

## **РОЗДІЛ 1. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОНОМІКА І МЕНЕДЖМЕНТ В ПРОМИСЛОВОСТІ**

DOI <https://doi.org/10.36059/978-966-397-247-3-1>

**Абрамов С. О.**

*кандидат технічних наук,  
доцент кафедри технології машинобудування  
Національна металургійна академія України  
м. Дніпро, Україна*

### **ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕКТОРНИХ ВУЗЛІВ НА ОСНОВІ ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛАМЕЛЕЙ**

*Робота присвячена новому підходу до вирішення проблеми щодо підвищення експлуатаційних характеристик і властивостей колекторних вузлів, за рахунок оптимізації активації бічної поверхні мідної ламелі, що оброблена струменево-абразивним методом.*

*Основними недоліками традиційних способів отримання профілю мідних ламелей є: мала несуча здатність бічних поверхонь, унаслідок похибок куткових розмірів. Це викликано тим, що традиційні технології отримання профілю ламелей – прокатка, волочіння, фрезерування та інші, не забезпечують потрібну точність і якість профілю. Тому розробка технологій, що забезпечує компенсацію похибок геометричних розмірів і форми мідних ламелей є актуальною науково-практичною задачею технології машинобудування.*

*На підставі встановлених закономірностей протікання процесів контактної взаємодії бокових поверхонь мідних ламелей з пластинами слюдопласта визначено, що ефективних значень трибопоказників досягається при оздоблювально-формуючій обробці поверхонь ламелей, струменево-абразивним методом є актуальним науковим завданням.*

*Вперше визначена закономірність впливу шорсткості на довговічність роботи колекторних вузлів та встановлена раціональна зона шорсткості бічних поверхонь ламелей. Це*

*дозволило отримати суттєву перевагу при виготовленні колекторного профілю з меншою точністю, що, в свою чергу, сприяє перешкоджанню радіальним переміщенням колекторних ламелей в зчепленні з пластинами слюдопласта, що зберігає рельєф контактної поверхні колектора, та сприяє підвищенню технологічності та надійності ресурсу колекторного вузла.*

### **Вступ**

Колекторні електродвигуни є широко-регульованими машинами і використовуються сучасною промисловістю там, де необхідні велика перевантажувальна здатність та регулювання частоти обертання. Основною проблемою експлуатації цього типу машин є забезпечення комутаційної стійкості.

Більше 30% відмов під час експлуатації двигунів постійного струму загальнопромислового застосування відбуваються через несправності колекторно-щіткового вузла, а у великих прокатних двигунах 44-46%. У малих колекторних машинах вихід з ладу колекторно-щіткового вузла складає 34-48% від загального числа відмов машин, а застосування безщіткових систем збудження не дозволяє вирішити проблему, оскільки частота відмов у них не менша [1; 2; 10; 12].

На основі покращення технології виготовлення мідних ламелей колекторного вузла збільшується термін роботи двигунів постійного струму та підвищуються експлуатаційні властивості із забезпеченням заданих характеристик, що є надзвичайно важливим завданням машинобудівних підприємств. Дослідження та вирішення цієї проблеми значно підвищить життєвий цикл електродвигунів, знизить собівартість виготовлення колекторних вузлів та сприятиме науковому розвитку зазначеної галузі.

Основними недоліками традиційних способів отримання профілю мідних ламелей є мала контактна жорсткість бічних поверхонь через похибки кутових розмірів. Це зумовлено тим, що традиційні технології отримання профілю ламелей – прокатування, волочіння, фрезерування тощо, не забезпечують точність геометричних параметрів та якість поверхонь профілю. Тому розробка технології, що забезпечить компенсацію похибок геометричних розмірів та форми мідних ламелей є актуальним науково-практичним завданням технології машинобудування.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є вирішення важливого науково-технічного завдання підвищення життєвого циклу колекторних вузлів електричних машин постійного струму, шляхом розробки технологічних методів, що формують функціональні та мікро- і макрогеометричні характеристики поверхневих шарів ламелей колекторних вузлів, а також сприяють компенсації кутових похибок ламелей.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

- провести класифікацію конструкцій ламелей електричних машин з урахуванням підвищення життєвого циклу колекторних вузлів;

- розробити методику створення функціонально-орієнтованих технологій виготовлення мідних ламелей на підставі аналізу технологічних впливів і властивостей функціональних елементів ламелей залежно від експлуатації колекторного вузла;

- дослідити вплив якості поверхні (шорсткість, структуру, мікроструктуру тощо) на показники експлуатаційних характеристик ламелей і колекторних вузлів електричних машин;

- провести аналіз струменево-абразивних методів обробки ламелей для підвищення технологічних та експлуатаційних характеристик колекторних вузлів;

- розробити математичну модель взаємодії абразивного струменя з поверхнею ламелі для досягнення мікрогеометрії, що сприятиме компенсації макропохибок кутів;

- здійснити дослідно-промислові випробування колекторних вузлів з мідними ламелями, обробленими струменево-абразивною технологією на підґрунті функціонально-орієнтованих досліджень;

- впровадити результати дослідних технологій у виробництво на машинобудівному підприємстві та використувати їх у навчальному процесі.

Об'єкт дослідження – процес формування мікро- і макрогеометричних характеристик бічних поверхонь ламелей колекторних вузлів при струменево-абразивній обробці.

Предмет дослідження – закономірності формування мікро- та макрогеометричних параметрів бічних поверхонь мідних ламелей колекторних вузлів електричних машин.

Під час дослідження та аналізу геометричної структури поверхонь для визначення параметрів мікро- та макрорельєфу

утворених поверхонь використовувалось таке метрологічне устаткування: інформаційно-обчислювальний комплекс на базі профілографа-профілометра моделі 170622, оптичний інтерференційний профілометр «Micron-alpha», мікро-нанотвердомір «Micron-gamma», установка для проведення струменево-абразивної обробки, мікроскоп AxioVertA1MAT, стенд для вимірювання сили тертя, оптичний квадрант КО-60М, виробничі стенди для випробувань електродвигунів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що в роботі теоретично обґрунтовані технологічні параметри нового способу текстурування бічних поверхонь мідних ламелей колекторних вузлів, а також експериментально доведено підвищення експлуатаційних характеристик і властивостей колекторних вузлів. Зокрема:

- набула розвитку технологія виготовлення мідних ламелей колекторних вузлів на основі наукового обґрунтування технологічного забезпечення якості бічних поверхонь ламелей для тривалої працездатності колекторного вузла – розробка відрізняється визначенням методу і технічних прийомів обробки бічних поверхонь ламелей;

