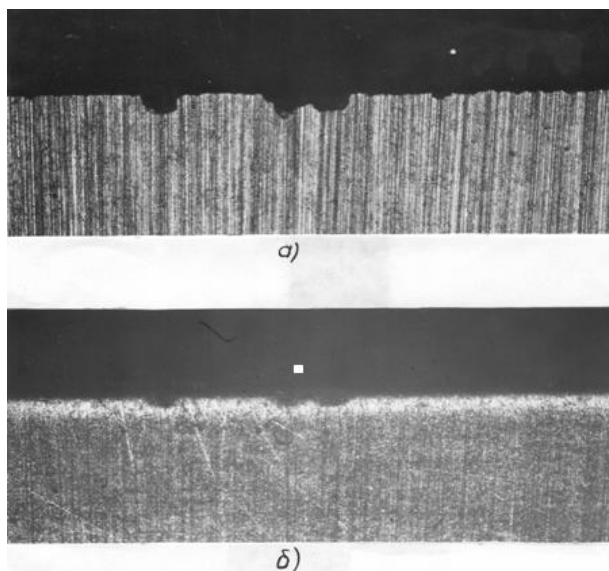


Рис. 2 – Форма ріжучої кромки в плані з ознаками відколів ( $\times 200$ ):  
 а) – до віброабразивної обробки; б) – після віброабразивної обробки. (ВМ40С; Т5К10; кераміка ПТ 15 $\times$ 15; амплітуда 0,6 мм; частота 46 Гц; час обробки 60 хв).

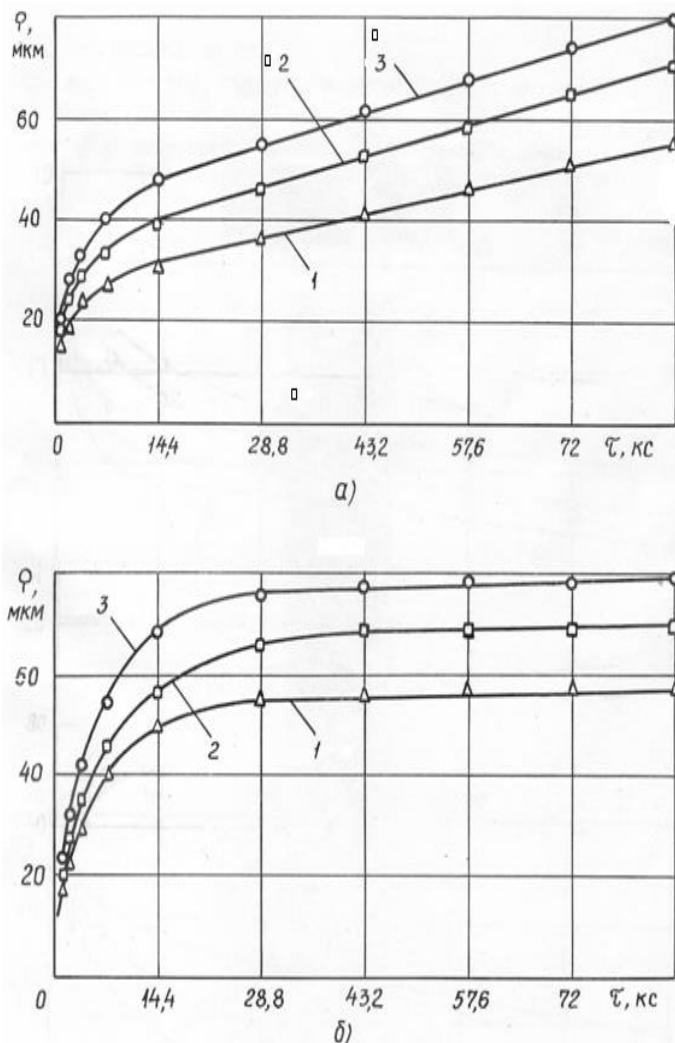


Рис. 3 – Залежність середнього радіуса округлення від тривалості віброабразивної обробки  $\tau$ :  
 а) P18; б) Т15К6. 1 –  $\beta = 75^\circ$ ; 2 –  $90^\circ$ ; 3 –  $105^\circ$  (ВМ40С; бой фарфора; амплітуда 0,6 мм; частота 46 Гц).

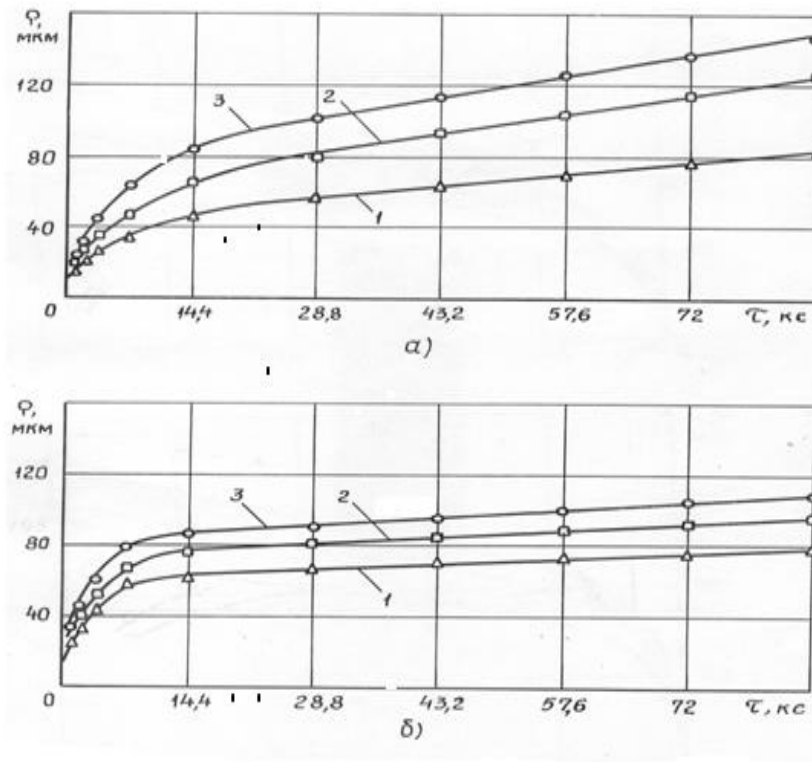


Рис. 4 – Залежність середнього радіуса округлення  $\rho$  від тривалості віброабразивної обробки  $\tau$ : а) P18; б) T15K6; 1 –  $\beta = 75^\circ$ ; 2 –  $90^\circ$ ; 3 –  $105^\circ$  (BM40C, кераміка ПТ15×15; амплітуда 0,6 мм; частота 46 Гц).

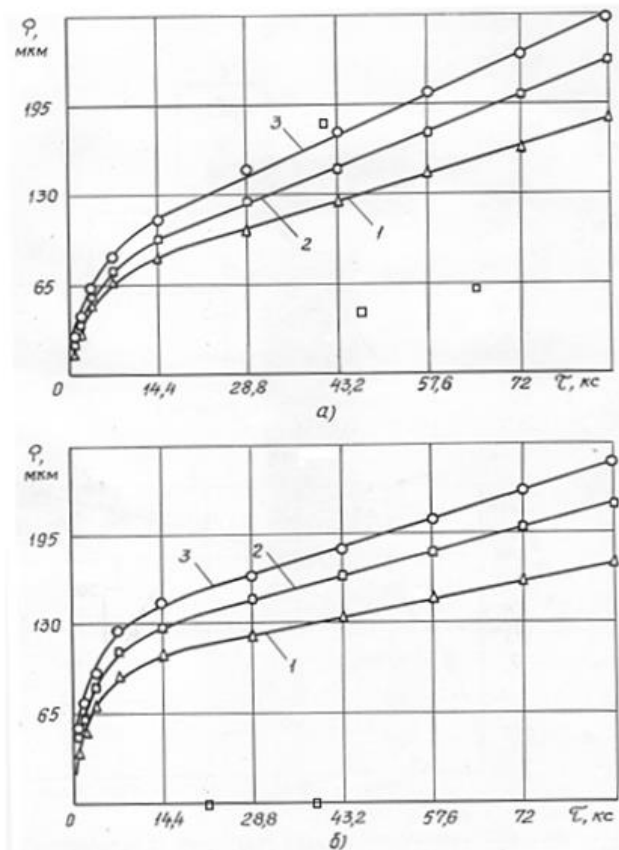


Рис. 5 – Залежність середнього радіуса округлення  $\rho$  від тривалості віброабразивної обробки  $\tau$ : а) P18; б) T15K6. 1 –  $\beta = 75^\circ$ ; 2 –  $90^\circ$ ; 3 –  $105^\circ$ . (BM40C, суміш бою фарфора і карбиду кремнію; амплітуда 0,6 мм; частота 46 Гц).

