

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Філімонов Євген Васильович

УДК 621.91

**ПРОГНОЗУВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИВНИХ
ІНСТРУМЕНТІВ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЇХ
СТРУКТУРИ**

Спеціальність 05.03.01 - процеси механічної
обробки, верстати та інструменти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2008

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка, Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Доброскок Володимир Ленінмирович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка.

Офіційні опоненти: Доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Шепелев Анатолій Олександрович,
Інститут надтвердих матеріалів
ім. В.Н. Бакуля НАН України,
заступник директора, м. Київ;

Кандидат технічних наук, доцент
Краснощок Юрій Степанович,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства ім. П. Василенка,
доцент кафедри технології матеріалів, м. Харків.

Захист відбудеться " 27 " березня 2008 р. о " 14 " годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "21" лютого 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку теорії і практики абразивної обробки можливість прогнозування та раціонального вибору параметрів інструменту обмежується у першу чергу відсутністю науково обґрунтованих комплексних стохастичних оцінок просторових характеристик взаємного розташування зерен у його робочому шарі. Для вирішення даної проблеми необхідна розробка методів моделювання, верифікації і статистичної оцінки структури. Це стає можливим при використанні сучасних напрацювань в області статистичного моделювання і морфологічного аналізу дисперсних структур.

Прогнозування робочих характеристик абразивних інструментів на основі статистичного моделювання їх структури із врахуванням особливостей умов їх роботи є одним з найбільш перспективних шляхів забезпечення високих експлуатаційних якостей інструменту, що і визначило напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язано з держбюджетною науковою тематикою кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф.Семка Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ") за темою: "Розробка теоретичних основ 3D методології комп'ютерного моделювання оптимальних характеристик абразивно-алмазних інструментів" (ГР № 0105U000577, 2005-2007 р.), у який здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розширення можливостей прогнозування і забезпечення заданих робочих характеристик абразивного інструменту на основі статистичного моделювання структури.

Задачі дослідження:

1. Виконати теоретичні та експериментальні дослідження структури абразивного інструменту, розглянути можливість використання теорії дисперсних систем для моделювання та оцінки його робочих характеристик.

2. Виявити статистичні характеристики структури, пов'язані з фізико-механічними характеристиками абразивного інструменту. Визначити статистичні характеристики стандартних шліфувальних матеріалів для проведення модельного дослідження і порівняльного аналізу. Розробити методіку верифікації моделі наважки зерен на основі оцінки вірогідності статистичних параметрів.

3. Розробити імовірнісну модель структури, що дозволить враховувати спільний (сумісний) вплив конструктивно-технологічних параметрів абразивного інструменту на його робочі характеристики. Оцінити достовірність прогнозування робочих характеристик абразивного інструменту.

4. На основі прогнозного моделювання і експериментальних досліджень розробити практичні рекомендації з визначення раціональних параметрів абразивного інструменту із врахуванням особливостей його подальшої експлуатації.

Об'єкт дослідження - абразивний інструмент і процес абразивної обробки шліфуванням та доведенням.

Предмет дослідження - статистичні і робочі характеристики абразивних інструментів.

Методи дослідження. Теоретичні, модельні та експериментальні дослідження виконані на основі фундаментальних положень теорії абразивної обробки, мікроскопічного аналізу, теорії дисперсних систем і стереометричної реконструкції просторових параметрів об'єктів. Прогнозування характеристик робочого шару виконано на основі сучасних методів стохастичної геометрії і статистичного 3D-моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Запропоновано, обґрунтовано і реалізовано новий підхід у прогнозуванні робочих характеристик абразивного інструменту з використанням системи функціональних залежностей, що зв'язують між собою статистичні і фізико-механічні характеристики структури інструменту як дисперсної системи. В якості основних статистичних характеристик структури прийняті: середнє число контактів зерна з іншими зернами і сила їх зчеплення в одиничному контакті, що визначаються на основі парної кореляційної функції.

2. Вперше у рамках методології об'єктно-орієнтованого моделювання запропоновано виконувати дослідження мікроструктури абразивного інструменту і її верифікацію з використанням мікроскопічного аналізу на етапах моделювання наважки зерен і їх "щільного" упакування з урахуванням контактної взаємодії, що дозволило окрім геометричної та фізичної подоби забезпечити також технологічну подобу та установити статистичні характеристики структури абразивного інструменту.

3. Вперше на базі єдиного системного підходу визначені параметри законів розподілів розмірів зерен для різних зернистостей шліфзерна і шліфпорошків із забезпеченням складу фракцій за стандартами FERA 42(43)-GB-1984 (ИСО 8486, GB/T 2481.1) та ГОСТ 3647-80, що дозволило уточнити співвідношення зернистостей стандартних шліфувальних матеріалів на основі порівняльного аналізу моделей наважок зерен.

4. Запропоновано нові конструкції абразивних інструментів для обробки складних поверхонь, характеристики структури і геометричні параметри робочої поверхні яких забезпечують задані параметри контакту інструменту з оброблюваним виробом, раціональні щодо робочого процесу абразивної обробки.

Практичне значення отриманих результатів. Запровадження на підприємствах-виробниках абразивних інструментів запропонованих підходів прогнозування характеристик структури абразивних кругів дозволяє враховувати спільний вплив основних параметрів структури на їх експлуатаційні властивості і забезпечити раціональний вибір стандартних характеристик інструменту (номер зернистості, твердості і структури). Результати досліджень можуть бути впроваджені при підготовці виробництва абразивного інструменту (у т.ч. нетипового). Окремі підходи можуть бути використані при удосконалюванні існуючих або розробці нових робочих процесів абразивної обробки.

Виходячи з результатів модельних і експериментальних досліджень, запропоновані конструкції абразивних інструментів для обробки складних поверхонь, що забезпечують задані параметри контакту у процесі обробки, дозволяють істотно знизити систематичні і випадкові технологічні похибки на етапах проектування і виконання абразивної обробки. Розроблено робочі процеси профілювання абразивного інструменту (пат. 71382) і доведення різального інструменту (пат. 71373).

