

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,  
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

## **НАУКОВІ ПРАЦІ**

*Донецького національного  
технічного університету*

*Серія: «Машинобудування і машинознавство»*

Випуск 8(190)

Заснований у 2003 році

Донецьк 2011

УДК 621.6-9; 658.5; 662.7; 921.6

Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Випуск 8 (190). – 213 с.

У збірнику опубліковано статті наукових працівників і провідних фахівців України в галузі машинобудування, в яких приведені результати наукових досліджень за такими напрямками:

- дослідження процесів механічного оброблення матеріалів та розробка прогресивних способів їх реалізації;
- проектування прогресивних конструкцій різальних інструментів та технологічного оснащення;
- створення і застосування прогресивних технологій в машинобудуванні;
- дослідження проблем кінематики, динаміки, міцності та надійності машин і їх вузлів.

Матеріали збірника призначені для наукових працівників, викладачів навчальних закладів, фахівців з питань механічного оброблення матеріалів, загального машинобудування і машинознавства, студентів, аспірантів і докторантів.

**Засновник та видавець** – Донецький національний технічний університет (ДонНТУ)

#### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Д-р техн. наук, проф. Башков Є.О. (голова), д-р техн. наук, проф. Гусєв В.В. (заст. голови), д-р техн. наук, проф. Нечепаяєв В.Г. (заст. голови), д-р техн. наук, проф. Калафатова Л.П. (відповідальна за випуск), д-р техн. наук, проф. Братан С.М., д-р техн. наук, проф. Матюха П.Г., д-р техн. наук, проф. Малишко І.О., д-р техн. наук, проф. Михайлов О.М., д-р техн. наук, проф. Єронько С.П., д-р техн. наук, проф. Клименко Г.П., д-р техн. наук, проф. Ковальов В.Д., д-р техн. наук, проф. Кондрахін В.П. д-р техн. наук, проф. Онищенко В.П., канд. техн. наук, доц. Полтавець В.В., д-р техн. наук, проф. Проволоцький О.Є. д-р техн. наук, проф. Седуш В.Я., д-р техн. наук, проф. Татьянченко А.Г., д-р техн. наук, проф. Шевченко Ф.Л.

Адреса редакції: 83000, Україна, м. Донецьк, вул. Артема, 58, ДонНТУ.

Публікується відповідно до рішення Вченої ради Донецького національного технічного університету, протокол № 6 від 17 червня 2011 р.

Свідectво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: Серія КВ № 7444 від 17.06.2003 р.

Збірник включено до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть бути опубліковані результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (додаток до постанови президії ВАК України №1-05/4 від 26. 05. 2010 р., надруковано в бюлетені ВАК України №6, 2010).

## ЗМІСТ

### Дослідження процесів механічного оброблення матеріалів та розробка прогресивних способів їх реалізації

<b>Азарова Н.В., Цокур В.П.</b> Експериментальне визначення параметрів шорсткості шліфованої поверхні.....	9
<b>Бурдін О.В.</b> Вплив зернистості алмазів на силу підтиску комбінованого зразка «сталь – твердий сплав» до різальної поверхні круга.....	16
<b>Васильченко Я.В.</b> Оперативна оптимізація процесу різання при обробці великогабаритних деталей.....	26
<b>Гусєв В.В., Калафатова Л.П., Медведєв А.Л., Семенюк Д.Ю.</b> Керування різальною здатністю алмазних кругів як фактор підвищення ефективності шліфування виробів із кераміки.....	35
<b>Івченко Т.Г.</b> Дослідження впливу параметрів процесу алмазного вигладжування на температуру в зоні обробки.....	44
<b>Майборода В.С., Джулій Д.Ю., Ткачук І.В.</b> Особливості формування магнітно-абразивного інструмента при магнітно-абразивній обробці довгомірних деталей у кільцевій робочій зоні.....	49
<b>Матюха П.Г., Габігов В.В.</b> Вплив виду шліфування на шорсткість обробленої поверхні.....	57
<b>Полтавець В.В.</b> Розвиток експериментально-теоретичного методу оптимізації режимів шліфування шляхом використання узагальненого показника процесу....	65
<b>Беляєв О., Хофман Д., Пфроммер Й., Майборода В.С., Гейчук В.Н.</b> Деякі аспекти обробки різальних поверхонь свердел.....	72

### Проектування прогресивних конструкцій різальних інструментів та технологічного оснащення

<b>Азарова Н.В.</b> Визначення закону та параметрів розподілу різновисотності алмазних зерен на робочій поверхні шліфувального круга.....	78
<b>Дерев'янченко О.Г., Бабилунга О.Ю., Косс Є.В., Соценко А.О.</b> Підхід до розпізнавання мікрodefektів інструментів, що відмовили, в структурі процесу їх відновлення.....	88
<b>Курілович В.Д., Ковальов С.В., Філатов Ю.Д.</b> Сучасні інструменти для фінішної обробки виробів з природного каменю.....	95
<b>Поліщук В.С., Матюха П.Г., Гонопольский М.Я.</b> Дослідження зернового складу залізо-абразивного порошку для магнітно-абразивної обробки.....	101
<b>Равська Н.С., Охріменко О.А., Кулініч А.С.</b> Особливості формоутворення передньої лінійчатої гвинтової поверхні зубців різального інструменту.....	108
<b>Равська Н.С. Охріменко О.А. Дубик Я.Р.</b> Підвищення технологічності заточки черв'ячних фрез.....	117
<b>Татьянченко О.Г., Сергеечев З.С.</b> Дослідження динамічної складової сили різання при обробленні поверхонь із геометричними похибками.....	124

## Створення і застосування прогресивних технологій в машинобудуванні

<b>Богданова Л.М., Лютакова О.М.</b> Підвищення керованості процесу механічної обробки деталей за рахунок використання інформаційних технологій.....	132
<b>Братан С.М., Сазонов С.Є., Мінаєв М.О.</b> Експериментальні дослідження обробки прецизійних пружних елементів приладів анодно-механічним методом.	139
<b>Гусєв В.В., Кучеренко С.В., Сухоручко К.С.</b> Магнітно-абразивна обробка внутрішніх поверхонь із використанням постійних магнітів.....	145