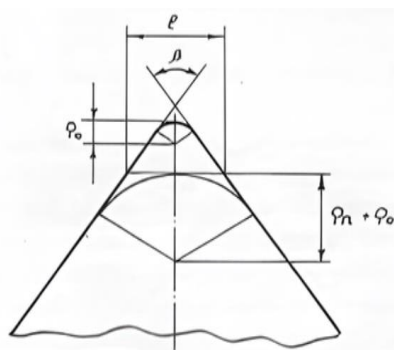


Рис. 6 – Геометричні параметри нормального перерізу леза.

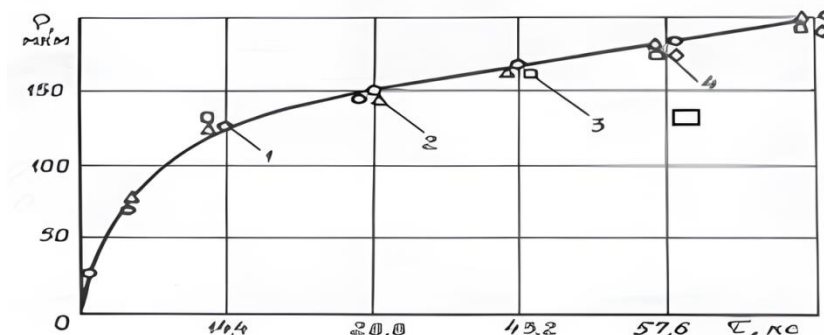


Рис. 7 – Залежність радіуса округлення від тривалості віброабразивної обробки: 1 – гостро заточений інструмент з радіусом 10 мкм; 2 – віброоброблений інструмент з радіусом 25 мкм; 3 – 60 мкм; 4 – 160 мкм. (VM40C; суміш бою фарфора і карбіду кремнію; амплітуда 0,6 мм; частота 46 Гц; T15K6;  $\beta = 105^\circ$ ).

Крім відомих з літератури, нами була запропонована логарифмічна модель. Поліноміальна модель:

$$\rho = \begin{cases} \rho_m - \frac{\rho_m - \rho_0}{\tau_m^2} (\tau_m - \tau)^2 & \rho \leq \rho_k \\ \rho_0 + \rho_m + a\tau & \rho \geq \rho_k \end{cases}$$

де  $\rho_m$  - радіус, відповідний вершині параболи, мкм;  
 $\rho_0$  - початковий радіус округлення, мкм;  
 $\rho_n$  - максимально можливе нелінійне збільшення радіуса, мкм;  
 $\rho_k$  - радіус, відповідний переходу нелінійного ділянки до лінійного, мкм;  
 $\tau_m$  - тривалість вібраційної обробки, відповідна вершині параболи, с;  
 $a$  - швидкість лінійного зносу, мкм/с.

Логарифмічна модель:

$$\rho = \begin{cases} \frac{\rho_k}{\ln A} \ln [A - B(\tau_k - \tau)] & \rho \leq \rho_k \\ \rho_0 + \rho_n + a\tau & \rho \geq \rho_k \end{cases}$$

де  $A$  - коефіцієнт;  
 $B$  - коефіцієнт,  $c^{-1}$ ;  
 $\tau_k$  - тривалість коливальної обробки, відповідна переходу нелінійного ділянки в лінійний, с.  
 Експоненціальна модель:

$$\rho = \rho_0 + \rho_n [1 - \exp(-g\tau)] + a\tau \tag{1}$$

де  $g$  - показник нелінійного зносу,  $c^{-1}$ .

Справедливість (1) для нелінійних перетинів підтверджується лінійністю залежностей, відповідно, перевірка яких показала, що експоненціальна модель краще описує експериментальні дані. Коефіцієнти експоненціальної моделі мають чіткий фізичний зміст, вона дозволяє єдиним виразом описати обидві стадії процесу, спростити відповідні розрахунки і перевірити висунуті гіпотези про швидкість зміїку округлення шляхом створення імовірнісної моделі процесу.

Нехай значення радіуса округлення дорівнює сумі його початкового значення, округлення в результаті нелінійного зносу  $\rho_x(\tau)$  і округлення в результаті лінійного зносу  $a\tau$ :

$$\rho = \rho_0 + \rho_x(\tau) + a\tau$$

З моменту руйнування частинок виникає не сукупність, а одиничний вплив (рис. 7). Періодичність поділу частинок дорівнює частоті впливів наповнювача на кромку  $f$ . Час обробки значно більше (на 4...6 порядків) за період коливань робочої камери, тому значення  $\rho(\tau)$  є результатом великої кількості відділень частинок. Швидкість округлення  $\rho_{AVNA}$  визначається частотним розподілом  $f$ , а приріст  $\Delta\rho(\tau)$  можна виразити рівнянням:

$$d\rho(\tau)/d\tau = f \cdot \Delta\rho(\tau)$$

Частота впливу наповнювача на кромку  $f'$  пропорційна частоті коливань робочої камери  $f: f' = c \cdot f$ . Оскільки величина радіуса значно (на 2...3 порядки) менше розмірів інструменту і наповнювача, частота ударів не залежить від величини радіуса  $i$ , отже, тривалості обробки:  $C(\tau) = \text{const}$ .

Нелінійне округлення - це зняття (нокаут) Одиниці виміру (Блоки) твердосплавні зерна в результаті впливів нанонаповнювач по краю. Обов'язковою умовою процесу є недостатній ( $Y$  цих умовах) міцність ребра, що визначається подкритичним значенням радіуса його округлення. Якщо радіус дорівнює  $\rho_n$ , потім удари наповнювача від заданого Маса, частота та амплітуди викликають макроруйнування краю. Від стану міцності на початку обробки - розмір частинки, що підлягає видаленню (за координатою  $(p)$  напрогулянки в діапазоні  $0 \leq \Delta\rho_n(\tau) \leq \rho_n$  і Тоді, коли Радіус дорівнює  $\rho_x(\tau)$  - в діапазоні  $0 \leq \Delta\rho_n(\tau) \leq [\rho_n - \rho_x(\tau)]$ . Розмір частинок є випадкова величина. Якщо вважають, що Форма розсилки Такий розмір використовується для обробки Отже не змінюється, тоді математичне очікування  $D\rho(\tau)$  буде пропорційно  $[\rho_n - \rho_x(\tau)]$ :

$$\Delta\rho(\tau) = C // [\rho_n - \rho_x(\tau)]$$

$$\frac{d\rho_x(\tau)}{d\tau} = C \cdot C // f [\rho_n - \rho_x(\tau)]$$

Таким чином, експоненціальну модель  $(\rho_x(\tau))$  можна тримати, виходячи з припущень про механізм вібраційної обробки твердих сплавів.

Підтвердження описаного механізму було отримано шляхом вивчення дисперсності шламу. Спеціально розроблене обладнання дозволило отримати достатній для розрахунку твердосплавний шлам Т15К6. Метод полягав у відокремленні легших частинок наповнювача від важких твердосплавних частинок, які осідають під час зливу рідини, що містить ще не осіли частинки. Проби шламу, що відповідають двом стадіям обробки (від 0 до 30 хвилин і від 0 до 240 хвилин), досліджувалися при збільшенні X1350. Твердосплавні частинки були забруднені наповнювачем і мали гострокутну форму. Розподіл розмірів частинок підпорядковувався логарифмічно-нормальному закону, що свідчить про постійну форму розподілу на всіх етапах обробки.

Зі збільшенням тривалості обробки збільшувалась дисперсія частинок, а розміри частинок зменшувались через заокруглення їх країв. Поява великих частинок (більше 25-30 мкм) не може бути результатом обробки лише твердого матеріалу. Зменшення розміру частинок наповнювача обумовлено тими ж причинами, що й для карбиду. Зі збільшенням часу обробки коефіцієнт варіації розмірів частинок зменшується більш ніж у 3 рази, що свідчить про зменшення нерівностей і підвищення однорідності структури поверхневого шару.