- набула розвитку математична модель, яка дозволила отримати аналітичні залежності, що об'єднують параметри процесу струменево-абразивної обробки з параметрами якості бічної поверхні ламелі – розробка відрізняється залежностями від взаємодії абразивного зерна з мідною поверхнею ламелі, що враховує збільшену шорсткість поверхні та обмеження щодо знімання матеріалу, отриманих при певних режимах струменево-абразивної обробки;

- уперше встановлена закономірність протікання процесів контактної взаємодії текстуrowаних бічних поверхонь мідних ламелей з пластинами слюдо пласта – розробка відрізняється впровадженням струменево-абразивної обробки бічних поверхонь колекторних ламелей та визначенням методів і технічних прийомів обробки бічних поверхонь ламелей;

- уперше визначена закономірність впливу шорсткості на довговічність роботи колекторних вузлів та встановлені оптимальні параметри шорсткості бічних поверхонь ламелей – розробка відрізняється тим, що бічні частини колекторних ламелей в місцях контакту з ізолюючими пластинами

слюдопласта, текстуровані з шорсткістю  $Ra=6,3-12,5\mu\text{м}$ , при цьому коефіцієнт тертя спокою забезпечений на рівні 0,7-0,9.

### **1. Аналіз технологічних та експлуатаційних характеристик колекторних вузлів**

У цьому розділі виконано систематизацію інформації науково-технічних джерел та аналіз існуючих конструкцій колекторних вузлів електродвигунів постійного струму (ДПС).

Аналіз робіт, присвячених технології виготовлення колекторних вузлів, у тому числі профільних пластин і електродвигунів, в цілому забезпечують необхідні їх експлуатаційні властивості для певних умов роботи [3; 12; 14; 17]. Проте технічний прогрес вимагає більш гнучкого підходу до виготовлення електричних машин за конкретними замовленнями і малими серіями. Оскільки колекторні профільні пластини з необхідними геометричними параметрами, точністю розмірів і високою електропровідністю виготовляють, як правило, із застосуванням тиску (прокатування, волочіння, екструзія, видавлювання тощо), тому через високу вартість технологічного оснащення витрати на виготовлення профілю малими партіями є нерентабельними.

У зв'язку з цим проєктувальникам та виробникам нових виробів припадає уніфікувати профілі, і тим самим, втрачати в технічних характеристиках електродвигунів. Варто зауважити, що надійність цього виробу часто визначає безпеку експлуатації технічної системи або машини, від якості експлуатації якого може залежати життя людей.

Здійснений аналіз вимог до технологічних та експлуатаційних властивостей колекторних вузлів встановив, що відсутні чіткі рекомендації до вибору технологічних параметрів обробки бічних поверхонь ламелей (рис. 1).

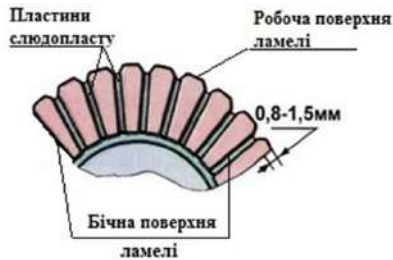


Рис. 1. Схема складання колекторного вузла

Розроблено загальний підхід створення функціонально-орієнтованої технології виготовлення профільних ламелей колектора ДПС [8; 15]. Розглянуто функціональне призначення профільних ламелей та їх елементів. Проведено об'єднання функціональних зон та елементів у модулі, для подальшої спільної їх обробки. Розроблено структуру експлуатаційних функцій ламелей колекторного вузла та граф функціональних елементів за рівнями поділу ламелі. Тому для компенсації похибок куткових розмірів профілю мідних ламелей необхідно реалізувати спеціальні схеми технологічного впливу на бічні поверхні ламелей.

## 2. Математичне моделювання та оптимізація параметрів процесу струменево-абразивної обробки

Було подано методику та результати теоретичних досліджень процесу струменево-абразивної обробки з використанням математичного моделювання та оптимізації параметрів.

Дискретна природа потоку абразивних частинок зумовлює можливість представлення його у вигляді послідовних одиничних актів контактної взаємодії на елементарну ділянку оброблюваної поверхні. Під елементарною ділянкою поверхні розуміємо досить малу квадратну площадку, що одночасно є досить надійним «представником» усієї поверхні. У випадку пласкої поверхні з прямолінійними межами такою елементарною ділянкою обрана квадратна площадка з розміром сторони, що дорівнює величині базової довжини при дослідженні шорсткості [3; 4; 5].

Отже, величина шорсткості поверхні може бути визначена:

$$R_a = \int r dS, \quad (1)$$

де  $S$  – площа оброблюваної поверхні;  $r$  – величина шорсткості з елементарної площадки. Тут:

$$r = \sum_{i=1}^N r_i, \quad (2)$$

де  $N$  – кількість одиничних актів контактної взаємодії на елементарній площадці;  $r_i$  – величина западини шорсткості після одиничного акту контактної взаємодії.

При цьому величина  $r_i$  визначається технологічними параметрами процесу, шорсткістю поверхні та її властивостями. Зміна шорсткості поверхні в процесі обробки не повинна бути пов'язана з величиною знімання матеріалу і це враховано при розробці математичної моделі.

В основу математичної моделі процесу обробки потоком абразивних частинок покладена модель одиничного акту контактної взаємодії [7], що дозволяє визначити величину  $r_i$ .

З огляду на складний характер процесів, що відбуваються під час обробки потоком абразиву, доцільно відокремити деякі сторони досліджуваного явища, використовуючи певну структуру математичної моделі. Як правило, математична модель має у своєму складі взаємопов'язані елементи, що описують оброблювану поверхню, потік абразивних часток, контактну взаємодію, зміну шорсткості з оброблюваної поверхні.

Особливістю моделі шорсткої поверхні є детермінований характер розташування сегментів на елементарній ділянці [3]. Це дозволяє істотно спростити подальшу побудову моделі контактної взаємодії.

Шорстка поверхня оброблюваного матеріалу моделювалася сукупністю сферичних сегментів, параметри яких підпорядковуються нормальному закону розподілу і визначаються в результаті аналізу профілограм поверхні.

Абразивні частинки потоку моделюються сферами, розміри яких є випадковими величинами, тому відтворюються відповідно до закону розподілу ймовірностей, що відповідає з відсотковим вмістом великій, основній та малій фракції абразивного матеріалу.

$$R = R_{k-1} + [(R_k - R_{k-1}) / (P_k - P_{k-1})] * (\alpha - P_{k-1}), \quad (3)$$

де  $R_k$  та  $R_{k-1}$  – граничні значення радіусів, відповідні певній фракції частинок;

$P_k$  та  $P_{k-1}$  – ймовірності виникнення  $(k-1)$ -ої та  $k$ -ої фракцій частинок, відповідно;  $\alpha$  – псевдовипадкове число з рівномірним (на інтервалі  $[0,1]$ ) законом розподілу ймовірностей.