## Дослідження проблем кінематики, динаміки, міцності та надійності машин і їх вузлів

<b>Долгін В.П.</b> Синтез системи управління процесом шліфування.....	152
<b>Парфенюк О.С., Веретельник С.П., Ільченко Д.В.</b> Перспективні технічні рішення для підвищення надійності та ефективності коксових машин і агрегатів.....	160
<b>Сидоров В.А.</b> Послідовність рішення задач діагностування механічних систем...	171
<b>Татьянченко О.Г., Брижан Т.М.</b> Рівняння зігнутої осі при поздовжньо-поперечному згині стиснуто-закрученого стержня.....	182
<b>Чернишев Є.О., Дворников В.І., Пашинін А.В.,</b> Точне рішення рівняння коливань консервативного осцилятора з квадратичною нелінійністю (на прикладі обробки різанням).....	190
<b>Гриньов Ю.О., Воєводіна Т.А., Царенко О.М.</b> Визначення статичних геометричних параметрів збірних свердел.....	200

## СОДЕРЖАНИЕ

### Исследование процессов механической обработки материалов и разработка прогрессивных способов их реализации

<b>Азарова Н.В., Цокур В.П.</b> Экспериментальное определение параметров шероховатости шлифованной поверхности.....	9
<b>Бурдин А.В.</b> Влияние зернистости алмазов на силу поджима комбинированного образца «сталь – твердый сплав» к режущей поверхности круга.....	16
<b>Васильченко Я.В.</b> Оперативная оптимизация процесса резания при обработке крупногабаритных деталей .....	26
<b>Гусев В.В., Калафатова Л.П., Медведев А.Л., Семенюк Д.Ю.</b> Управление режущей способностью алмазных кругов как фактор повышения эффективности шлифования изделий из керамики.....	35
<b>Ивченко Т.Г.</b> Исследование влияния параметров процесса алмазного выглаживания на температуру в зоне обработки .....	44
<b>Майборода В.С., Джулий Д.Ю., Ткачук И.В.</b> Особенности формирования магнитно-абразивного инструмента при магнитно-абразивной обработке длинномерных деталей в кольцевой рабочей зоне.....	49
<b>Матюха П.Г., Габитов В.В.</b> Влияние вида шлифования на шероховатость обработанной поверхности.....	57
<b>Полтавец В.В.</b> Развитие экспериментально-теоретического метода оптимизации режимов шлифования путём использования обобщенного показателя процесса.....	65
<b>Беляев О., Хофман Д., Пфроммер Й., Майборода В.С., Гейчук В.Н.</b> Некоторые аспекты обработки режущих поверхностей сверл.....	72

### Проектирование прогрессивных конструкций режущих инструментов и технологической оснастки

<b>Азарова Н.В.</b> Разновысотность алмазных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга .....	78
<b>Деревянченко А.Г., Бабилунга О.Ю., Косс Е.В., Соценко А.О.</b> Подход к распознаванию микродефектов отказавших инструментов в структуре процесса их восстановления.....	88
<b>Курилович В.Д., Ковалев С.В., Филатов Ю.Д.</b> Современные инструменты для финишной обработки изделий из природного камня .....	95
<b>Полищук В.С., Матюха П.Г., Гонопольский Н.Я.</b> Исследование зернового состава железо-абразивного порошка для магнитно-абразивной обработки.....	101
<b>Равская Н.С., Охрименко А.А., Кулинич А.С.</b> Особенности формороборазования передней линейчатой винтовой поверхности зубьев режущего инструмента.....	108
<b>Равская Н.С., Охрименко А.А., Дубик Я.Р.</b> Повышение технологичности заточки червячных фрез.....	117
<b>Татьянченко А.Г., Сергеечев З.С.</b> Исследование динамической составляющей силы резания при обработке поверхностей с геометрическими погрешностями...	124

## Создание и применение прогрессивных технологий в машиностроении

<b>Богданова Л.М., Лютакова Е.М.</b> Повышение управляемости процесса механической обработки деталей за счет применения информационных технологий.....	132
<b>Братан С.М., Сазонов С.Е., Минаев Н.А.</b> Экспериментальные исследования обработки прецизионных упругих элементов приборов анодно-механическим методом.....	139
<b>Гусев В.В., Кучеренко С.В., Сухоручко К.С.</b> Магнитно-абразивная обработка внутренних поверхностей с использованием постоянных магнитов.....	145

## Исследование проблем кинематики, динамики, прочности и надежности машин и их узлов

<b>Долгин В.П.</b> Синтез системы управления процессом шлифования.....	152
<b>Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Ильченко Д.В.</b> Перспективные технические решения для увеличения надежности и эффективности коксовых машин и агрегатов.....	160
<b>Сидоров В.А.</b> Последовательность решения задач диагностирования механических систем.....	171
<b>Татьянченко А.Г., Брижан Т.М.</b> Уравнение изогнутой оси при продольно-поперечном изгибе сжато-закрученного стержня.....	182
<b>Чернышев Е.А., Дворников В.И., Пашинин А.В.</b> Точное решение уравнения колебаний консервативного осциллятора с квадратичной нелинейностью (на примере обработки резанием).....	190
<b>Гринёв Ю.А., Воеводина Т.А., Царенко Е.Н.</b> Определение статических геометрических параметров сборных сверл.....	200