Практичні результати роботи впроваджені на ВАТ "Запорізький абразивний комбінат" з очікуваним річним економічним ефектом 18 тис. 860 грн.

Результати досліджень використовуються у навчальному процесі кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф.Семка НТУ "ХП" у дисциплінах: "Об'єктно-орієнтоване моделювання робочих процесів"; "Сучасні комп'ютерні технології у дослідженнях"; "Програмне забезпечення інтегрованих технологій".

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, що виносяться на захист, розроблені самостійно. Постановка задач і аналіз результатів виконані разом з науковим керівником. Роботи по підготовці патентів України проведені за участю співавторів. У роботі приведені посилання на авторів і джерела при використанні відомих залежностей, експериментальних даних, наукових положень, комп'ютерних систем моделювання і програмного забезпечення.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і дисертаційна робота доповідалися на наукових семінарах кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф.Семка НТУ "ХП" (2003-2007), а також на науково-технічних конференціях і семінарах: науково-практичній конференції Samsung Young Scientist Day (Київ, Україна, 2002); III і VI Молодіжній науково-практичній конференції "Машинобудування України очима молодих" (Запорожжя, Хмельницький, Україна, 2003 і 2006); Першій міжнародній науково-технічній конференції "Машинобудування і металообробка: математичне моделювання і САПР" (Кіровоград, Україна, 2003); "Високі технології у машинобудуванні" (Харків - Алушта, 2002, 2005 і 2006); X, XII і XIV Міжнародній науково-практичній конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 2002, 2004 і 2007).

Публікації. За результатами роботи опубліковано 9 наукових праць, з них 5 – у фахових виданнях ВАК України, 2 – деклараційних патенти України на винаходи.

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів основної частини, висновку, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 186 сторінок, з них 17 малюнків по тексту, 20 малюнків на 20 сторінках, 2 таблиці по тексту, 9 таблиць на 10 сторінках, 130 використаних літературних джерел на 12 сторінках, 3 додатка на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми і важливість питань, розглянутих у дисертації, сформульовані основні наукові положення і практичне значення досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз стану абразивної галузі, представлені основні аспекти виробництва абразивного інструменту, вплив основних факторів на його робочі характеристики. Розглянуто існуючі методи моделювання структури абразивного інструменту, можливості прогнозування його робочих властивостей із врахуванням взаємозалежних характеристик.

При виготовленні нових партій або замовленні нетипового абразивного інструменту у виробника виникає задача прогнозування і варіювання його робочих характеристик. Для її вирішення необхідно виділити властивості структури абразивного інструменту, що визначають його робочі характеристики.

Наукові праці Е.Н. Маслова, П.І. Ящеріцина, дослідження ВНДІАШ, ІНМ НАН України та інші показують, що твердість абразивного інструменту істотно впливає на продуктивність і якість обробки, характер зносу абразивних зерен, оскільки зміна пружної деформації містків зв'язки і сили, що утримує зерно у зв'язці, змінює характер навантаження, що визначає механізм і етапи зносу. Твердість круга пов'язана з відносною концентрацією зв'язки, її твердістю і здатністю ефективно розподілятися проміж зернами, а також зернистістю шліфувального матеріалу. Аналіз літературних джерел показує, що прикладні дослідження, направлені на вибір оптимального складу зв'язки, ефективні тільки у конкретних виробничих умовах. Тому у рамках теоретичного дослідження доцільно формалізувати опис взаємодії зв'язки з зернами.

Номер структури при виборі абразивного інструменту також залежить від його зернистості. Цей зв'язок відображує фізичну природу міцності тіла, що складається зі зв'язаних часток (як правило, дрібнозерниста структура міцніша за крупнозернисту). Таким чином, при оцінці робочих характеристик абразивного інструменту необхідно враховувати спільний вплив стандартного ступеня твердості, номера структури і зернистості (концентрації і дисперсності фаз). Уявлення про зв'язок цих характеристик з робочими властивостями досліджуваного об'єкта найбільш розвинуті у теорії дисперсних систем.

Одна з основних закономірностей теорії дисперсних систем, що встановлена академіком П.А. Ребіндером, зв'язує величину питомої поверхні дисперсної фази S або питома число контактів часток між собою Z з твердістю структури за залежністю

$$P_m = a_1 \cdot F_c \cdot Z^{\frac{2}{3}} = a_2 \cdot F_c \cdot \varphi \cdot S^2, \quad (1)$$

де P_m - гранична напруга зсуву; a_1 і a_2 - емпіричні коефіцієнти, що враховують розмірність; F_c - сила зчеплення в одиничному контактi; Z - питома число контактів (число контактів в одиниці об'єму); φ - концентрація дисперсної фази; S - питома поверхня дисперсної фази.

У загальному випадку, модель структури абразивного інструменту як дисперсної системи I може бути представлена у вигляді деякої обмеженої області абразивного простору, в якій знаходяться підобласті дисперсних фаз: зерен G , зв'язки B і пор V .

Використання теорії дисперсних систем стосовно до структури абразивного

інструменту передбачає визначення таких її статистичних характеристик, як середнє число контактів, середня сила зчеплення у контакті або питома поверхня наважки зерен.

Визначення характеристик абразивного інструменту в основних теоретичних дослідженнях Е.Н. Маслова, А.Н. Резнікова, А.К. Байкалова супроводжувалося розробкою моделі його структури. А.К. Байкалов є засновником системного підходу у дослідженні будови робочого шару алмазно-абразивного інструменту. Але розвинена ним методологічна база моделювання абразивного простору не може бути застосована для інструментів з традиційних абразивних матеріалів, бо вони являють собою щільні структури. Відстань між центрами щільно упакованих зерен абразивного інструменту визначається як імовірністю перебування зерна у визначеній точці простору, так і імовірністю перебування зерна на деякій відстані від іншого зерна.