Показники фізико-механічних властивостей матеріалу абразивних частинок (твердість, щільність, коефіцієнт Пуассона, модуль пружності, міцність на зріз) є випадковими величинами з нормальним законом розподілу ймовірностей, що відтворюються за допомогою датчиків випадкових чисел на комп'ютері. Параметри закону розподілу (математичне очікування та дисперсія) встановлюються за відомими методиками та довідковими даними.

Величина кута атаки  $\alpha$  частинки залежить від технологічних особливостей змодельованого процесу обробки. Наприклад, у разі дослідження обробки потоком частинок, сформованим сопловим апаратом, приймаємо, що всі частинки потоку мають однаковий кут атаки. При цьому величина кута може змінюватися в широких межах (практично від  $0^\circ$  до  $180^\circ$ ). Кут атаки визначається в обраній системі координат величинами трьох напрямних косинусів.

$$\alpha = \arcsin \frac{\cos z}{\sqrt{\cos^2 \alpha x + \cos^2 \alpha y + \cos^2 \alpha z}}, \quad (4)$$

де  $\alpha z$  – кут траєкторії частинки з віссю  $OZ$ ;  $\alpha y$  – кут траєкторії частинки з віссю  $OY$ ;  $\alpha x$  – кут траєкторії частинки з віссю  $OX$ .

Реальні технологічні особливості процесу текстурування колекторних пластин, зокрема дискретна природа потоку частинок, вказують на необхідність виконання послідовно одиничних актів конкретної взаємодії на елементарній ділянці оброблюваної поверхні [4]. При такому підході зміна шорсткості та оброблюваної поверхні може бути визначена як:

$$Ra_i(Z, V) = \sum_{j=1}^N r(Z, V) \rightarrow \max, \quad (5)$$

де  $N$  – кількість одиничних актів контактної взаємодії на елементарній площадці;  $r$  – величина лунки після одиничного акту контактної взаємодії;  $Z$  – зернистість абразивної частинки;  $V$  – швидкість абразивного потоку.

При цьому знімання матеріалу, приймається як обмеження:

$$G_i(Z, V) \rightarrow \min \quad (6)$$



В основу математичної моделі процесу текстурування бічних поверхонь ламелей потоком абразивних частинок покладена модель одиночного акту їх контактної взаємодії.

Для опису контактної взаємодії абразивної частинки, у результаті якого збільшується шорсткість поверхні ламелі без знімання матеріалу – математична модель включає: властивості оброблюваної поверхні, параметри потоку абразивних частинок.

Моделювання контактної взаємодії абразивних частинок з оброблюваною поверхнею здійснювалося у два етапи. На першому етапі визначено положення точки контакту моделі абразивної частинки, розміри якої спочатку більші від шорсткості поверхні; на другому – проаналізовано напружений стан моделі шорсткості.

Проведена імітація величин зернистості абразиву та швидкості потоку за допомогою експериментального планування імітаційних експериментів з моделлю процесу текстурування. Критерій оптимізації – величина шорсткості поверхні елементарної площадки.

### **3. Експериментальні дослідження процесу струменево-абразивної обробки бічних поверхонь ламелей**

Було висвітлено методику та результати експериментальних досліджень процесу струменево-абразивної обробки бічних поверхонь ламелей.

Дослідження здійснювалися в лабораторних і виробничих умовах на натурних зразках мідних профілів колекторних полос. У зв'язку з тим, що у відомих джерелах з досліджень струменево-абразивної обробки матеріалів відомості стосовно міді та її сплавів відсутні, були проведені додаткові експерименти [3] щодо визначення оптимальних параметрів текстурування (рис. 2) колекторних ламелей.

Результати досліджень шорсткості та кількісної металографії подано на рис. 3, 4.

Металографічний аналіз структури мідних зразків було виконано за допомогою оптичного мікроскопа AxioVertA1MAT у режимі світлого поля [7]. Мікроструктура досліджуваних зразків представлено на рис. 3.

Було проведено аналіз мікротвердості вихідного стану мідної ламелі та пластини слюдопласта за допомогою мікронанотвердоміру «Micron-gamma» [17], методом впровадження скретч-тестера рис. 5, 6.

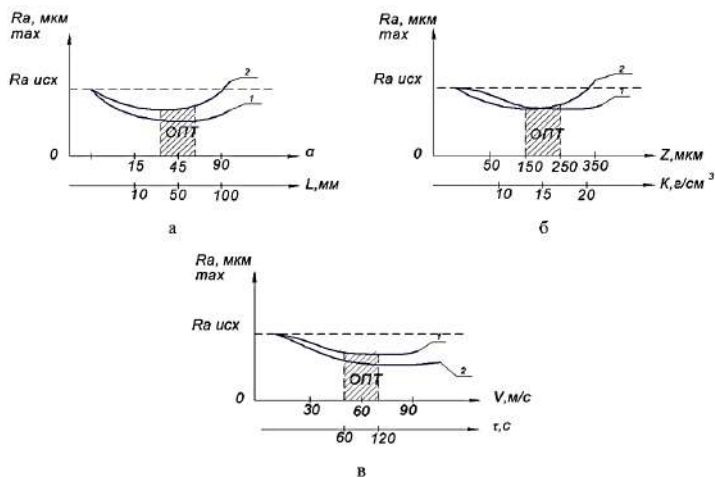


Рис. 2. Типові залежності шорсткості поверхні  $R_a$  від параметрів струменево-абразивної обробки: а – від довжини струменя  $L$  (1) та від кута нахилу  $\alpha$  (2); б – від зернистості  $Z$  абразиву (1) та його концентрації  $K$  (2); в – від швидкості струменя  $V$  (1) та часу обробки  $\tau$  (2)