## CONTENTS

### Investigation of processes of material machining and development of progressive ways of its implementation

<b>Azarova N.V., Tsokyr V.P.</b> Determination of parameters of roughness of the grinded surface.....	9
<b>Burdin A.V.</b> Influence of diamond graininess on hold-down pressure of combined sample «steel – hard alloy» to wheel working surface.....	16
<b>Vasilchenko Y.V.</b> Operational optimization of cutting process for machining of large parts.....	26
<b>Gusev V.V., Kalafatova L.P., Medvedev A.L., Semenyuk D.Y.</b> Control of cutting capacity of diamond wheels as a factor that increasing efficiency of grinding of ceramics products.....	35
<b>Ivchenko T.G.</b> Research of influence of process of diamond smoothing parameters on temperature in machining area.....	44
<b>Maiboroda V.S., Dzhulii D.Y., Tkachuk I.V.</b> Features of formation of a magnetic-abrasive tool at magnetic-abrasive machining of long-sized details in a ring-type working area.....	49
<b>Matjuha P.G., Gabitov V.V.</b> Influence of kind of grinding on the roughness of finished surface.....	57
<b>Poltavets V.V.</b> Development of experimental and theoretical method of grinding conditions optimization by use of integrated process indicator.....	65
<b>Byelyayev O., Hoffmann D., Pfrommer J., Maiboroda V.S., Geichuk W.N.</b> Einige aspekte der schneidkantenverrundung an bohrwerkzeugen.....	72

### Projection of progressive designs of cutting tools and technological equipment

<b>Azarova N.V.</b> Determination of parameters of distribution law of different height of diamond grains on the working surface of grinding wheel.....	78
<b>Derevianchenko A.G., Babilunga O.U., Koss E.V., Sotsenko A.O.</b> An approach of refusing of cutting tools microdefects recognition in structure of process of their renewal.....	88
<b>Kurilovich V.D., Kovalyov S.V., Filatov Y.D.</b> Modern tools for finish machining of products from natural stone.....	95
<b>Polischuk V.S., Marjuha P.G., Gonopolsky N.Y.</b> Research of grain structure of iron-abrasive powder for magnetic-abrasive machining.....	101
<b>Ravskaja N., Ohrimenko A., Kulinich A.</b> Features of surface generation of front linear screw surface of cutting tool teeth.....	108
<b>Ravskaja N., Ohrimenko A., Dubik J.</b> Increase of adaptability to manufacture of sharpening of worm mills.....	117
<b>Tatyanchenko A.G., Sergeyechev Z.S.</b> Study of dynamic component of cutting force at machining of surfaces with geometrical errors.....	124

## Creation and application of advanced engineering technologies

<b>Bogdanova L.M., Lyutakova O.M.</b> Improving the manageability of machining process by using of information technologies.....	132
<b>Bratan S.M., Sazonov S.E., Minaev N.A.</b> Experimental researches of machining of precision resilient elements of devices by anodal-mechanical method.....	139
<b>Gusev V.V., Kucherenko S.V., Sukhoruchko K.S.</b> Magnetic-abrasive machining of internal surfaces with use of permanent magnets.....	145

## Investigation of problems of kinematics, dynamics, strength and reliability of machines and machine units

<b>Dolgin V.P.</b> Synthesis of control system of grinding process.....	152
<b>Parfenyuk A.S., Veretelnik S.P., Ilchenko D.V.</b> Perspective technical solutions for increase of reliability and efficiency of coke machines and aggregates.....	160
<b>Sidorov V.A.</b> Sequence of the decision of problem of diagnosing of mechanical systems.....	171
<b>Tatyanchenko A.G., Brizhan T.M.</b> Equation of the bending axis at longitudinal-transversal bend of briefly-involute bar.....	182
<b>Chernyshev E.A., Dvornikov V.I., Pashinin A.V.</b> The accurate solution of conservative oscillator equation with quadratic nonlinearity (as an example of machining).....	190
<b>Grinyov Y., Voyevodina T., Tsarenko E.</b> Definition of static geometrical parameters of modular drills.....	200

## **Дослідження процесів механічного оброблення матеріалів та розробка прогресивних способів їх реалізації**

УДК 621.923

**Н.В. АЗАРОВА** (канд. техн. наук, доц.)

**В.П. ЦОКУР** (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Предложена методика экспериментального определения параметров шероховатости шлифованной поверхности. Запись и обработка профилограмм на ПЭВМ позволяет значительно снизить трудоемкость исследований.

**Ключевые слова:** Шлифование, шероховатость поверхности

#### **Введение**

Параметры шероховатости определяются по профилограммам шлифованной поверхности, записанным на профилографическую бумагу, обработка профилограмм производится вручную и отличается высокой трудоемкостью. Поэтому в ряде случаев ограничиваются определением только высотных параметров шероховатости  $R_{max}$ ,  $R_z$ ,  $R_a$ . Вместе с тем обработка профилограмм позволяет определить не только высотные параметры, но и весь комплекс параметров шероховатости, предусмотренный ГОСТ 25142-82 и ДСТУ ISO 12085-2001 [1, 2]. Запись профилограмм на персональный компьютер (ПК) позволяет автоматизировать процесс обработки профилограмм с целью определения параметров шероховатости.

Целью работы является определение параметров шероховатости шлифованной поверхности при помощи специально разработанной программы обработки на ПК участков профилограммы базовой длины.

#### **Основная часть**

В результате наличия зазоров в шпиндельном узле фактическая глубина шлифования не соответствует величине вертикальной подачи, устанавливаемой с помощью нониуса. При измерении параметров шероховатости обработанной поверхности на образце необходимо гарантировать устранение влияния шероховатости, сформированной предыдущей обработкой, на результаты эксперимента.

Для определения номера прохода, на котором вертикальное перемещение шпинделя по показанию цифрового индикатора равно фактической глубине шлифования, были проведены предварительные эксперименты.

Образцы из стали Р6М5Ф3 с размером обрабатываемой поверхности 70×15 мм обрабатывали на плоскошлифовальном станке модели 3Д711АФ11 методом плоского врезного шлифования кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 160/125-4-М2-01 на следующих режимах: скорость круга  $v_k=30$  м/с, скорость стола  $v_{cm}=1,5; 3; 6$  м/мин, величина вертикального перемещения шпинделя по индикатору (вертикальная подача)  $t_n=0,015$  мм.