Статистичне моделювання щільно упакованих абразивних структур потребує вирішення задачі обробки перетинань або контактів тривісних еліпсоїдів. Рішення цієї задачі дослідниками Eberly D., Sorola V., що пов'язані з побудовою площин дотичних до поверхонь еліпсоїдів, слід визнати найбільш універсальними, хоча складність числових методів перешкоджає їх застосуванню у задачах обробки великої кількості перетинань.

Для статистичної оцінки взаємного розподілу фаз використовуються різні види парної кореляційної функції (Manwart C., Torquato S.). На відміну від коефіцієнта кореляції, який характеризує взаємозалежність змінних, кореляційна функція визначає імовірність досягнення визначеного значення однією змінною в залежності від значення іншої змінної. У даному випадку парна кореляційна функція визначає імовірність розташування однієї частки абразивної фази на деякій відстані від іншої.

Крім забезпечення заданих робочих характеристик інструменту, враховуючи експортну орієнтацію української абразивної промисловості, важливою представляється задача гармонізації стандартів ГОСТ 3647-80 і FEPA 42(43)-GB-1984 на шліфувальні матеріали. Один з етапів гармонізації - встановлення відповідності між стандартами - вимагає проведення порівняльного аналізу зернового складу шліфувальних матеріалів з урахуванням його впливу на показники процесу абразивної обробки.

На основі проведеного аналізу визначені напрямки наукового пошуку, сформульовані мета і задачі дослідження.

Другий розділ присвячено питанням методів моделювання і мікроскопічного аналізу структури абразивного інструменту. Розглянуто інтегрований комплекс спеціального програмного забезпечення, який використовувався для статистичного моделювання абразивного простору і візуалізації моделі.

Розроблена методика моделювання абразивних інструментів на основі системи статистичного моделювання алмазно-абразивних інструментів, що створена на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ "ХПІ". Основною складовою методики є модуль, який дозволяє здійснювати моделювання та імітаційний контроль наважки шліфувального матеріалу відповідно до вимог ГОСТ і FEPA. Для дослідження щільно упакованих об'єктів у роботі

використовувалася версія програми Siams S3D (freeware version), що розроблена у Новосибірському державному технічному університеті. Розроблено спеціальне програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати моделювання упакування зерен, проводити статистичний аналіз упакування зерен і параметрів об'єктів, виділених на зображенні структури абразивного інструменту. Виведення параметрів, розрахованих на основі статистичного моделювання або аналізу зображення, було реалізовано шляхом формування звіту в середовищі MS Excel, де виконувався подальший розрахунок статистичних і робочих характеристик абразивного інструменту.

Для вирішення задач дослідження також був розроблений модуль (підсистема імітаційного контролю), який доповнює систему статистичного моделювання абразивно-алмазних інструментів, що дозволяє здійснювати моделювання наважки шліфувального матеріалу відповідно до вимог ГОСТ і FEPA.

Для якісного і кількісного дослідження зерен шліфувального матеріалу, оцінки розташування абразивної фази на фотографії структури абразивного інструменту використовувалися мікроскопічні методи аналізу структури абразивного інструменту.

Для дослідження зернового складу і характеристик шліфувальних матеріалів використовувався відео-комп'ютерний діагностичний комплекс фірми VOLLSTADT DIMANT GmbH, що знаходиться в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.Н. Бакуля НАН України. Виділення фази зерен на зображеннях мікрошліфів абразивних інструментів і їх морфологічний аналіз виконувалися з використанням програми Scion Image.

Основними робочими характеристиками абразивного інструменту є твердість як стандартна характеристика і міцність, що пов'язана з розривною швидкістю обертання круга.

У більшості теоретичних досліджень розрахункові залежності приводилися до глибини лунки (ГОСТ 18118-79), що прорізається в абразивному інструменті і є величиною, зворотною до твердості. Для отримання аналітичної залежності твердості абразивного інструменту і визначення відхилень розрахункових значень глибини лунки стосовно кожного з діапазонів зернистостей і глибини лунки h_n , наведених у ГОСТ 18118-79, розраховано їх середні значення, на основі яких побудовано опорні точки і визначено залежність $N_{TB}(h_n, \bar{d})$

$$N_{TB} = 0.035 \cdot \bar{d} \cdot e^{0.29h_n \cdot \bar{d} (0.00022h_n + 0.0025)}, \quad (2)$$

де \bar{d} - середній розмір зерен, або їх математичне сподівання.

Запропонована залежність відбиває характер зміни ступеня твердості при варіюванні параметрів h_n і \bar{d} та дозволяє розрахувати ступень твердості з максимальною відносною похибкою 7.2%.

Дослідження просторових характеристик окремих структур проводилося з використанням методики пошарової реконструкції (slicing), результати якої

використовувалися для верифікації моделі.

У **третьому розділі** розглянуто основні етапи моделювання абразивного інструменту. Реалістичність моделювання структури абразивного інструменту забезпечувалася використанням параметрів розподілу розмірів зерен відповідно з вимогами стандартів до зернового складу фракцій.

Згідно до положення А.Н. Коломогорова щодо часток, отриманих у результаті дроблення, у роботі приймалася базова гіпотеза, згідно якій розміри зерен підпорядковані логарифмічно-нормальному закону розподілу. З використанням системи статистичного моделювання абразивно-алмазних інструментів для різних зернистостей шліфувальних матеріалів були визначені: середній розмір зерен - \bar{d} , який приймався рівним математичному сподіванню; середній об'єм зерна - V_3 ; та модифіковані параметри розподілу розмірів зерен: коефіцієнт розташування математичного сподівання відносно характеристичного розміру - $k_m = \bar{d} / A_{\max}$ і коефіцієнт варіації - $k_v = \sigma / \bar{d}$ (де A_{\max} – розмір вічка верхнього сита, на якому затримується гранична фракція; σ - середньоквадратичне відхилення). Визначення цих параметрів здійснювалося із врахуванням припустимого стандартами ГОСТ або FEPA змісту різних фракцій (рис. 1). Додатково з використанням підсистеми імітаційного контролю визначалася площа поверхні для кожної з фракцій наважки зерен.