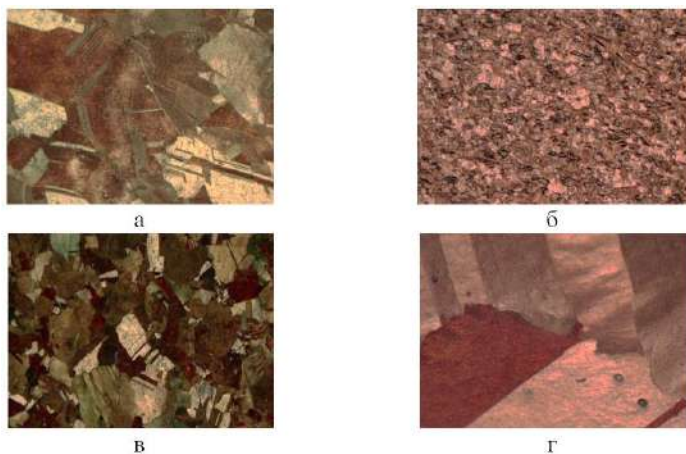
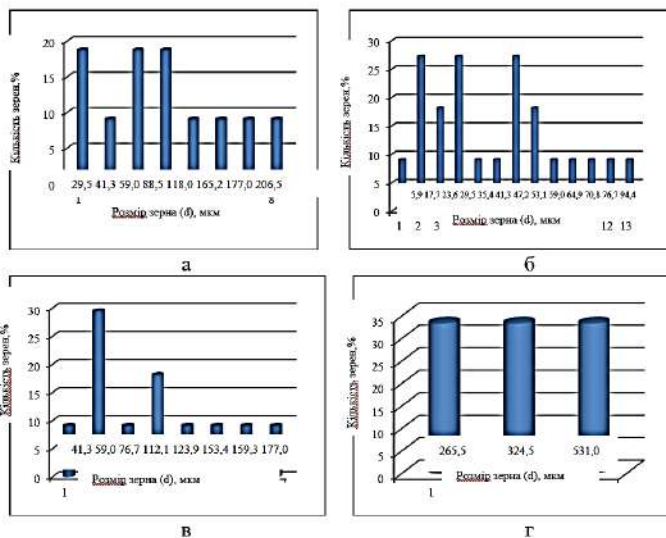
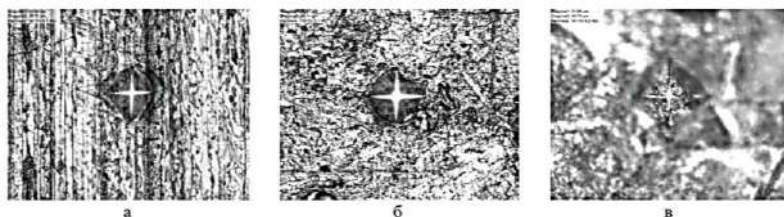


Рис. 3. Мікроструктура міді,  $\times 100$ : а, в – вихідний, б, г – мідний профіль, а, б – поздовжній напрям, в, г – поперечний напрям

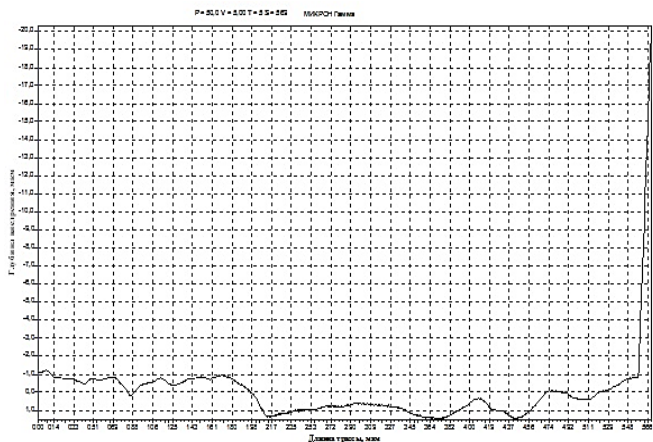


**Рис. 4.** Результати кількісної металографії за розміром зерна: а, в – вихідний, б, г – мідний профіль, а, б – поздовжній напрям, в, г поперечний напрям

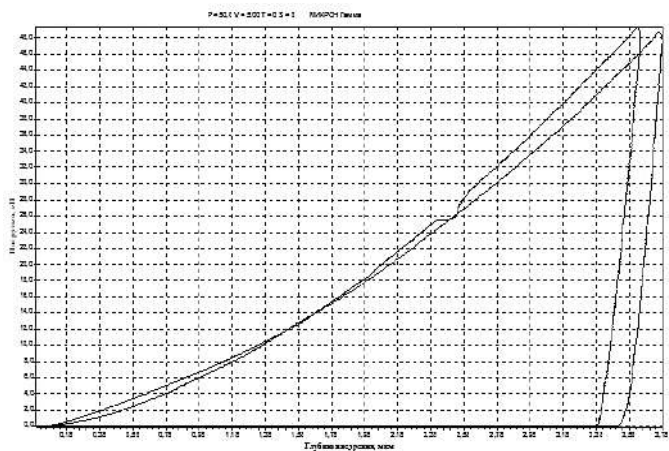


**Рис. 5.** Результати аналізу мікротвердості вихідного стану мідної ламелі та слюдопласта: а – поздовжній напрям (мідна ламель), б – поперечний напрям (мідна ламель), в – пластина слюдопласта

Здійснено морфологічний аналіз абразивних матеріалів (рис. 7). Чавунний дріб та сополімери представлено сферичною формою, а карбід кремнію чорний та зелений – уламковою.



а



б

**Рис. 6. Графіки залежності результатів аналізу мікротвердості:**  
**а** – залежність глибинного проникнення від довжини траси, мкм;  
**б** – залежність глибинного проникнення (мкм) від навантаження

Зі збільшенням зернистості абразивного матеріалу висота мікронерівностей різко зростає, оскільки збільшуються розміри лунок, що залишаються на оброблюваній поверхні ламелей абразивними частинками. Морфологічний скан-аналіз поверхні,

обробленої різним абразивним матеріалом ККЧ, ККЗ, ДЧЛП, КУ-2-8 подано на рис. 8.



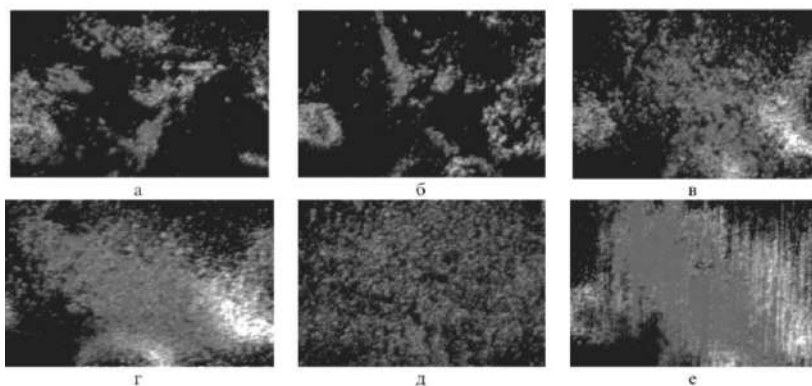
**Рис. 7. Морфологічний аналіз досліджуваних абразивних матеріалів: а – ККЧ, б – ККЗ, в – ДЧЛП (ЧС5), г – КУ-2-8 (фракція 1,5 мм), д – КУ-2-8 (фракція 0,5мм)**

Підтвердженням цього слугують профілограми поверхонь, оброблених абразивними матеріалами різної зернистості (рис. 9).