Перед экспериментом круг, заправленный электроэрозионным способом, прирабатывали в течение 15 мин (скорость круга  $v_k = 30$  м/с, скорость стола  $v_{cm} = 6$  м/мин, вертикальная подача  $t_n = 0,015$  мм, поперечная подача  $s_{non} = 1,5$  мм/ход, обрабатываемый материал – сталь Р6М5Ф3).

Образец 1 закрепляли в специальных тисках 2, которые устанавливали на магнитной плите 3 (рис. 1).

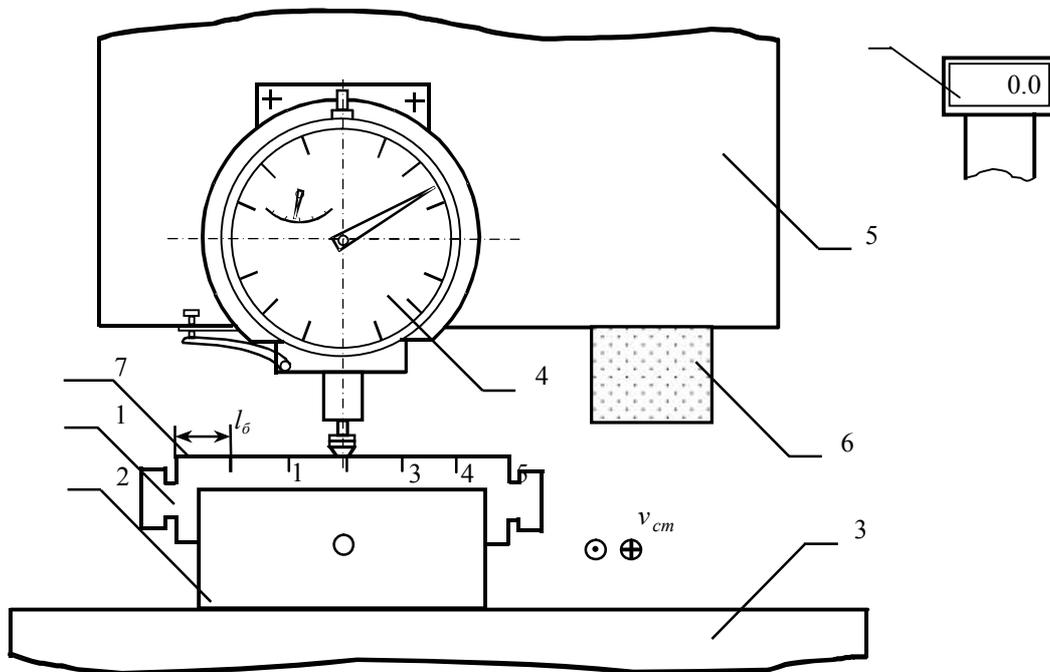


Рис. 1. Схема измерения высоты слоя сошлифованного материала

Измерение высоты образца в процессе обработки осуществляли с помощью индикатора часового типа 4 с ценой деления 0,001 мм, установленного на кожухе 5 шлифовального круга 6.

Перед измерением поверхность образца шлифовали для обеспечения параллельности обработанной поверхности относительно поперечного перемещения стола и образования базовой поверхности 7. Затем круг смещали вдоль образца на величину  $l_0$  и осуществляли обработку сечения 1 двумя ходами с увеличением на каждом ходе вертикальной подачи на заданную величину, которую определяли с помощью электронного цифрового индикатора 8 шлифовального станка с ценой деления 0,001 мм. После этого круг смещали в сечение 2 и осуществляли обработку четырьмя ходами с увеличением на каждом ходе вертикальной подачи на ту же величину. Аналогично обрабатывали сечение 3 шестью ходами, сечение 4 – восемью ходами, а сечение 5 –десятью ходами.

Эксперимент проводили три раза. Замеры расположения обработанной поверхности выполняли в каждом сечении в пяти точках по длине образца. Среднюю высоту слоя сошлифованного материала в каждом сечении определяли по формуле

$$\bar{h} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{h}_i,$$

где  $\bar{h}_i$  – средняя высота слоя сошлифованного материала в исследуемом сечении, определенная в  $i$ -ом опыте;

$m$  – количество опытов.

Для определения доверительных интервалов на средние значения высоты слоя сошлифованного материала  $\bar{h}$  в каждом сечении определяли эмпирические дисперсии:

$$S_{h_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (h_{ij} - \bar{h}_i)^2}{n-1} \quad (i = \overline{1, m}).$$

Здесь

$$\bar{h}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n h_{ij} \quad (i = \overline{1, m}),$$

где  $n$  – количество точек исследуемого сечения, в которых проводились измерения;

$h_{ij}$  – высота сошлифованного материала в исследуемом сечении, определяемая как разность показаний индикатора в точке измерения и базовой поверхностью.

В качестве оценки дисперсии  $S_h^2$  использовали взвешенное среднее эмпирических дисперсий:

$$S_h^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{h_i}^2.$$

95%-ные доверительные интервалы на высоту сошлифованного материала определяли по известным зависимостям:

$$\bar{h} - t_\alpha S_h \leq h \leq \bar{h} + t_\alpha S_h,$$

где  $t_\alpha$  – значение критерия Стьюдента при уровне значимости  $\alpha=0,05$ ;

$\bar{h}$  – среднее значение высоты сошлифованного материала.

Результаты экспериментов представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показывает, что при врезном шлифовании высота слоя удаленного материала равна величине вертикальной подачи лишь после нескольких ходов, что связано с выбором зазоров в шпиндельном узле. Причем, для  $v_{cm}=1,5$  м/мин величина съема металла равна величине вертикальной подачи на 9 – 10 ходу, для  $v_{cm}=3$  м/мин – на 7 – 8 ходу, для  $v_{cm}=6$  м/мин – на 7 – 8 ходу. При этом с увеличением продольной скорости стола наблюдается уменьшение количества ходов, при которых  $t_n = t_\phi$ . Это обусловлено тем, что с увеличением радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , вызванным увеличением  $v_{cm}$ , происходит смещение шпиндельного узла на большую величину. Таким образом, при проведении исследований параметры шероховатости измеряли после восьми ходов.