Перевірка адекватності моделі зерен з логарифмічно-нормальним розподілом розмірів проводилася на вибірці з 2000 зерен шліфувального матеріалу 25A зернистістю 25Н шляхом порівняння експериментально отриманого розподілу розмірів зерен, з використанням комплексу фірми VOLLSTADT DIMANT GmbH, та теоретичного закону розподілу, отриманого з використанням розробленої системи статистичного моделювання.

На першому етапі верифікації моделі наважки зерна шліфувального матеріалу насипалися на предметне скло. При цьому зерна орієнтувалися таким чином, щоб можливо було обміряти їх максимальний d_{\max} і середній d_{mean} розміри. На другому етапі вони насипалися на поверхню в'язкого прозорого середовища. Передбачалося, що при цьому вони орієнтуються випадково. На основі проведеного статистичного аналізу експериментальних даних було підтверджено положення А.Н. Колмогорова про логарифмічно-нормальний закон розподілу розмірів часток стосовно до абразивних зерен (рис. 2) у відповідності з критеріями χ^2 та Колмогорова-Смірнова.

Для моделювання структури абразивного інструменту необхідно описати контактну взаємодію зерен. Оскільки до теперішнього часу не існує аналітичного рішення перетину вільно орієнтованих тривісних еліпсоїдів, встановлення їх перетинання чи контакту досягалось використанням розробленої ієрархічної системи, яка включає шість критеріїв.

Перший і другий критерії основані на встановленні перетинання шарів, які описані та уписані навколо кожного з пари еліпсоїдів.

Для перевірки наявності перетину за наступними чотирма критеріями здійснюються перетворення, пов'язані з орієнтацією еліпсоїдів у системі координат

абразивного простору. На рис. 3 радіус-вектор $\vec{r}_A = (x_A, y_A, z_A)$ визначає точку на поверхні еліпсоїда A у його власній системі координат, радіус-вектору $\vec{r}_B = (x_B, y_B, z_B)$ відповідає точка на поверхні другого еліпсоїда у системі координат B . Звідси

$$\phi_A(x_A, y_A, z_A) = \vec{r}_A^T \cdot D_A \cdot \vec{r}_A - 1 = 0; \quad \phi_B(x_B, y_B, z_B) = \vec{r}_B^T \cdot D_B \cdot \vec{r}_B - 1 = 0, \quad (3)$$

де D_A і D_B – рівняння поверхні кожного з еліпсоїдів у матричному виді.

При перевірці наявності перетину за третім критерієм будуються площини, дотичні до поверхонь еліпсоїдів і перпендикулярні лінії, яка з'єднує їх центри (рис. 4). Четвертий критерій потребує визначення різниці відстаней між точками перетинання поверхонь еліпсоїдів лінією, що з'єднує їх центри, і довжиною цієї лінії. При перевірці за п'ятим та шостим критеріями відбувається побудова площин, дотичних до точок перетинання поверхні еліпсоїдів лінією, що з'єднує їх центри.

Ієрархічна система критеріїв була застосована у розробленій методиці моделювання упакування зерен (рис. 5). Використання алгоритмів обробки множинного контакту об'єктів на основі тривісних еліпсоїдів робить розроблену методику більш універсальною і дозволяє розширити групу досліджуваних структур. Зерна у просторі розташовуються випадковим чином, потім відбувається послідовне ущільнення упакування, також як і при пресуванні абразивної маси. Таким чином, у процесі моделювання окрім геометричної та фізичної подоби дотримувався принцип технологічної подоби.

У **четвертому розділі** представлені результати дослідження фізико-механічних властивостей абразивного інструменту як дисперсної системи, отримані на основі моделі абразивного простору і мікроскопічного аналізу.

На основі літературного аналізу для розрахунку фізико-механічних характеристик абразивного інструменту було виділено три статистичні характеристики: питома число контактів зерен між собою Z , середню силу зчеплення зерен у контакті F_c та парну кореляційну функцію $S_{G2} \bar{x}_1, \bar{x}_2$, що описує розподіл абразивної фази для двох розташованих поруч часток.

Питома число контактів зерен в одиниці об'єму визначається за формулою

$$Z = \bar{Z} \cdot N/V, \quad (4)$$

де \bar{Z} – середнє число контактів зерна з іншими зернами; N – число зерен в об'єму V ; V – об'єм абразивного простору.

Результати статистичного моделювання і проведеного мікроскопічного аналізу дозволяють отримати уявлення про характер залежності середнього числа контактів зерна від концентрації $\bar{Z} = f(\varphi_G)$ для упакування зерен у робочому шарі абразивного інструменту. Однак, встановлення цієї залежності для реальної структури абразивного інструменту, потребує знайти опорні точки на інтервалі $\varphi_G = 0.38 \div 0.62$. Їри їх розрахунку використовувалася парна кореляційна функція.

За аналогією з парною кореляційною функцією $S_2 R$, яка будується для упакування шарів, функція, яка описує розподіл точок абразивної фази для

розташованих поруч зерен, представлена як $S_{G_2}(\rho)$. Розходження в описах функцій $S_2 R$ та $S_{G_2}(\rho)$ полягає у тому, що функція $S_{G_2}(\rho)$ показує імовірність знаходження не центрів зерен, а абразивної фази (концентрацію фази) на кожній ділянці Q_i абразивного простору, обмеженій радіус-векторами ρ_i і $\rho_i + \Delta$, початок яких знаходиться у центрі зерна (рис. 6).

З метою підвищення демонстративності результатів при розрахунку функції $S_{G_2}(\rho)$ для структур різних зернистостей приріст Δ радіус-вектора ρ приводиться до середнього розміру зерен \bar{d} .