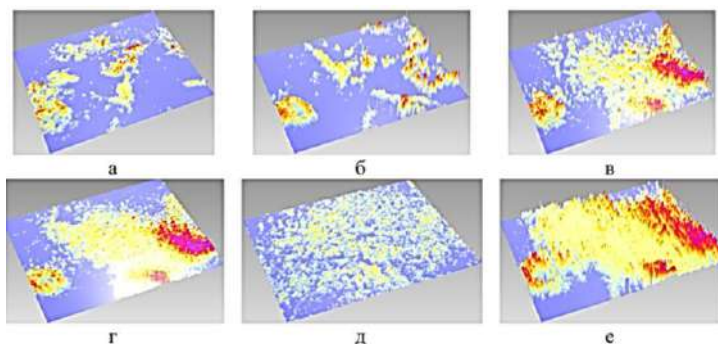
#### **4. Дослідження контактної взаємодії бічних поверхонь мідних ламелей з пластинами слюдопласту**

Подано методику та результати досліджень контактної взаємодії бічних поверхонь з пластинами слюдопласта. Через відсутність єдиної методики випробувань контактної жорсткості, вирішення завдання підвищення монолітності колекторного вузла здійснювалося в лабораторних і виробничих умовах на натурних зразках методом безпосередніх вимірювань параметрів запресування пакета в кільце [6].

Зроблено розрахунок зусиль обтиску та питомих тисків між ламелями (рис. 10) колекторного вузла та ізоляційними пластинами при запресуванні набраного пакета в технологічне кільце.

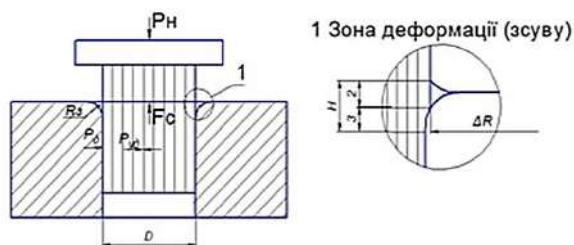


**Рис. 8. Морфологічний скан-аналіз поверхні, що оброблена різним абразивним матеріалом: а – ККЧ, б – ККЗ, в – ДЧЛП (ЧС5), г – КУ-2-8 (фракція 1,5мм), д – КУ-2-8 (фракція 0,5мм); е – вихідна ламель**



**Рис. 9. 3D профілограми поверхні, що оброблена різним абразивним матеріалом: а – ККЧ, б – ККЗ, в – ДЧЛП (ЧС5), г – КУ-2-8 (фракція 1,5мм), д – КУ-2-8 (фракція 0,5мм), е – вихідна ламель**

При складанні колекторного вузла та перевірку на контактну жорсткість і, відповідно на зрушення ламелей по ізоляційній пластині, вважають відхилення у товщині ламелі в межах допуску, так і похибки кутових розмірів. Набір у пакет великого числа ламелей призводить до значних відхилень від його розрахункового діаметра (рис. 11).

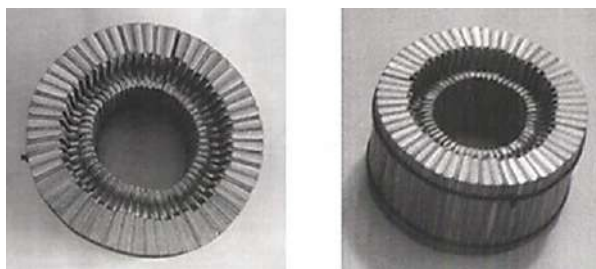


**Рис. 10. Схема запресовування набраного пакета в технологічне кільце: 1 – технологічне кільце; 2 – пакет мідних ламелей та пластин слюдопласта**

Для запресовування обираються технологічні кільця з розмірами, що забезпечують монолітне обтиснення з виникненням пластичної деформації на бічних поверхнях ламелей глибиною 0,1-0,2мм (рис. 12).

Від сили стиснення  $P_d$  при запресовуванні пакета в кільце шляхом розкладання по куту профілю  $\alpha$  переходимо до питомому тиску між мідною ламеллю та ізоляційною пластиною, а також застосування сили тертя між ними, знаючи коефіцієнт тертя при заданій шорсткості бічної поверхні ламелі.

Забезпечення арочного розпору вздовж всієї висоти бічної поверхні ламелі з компенсацією допускового відхилення кута профілю, за рахунок змінання отриманої шорсткості подано на рис. 13.



**Рис. 11. Зібраний пакет колекторного вузла для запресовування**



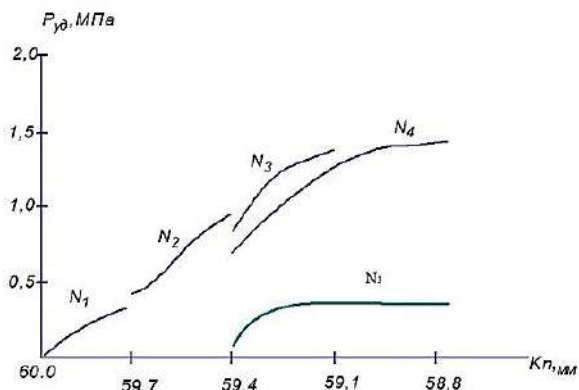


Рис. 12. Залежності сили стиснення при запресовуванні пакета в кільця різних діаметрів:  $P_{y0}$  – сила стиснення;  $N_1$ - $N_4$  – номер кільця для експериментальних пакетів;  $N_3$  – серійна технологія

У партії мідних ламелей відхилення  $\alpha$  на  $+01'03''$ , збігається із зазначеним розрахунком та дозволяє зімкнути поверхні за рахунок зминання та проникнення виступів.

Умова жорсткості на відсутність зсуву ламелей:  $F_{тр.бічних\ пов.} > F_{ц.б.} + F_{вибр.} + F_{темпер.}$  або  $F_{тр} > K_v \cdot K_T \cdot F_{ц.б.}$ , оскільки коефіцієнти сил, що обурюють мають емпіричний характер, пов'язаний із залишковим дисбалансом та робочою температурою.