На підставі отриманої моделі оцінимо критичне значення радіуса округлення. Довжина шляху руйнівної тріщини

$$l = 2(\rho_0 + \rho_n) \frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\cos \frac{\beta}{2}}$$

Для статичного навантаження, якщо умова вважати її застосованою до кромки:

$$\sigma_n = \frac{M}{W}$$

де  $\sigma_n$  — межа міцності на розрив при вигині, МПа;

$M$  - згинальний момент, Н·м;

$W$  - момент опору,  $\text{м}^3$ .

$$M = P\rho_n \left( \frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}} \right),$$

$$W = \frac{Ll^2}{6},$$

де  $L$  - довжина ріжучої кромки, м.

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{6P\rho_n}{Ll^2} \left( \frac{1 - \sin \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}} \right).$$

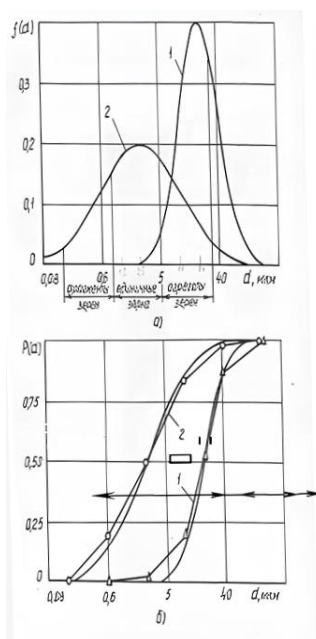


Рис. 8 – Вплив стадії віброабразивної обробки на дисперсність отриманого шламу:  
а) – густина розподілу частинок шламу; б) – функція розподілу. 1 – на початковій стадії обробки; 2 – на кінцевій (ВМ40С; кераміка ПТ 15×15; амплітуда 0,6 мм; частота 46 Гц)

Нехтуючи значенням  $\rho_0$ , мале в порівнянні з  $\rho_n$ , отримуємо  $\rho_0 \rho_n$

$$\rho_n = \frac{3P \cos^2 \frac{\beta}{2}}{2\sigma_{\text{н}} \sin \frac{\beta}{2} (1 - \sin \frac{\beta}{2})}, \quad (2)$$

де  $P$  - питоме навантаження (на одиницю довжини кромки), Н/м.

Для динамічного навантаження ударна в'язкість:

$$a_1 = \frac{E}{F},$$

де  $E$  - енергія удару, Дж;

$F$  - площа розлому,  $\text{м}^2$ .

$$\rho_n = \frac{q \cos \frac{\beta}{2}}{2a_1 (1 - \sin \frac{\beta}{2})}, \quad (3)$$

де  $q$  - питома енергія (на одиницю довжини ребра), Дж/м.

Коефіцієнти отримано методом найменших квадратів (табл. 1). На рис. 3, 4, 5 показані криві за рівняннями, а точки — за експериментальними даними. На нелінійному розрізі інтенсивність округлення спочатку вища, а потім нижча за прогнозовану. Знос гранул наповнювача зменшує їх розміри та енергію впливу на кромку, що відображається у відхиленнях експериментальних точок. На лінійній ділянці швидкість зносу спочатку вища, а потім нижча, ніж у лінійній моделі.

Швидкість лінійного зносу зростає зі збільшенням кута заточки, що відповідає зменшенню обсягу матеріалу, що видаляється. Швидкість зносу найвища для суміші, менша для ПТ і найнижча для порцеляни, що пов'язано з падінням мікротвердості наповнювача (29,0; 29,8 і 6,5 ГПа). Швидкість зносу сталі Р18 значно більша за Т15К6, що відповідає їх мікротвердості (9,0 і 15,5 ГПа). Різниця в твердості матеріалів сильніше впливає на м'які наповнювачі, ніж на тверді. Подібна закономірність відома в теорії різання [6]. Співвідношення швидкості зносу Р18 і Т15К6 становить для суміші 1,5 рази, для ПТ — 3 рази і в 10 разів для порцеляни.

Таблиця 1 – Показники віброабразивної оброблюваності кромок – коефіцієнти рівняння

Контактуючі матеріали		Показники оброблюваності								
		Швидкість лінійного зносу $a$ , $10^{-4}$ мкм/с			Граничне нелінійне збільшення радіусу $\rho_n$ , мкм			Показник нелінійного зносу $q$ , $10^{-5}$ с $^{-1}$		
Вид абразиву обробки пластин для зубофрезерування	Оброблюваний матеріал	для кутів заточування, град.								
		75	90	105	75	90	105	75	90	105
Бій фарфора	Р18 Т15К6	3,2 0,3	4,2 0,3	4,3 0,5	17 44	24 57	32 65	33 17	30 17	30 17
ПТ15×15	Р18 Т15К6	4,2 1,8	7,5 2,3	7,8 2,7	34 52	50 65	68 74	14 28	12 28	14 28
Суміш фарфора і SiC	Р18 Т15К6	13,2 8,3	17,7 11,8	20,0 13,8	57 88	62 103	74 115	28 30	28 33	28 36

Величина зростає зі збільшенням  $\rho_n$   $\beta$ . Порівняння прогнозованих і експериментально отриманих залежностей показує, що на відміну від  $(4\rho_n(\beta))$ , адекватно описує експериментальні дані (табл. 2), що відповідає динамічному характеру впливів при вібробробці [2, 4, 5].

Для порівняння була розрахована відносна величина:  $\rho_{no}$

$$\rho_{no} = \frac{\rho_n(\beta)}{\sum_{i=1}^m \rho_n(\beta_i)}$$

де  $i = 1, 2, \dots, m$  - число кута заточування, що дозволило виявити залежність, практично не знижуючи точності, так як знаменник  $\rho_n(\beta)$  (2) визначається в рази точніше чисельника.  $\sqrt{m}$

Таблиця 2 – Перевірка адекватності залежності радіуса  $\rho_n$  від кута заточування

Кут заточування, град	Величина, $\rho_{no}$ за формулою		Величина, $\rho_{no}$ за даними експерименту						В середньому
	(2)	(3)	фарфор		ПТ		суміш		
			Р18	Т15К6	Р18	Т15К6	Р18	Т15К6	
75	0,360	0,275	0,23	0,27	0,22	0,27	0,30	0,29	0,26
90	0,330	0,327	0,33	0,34	0,33	0,34	0,32	0,34	0,33
105	0,309	0,398	0,44	0,39	0,45	0,39	0,38	0,37	0,40

Співвідношення радіусів для сталі Р18 і сплаву Т15К6 не відповідає прогнозованим рівнянням (2) або (3) (табл. 3). При вібраційній обробці критичніше не міцність в мікрообсягах, а міцність кордонів зерен. Розмір



твердосплавних зерен становить 2 ... 4 мкм, а висота нерівностей — 0,5...1,0 мкм. При заточуванні інструментів радіус заокруглення для інструментальної сталі становить 10...12 мкм, для швидкодуючих — 12...15 мкм, для суцільних щілин — 18...24 мкм, для кераміки — 18...31 мкм [9]. Співвідношення радіусів швидкохідних і твердосплавних знарядь становить 0,6...0,7, що відповідає таблиці 3.5. Механізм заокруглення кромки при заточуванні обумовлений стружкою від нерівномірного сольового ефекту [1].

Зменшується кількість наповнювачів з  $\rho_n$  mes - PT - farf або в зв'язку зі збільшенням радіуса контакту, що знижує контактні напруги. Радіус округлення для наповнювача становить 4 ... 9 мкм, для PT — 6...12 мкм, для фарфору — 10...16 мкм.

Таблиця 3 – Перевірка адекватності залежності радіуса  $\rho_n$  від властивостей оброблюваного матеріалу.

Кут загострення, град	Відношення радіусів $\rho_n$ для P18 та T15K6 по формулі		Відношення радіусів $\rho_n$ для P18 та T15K6 за даними експерименту			
	(2)	(3)	фарфор	ПТ	суміш	в середньому
75	0,383	0,340	0,69	0,65	0,65	0,56
90			0,42	0,77	0,60	0,60
105			0,49	0,92	0,64	0,68
В середньому			0,43	0,78	0,63	0,61

Швидкість нелінійного заокруглення практично не залежить від кута заточування (табл. 1) . Для T15K6 швидкість визначається твердістю наповнювача і зростає поспіль: farfor - pt - s m es. При ударівелика ймовірність того, що ви вріжетеся вербоюанії гранулами наповнювача m ala, тому швидкість визначається ймовірністю відколів карбіду, в залежності від твердості, наповнювача, розташованого в однаковій послідовності.

При більш детальному впливі кута заточування кромки було встановлено, що кінетика заокруглення відповідає (3) - (рис. 9). Граничний радіус точки підпорядкований (10). Відхилення експериментальних точок від розрахунку рівняння менше 5%.