Значення парної кореляційної функції для деякої відстані ρ_i визначався як імовірність перебування абразивної фази G у області "сканування" абразивного простору Q_i

$$S_{G_2} \rho_i = \frac{1}{Q_i} \sum_{j=1}^{N_i} Q_{ij}, \quad (5)$$

де N_i - число зерен, що перетинаються областю Q_i ; Q_{ij} - область перетинання j -го зерна з областю Q_i .

Аналіз властивостей розглянутої парної кореляційної функції $S_{G_2}(\rho)$ виконувався при моделюванні упакування куль, коли забезпечується досить повний контакт між моделями зерен. Як показано на рис. 7, екстремальні значення парної кореляційної функції приблизно відповідають відносним відстаням від центру моделі зерна $e_0 = 0$, $e_1 = \bar{d}/2$, $e_2 = \bar{d}$ і $e_3 = 1.5 \cdot \bar{d}$.

Рис. 7. Парні кореляційні функції $S_{G_2}(\rho)$ для насипного упакування куль і їх перетинів

Рис. 8. Парна кореляційна функція $S_{G_2}(\rho)$ при різних концентраціях абразивної фази та зображення структур, для яких значення функції встановлені експериментально

Результати статистичного моделювання показали, що запропоновану парну кореляційну функцію як об'ємну характеристику можна досить точно визначити при перетинанні досліджуваної структури довільною площиною (рис. 7). Така властивість функції дає можливість розрахувати інші просторові характеристики структури на основі аналізу мікрошліфів (рис. 8).

З використанням системи морфологічного аналізу зображень Scione Image і спеціально розробленого програмного забезпечення експериментально були встановлені значення парної кореляційної функції $S_{G_2}(\rho)$ для наступних номерів структур абразивних інструментів (концентрацій абразивної фази): №6 (0.5), №8 (0.46) і №9 (0.44). Значення $S_{G_2}(\rho)$ до концентрації 0.34 визначені методом статистичного моделювання.

Число контактуючих зерен пов'язано з концентрацією фази навколо зерна (рис. 9). Як показали модельні експерименти, відносна відстань e_2 третього екстремуму функції $S_{G_2}(\rho)$ відповідає середньої відстані між центрами сусідніх зерен. Об'єм абразивної фази в області, яка обмежена радіус-вектором відносно довжиною e_2 , приблизно відповідає половині об'єму контактуючих зерен, якщо при цьому не враховується зерно, розташоване у центрі. Таким чином, середнє число контактів зерна з іншими зернами може бути визначено за залежністю

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{\rho_i=0}^{e_2} S_{G_2} \rho_i \cdot Q_i}{V_3} - 1, \quad (6)$$

де e_2 - відносна відстань, що відповідає розташуванню третього екстремуму парної кореляційної функції; $S_{G_2}(\rho_i)$ - значення парної кореляційної функції для відносної відстані ρ_i ; Q_i - область "сканування" абразивного простору (рис. 6); V_3 - середній об'єм зерна, визначений на етапі моделювання наважок зерен.

Для експериментально визначених значень \bar{Z} були знайдені коефіцієнти рівняння регресії $\bar{Z} = f(\varphi_G)$, що забезпечують максимальну відносну похибку розрахунку 2.4%

$$\bar{Z} = \frac{4.5\varphi_G^{3.6}}{1.3\varphi_G^{6.04} + 0.055}, \quad (7)$$

Другий екстремум e_1 функції $S_{G_2}(\rho)$ відповідає умовній області контакту зерен. З ростом концентрації зерен (і зменшенням відносної відстані e_1) за рахунок їх взаємної орієнтації і більш щільного упакування збільшується область контакту зерен.

Концентрація абразивної фази в області контакту зерна із сусідніми зернами є часткою площі сфери відносним радіусом e_1 , що відповідає значенню $S_{G_2}(\rho)$ на цій відстані. Звідси, величина K_Z , що характеризує щільність прилягання зерен одне до одного (рис. 9), може визначатися за залежністю

$$K_Z = k_{K_Z} \frac{4\pi \cdot e_1^2 \cdot S_{G_2} e_1}{\bar{Z}}, \quad (8)$$

де $k_{K_Z} = 5.71$; $S_{G_2}(e_1)$ - значення парної кореляційної функції для відносної відстані e_1 ; \bar{Z} - середнє число контактів зерна з іншими зернами.

У роботі приймалася гіпотеза, що під час часткового чи повного розплавлення зв'язка концентрується у місцях контакту абразивних зерен пропорційно їх об'єму. Середній об'єм зв'язки W_Z , що приходить на один контакт, визначався як

$$W_Z = q \cdot W / \bar{Z}, \quad (9)$$

де q - емпіричний коефіцієнт, що характеризує концентрацію зв'язки у місцях контакту зерен ($q = 0.50 \div 0.65$); W - об'єм зв'язки, що приходить на одне зерно; \bar{Z} - середнє число контактів зерна з іншими зернами.

Для містка зв'язки циліндричної форми формула, що пов'язує середній діаметр зерен \bar{d} , половину товщини містка зв'язки H і перетин зв'язки у місці контакту $d_{зв}$, може бути представлена у наступному вигляді

$$d_{зв} = \sqrt{\bar{d} \cdot H - H^2}; \quad W_Z = \pi \cdot H^2 \left(\bar{d} - \frac{4}{3} H \right), \quad (10)$$

де \bar{d} - середній діаметр зерен; H - половина товщини містка зв'язки.

Сила зчеплення зерен у контакті

$$F_c = K_Z \cdot \pi \cdot d_{зв} \cdot \sigma_B, \quad (11)$$

де σ_B - міцність зв'язки.

Рис. 10. Залежність міцності абразивного інструменту на згин від зернистості і концентрації зв'язки (концентрація абразивної фази $\phi_G = 0.5$, шліфувальний матеріал – електрокорунд 25А, зв'язка К5)

Згідно (1) міцність абразивного інструменту визначалася залежністю

$$\sigma_{зг} = 38 F_c \cdot Z^{\frac{2}{3}}. \quad (12)$$

Таким чином, на основі статистичного моделювання і мікроскопічного аналізу визначається міцність абразивного інструменту (рис. 10) - базова характеристика, що дозволяє прогнозувати його експлуатаційні властивості.