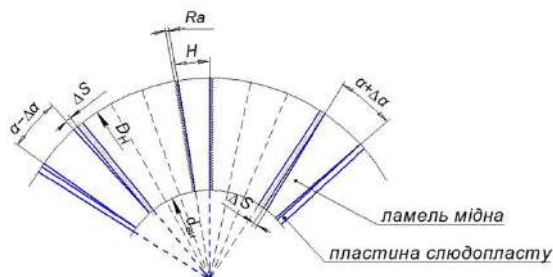


Рис. 13. Схема забезпечення арочного розпору:  $\alpha$  – розрахунковий кут ламелі;  $H$  – ширина ламелі;  $R_a$  – величина шорсткості

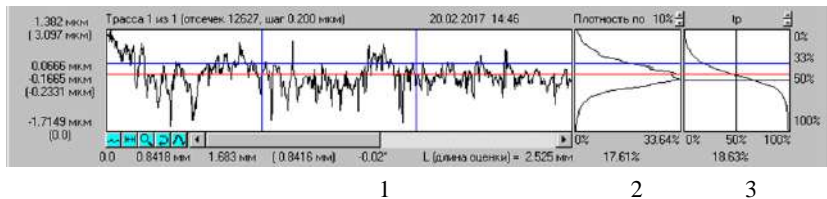
Величина зближення двох шорстких поверхонь залежить не тільки від параметрів шорсткості  $R_a$  та  $R_z$ , а й від радіусів



заокруглення вершин і кутів профілю мікронерівностей, кроку поздовжньої і поперечної шорсткості, їх відношення до  $R_{max}$ , параметрів  $b$  та  $\nu$ , характеризують початкову частину опорних кривих тощо.

Тому були проведені дослідження не тільки параметрів мікрогеометрії поверхні, а й форми профілю з використанням опорної лінії (кривої Аббота-Файрстоуна) та кривої щільності розподілу амплітуд (рис. 14).

Крива Аббота-Файрстоуна графічно відображує залежність значень відносної опорної довжини профілю ( $t_p$ ) та рівня перетину [14].



**Рис. 14. Графічні елементи профілограми: 1 – довжина оцінки; 2 – крива щільності розподілу амплітуд; 3 – крива Аббота-Файрстоуна**

Характеристика  $t_p$  містить найбільшу інформацію про висотні властивості профілю, оскільки є аналогічною до функції розподілу (розподіл Гауса).

У поздовжньому напрямі  $t_p$  характеризує фактичну площу контакту при контактуванні шорсткуватих поверхонь на заданому рівні перетину. Характеристика  $t_p$  досить повно описує форму нерівностей профілю на рівні  $p$ , що дозволяє нормувати найважливіші експлуатаційні властивості поверхні, які залежать від висотних властивостей профілю і визначаються формою нерівностей.

У роботі було проаналізовано дванадцять профілограм з визначенням для кожної  $t_p$ ,  $R_a$ ,  $Щ$ . За отриманими даними побудовані графіки розподілу, відповідно до кожного параметра (рис. 15).

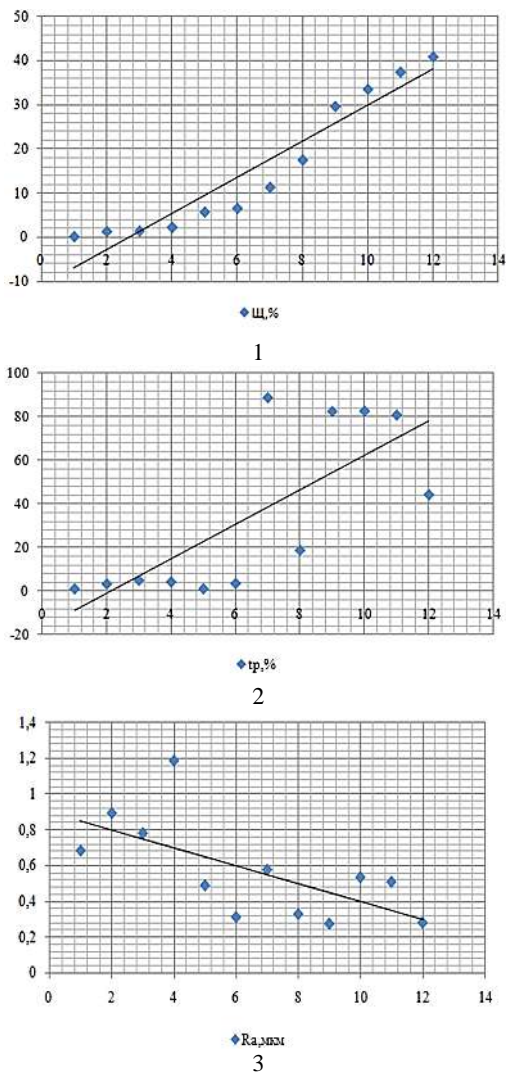
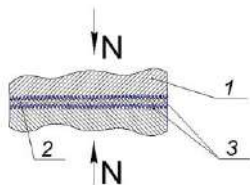


Рис. 15. Графіки розподілу: 1 – щільності розподілу амплітуд ( $Щ, \%$ ); 2 – відносної опорної довжини ламелі ( $t_p, \%$ ); 3 середнього арифметичного відхилення ламелі ( $R_a, \text{мкм}$ )

Згідно з отриманими результатами визначено, що при збільшенні щільності розподілу амплітуд збільшується коефіцієнт відносної опорної довжини ламелі та зменшується значення середнього арифметичного відхилення ламелі. Проте розподіл значень за кожним параметром свідчить, що більш-менш залежність мають параметри щільності розподілу амплітуд та середнє арифметичне відхилення ламелі.

На рис. 16 зображено схему з'єднання двох суміжних пластин колекторного вузла електричної машини, що складається з мідних колекторних ламелей 1, ізоляційних (слюдопластових) пластин 2, спресованих арочним розпором з компенсацією зазорів між ними за допомогою текстурованих бічних поверхонь ламелей 3.

Колектор електричної машини містить мідні колекторні ламелі 1 з текстурованою поверхнею довільного мікрорельєфу 3, шорсткість якого перебуває в межах  $Ra=6,3-12,5\mu\text{m}$ , що не перевищує 0,5 допуску на розмір профілю та стандартних слюдопластових пластини 2 [18].



**Рис. 16. Схема з'єднання двох суміжних мідних ламелей колекторного вузла**

Під час запресування пакету текстурованих мідних колекторних ламелей з ізоляційними пластинами в колекторний вузол з арочним розпором відбувається впровадження виступів мікронерівностей мідних колекторних ламелей у слюдопластові пластини, їх зминання, заповнення западин, що сприяє підвищенню сили тертя спокою, яка забезпечує нерухомість між мідними колекторними ламелями та пластинами слюдопласта.