Таблица 1. Влияние количества врезаний и скорости стола на фактическую глубину врезного шлифования  $t_f$  образцов из стали Р6М5Ф3 кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 160/125-4-М2-01 с вертикальной подачей  $t_n = 0,015$  мм/ход

Скорость стола, м/мин	Номера ходов, для которых определялась $t_f$	Высота слоя сошлифованного материала за два хода, мкм			
		Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Среднее значение
1	2	3	4	5	6
1,5	1 – 2	6,00	5,80	4,83	5,54 ± 0,49
	3 – 4	14,02	13,81	18,24	15,36 ± 0,52
	5 – 6	22,01	20,00	23,51	21,84 ± 0,61
	7 – 8	26,00	23,16	24,42	24,53 ± 0,48
	9 – 10	31,02	28,98	30,00	30,00 ± 0,59
3	1 – 2	16,65	15,53	16,05	16,08 ± 0,60
	3 – 4	19,42	17,50	20,11	19,01 ± 0,61
	5 – 6	26,87	22,82	25,42	25,04 ± 0,62
	7 – 8	29,37	29,80	30,83	30,00 ± 0,49
6	1 – 2	15,92	17,01	16,00	16,31 ± 0,59
	3 – 4	25,62	25,00	24,14	24,92 ± 0,64
	5 – 6	27,13	26,00	28,00	27,04 ± 0,61
	7 – 8	30,80	29,11	30,09	30,00 ± 0,60

Параметры шероховатости оценивали методом профилографирования обработанной поверхности на профилометре-профилографе модели 201. Запись профилограммы осуществлялась на ПК при помощи специально разработанного устройства, позволяющего производить запись с постоянной линейной скоростью движения исследуемой поверхности (рис. 2).

Профилограф-профилометр модели 201 в его комплектности обладает тем недостатком, что запись профилограмм производится на профилографическую бумагу, обработка профилограмм производится вручную и отличается высокой трудоемкостью. Запись профилограммы на ПК позволяет автоматизировать процесс обработки участков профилограммы базовой длины с целью определения параметров шероховатости при помощи разработанной нами программы.

Для экспериментального определения параметров шероховатости шлифованной поверхности образцы из быстрорежущей стали Р6М5Ф3 обрабатывали на модернизированном для алмазно-электроэрозионной правки плоскошлифовальном станке 3Д711Ф11 кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 160/125-4-М2-01. Перед проведением эксперимента шлифовальный круг правили электроэрозионным способом в течение 10 мин на медном электроде на следующих режимах: скорость круга 30 м/с, скорость стола равна нулю, вертикальная подача 0,002...0,007 мм/ход, поперечная подача – ручная, средняя сила тока 5...8 А, напряжение холостого хода 50 В. Известно, что характеристики рельефа стабилизируются после 15 – 30 мин шлифования [3], поэтому перед проведением эксперимента круг прирабатывали в течение 20 мин на режимах:  $v_k = 30$  м/с,  $v_{cm} = 6$  м/мин,  $t_n = 0,015$  мм. Параметры радиальных колебаний круга: частота  $f$

= 37 Гц, амплитуда  $A = 0,9$  мкм. Параметры шероховатости измеряли после нескольких проходов, в результате которых были выбраны зазоры в шпиндельном узле станка, и фактическая глубина шлифования составляла 0,013 – 0,015 мм при подаче на врезание 0,015 мм. Дальнейшую обработку проводили врезным шлифованием за один проход.



Рис. 2. Общий вид комплекса для записи профилограммы обработанной поверхности на ПЭВМ

Шероховатость обработанной поверхности оценивали наибольшей высотой неровностей профиля  $R_{max}$ , высотой неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$ , средним арифметическим отклонением профиля  $R_a$ , опорной длиной профиля  $\eta_{50}$  на уровне 50 %  $R_{max}$ , относительной опорной длиной профиля  $t_{50}$  и средним шагом неровностей профиля по вершинам  $s$ . Параметры шероховатости определяли с помощью профилометра-профилографа модели 201, включенного в регистрирующий блок, состоящий из ПЭВМ, оснащенной аналогово-цифровым преобразователем и дисплеем. Обработку записанных профилограмм осуществляли по методике ГОСТ 27964-88 [4].

Результаты определения параметров шлифованной поверхности экспериментальным и расчетным путем (табл. 2) позволяют дать количественную оценку соответствия теоретических расчетов практике шлифования. расчет параметров шероховатости выполнен по разработанной нами методике, учитывающей влияние радиальных колебаний рпк, обусловленных колебанием оси вращения шпинделя со шлифовальным кругом [5].

Таблица 2. Значения параметров шероховатости шлифованной поверхности при плоском алмазном шлифовании стали Р6М5Ф3 кругом 1А1 250×16×75×5 АС6 160/125-4-М2-01 ( $v_k = 30$  м/с,  $v_{cm} = 6$  м/мин,  $t_n = 0,015$  мм,  $f = 37$  Гц,  $A = 0,9$  мкм)

Параметры шероховатости	Значения параметров	
	Расчетные	Экспериментальные с 95% доверительным интервалом
$R_{max}$ , мкм	7,29	5,83±1,89
$R_z$ , мкм	5,72	4,76±1,09
$R_a$ , мкм	1,14	1,01±0,20
$\eta_{50}$ , мм	0,68	0,60±0,17
$t_{50}$ , %	85,60	74,73±20,76
$s$ , мкм	10,23	11,17±1,18

Как видно из приведенных данных, параметры шероховатости, полученные расчетным путем, находятся в пределах 95%-го доверительного интервала на экспериментальные величины.