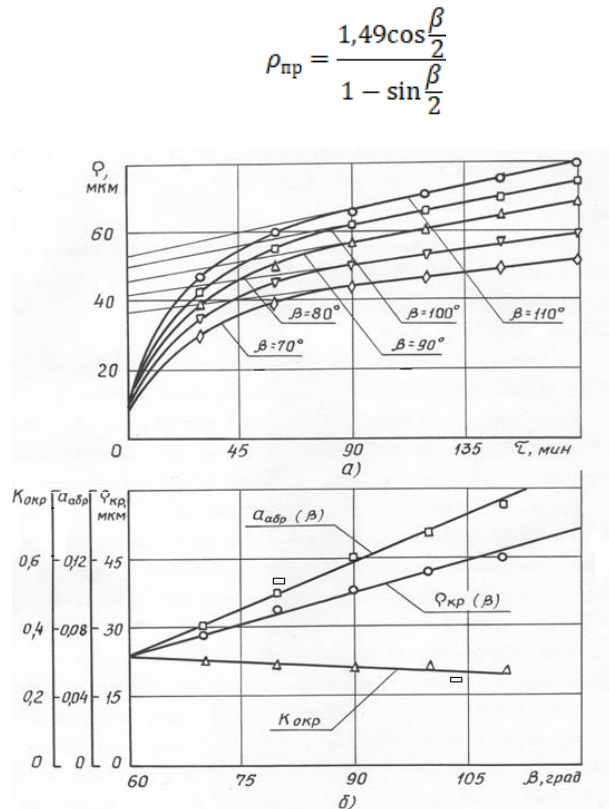


Рис. 9 – Вплив кута загострення кромки на кінетику її заокруглення: а) – залежність радіусу заокруглення від тривалості обробки; б) – залежність показників оброблюваності від кута загострення (BM-05; T15K6; кераміка П12; амплітуда 0,5 мм; частота 35 Гц)

Швидкість стаціонарного заокруглення лінійно зростає зі збільшенням кута заточування (аналогічно табл. 1). Також спостерігається тенденція до збільшення швидкості сталого заокруглення при підвищенні кута заточування. Окрім шорсткості плоских поверхонь, кромки і радіуса заокруглення кромки, показник якості поверхні після вібраційної обробки включає також радіус заокруглення вершин. Це питання важливе для ріжучих інструментів, оскільки верхня частина інструмента має низьку геометричну міцність і є місцем локалізації зносу, відколів та пластичної деформації. Збільшення радіуса заокруглення порівняно з радіусом заокруглення країв є важливим фактором для покращення якості чорнового і напівчистового інструменту.

При різних режимах механічної обробки на ділянці радіуса кромки, яка прилягає до верхньої частини інструмента, округлення з радіусом змінної величини нормується. Величина радіуса плавно змінюється від мінімуму в точках сполучення радіусного перетину з лінійним до максимуму в вершині. Відношення радіуса округлення в середині радіусного перетину до значення радіуса на його краях може становити 1...2 залежно від кута на вершині, величини радіуса на вершині, характеристик абразивного наповнювача і частоти вібраційної обробки. У вхідному та бробразивному режимах радіус округлення вершин дорівнює 1,3...1,6 радіусів ребер. Таке співвідношення досягається при використанні гранул наповнювача, порівняних з оброблюваними продуктами.

Найважливішими факторами в процесі округлення є властивості наповнювача і карбіду, такі як зернистість та жорсткість (рис. 10). Кінетика шорсткості площин аналогічна описаній раніше. Більшість залежностей адекватні рівнянням (3, 2), але є й випадки з інкубаційним періодом, що добре описуються експоненціальними залежностями. Відхилення від них мінімальні для радіусів округлення, що відповідає точності вимірювання. За 180 хвилин шорсткість країв зменшується з 1,9...2,2 мкм до 0,18...0,40 мкм, що в 5-10 разів.

Показники цих залежностей змінюються у вузьких межах через низьку точність визначення за експериментальними даними і статистичний характер вібраційного процесу. Найвищий показник наближення до стабільного радіуса округлення, менший — до стабільної шорсткості площини і найменший — до стійкої шорсткості країв. Останній зменшується на порядок незалежно від наповнювача.

Твердість в'язучого наповнювача найбільше впливає на інтенсивність округлення (рис. 10). Зі збільшенням твердості від М до Н продуктивність округлення знижується в 3 рази, а питоме та пікірування — в 15 разів. При вібраційній обробці твердість М Ra знижується з 0,52...0,57 мкм до 0,12...0,15 мкм, а жорсткість НТ — з 0,56 мкм до 0,27...0,31 мкм. Зі збільшенням зернистості наповнювача з 6 до 40 радіус округлення збільшується в 1,6 рази, а питомий знос — в 3 рази (рис. 11).

Для отримання малих радіусів шорсткість країв є визначальним фактором при виборі наповнювача. Радіус 30...40 мкм з м'якими крупнозернистими наповнювачами можна отримати за короткий час (10...15 хв), але шорсткість країв буде незадовільною. Для червоних радіусів доцільно використовувати наповнювачі високої твердості та низької зернистості. Максимальна продуктивність вібраційної обробки досягається м'якими крупнозернистими наповнювачами через інтенсивне самозаточування.

Для різних наповнювачів граничний радіус змінюється в 4,6 рази, швидкість округлення — в 3,5 рази, а зміна шорсткості — в 2,1 рази. Граничний радіус округлення є показником нестаціонарного округлення, а сталий швидкість округлення додаються до цього (рис. 12). Зміна шорсткості слабо позитивно відповідає граничному радіусу і швидкості округлення, що відповідає неповному усуненню слідів попередньої обробки.

У всіх трьох зазначених показниках позитивні кореляції з зносом наповнювача, а граничний радіус близький, швидкість округлення слабша, а зміна шорсткості мінімальна. Тривалість вібраційної обробки (3 години) не забезпечувала високої точності визначення швидкості заокруглення, оскільки лінійний етап був чітко виявлений нечітко. Граничний радіус був визначений точно, що забезпечує тісну кореляцію. Знайдена закономірність відкриває ефективний спосіб контролю процесу зносу наповнювача. На графіках виділяються дві лінійні залежності: для абразивних кругів з низькою зносостійкістю і спеціальних формованих органів з високою зносостійкістю, що потребує подальших досліджень.

Для вивчення залежності продуктивності процесу від матеріалу виготовлено дві серії сплавів. Сплави першої серії (Б К4, ВК6, В К 8, Т5К10, Т15К6) мали однакову зернистість карбіду вольфраму, але різний склад. Сплави другої серії (ВК60М, ВК6М, ВК6, ВК6К, УК6В) відрізнялися середнім розміром зерен карбіду вольфраму. Також були випробувані сплави ТТ7К12 і Т5К12В, які відрізняються складом та розміром твердосплавних зерен (рис. 14). Коли висота нерівностей наближається до розмірів твердосплавних зерен, подальше зниження шорсткості значно сповільнюється. Тісний зв'язок між радіусом заокруглення ріжучих крайок, коефіцієнтом варіації та шорсткістю кромки дозволяє застосовувати значення для управління шорсткістю відповідно:

$$R_{ap} = 0,2 + 9V_p$$

$$R_{ap} = -0,9 + 11V_p.$$

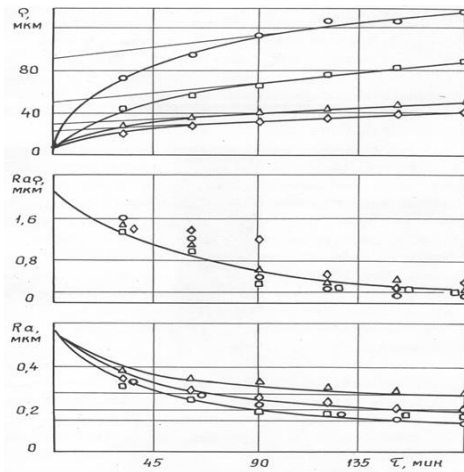


Рис. 10 – Залежність радіуса округлення, параметрів шорсткості ріжучої кромки та плоскої поверхні від тривалості обробки для наповнювачів з SiC різної твердості (зернистість 40):  
 о – твердість М; □ – С; Δ – Т; ◇ – ЧТ

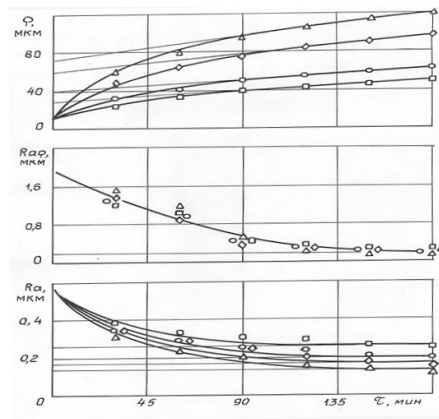


Рис. 11 – Залежність радіуса округлення, параметрів шорсткості ріжучої кромки та плоскої поверхні для наповнювачів з SiC різної зернистісті (твердість С); □ – зернистість 6; о – 16; ◇ – 40; Δ – суміш.