Сила тертя спокою зберігає взаємну нерухомість мідних колекторних ламелей та слюдопластових пластин і повинна бути більшою за динамічні впливи і механічні навантаження, що виникають внаслідок високих окружних швидкостей.

$$F \leq F_0 = f_0 N, \quad (7)$$

де  $F_0$  – сила тертя спокою;  $N$  – сила тиску при арковому з'єднанні;  $f_0$  – коефіцієнт тертя спокою.

Результати дослідження доводять, що бічні несучі поверхні мідних ламелей, профіль яких було отримано холодним деформуванням, мають коефіцієнт тертя спокою в середньому 0,247 при шорсткості поверхні  $Ra=0,6\text{мкм}$ . За таких умов зусилля запресовування мідних колекторних ламелей та шлюдопластових пластин у колекторний вузол становить 1,0МПа. При досягненні шорсткості бічних несучих поверхонь  $Ra=6,3-12,5\text{мкм}$  та збереженні граничних розмірів товщини мідного профілю, коефіцієнт тертя спокою склав 0,7-0,9. У цьому випадку зусилля запресовування складо 2,0-2,5МПа.

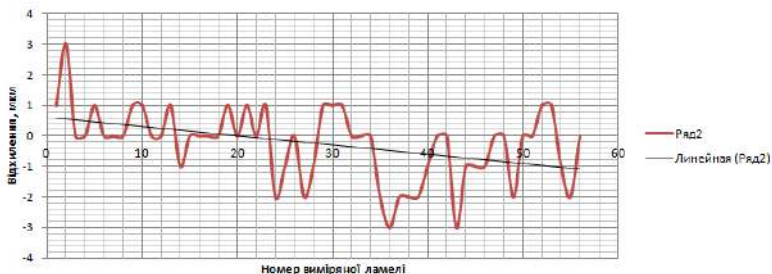
Суттєва перевага мідних колекторних пластин з текстурованою бічною поверхнею полягає в тому, що вона допускає виготовлення профілю трапецеїдальної форми перетину з меншою точністю, що полегшує виробництво.

## **5. Практичне використання результатів дослідження у виробничих умовах**

Висвітлено результати виробничих випробувань колекторних вузлів та зібраних електродвигунів постійного струму, розрахунок техніко-економічної ефективності використання електродвигунів та результати їх промислового впровадження.

На підставі аналітичних та експериментальних досліджень була виготовлена дослідна партія колекторних вузлів у виробничих умовах. У цій партії три вузли виготовлялися з текстурованих мідних ламелей, а три контрольних – відповідно по заводській технології. В результаті випробувань на розгін отримано збільшення монолітності дослідних колекторів на 50%.

З дослідними колекторами виготовлені якоря ДП-0,18.500-01 за серійною технологією, проведена збірка електродвигунів ДП-0,25 та проведені контрольні випробування електродвигунів на надійність, методом повторно-короткочасного включення-виключення, у кількості 40 000 циклів при номінальному навантаженні на валу. Перед початком випробувань проведено замір висоти щіток з точністю до 0,01мм. Після випробувань проведено перевірку на зсув (перепад) ламелей в колекторному вузлі рис. 17, що довело (по зрівнянню з серійними колекторними вузлами) зменшення перепаду ламелей на 25-35%.



**Рис. 17. Графік перепаду ламелей на колекторному вузлі після ресурсних випробувань**

Дослідний електродвигун після ресурсних випробувань, розбирання та дефектації знаходиться в задовільному стані, відповідає в повному обсязі технічним умовам, що свідчить про збільшення життєвого циклу на 30%.

### **Висновки**

У роботі вирішена актуальна наукова задача обґрунтування раціонального способу підвищення експлуатаційних характеристик і властивостей колекторних вузлів на основі покращення технології виготовлення ламелей для збільшення життєвого циклу двигунів постійного струму.

1. Проведений аналіз вимог до технологічних та експлуатаційних властивостей колекторних вузлів встановив що відсутні чіткі рекомендації по вибору технологічних параметрів обробки. Результатом здійснених аналітичних досліджень обробок бічних поверхонь ламелей колекторних вузлів стало визначення оптимальних режимів, що дозволило отримати шорсткість поверхонь довільного мікрорельєфу величиною 0,5 допуску на розмір ламелі згідно з конструкторською документацією.

2. В роботі розроблена методика для створення функціонально-орієнтованої технології виготовлення профільних ламелей колектора ДПС. Розглянуто функціональне призначення профільних ламелей та їх елементів. Проведено об'єднання функціональних зон та елементів в модулі, для подальшої їх обробки, тому для компенсації похибок куткових розмірів профілю мідних ламелей реалізовані спеціальні схеми технологічного впливу на бічні поверхні ламелей.

3. Розроблено універсальний підхід, заснований на визначенні шуканих залежностей та вирішенні задачі оптимізації технологічних параметрів процесу обробки в результаті імітаційного моделювання. В основу математичної моделі процесу текстурування бічних поверхонь ламелей потоком абразивних частинок покладена модель одиничного акта їх контактної взаємодії. За допомогою моделювання потоку абразивних частинок визначено, що кількість відтворених при моделюванні абразивних частинок, тобто кількість актів одиничного контактної взаємодії обумовлено концентрацією абразивного матеріалу в потоці, величиною витрат в одиницю часу через зріз сопла, співвідношенням величин площ сопла і елементарної площадки, а також часом та маршрутом переміщення сопла по поверхні, яка оброблювалась.

4. За результатами порівняльного металографічного аналізу структури вихідної міді в поздовжньому і поперечному напрямках визначено відмінність в розмірі зерна мідного профілю в поздовжньому і поперечному напрямках пов'язана з наявністю зональної нерівномірності протікання процесів рекристалізації, що викликано нерівномірними температурними полями, неоднорідними умовами перебігу металу, локальним характером деформації. Дослідження експериментальних зразків, отриманих різними формуючими технологіями, дозволили встановити вплив технологічних режимів формуюння профілю на макрота мікрогеометричні відхилення, структуру матеріалу, твердість та інші показники якості.

За результатами фракційного та морфологічного аналізів абразивного матеріалу для текстурування поверхні мідних ламелей методом струменевої обробки запропоновано використання карбіду кремнію чорного.

Експериментальні підтвердження імітаційного моделювання дозволили внести корегування у конструкцію експериментальної струменево-абразивної установки для оздоблювально-формуєчої обробки бічних поверхонь колекторних ламелей, що в свою чергу дозволило збільшення коефіцієнта тертя спокою в початковому стані з 0,25 до отриманих значень на зразках 0,67-0,94 та підвищити жорсткість колекторного вузла при експлуатаційних навантаженнях.