### Выводы

1. Установлено, что при врезном шлифовании толщина слоя сошлифованного материала равна величине вертикальной подачи после восьмого и десятого ходов в зависимости от скорости шлифования, в связи с чем измерять параметры шероховатости обработанной поверхности при  $v_{cm}=6$  м/мин необходимо на девятом ходу.
2. Разработано и изготовлено устройство, позволяющее производить запись профилограммы исследуемой поверхности обработанного образца на пэвм.
3. Разработана программа для определения на пэвм параметров шероховатости поверхности в пределах базовой длины.
4. Полученные результаты говорят об удовлетворительном совпадении расчетных и экспериментальных данных по определению параметров шероховатости шлифованной поверхности.

### Список литературы

1. Шероховатость поверхности. Термины и определения: ГОСТ 25142-82 (СТ СЭВ 1156-78). – [Введен с 1983-01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 20 с.
2. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Параметри структурних елементів (ISO 12085: 1996, IDT): ДСТУ ISO 12085-2001. – [Чинний від 2003-01-01]. – К.: Держстандарт України, 2002. – 16 с.
3. Матюха П.Г. Високопродуктивне шліфування ванадієвих штампових та інструментальних сталей / П.Г. Матюха. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – 222 с.
4. Измерение параметров шероховатости. Термины и определения: ГОСТ 27964-88 (СТ СЭВ 6134-87, ИСО 4287/2-84). – [Введен с 1990-01-01]– М.: Изд-во стандартов, 1989. – 120 с.
5. Азарова Н.В. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности с учетом радиальных колебаний рабочей поверхности круга / Н.В. Азарова, П.Г. Матюха // Сверхтвердые материалы. – 2006. – № 3. – С. 52-61.

Рецензент: Калафатова Л.П.

Надійшла до редколегії: 27.04.2011р.

**Н.В. АЗАРОВА**

**В.П. ЦОКУР**

Донецький національний технічний університет

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ  
ШЛІФОВАНОЇ ПОВЕРХНІ**

Запропоновано методику експериментального визначення параметрів шорсткості шліфованої поверхні. Запис та обробка профілограм на ПЕВМ дозволяє значно знизити трудомісткість досліджень.

**N.V. AZAROVA**

**V.P. TSOKYR**

Donetsk National Technical University

**DETERMINATION OF PARAMETERS OF ROUGHNESS OF THE GRINDED  
SURFACE**

The method of determination of parameters of roughness of the machined surface is developed. Recording and handling of profilograms by PC has allowed considerably reduce laboriousness of research.

УДК 621.923

**А.В. БУРДИН** (асп., mc@donntu.edu.ua)

Донецкий национальный технический университет, г.Донецк, Украина

**ВЛИЯНИЕ ЗЕРНИСТОСТИ АЛМАЗОВ НА СИЛУ ПОДЖИМА  
КОМБИНИРОВАННОГО ОБРАЗЦА «СТАЛЬ – ТВЕРДЫЙ СПЛАВ»  
К РЕЖУЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУГА**

Предложена методика расчета силы поджима комбинированного образца «сталь – твердый сплав» к режущей поверхности круга (РПК) при шлифовании кругами различных зернистостей.

**Ключевые слова:** Алмазное шлифование, сила поджима, зернистость, комбинированный образец.

**Введение**

Высокопроизводительное шлифование при условии получения заданных показателей качества и минимуме затрат, как правило, обеспечивается оптимизацией режимов шлифования. Так, в работе [1] при оптимизации используются обобщенные режимы шлифования, одним из которых, при шлифовании по упругой схеме, является сила поджима образца к режущей поверхности круга (РПК). Использование при оптимизации обобщенных режимов существенно снижает трудоемкость поиска по сравнению с известными способами [2]

В работах [3, 4] определена сила поджима комбинированного образца «сталь – твердый сплав» к РПК, ограниченная температурой окисления алмазов при шлифовании кругом только одной характеристики 1A1 250x76x15x5 AC6100/80-M2-01.

Таким образом, сведения о влиянии зернистости шлифовального круга на силу поджима комбинированного образца к РПК в литературе отсутствуют.

Целью работы является исследование влияния зернистости алмазов на силу поджима комбинированного образца «сталь 45 – твердый сплав ВК8» к РПК, при плоском врезном шлифовании.

**Основное содержание работы**

При расчете силы поджима комбинированного образца к РПК (рис.1) используем положение, в соответствии с которым радиальная составляющая силы резания на комбинированном образце равна сумме радиальных сил на отдельных его частях

$$P_{n\ KO} = P_{yTC} + P_{yCT}, \quad (1)$$

где  $P_{yTC}$  – радиальная сила резания твердосплавной части комбинированного образца, ограниченная температурой окисления алмазов,  $P_{yCT}$  – радиальная сила резания стальной части образца, полученная при шлифовании на режимах, одинаковых с твердым сплавом.

Радиальную силу резания твердосплавной части, ограниченную температурой окисления алмазов, вычислим по формуле, заимствованной из работы [4]:

$$P_{yTC} = \frac{1}{k_{ш}} \left( \frac{[T_{ок} - 293] (\lambda_1 + 2,25 \lambda_{TC} A^* \sqrt{F_0}) \pi z_p d^2}{4,52 A^* \delta \sqrt{\omega_1 V_k L}} \right), \quad (2)$$

где  $k_{ш}$  – коэффициент шлифования твердого сплава алмазным кругом;  $T_{ок}$  – температура окисления алмазного зерна, °К;  $L$  – длина дуги контакта зерна с обрабатываемой поверхностью, мм;  $V_k$  – скорость круга, м/с;  $d$  – диаметр основания цилиндрической модели зерна, мм;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/(м·°С);  $\lambda_{TC}$  – коэффициент теплопроводности ВК8, Вт/м·град;  $\omega_1$  – коэффициент температуропроводности алмаза, м<sup>2</sup>/с;  $\delta$  – коэффициент неравномерности нагрузки на зерне;  $z_p$  – количество режущих зерен на площадке контакта круга с заготовкой, шт;  $F_0$  – безразмерное время контакта зерна с кругом, представлено с помощью критерия Фурье;  $A^*$  – безразмерная функция температуры на алмазе.