У **п'ятому розділі** представлені результати використання теоретичних залежностей, які були отримані при статистичному моделюванні та аналізі структури абразивного інструменту.

На основі розрахованих значень міцності інструменту визначені розривні і робочі кутові швидкості обертання круга. Залежність для розрахунку розривної кутової швидкості обертання може бути представлена у наступному вигляді

$$\omega = \sqrt{\frac{8 \cdot g \cdot \sigma_{зг}}{\gamma \cdot 3 + \mu \cdot 2R_3^2 + R_B^2 - \frac{R_B^2 \cdot 1 + 3 \cdot \mu}{3 + \mu}}}, \quad (13)$$

де g - прискорення вільного падіння; γ - вага одиниці матеріалу; μ - коефіцієнт Пуассона ($\mu = 0.15$); R_3 - зовнішній радіус круга; R_B - внутрішній радіус круга (чи зовнішній радіус планшайби).

Визначено залежність, що зв'язує ступінь твердості абразивного інструменту (глибину лунки, прорізуваної в абразивному інструменті в умовах регламентованих

ГОСТ 18118-79) з характеристиками структури

$$h_n = \frac{48}{F_c \cdot Z^{2/3} - 17\bar{d}}, \quad (14)$$

де F_c - сила зчеплення зерен у контакті; Z - питоме число контактів (число контактів в одиниці об'єму); \bar{d} - середній діаметр зерен.

Точність оцінки твердості при використанні розробленої моделі перевірялася шляхом порівняння стандартних і розрахункових значень глибини лунки h_n для типових абразивних інструментів на зв'язці K5, виготовлених з електрокорунду 25A зернистістю №12÷63, з різною концентрацією абразивної фази і зв'язки. Показано, що запропонована статистична модель структури дозволяє прогнозувати робочі властивості абразивного інструменту при варіюванні концентрації зв'язки, зерен та зернистості шліфувального матеріалу.

Крім забезпечення заданих робочих характеристик абразивного інструменту перед українськими виробниками також стоїть задача гармонізації стандартів ГОСТ і FERA на шліфувальні матеріали. Відповідно до розробленої методики здійснено імітаційний контроль зернового складу моделей наважок зерен, сформованих відповідно до вимог FERA (ряди F і P), але з використанням номінальних розмірів вічок сит за ГОСТ 3647-80.

Аналіз співвідношень фракційного складу зерен для близьких варіантів зернистостей шліфувальних матеріалів за ГОСТ і FERA дозволив уточнити рекомендовану у Додатку 6 стандарту ГОСТ 3647-80 відповідність зернистостей для FERA ряд F.

Вибір зернистості відповідно до ГОСТ заснований на неперевищенні розмірів вічок сита для основної фракції по FERA вічками сита основної фракції за ГОСТ. Тобто, використовуються матеріали меншої зернистості, однак при цьому не враховується ступінь відповідності зернових складів по фракціях і критерії вибору зернистості.

Встановлено відповідність зернистостей ГОСТ і FERA ряд P. Показано можливість розширення відповідності зернистостей ГОСТ 3647-80 і FERA ряд F на основі додаткового використання шліфувальних інструментів більшої зернистості, якщо клас шорсткості не є головним критерієм

Таблиця 1

**Рекомендована відповідність
зернистостей шліфувальних
матеріалів для стандартів
ГОСТ 3647-80 і FERA**

Позначення зернистості		
ГОСТ	FERA ряд F	FERA ряд P
200	F10	-
160	F12	P12
125	F16 (F14*)	P16
100	F20	P20
80	F24 (F22*)	P24 (P20*)
63	F30	P30
50	F36	P36
40	F40**	P40
32	F54 (F46*)	P50
25	F60	P60
20	F70	P80
16	F80	P100 (P80*)
12	F100	P120 (P100*)
10	F120	P150
8	F150	P180
6	F220	P220

Примітка:

* рекомендується як додаткова, при необхідності підвищити продуктивність абразивної обробки;

** рекомендується на заміну відповідності пари зернистостей №40 за ГОСТ і F46 за FERA, Додатку 6 ГОСТ 3647-80.

обробки, але необхідно забезпечити більшу її продуктивність (табл. 1).

На основі результатів досліджень з використанням об'єктно-орієнтованого підходу розроблені робочі процеси шліфування криволінійних поверхонь (пат. 71382) і доведення лезового інструменту (пат. 71373), що дозволяють знизити систематичні і випадкові технологічні похибки на етапах проектування і виконання абразивної обробки.

Для реалізації схеми робочого процесу шліфування криволінійних поверхонь утворююча абразивного інструменту розбивалася на ряд ділянок, сполучених з відповідною ділянкою профілюючого інструменту. У середині кожної ділянки задавалося знімання по нормалі до поверхні I_n при абразивній обробці. Відступ t_n на границі кожної ділянки абразивного інструменту визначався за формулою

$$t_n = \frac{k^a \cdot I_n \cdot \bar{d} / R_z^b}{P_n \cdot V \cdot T}, \quad (15)$$

де k - технологічний коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу; I_n - ваговий знос оброблюваного матеріалу у точці по нормалі до поверхні при абразивній обробці, г; \bar{d} - середній діаметр зерен, мкм; R_z - задана шорсткість поверхні деталі, що шліфується, мкм; $a = 0.3 \div 0.5$ - емпіричний коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу і твердості шліфувального круга; $b = 0.1 \div 0.4$ - емпіричний коефіцієнт, що залежить від структури круга; P_n - нормальне навантаження у точці, Н; V - швидкість різання, м/с; T - тривалість контакту, с.