Результати дослідження показали, що бічні поверхні мідних ламелей, профіль яких було отримано холодним деформуванням,

мають коефіцієнт тертя спокою в середньому 0,247 при шорсткості поверхні  $Ra=0,6\text{мкм}$ . При досягненні шорсткості бічних несучих поверхонь  $Ra=6,3-12,5\text{мкм}$  та збереженні граничних розмірів товщини мідної ламелі, коефіцієнт тертя спокою склав 0,7-0,9 із зусиллям запресовування 2,0-2,5МПа.

5. В результаті проведених експериментальних та аналітичних досліджень струменево-абразивної обробки бічних поверхонь дослідних ламелей колекторних вузлів було визначено можливість компенсації відхилення кута колекторної ламелі та впровадження виступів шорсткості в межах 5-10мкм, що відповідає куту  $0^{\circ}01'$  після текстурування та збільшенні шорсткості, при інших рівних вимогах, дозволило збільшення питомого тиску при запресовуванні між мідними ламелями та пластинами слюдопласту в 2 рази та отримати шорсткість поверхонь довільного мікрорельєфу з величиною 0,5 допуску на розмір ламелі, згідно конструкторській документації.

6. Дослідний електродвигун після ресурсних випробувань (відпрацювання 40000 включень-виключень при повному навантаженні на вал), розбирання та дефекації знаходиться в задовільному стані, відповідає в повному обсязі технічним умовам.

В результаті проведених промислових випробувань дослідних колекторних вузлів з ламелями, які оброблено струменево-абразивною технологією отримано збільшення монолітності дослідних колекторів на 50% та показав, що в дослідних двигунах радіальні переміщення ламелей, які призводять до виходу з ладу колекторного вузла значно менші, ніж в серійних двигунах, тим самим збільшується ресурс роботи електродвигуна майже на 25-35%.

### **Література:**

1. Абрамов С.О. Підвищення експлуатаційних характеристик і властивостей колекторних вузлів на основі покращення технології виготовлення ламелей: дис...канд. техн. наук: 05.02.08 / Національна металургійна академія України. Дніпро, 2019. 186 с.

2. Электротехнические материалы: справочник / В.В. Березин и др. М.: Высшая школа, 1983. 504 с.

3. Abramov Serhii, Serdiuk Tetiana, Synytsina Yuliia, Gryshin Volodymyr, Babiak Mykola. Texturing the lamellae of the collector of electrical machines. Conference Proceedings. *UKRCON-2019*: mater.

IEEE 2<sup>nd</sup> Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, m. Lviv, 02-06 July 2019. Lviv, 2019. S. 634-640.

4. Гришин В.С., Абрамов С.О. Моделювання текстурування поверхонь колекторних пластин. *Системные технологи.* 2019. № 3(122). С. 59-71.

5. Grishin V., Abramov S. The forming processing of copper profiles by method of hot extrusion as technical system. *Системные технологи.* 2015. № 2(97). С. 25-32.

6. Абрамов С.О. Обґрунтування абразивного матеріалу для активації поверхні мідної ламелі струменево-абразивним методом. *Наукові нотатки.* 2019. № 66. С. 10-17.

7. Пройдак Ю. Оценка микроструктуры медных профилей после формирующей обработки / Ю. Пройдак, С. Абрамов, В. Гришин *Inzynieria Produkcji strona spoleczna I przemyslowa: coll. monog.* Częstochowa. 2015. S. 137-144.

8. Пройдак Ю. Функционально-ориентированный подход к технологическим процессам изготовления профиля пластины коллектора / Ю. Пройдак, С. Абрамов, В. Гришин, Я Синицин *In ynieria procesów produkcji wybrane aspekty: coll. monog.* Częstochowa. 2016. S. 49-54.

9. Проволоцкий А.Е. Имитационное моделирование процесса обработки штоком абразивных частиц /А.Е. Проволоцкий, А.Г. Ясев, В.С. Гришин, И.А. Маринченко *Машиностроение.* 1987. № 4. С. 112-117.

10. Абрамов С.А., Гришин В.С. Особенности изготовления коллекторных пластин для двигателей постоянного тока, применяемых в авиастроении. *Машинобудування України очима молодих: зб. наук. праць всеукр. мол. наук.-техн. конф., м. Суми, 27-31 жовт. 2014р.* Суми, 2014. С. 3-4.

11. Гришин В.С., Абрамов С.А. Анализ точности формы коллекторных пластин с учетом технологической наследственности. *Актуальні питання аграрної науки: мат. VI міжн. наук.-практ. конф., м. Умань, 15 листоп. 2018 р.* Умань, 2018. С. 240-242.

12. Абрамов С.А., Гришин В.С., Морозенко Е.П. Синтез технологий, обеспечивающих долговечность коллекторного узла. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: зб. наук. пр. міжн. наук.-техн. конф., Дніпро, 27-29 берез. 2018 р.* Дніпро, 2018. С. 4.



13. Абрамов С.А., Гришин В.С. Повышение эксплуатационных свойств коллекторных узлов за счет качества сопряжения. *Сучасні технології промислового комплексу*: зб. наук. пр. міжн. наук.-практ. конф., м. Херсон, 12-17 верес. 2017 р. Херсон, 2017. С. 261-263.

14. Абрамов С.О., Воронищева К.А. Взаємозв'язок між площиною контакту ламелей та гібридними параметрами шорсткості. *Механіка машин – основна складова прикладної механіки*: зб. наук. пр. всеукр. наук.-техн. конф. м. Дніпро, 11-13 квітня 2017 р. Дніпро, 2017. С. 255-256.

15. Абрамов С.А., Гришин В.С. Функционально-ориентированный поход к технологическим процессам обработки профиля пластины коллектора. *Сучасні наукові дослідження та розробки: теоретична цінність та практичні результати – 2016*: мат. міжн. наук.-практ. конф., м. Братислава, 15-18 берез. 2016 р. Братислава, 2016. С. 10-11.

16. Абрамов С.А., Гришин В.С. Влияние формирующей обработки на структуру медных ламелей. *Розвиток національної економіки: теорія і практика*: зб. наук. пр. міжн. наук.-практ. конф., м. Івано-Франківськ, 03-04 жовт. 2015 р. Івано-Франківськ, 2015. С. 24-26.

17. Игнатович С.Р., Закиев И.М., Борисов Д.И., Закиев В.И. Методика исследования физико-механических свойств поверхностных слоев материалов при усталости с использованием многофункционального прибора «Микрон-гамма». *Авиационно-космическая техника и технология*. 2004. № 8 (16). С. 163-166.

18. Колектор електричної машини: пат. 129087 Україна, МПК51 Н01R39/04, Н02К13/04, Н02К23/00. № u201802904; заявл. 22.03.18; опубл. 25.10.18, Бюл. № 20. 4 с.