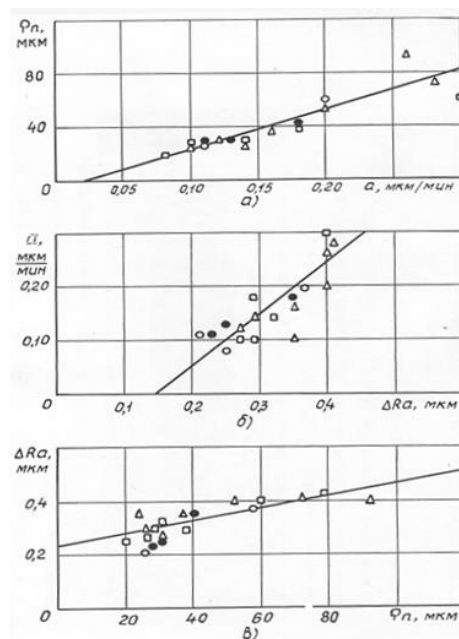


Рис. 12 – Взаємні кореляційні зв'язки показників процесу віброабразивної обробки:  
 а) – зв'язок; б) –  $\rho_p$  ( $\Delta R_a$ ); в) –  $\Delta R_a$  ( $r_p$ ) (умови рис. 10, 11).

Сталій швидкість округлення не корелює з граничним радіусом округлення, механічними властивостями

карбіду (HRA,  $\sigma_{\text{відключення}}$ ), розміром зерен WC, вмістом Co, slab o позитивно корелює n з вмістом T і C, а також загальний вміст Co, T і C і Ta C (рис. 15).

Граничний радіус округлення не корелює з вмістом твердосплавних компонентів, він співвідноситься з механічними властивостями (при міцності позитивній, з твердістю негативною) і тісно корелює з розміром зерен карбіду вольфраму (рис. 16). Множинна  $\rho_{\text{пр}}(d_{\text{WC}}, \sigma_n)$  кореляція  $\rho_{\text{пр}}(\text{HRA}, \sigma_{\text{WC}})$  статично не покращує опис залежності, тому поправки не мають самостійного  $\rho_{\text{пр}}(\sigma_n) \rho_{\text{пр}}(\text{HRA})$  фізичного сенсу, а пов'язані з наявністю кореляції  $\sigma_n(d_{\text{WC}})$  і  $\text{HRA}(d_{\text{WC}})$ .

Аналогічно при зносі оксидної, твердосплавної і селітрової кераміки крихким мікроруйнуванням не встановлено кореляції зносостійкості ні з однією з 8 механічних характеристик матеріалу [7].

Таким чином, кінетика заокруглення кромок характеризується двома незалежними параметрами: граничним радіусом заокруглення і стійкою швидкістю заокруглення, пов'язаної не стільки з механічними (HRA,  $\sigma_n$ ), скільки зі структурними факторами. визначається  $(d_{\text{WC}}, q_{\text{Ti}}) \rho_{\text{пр}}$  в основному розміром зерен WC, а d вмістом TiC. Це добре узгоджується з результатами оптичної та електронної мікроскопії: першим етапом видалення матеріалу є статичне руйнування зерна, а на другому етапі - втомавнутрисред. Відповідно до цього перша стадія, що характеризується, визначається розміром зерна, пропорційним середньому розміру  $\rho_{\text{пр}}$  деталі, що видаляється одним ударом. Друга стадія, що характеризується a, визначається міцністю зерна (Ti; W) C, яка зменшується зі збільшенням вмісту TiC, тим самим зменшуючи кількість ходів для розщеплення зерна.

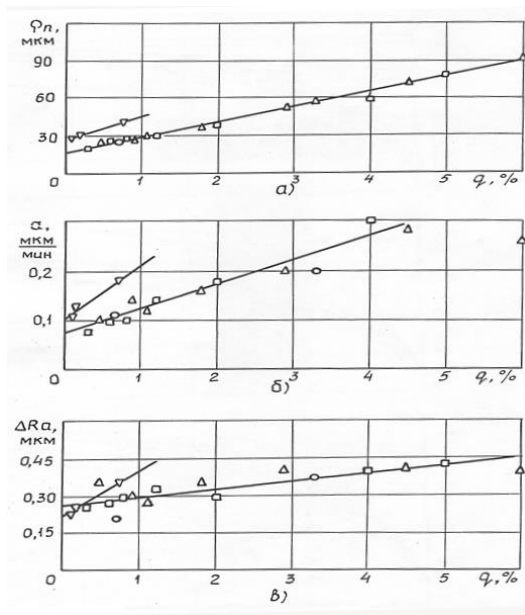


Рис. 13 – Залежність показників процесу віброабразивної обробки від зносостійкості абразивного наповнювача (умови рис. 10, 11).

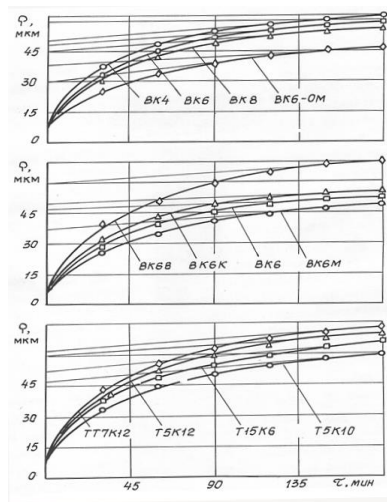


Рис. 14 – Залежність радіуса округлення від тривалості обробки різних марок твердих сплавів (BM-05; кераміка П12; амплітуда 0,5 мм; частота 35 Гц).

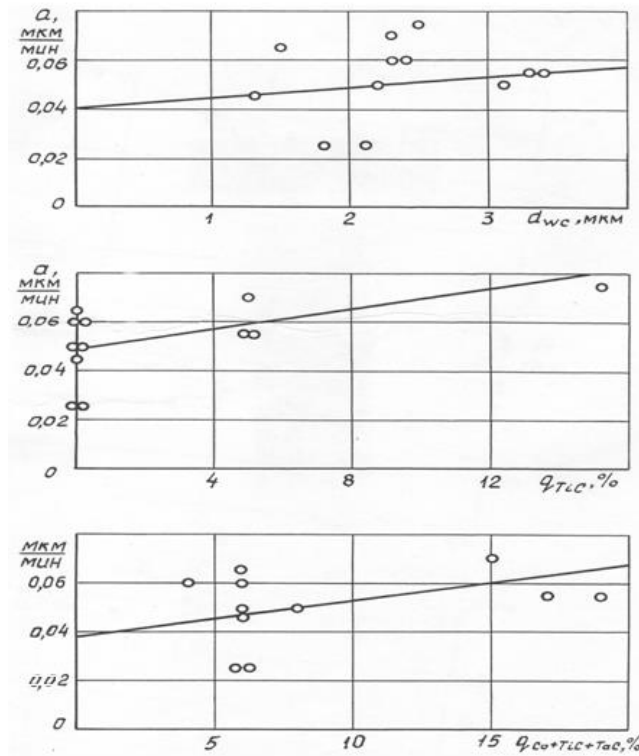


Рис. 15 – Залежність швидкості округлення кромки від параметрів структури твердого сплаву:  
 а) – від розміру зерна WC; б) – від вмісту TiC; в) – від вмісту (Co+TiC+TaC) (BM-05; наповнювач – кераміка П12; амплітуда 0,5 мм; частота 35 Гц).