За рахунок локальності контакту інструменту та деталі запропонований робочий процес має широкі можливості оптимізації режимів обробки шляхом варіювання характеристик структури (номерів твердості, зернистості, структури) і зміни положення контактних кривих.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведене перспективне вирішення науково-практичної задачі раціонального вибору параметрів абразивного інструменту, що полягає у розробці статистичної 3D моделі структури абразивного інструменту і використанні теорії дисперсних систем для оцінки його робочих характеристик. За результатами роботи зроблено наступні висновки:

1. У результаті теоретичних і експериментальних досліджень розроблені основи прогнозування робочих характеристик абразивних інструментів на базі статистичного 3D моделювання структури. Для розрахунку фізико-механічних властивостей абразивного інструменту обґрунтована доцільність використання трьох статистичних характеристик: парної кореляційної функції розподілу абразивної фази, середнього числа контактів між зернами і сили зчеплення в одиничному контакті.

2. На основі єдиного системного підходу отримані статистичні характеристики законів розподілів розмірів зерен шліфувальних матеріалів за стандартами FEPA 42-GB-1984 і ГОСТ 3647-80. З використанням розробленої методики

верифікації, що базується на відео-комп'ютерному аналізі проєкції 2000 зерен, експериментально підтверджена адекватність моделі наважки, для якої відносне відхилення вибіркового середньоарифметичного розмірів зерен складає 4%. Вперше стосовно абразивних зерен підтверджено теоретичне положення А.Н. Колмогорова про логарифмічно-нормальний закон розподілу розмірів часток, отриманих у результаті дроблення.

3. З використанням імітаційного контролю для моделей наважок зерен встановлена відповідність зернистостей шліфувальних матеріалів за ГОСТ і FERA (ряд P), уточнена відповідність зернистостей шліфувальних матеріалів за ГОСТ і FERA (ряд F). Зокрема, зернистість F46 відповідає зернистості №32 більш повно, якщо взяти до уваги склад фракцій, чим пара зернистостей, зазначена у Додатку 6 ГОСТ 3647-80 (те ж для відповідності зернистостей №80 і F22). Обґрунтовано доцільність використання зернистості F40 по FERA як відповідної №40 за ГОСТ 3647-80.

4. З використанням системи тестів для обробки контакту тривісних еліпсоїдів розроблена методика 3D моделювання упакування зерен на основі послідовного її ущільнення, що забезпечує принцип технологічної подоби. Розроблена модель і мікроскопічний аналіз дозволяють визначати парну кореляційну функцію розподілу абразивної фази і залежність середнього числа контактів зерна з іншими зернами від їх концентрації.

5. Для абразивного інструменту, виготовленого з електрокорунду білого на керамічній зв'язці, встановлено залежності, що описують зв'язок розрахованих статистичних характеристик з розривною швидкістю обертання круга і стандартним ступенем твердості. Значення глибини лунки, розраховані по отриманих залежностях для типових інструментів з відомими характеристиками, знаходяться у межах діапазону, регламентованого стандартом ГОСТ 18118-79.

6. На основі об'єктно-орієнтованого підходу (метод перевизначення функцій процесів) з використанням отриманих залежностей розроблені робочі процеси шліфування криволінійних поверхонь і доведення різального інструменту. В основі запропонованих процесів лежить регулювання параметрів контакту при формоутворенні і побудові траєкторії переміщення інструменту.

7. Практичні результати роботи впроваджено на ВАТ "Запорізький абразивний комбінат" та в учбовому процесі НТУ "ХПІ".

СПИСОК ОПУБЛКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Перепелица Б.А., Кондусова Е.Б., Филимонов Е.В. Особенности 3D моделирования режущих инструментов на основе многопараметрических отображений пространства // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. - Вып. 62. - С. 99-103.

Здобувачем запропоновано принципи реалізації математичного ядра об'ємного моделювання, орієнтованого на розробку спеціальних програм. Визначено базовий набір класів, які забезпечують функціонування системи.

2. Доброскок В.Л., Филимонов Е.В. Расчет траектории движения при переопределении функций процессов формообразования доводника и доводки

лезвийного інструмента // Високі технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ", 2003. - Вип. 2 (7) - С. 158-163.

Здобувачем розглянуто геометричні і технологічні фактори, що визначають конфігурацію і площу зони контакту. Розглянуто залежності формоутворення при абразивному зношуванні.

3. Доброскок В.Л., Филимонов Е.В. Алгоритмы обработки взаимодействия трехосных эллипсоидов в задачах моделирования абразивно-алмазных инструментов // Високі технології в машинобудуванні. - Харків: НТУ "ХПІ", 2004. - Вип. 1(8). - С. 61-70.

Здобувачем розроблено алгоритми взаємодії моделей зерен, які можуть застосовуватися при дослідженні структур з різною щільністю пакування об'єктів.

4. Доброскок В.Л., Филимонов Е.В. Особенности формирования структур при моделировании абразивно-алмазных инструментов // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. - Вип. 66. - С. 37-47.

Здобувачем проведено аналіз методологічних підходів у дослідженні характеристик дисперсних систем і структури робочого шару абразивного інструменту, методів модельного відтворення дисперсних систем.

5. Филимонов Е.В. Верификация и статистическая оценка микроструктуры абразивного инструмента // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков: НТУ "ХПИ". - 68'2005. - С. 362-375.

6. Декл. пат. 71382 А УКРАЇНА, МПК В24В53/06 / А.І. Грабченко, В.Л. Доброскок, Е.В. Філімонов; НТУ "ХПІ". Спосіб профілювання абразивного інструменту - № 20031212479; Заяв. 25.12.2003; Опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.

Здобувачем визначено схему профілювання і переміщення абразивного інструменту, яка враховує параметри контакту і технологічні умови процесу обробки.

7. Декл. пат. 71373 А УКРАЇНА, МПК В24В37/02 / А.І. Грабченко, В.Л. Доброскок, Е.В. Філімонов; НТУ "ХПІ". Спосіб доведення різального інструменту - № 20031212422; Заяв. 25.12.2003; Опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.