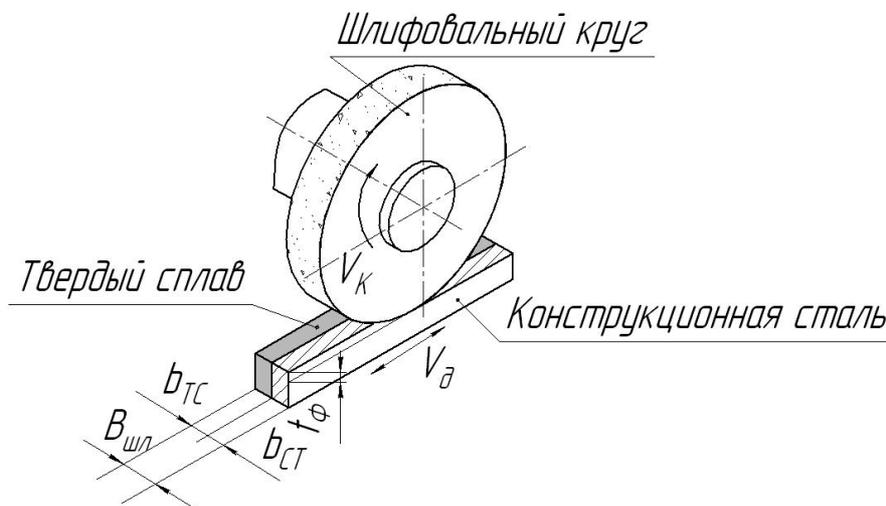


Рис.1. Схема плоского шлифования комбинированного образца.

Длина дуги контакта шлифовального круга с образцом равна:

$$L = \sqrt{2R_k t_\phi}, \quad (3)$$

где  $R_k$  – диаметр шлифовального круга, мм;  $t_\phi$  – глубина шлифования, мм.

Диаметр цилиндрической модели зерна определяется через диаметр шаровой модели, по условию равенства объёмов цилиндрической и шаровой моделей зерна [4], мкм,

$$d = \sqrt[3]{\frac{2}{3}} d_{cp}. \quad (4)$$

Диаметр шаровой модели зерна  $d_{cp}$ , мкм,

$$d_{cp} = \frac{6090}{\sqrt[3]{N_z}}, \quad (5)$$

где  $N_z$  – среднее количество зерен в одном карате, шт.  
Количество одновременно работающих зерен  $z_p$ , шт [4]:

$$z_p = \frac{Lb_{TC}}{S_{zn}^2} F(a_z), \quad (6)$$

где  $b_{TC}$  – ширина твердосплавной части, мм.  
Расстояние между зернами на поверхности круга, мм:

$$S_{zn} = S_{zp} K_1. \quad (7)$$

Расстояние между зернами в сечении алмазоносного слоя плоскостью, мм:

$$S_{zp} = \frac{10}{\sqrt[3]{\frac{4,4KN_z}{100}}}, \quad (8)$$

где  $K$  – относительная концентрация алмазов в алмазоносном слое, %.  
 $K_1 = 2,46$  – коэффициент, учитывающий критическую величину закрепления зерна в связке алмазоносного слоя.

Вероятность попадания вершины зерна в интервал, равный толщине среза, определяется значением функции распределения Вейбулла:

$$F(a_z) = 1 - \exp\left(\frac{-a_z^m}{X_0}\right), \quad (9)$$

где  $X_0$ ,  $m$  – параметры распределения Вейбулла.  
Толщина единичного среза  $a_z$ , мкм:

$$a_z = a_{z \max} + R_z k_{cp}, \quad (10)$$

где  $R_z$  – параметр шероховатости на поверхности резания, мкм;  $k_{cp}$  – коэффициент, учитывающий влияние марки твердого сплава на параметр шероховатости поверхности резания при обработке твердого сплава.

Максимальная толщина среза  $a_{z \max}$ , мкм:

$$a_{z \max} = R_k - \sqrt{\left(\frac{V_d l_{\text{фок}}}{60V_k}\right)^2 + R_k^2 - 2 \frac{V_d l_{\text{фок}} R_k}{60V_k} \sqrt{2 \frac{t_{\phi} 10^{-3}}{R_k}}}, \quad (11)$$

где  $l_{\text{фок}}$  – фактическое окружное расстояние между двумя контактирующими зернами, мм;  $V_d$  – скорость детали, м/мин;  $V_k$  – скорость круга, м/с.

Фактическое окружное расстояние между контактирующими зернами определяется по формуле:

$$l_{\phi_{ок}} = S_{зр} K_1 K_c K_{\partial}. \quad (12)$$

Значение коэффициента  $K_c$ , учитывающего разновысотное положение зерен определяется через вероятность попадания вершин зерен в интервал равный глубине шлифования, выраженной значением функции распределения Вейбулла

$$K_c = \frac{1}{\sqrt{F(t_{\phi})}}, \quad (13)$$

$$F(t_{\phi}) = 1 - \exp\left(-\frac{t_{\phi}^m}{X_0}\right), \quad (14)$$

где  $X_0$ ,  $m$  – параметры распределения Вейбулла.

Кинематический коэффициент  $K_{\partial}$ , учитывающий влияние режимов шлифования на окружное расстояние между зёрнами:

$$K_{\partial} = \alpha_{\partial} + \beta_{\partial} \frac{60V_{\kappa}}{V_{\partial}}, \quad (15)$$

где  $\alpha_{\partial}$ ,  $\beta_{\partial}$  – параметры уравнения регрессии.