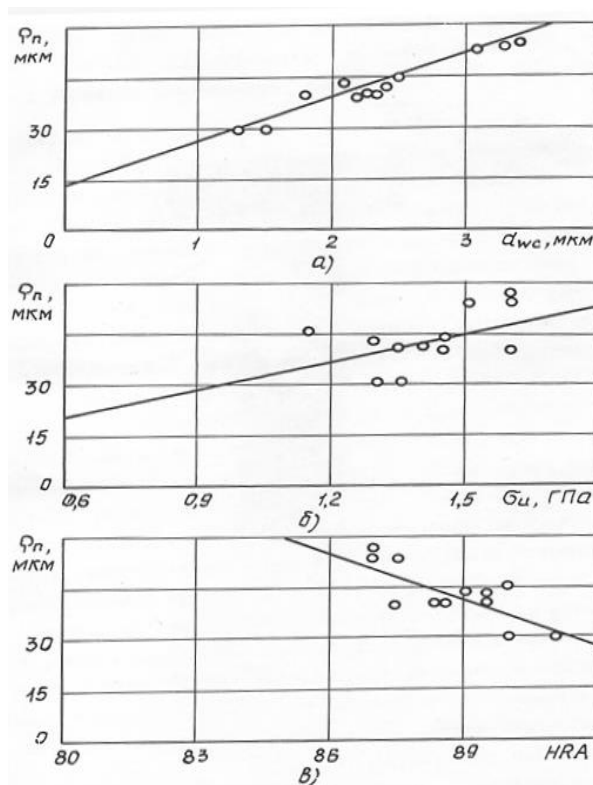


Рис. 16 – Залежність граничного радіуса округлення  $r_n$  від характеристик твердого сплаву:  
 а) – від розміру зерна WC; б) – від міцності  $\sigma_t$ ; в) – від твердості HRA (BM-05; наповнювач – кераміка П12; амплітуда 0,5 мм; частота 46 Гц).

Вплив режимів віброобразивної обробки на заокруглення кромки інструменту

Параметри обробки (амплітуда та частота коливань камери), разом з типом наповнювача та тривалістю обробки, є важливими для управління технологічним процесом. Збільшення амплітуди призводить до

підвищення енергії ударів наповнювача та шляху удару, а збільшення частоти – до збільшення кількості ударів, швидкості ковзання та енергії удару. Збільшення частоти також покращує рівномірність округлення: коефіцієнт варіації радіуса округлення зменшується з 0,22 до 0,17 при збільшенні частоти з 20 до 35 Гц. Однак перевищення допустимих значень для кожного сплаву та кута заточування може призвести до пошкодження кромок.

Для сплаву Т15К6 з кутом  $90^\circ$  обробка в режимах, вище лінії 3, спричиняє пошкодження кромок, а в нижчих режимах продуктивність дорівнює нулю, оскільки наповнювач не рухається в камері (для установки ВМ-0,5 ця крива описується рівнянням  $A = 360f - 2$ ). Для забезпечення циркуляції вантажу в камері вібраційне прискорення повинно перевищувати певне значення. Для максимального рівня продуктивності необхідно вибирати режими в верхній частині регіону, а для більш рівномірної обробки доцільно проводити обробку при великих значеннях частоти ( $f$ ) і малих значеннях амплітуди ( $A$ ).

Формула для визначення режимів обробки:

$$A = C + 0,007\beta - 0,25f,$$

де  $C = 0,65$  для сплаву Т15К6 і  $0,90$  для сплаву Т5К10.

Режими для сплавів Т 15К12 В, ТТ7К12 і ТТ10К8Б можна визначити рівняннями для сплаву Т5К10, а для Т14К8 - рівняннями для Т15К6.

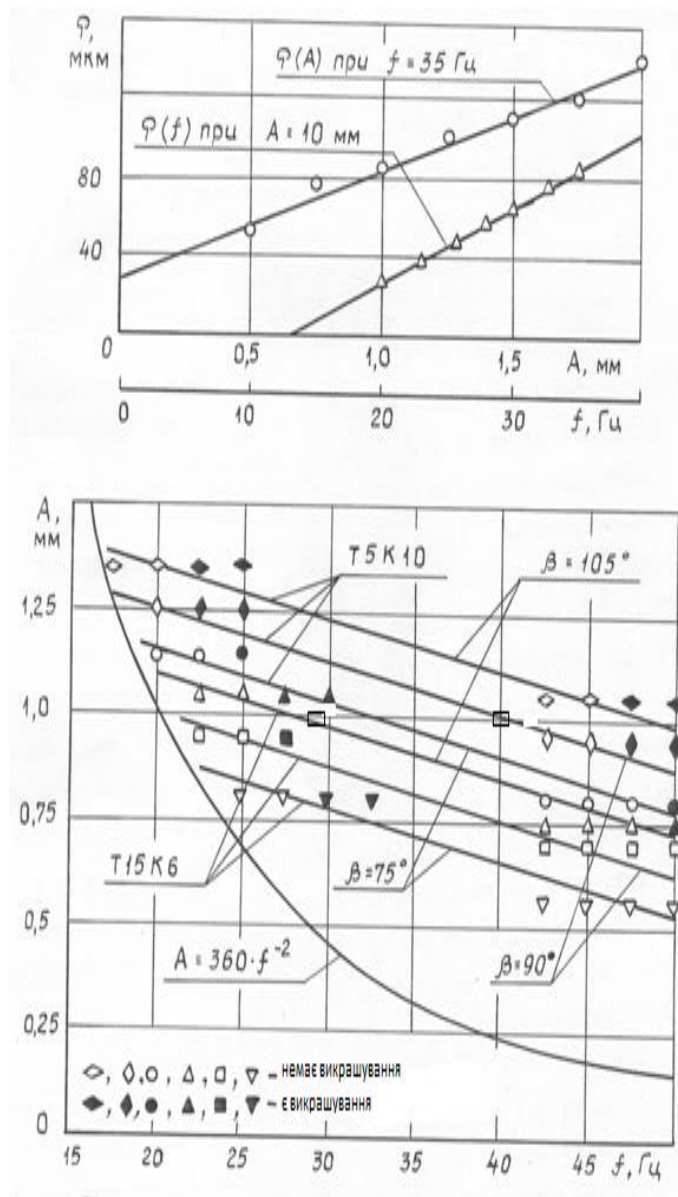


Рис. 17 – Вплив режимів віброабразивної обробки на її ефективність (Т15К6, наповнювач – кераміка П12):  
 а) залежність радіуса округлення  $r$  від амплітуди  $A$  і частоти коливань  $f$ ;  
 б) – область режимів, що забезпечують обробку без сколів.

Зі збільшенням амплітуди та частоти шорсткість ребер і площин зменшується (рис. 18). Зниження шорсткості обумовлено тими ж причинами, що і збільшення продуктивності. Проте сила мікрошоків навіть при максимальних режимах в рамках експерименту недостатня для повного усунення початкових нерівностей. Зі збільшенням амплітуди і частоти витрата наповнювача збільшується, що відповідає кореляції між потужністю обробки та витратою наповнювача.

Виконання заокруглення кромки і верхівки інструменту при віброобразивній обробці.

Для нормалізації операцій віброобразивної обробки інструменту необхідні моделі взаємозв'язку продуктивності в основному часі з факторами-умовами обробки. Спочатку на основі попередніх експериментів були виявлені найважливіші фактори, що визначають продуктивність. Залежність радіуса від цих факторів шукали у вигляді політропної моделі

$$\rho_k = C_{ан} \cdot C_{им} \cdot C_{МН} \cdot C_{МИ} \cdot \tau^{n\tau} \cdot A^{nA} \cdot f^{nf} \cdot \beta^{n\beta},$$

$C_{ан}$  - коефіцієнт, що враховує марку наповнювача;

$C_{им}$  - коефіцієнт, що враховує марку інструментального матеріалу;

$C_{МН}$  - коефіцієнт з урахуванням маси наповнювача;

$C_{МИ}$  - коефіцієнт, що враховує масу інструменту;

$n\tau, nA, nf, n\beta$  - показник ступеня, відповідно, прит,  $A, f, \beta$ .

Читання вузьких інтервалів зміни факторів у виробничому середовищі не суперечить більш складним залежностям встановленим в лабораторії широкий спектр змін факторів на основі фізики процесу. У логарифмічній формі вона має вигляд многочлена, що дозволяє використовувати традиційну лінійну модель для планування експерименту.