Здобувачем визначено залежності, які визначають сталість параметрів контакту у процесі обробки на основі відстеження сили різання.

8. V.L. Dobroskok, E.V. Filimonov, Y.N. Garachshenko. Paradigms of Modelling of Abrasive-Diamond Tools // 2nd International Conference of "Research and Education". - Miskolc: University press. - 2004. P. 43 - 51.

Здобувачем сформульовано комплекс умов, необхідних для реалістичного моделювання структур абразивно-алмазних інструментів.

9. Грабченко А.І., Доброскок В.Л., Филимонов Е.В., Эсмантович С.Н. Современные тенденции производства абразивных инструментов в Украине // Мат. міжнародн. наук.-практ. конф. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. - Харків: НТУ "ХПІ", 2005. - С. 19-27.

Здобувачем проведено аналіз стану абразивної галузі України і перспективних напрямків підвищення конкурентоспроможності абразивної продукції, показано необхідність гармонізації міжнародних стандартів на абразивну продукцію.

АНОТАЦІЇ

Філімонов Є.В. Прогнозування робочих характеристик абразивних інструментів на основі статистичного моделювання їх структури. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 - процеси механічної обробки, верстати та інструменти. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2008.

Дисертація присвячена прогнозуванню твердості і міцності абразивного інструменту на основі статистичного моделювання структури. Для визначення робочих характеристик абразивного інструменту використовувалася теорія дисперсних систем.

Уточнено відповідність зернистостей шліфувальних матеріалів за ГОСТ і FEPA. З використанням розробленої методики верифікації, заснованої на відео-комп'ютерному аналізі проекцій зерен, підтверджено адекватність моделі наважки.

Розроблений підхід дозволяє здійснювати статистичне 3D моделювання упакування зерен шляхом послідовного його ущільнення, що забезпечує принцип технологічної подоби процесу пресування абразивної маси.

Встановлено залежності, що описують зв'язок розрахованих статистичних характеристик з робочою швидкістю обертання круга і стандартним ступенем твердості абразивного інструменту.

Ключові слова: структура абразивного інструменту, прогнозування робочих характеристик, статистичне моделювання.

Филимонов Е.В. Прогнозирование рабочих характеристик абразивных инструментов на основе статистического моделирования их структуры. - Рукопись.

Дисертація на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 - процессы механической обработки, станки и инструменты. - Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2008.

Дисертація посвящена прогнозуванню твердості і прочності абразивного інструмента на основі статистичного моделювання структури.

Методика моделювання структури абразивних інструментів була определена на основе системы статистического моделирования абразивно-алмазных инструментов, разработанной на кафедре интегрированных технологий машиностроения им. М.Ф. Семко НТУ "ХПИ".

Система была дополнена модулями имитационного контроля фракционного состава навески зерен, которые позволили определить статистические характеристики законов распределений размеров зерен в соответствии с требованиями стандартов FEPA 42-GB-1984 и ГОСТ 3647-80. С использованием системы уточнено соответствие зернистостей шлифовальных материалов по ГОСТ и FEPA (ряд F), установлено соответствие зернистостей шлифовальных материалов

по ГОСТ и FEPA (ряд P).

Для исследования зернового состава и характеристик шлифовальных материалов применялся видео-компьютерный диагностический комплекс (ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины). На основе микроскопического исследования при помощи специального программного обеспечения проводился морфологический анализ изображений структуры абразивного инструмента.

С использованием разработанной методики верификации, основанной на анализе проекций зерен, подтверждена адекватность модели навески, экспериментально подтверждено теоретическое положение А.Н. Колмогорова о логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц, полученных в результате дробления, применительно к абразивным зернам.

В основу методики статистического моделирования плотноупакованных абразивных структур легла модель контактного взаимодействия зерен. Повышение эффективности установления контакта моделей зерен достигалось с использованием иерархической системы взаимодополняющих геометрических тестов. Разработанный подход позволяет осуществлять статистическое 3D моделирование упаковки зерен путем последовательного ее уплотнения, что обеспечивает принцип технологического подобия процессу прессования абразивной массы.

На основе полученной модели упаковки зерен и микроскопического анализа определена парная корреляционная функция распределения абразивной фазы, рассчитана зависимость среднего числа контактов зерен между собой от их концентрации.

Для определения рабочих характеристик абразивного инструмента использовалась теория дисперсных систем, в частности, зависимость, связывающая величину удельной поверхности абразивной фазы или удельное число контактов частиц между собой с прочностью структуры.

Предложенная статистическая модель структуры позволяет прогнозировать рабочую скорость вращения круга и стандартную степень твердости абразивного инструмента при варьировании концентрации связки, зерен и зернистости шлифовального материала.

На основе результатов исследований с использованием объектно-ориентированного подхода разработаны рабочие процессы шлифования криволинейных поверхностей и доводки лезвийного инструмента, которые позволяют снизить систематические и случайные технологические погрешности на этапах проектирования и выполнения абразивной обработки.

Ключевые слова: структура абразивного инструмента, прогнозирование рабочих характеристик, статистическое моделирование.

Filimonov E.V. Forecasting of the abrasive tools operating characteristics on the basis of statistical modelling of they structure. - Manuscript.

Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences on specialty 05.03.01 - Machining processes, machine tools and tools. - National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkiv, 2008.

The thesis deals with forecasting of grade and resistance of abrasive tools on the basis

of statistical modelling of structure. The theory of disperse structures was used for determining operating characteristics of abrasive tools.

The conformance of State Standard to FEPA of grinding material graininess was made more exact. Using the developed system of verification the adequacy of the grain model was proved.

The developed approach allows 3D modelling of grain packs by stage-by-stage compression and provides for the principle of technological similarity.

On the basis of the developed model and microscopic analysis the relationships describing the connection of the calculated statistical and operating characteristics of abrasive tools were determined.

Key words: structure of abrasive tools, forecasting of operating characteristics, statistical modelling.