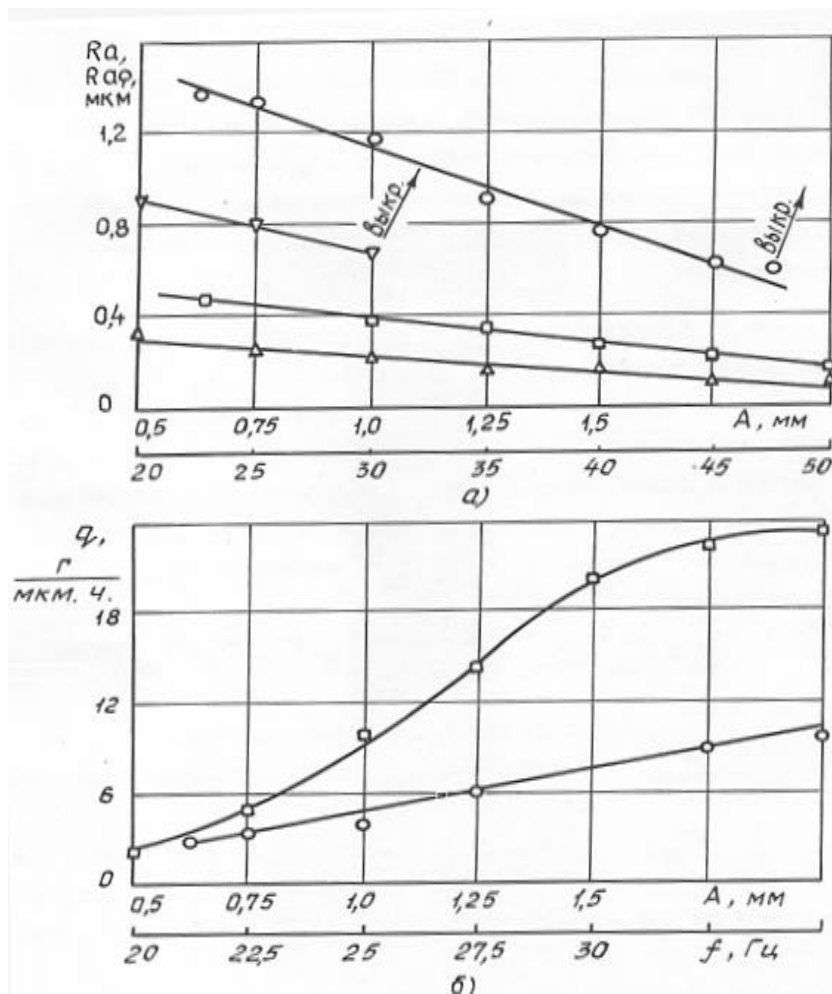


Рис. 18 – Вплив режимів віброобразивної обробки на її якість та витрату наповнювача:

а) – залежність параметра шорсткості площин (1, 2) і ріжучих кромки (3, 4) від амплітуди (1, 3 при частоті 35 Гц) і частоти (2, 4 при амплітуді 1,0 мм); б) – залежність витрати наповнювача від амплітуди (1 при частоті 35 Гц) і частоти (2 при амплітуді 1,0 мм) (ВМ-05; Т5К10; кераміка Р12; час обробки – 60 хв) рівняння регресії.

$$y = 4,13 + 0,31X_1 + 0,24X_2 + 0,34X_3 + 0,23X_4 (0,0025X_1X_2 + 0,0075X_1X_3 + 0,0063X_1X_4 + 0,0000X_2X_3 + 0,0012X_2X_4 + 0,0012X_3X_4).$$

При збільшенні радіуса від 20 до 200 мкм коефіцієнт варіації падає в 2 рази - від 0,06 до 0,04. Коефіцієнти у взаємодіях незначні, модель адекватна. Перевішивши закодовані значення акторів природні і потенціуючи, ми отримали

$$\rho = 1,13 \cdot 10^{-4} \cdot \tau^{0,39} \cdot A^{0,69} \cdot f^{1,94} \cdot \beta^{1,02}.$$

Оскільки найбільш універсальним параметром управління в галузі є тривалість, доцільно встановити зв'язок з іншими факторами.

Узагальнення до різних наповнювачів

$$\begin{aligned} \tau &= C_\tau \rho^{2,63} \cdot A^{-1,81} \cdot f^{-5,10} \cdot \beta^{-2,68}, \\ \rho &= C_\rho \cdot \tau^{0,38} \cdot A^{0,69} \cdot f^{1,94} \cdot \beta^{1,02}. \end{aligned}$$

З урахуванням експериментально отриманих факторів (табл. 4) були побудовані номограми для практичного застосування.

З урахуванням додатково вивчених акторів для пластин і різців:

$$\begin{aligned} \rho &= C_{pp} \tau^{0,38} A^{0,69} f^{1,94} \beta^{1,02} d^{0,70}, \\ \rho_p &= C_{pp} \tau^{0,38} A^{0,69} f^{0,75} \beta^{1,02} d^{0,70} G^{0,10}, \end{aligned}$$

де  $d$  - середній розмір зерен WC -основи, мкм;

$G$  - вага а інструменту, кг;

$C_\rho, C_{pp}$  - коефіцієнти в залежності від типу наповнювача.

Таблиця 4 – Коефіцієнти рівнянь для різних наповнювачів

Тип наповнювача	$C_\tau$ (4.17) $10^{-11}$ , хв	$C_\rho$ (4.18) $10^{-4}$ , мкм	$C_p$ (2) $10^{-5}$ , мкм	$C_{pp}$ (3) $10^{-3}$ , мкм
Бій кругів SiC	27,0	2,3	2,8	10,4
Суміш бою кругів SiC та фарфора (1:1)	14,1	1,8	2,2	8,5
Кераміка П12	7,3	1,4	1,7	7,0
Кераміка П15×15	4,1	1,1	1,4	5,9
Кераміка ЦМ-332	2,3	0,9	1,2	5,2
Бій фарфора	1,7	0,8	1,1	4,1

На величину радіуса округлення в вершині, крім уже  $\rho_p$  вивчених дійових осіб, впливають кут в плані у вершини  $E$  і радіус у вершини  $r$ , в зв'язку з чим був виявлений невеликий позитивний дрейф параметра.

Аналогічно шукана політропна залежність



$$\rho_B = C_{ан} \cdot C_{ИМ} \cdot C_{МН} \cdot C_{МИ} \cdot \tau^{nr} \cdot A^{nA} \cdot f^{nf} \cdot \beta^{n\beta} \cdot r^{nr} \cdot E^{nE},$$

де  $nr$ ,  $nE$  – показаті степені, відповідно, при  $r$  та  $E$ .

Використовуючи результати попереднього експерименту і вважаючи вплив деяких суб'єктивна і  $\rho$  подібних,  $\rho_B$  представлений у вигляді:

$$\rho_B = C \cdot \tau^{nr} \cdot \beta^{n\beta} \cdot V^{nv} \cdot E^{nE},$$

звідки

$$C = C_{ан} \cdot C_{ИМ} \cdot C_{МН} \cdot C_{МИ} \cdot A^{nA} \cdot f^{nf}$$

(4).

рівняння регресії:

$$y = 4,15 - 0,20X_1 + 0,34X_2 - 0,08X_3 + 0,28X_4(-0,008X_1X_2 + 0,014X_1X_3 - 0,004X_1X_4 - 0,016X_2X_3 + 0,061X_2X_4 + 0,004X_3X_4).$$

Коефіцієнт варіації радіуса округлення вершини більше радіуса округлення ребра, що говорить про більшу нерівномірність процесу в вершинах.

Коефіцієнти при взаємодіях незначні, але величина позитивної взаємодії кута заточування і час обробки близькі до довірчого інтервалу і коефіцієнта кута в плані, модель адекватна. Перевівши кодовані значення факторів в натуральні, потенціуючи і узагальнюючи для різних наповнювачів, отримаємо

$$\rho_B = C_{дв} \cdot \tau^{0,35} \cdot \beta^{1,51} \cdot r^{-0,24} \cdot E^{-0,35},$$

де коефіцієнт визначається типом наповнювача  $C_{дв}$ .

Найбільш інтенсивне видалення відбувається в вершинах з малими кутами і радіусами, так як при зниженні параметрів площа контакту наповнювача з вершиною зменшується, а питомий тиск збільшується.

**Обговорення.** Таким чином, процес заокруглення кромки ріжучого інструменту під час зубчастої обробки залежить від геометричних параметрів інструменту, режимів обробки та властивостей матеріалу заготовки. Початкове заокруглення характеризується інтенсивним зносом і формуванням мікропошкоджень, які поступово вирівнюються, що дозволяє стабілізувати геометрію кромки та зменшити ризик концентрації напруг.

Досягнення високої однорідності поверхневого шару можливе при належному контролі співвідношення між радіусом округлення кромки та режимами різання. Зменшення початкової товщини зрізу при відповідному радіусі округлення сприяє зниженню шорсткості поверхні, що позитивно впливає на зносостійкість інструменту та підвищує його довговічність.

Оптимізація технологічних параметрів, таких як швидкість різання, подача та кут заточування інструменту, сприяє покращенню мікроструктури поверхневого шару і мінімізації впливу мікротріщин. Це забезпечує стабільність процесу та підвищує ефективність формоутворення кромки, що в свою чергу дозволяє значно підвищити продуктивність та якість поверхонь зубчастих виробів.

**Висновки.** 1. При віброобразивній обробці твердосплавного інструменту крайки і вершини округлюються до необхідного значення (20...200 мкм), причому останні міцніше, дисперсність радіусу, відхилення форми і шорсткість кромки зменшуються в 5...10 разів, усувається відкол до 40...60 мкм, а більші набувають сприятливий рельєф при зменшеній глибині і плавних переходах.

2. У початковій стадії віброобразивної обробки переважає макрокрихке руйнування кромки з нелінійною кінетикою - відділення зернових щелебню, порівнянних з радіусом округлення, в кінцевій стадії - мікрокрихке з лінійним - відділення одиночних зерен, порівнянних з висотою нерівностей. Момент переходу визначається величиною округлення, яка критична для макроміцності.

3. Показана перевага експоненціальної моделі, отриманої при розв'язанні диференціального рівняння для опису залежності радіуса округлення від початкового радіуса, кута заточування і тривалості обробки для різних комбінацій наповнювачів і оброблюваних твердих сплавів. Кінетика інших мікрогеометричних параметрів описується тієї ж моделлю, але з кінцевим загасанням замість лінійного перетину.

4. Граничний радіус заокруглення, який є показником віброобразивної оброблюваності кромки, тісно позитивно корелює з розмірами твердосплавних зерен і збільшується зі збільшенням заточки. Швидкість лінійного заокруглення не залежить від структури і механічних властивостей сплаву і збільшується зі

збільшенням кута заточування.

5. Граничний радіус заокруглення, швидкість лінійного заокруглення і зменшення шорсткості позитивно корелюють один з одним і збільшуються зі збільшенням твердості і зернистості присадного абразиву і зменшенням твердості сполучного.

6. Для кожної з груп наповнювачів - спеціальної формованої кераміки (зносостійка) і полумки абразивних кругів (зношується) - показник заокруглення зростає лінійно зі збільшенням питомого зносу наповнювача.

7. Вибравши характеристики наповнювача і режими вібраційної і абразивної обробки інструменту, можна одночасно домогтися необхідного значення заокруглення країв і мінімальної глибини інструменту.

8. Експериментально знайдені ділянки оптимальної частоти і амплітуди різання - відповідають максимальному виробленню за одне округлення за винятком сколів кромки, шорсткості, неприпустимого розсіювання радіуса і зносу наповнювача з урахуванням марки сплаву і кута заточування.

9. У ряді запланованих експериментів по встановленню залежностей і розробці номограм для нормалізації операцій віброабразивної обробки твердосплавних вставок і фрез з урахуванням структури сплаву, геометрії і ваги інструменту, типу наповнювача, режимів обробки і необхідного значення округлення.

#### Список літератури

1. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
2. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): *Modern trends in metalworking*, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
3. Ramadani, R., Belsak, A., Kegl, M., Predan, J., & Pehan, S. (2018). Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. *International Journal of Simulation Modelling*, 17(1), 92-104
4. Клочко О.О., Гасанов М.І., Заковоротний О.Ю., Майборода В.С., Охрименко О.О., Федоренко В.С. Технологічні передумови деформації і рушення зрізуючого шару при швидкісному зубофрезуванні загартованих циліндричних зубчатих коліс на основі атомного підходу // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – № 1 (5) 2022. – С. 10–20. – ISSN 2079-004X, DOI: 10.20998/2079-004X.2022.1(5).0
5. Нежебовський В.В., Дергоусов В.М., Пермяков О.А., Клочко О.О., Устиненко О.В., Рябенко С.В. Новітні процеси обробки зубчатих коліс редукторів вулгодобувних комбайнів // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції 01 – 03 вересня 2022 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 162–163. – ISBN 978-617-7889-20-4.
6. Гасанов М.І., Клочко О.О., Заковоротний О.Ю., Перминов С.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112. – ISSN 2079–004X
7. Gołębski, R., & Ivandic, Z. (2018). Analysis of Modification of Spur Gear Profile. *Tehnicky Vjesnik*, 25(2), 643-648.
8. M. Ciavarella, On the significance of asperity models predictions of rough contact with respect to recent alternative theories, *ASME J. Tribol.* 139 (2017) 021402–1-11

#### References (transliterated):

1. Shelkovej A.N., Gasanov M.I., Naboka E.V., Klochko A.A., Belousov N.A., Novikov F.V. Imitacionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo obespecheniya ekspluatacionnykh svoystv krupnogabaritnykh zubchatykh koles. Novye i netradicionnye tekhnologii v resurso- i energosberezenii: Materialy mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, 22-24 sentyabrya 2021 g., g. Odessa. – Odessa: Gosudarstvennyj universitet «Odesskaya politehnika», 2021. – S. 207 – 210.
2. Kovalev Viktor D, Vasilchenko Yana V., Klochko Alexander A., Gasanov Magomedemin I. Technology of restoration of large gear boxes. Dašić, P. (editor): *Modern trends in metalworking*, Vol. 1: Vrnjačka Banja: SaTCIP Publisher Ltd., 2018. – P. 43–63. ISBN 978-86-6075-065-7.
3. Tekhnologicheskie osnovy zuboobrabotki zakalennykh krupnomodulnykh zubchatykh koles: monografiya / A. A. Klochko [i dr.]. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – 479 s. ISBN 978-966-379-667-3.
4. Issledovanie processov zuboferzerovaniya zakalennykh shevronnykh zubchatykh koles / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova, S.Yu. Palashek, A.L. Nevmerzhhiczkiy // Nadijni st instrumentu ta optimizacziya tekhnologichnikh sistem: zb.nauk. pr. – Kramatorsk : DDMA, 2017. – Vip. 40. – S. 90–101.
5. Klochko, O., Okhrimenko, O., & Shapovalov, M. (2021). Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 374–380. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
6. Kabaldin Yu.G., Olejnikov A.I., Shpilev A.M., Burkov A.A. Matematicheskoe modelirovanie samoorganizuyushhixsya processov v tekhnologicheskikh sistemakh obrabotki rezaniem. Vladivostok, Dal'naya nauka, 2000. 194 s.
7. Shapovalov V.F., Pechenyj V.I., Klochko A.A., Permyakov A.A., Shelkovej A.N., Gasanov M.I., Anczyferova O.A. Povyshenie kachestva poverkhnostnogo sloya zub'ev iznoshennykh i vosstanavlivaemykh krupnogabaritnykh zubchatykh koles poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem // Nadijni st instrumentu ta optimizacziya tekhnologichnikh sistem: zb. nauk. pr. – Kramatorsk : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 91–102.
8. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.F. Gruppye marshrutnye tekhnologicheskie processy vosstanovleniya krupnogabaritnykh zubchatykh koles na osnove imitacionnogo modelirovaniya s uchetom progressiruyushhix vidov iznosa // Nadijni st instrumentu ta optimizacziya tekhnologichnikh sistem: zb.nauk. pr. – Kramatorsk : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.

Поступила (received) 10.09.2024

**Гасанов Магомедмін Ісамагомедович (Hasanov Magomedemin Isamagomedovich)** – проректор по науково-педагогічній роботі, доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (096)-590-8850; e-mail: kh.kajvika@gmail.com;

**Охріменко Олександр Анатолійович (Ohrimenko Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; пр. Перемоги, 37, Україна; email: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987

**Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr)** – доктор технічних наук, професор, зав. кафедри інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.:+38067-936-36-64, e-mail: [ukrstanko21@ukr.net](mailto:ukrstanko21@ukr.net), ORCID: 0000-0003-2841-9455;

**Пермяков Єгор Олександрович (Permyakov Egor)** – аспірант кафедри інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: perm\_a@i.ua, ORCID: 0000-0003-2843-6108

**Hubskiy Serhii** – PhD, Associate Professor at the Department of Computer Modeling and Integrated Forming Technologies, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; mob.: (066) 219-20-50; e-mail: gubskiyso@gmail.com.

**Старченко Віталій Валерійович (Vitaly Starchenko)** – аспірант кафедри інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: perm\_a@i.ua, ORCID: 0000-0003-2843-6108

**Тимошенко Богдан Ярославович (Bohdan Tymoshenko)** – магістр кафедри інтегровані технології машинобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; e-mail: perm\_a@i.ua, ORCID: 0000-0003-2843-6108