Величина  $A^*$  определяется по формуле, [3]:

$$A^* = A_1 - \frac{8\lambda_{\kappa} F_0}{\ln \frac{4h}{d} \lambda_1 + 8\lambda_{\kappa} F_0} A_{cp}, \quad (16)$$

где  $A_1$  – безразмерная функция учитывающая температуру рабочего торца зерна [4];  $A_{cp}$  – безразмерная функция, учитывающая среднюю температуру рабочего и не рабочего торца зерна [4];  $h$  – высота цилиндрической модели зерна ( $d=h$ ), мм;  $\lambda_{\kappa}$  – коэффициентом теплопроводности алмазоносного слоя шлифовального круга, Вт/(м·°К);

Коэффициент теплопроводности алмазоносного слоя шлифовального круга, Вт/(м·°К), рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{\kappa} = \lambda_{\kappa a}^{0,01 \cdot Y_a} \cdot \lambda_{\kappa o}^{0,01 \cdot Y_o} \cdot \lambda_{\kappa m}^{0,01 \cdot Y_m}, \quad (17)$$

где  $Y_a$ ,  $Y_o$ ,  $Y_m$  – процентное содержание алмаза, олова, меди в алмазоносном слое;  $\lambda_{\kappa a}$ ,  $\lambda_{\kappa o}$ ,  $\lambda_{\kappa m}$  – коэффициенты теплопроводности алмаза, олова и меди.

Безразмерное время шлифования определим следующим образом, [4]:

$$F_0 = \frac{\omega_1 L}{V_{\kappa} d^2} \quad (18)$$

При  $F_0 > 10$

$$A_1 = 0,977 + 0,718 F_0^{0,602}, \quad (19)$$

$$A_{cp} = 1,041F_0^{0,5}. \quad (20)$$

При  $F_0 \leq 10$

$$A_1 = 1,033 + 0,576F_0^{0,719}, \quad (21)$$

$$A_{cp} = 1,075F_0^{0,502}. \quad (22)$$

Аналитический расчет радиальной силы резания при плоском врезном шлифовании стальной части комбинированного образца выполним, используя формулы, приведенные в работе [5], которые используют схему стружкообразования с единственной условной плоскостью сдвига.

$$P_{yCT} = \left( \frac{\sqrt{1+M^2} a_z \sin \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M l_3 \right) S_x z_p \left( C - \frac{4a\alpha V_\kappa \sqrt{H} \alpha_6}{\sqrt{\pi} \lambda V_\Delta S} P_{zCT} \right). \quad (23)$$

Тангенциальная составляющая силы резания на круге определяется по формуле:

$$P_{zCT} = \frac{\left( \frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_3 \right) S_x z_p C}{1 + \left( \frac{\sqrt{1+M^2} a_z \cos \omega}{\sin \beta} + \kappa_3 M \mu l_z \right) S_x z_p \frac{4a\alpha V_\kappa \sqrt{H} \alpha_6}{\sqrt{\pi} \lambda V_\Delta S}}. \quad (24)$$

Здесь  $M$  – соотношение нормальных и касательных напряжений вдоль условной плоскости сдвига;  $\beta$  – угол сдвига, рад;  $a_z$  – толщина единичного среза, мкм;  $\omega$  – угол действия, рад;  $C$ ,  $\alpha$  – коэффициенты модификации МакГрегора-Фишера для стали 45;  $\kappa_3$  – коэффициент контактирования задней поверхности зерна по поверхности заготовки;  $\mu$  – коэффициент трения между зерном и заготовкой;  $S_x$  – ширина среза единичным зерном, мм;  $\lambda_{CT}$  – коэффициент теплопроводности стали 45, Вт/м·град;  $l_3$  – величина контактной площадки на зерне, мкм;  $z_p$  – количество одновременно работающих зерен, шт;  $S$  – площадь зоны контакта заготовки с кругом, мм<sup>2</sup>;  $V_\Delta$  – скорость детали, м/мин;  $V_\kappa$  – скорость круга, м/с;  $H$  – безразмерная полуширина источника тепла;  $a_{CT}$  – коэффициент температуропроводности стали 45, м<sup>2</sup>/с;  $\alpha_6$  – коэффициент ввода теплоты в заготовку.

Соотношение нормальных и касательных напряжений вдоль условной плоскости сдвига  $M$ :

$$M = 1 + 2 \left( \frac{\pi}{4} - \beta \right). \quad (25)$$

Угол сдвига  $\beta$ , рад:

$$\beta = \arctg \left( \frac{\cos \gamma}{K_L - \sin \gamma} \right), \quad (26)$$

где  $K_L$  – коэффициент усадки стружки.

При расчете сил резания форму зерна примем в виде призмы, а передний угол определяется по среднему диаметру шаровой модели зерна, рад:

$$\gamma = -\arcsin\left(1 - \frac{2a_z}{d_{cp}}\right). \quad (27)$$

Толщина единичного среза  $a_z$ , мкм:

$$a_z = a_{z \max} + \frac{R_z}{2}. \quad (28)$$

Составляющие формулы (28) находятся по выше приведенным зависимостям. Количество одновременно работающих зерен  $z_p$ , длина дуги контакта детали со шлифовальным кругом  $L$  и коэффициент теплопроводности круга определяются по зависимостям (6), (3), (17) соответственно.

Угол действия  $\omega$ , рад:

$$\omega = \arctg M - \beta. \quad (29)$$

Площадь зоны контакта стальной части комбинированного образца с кругом  $S$ , мм<sup>2</sup>:

$$S = b_{CT} \sqrt{2R_k t_\phi} 10^{-3}. \quad (30)$$

Величина контактной площадки на зерне  $l_z$ , мкм:

$$l_z = 0,22 d_{cp} T^{0,047}, \quad (31)$$

где  $T$  – время шлифования после правки круга, мин.

Ширина единичных срезов, мм, определяется по формуле:

$$S_x = \frac{S_{zn}^2}{l_\phi F(t_\phi) K_k}, \text{ если } S_x < b_c. \quad (32)$$

Иначе  $S_x = b_c$ .

В формулах (32), (33)  $b_c$  – ширина единичного среза, определяемая по ширине модели зерна в виде конуса с округленной вершиной, по известным зависимостям [6].

$$b_c = 2 \cdot \left( \sqrt{2\rho a_z - a_z^2} + (t_\phi - a_z) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \right), \quad (34)$$

если

$$t_\phi \geq \rho \left( 1 - \sin \frac{\varepsilon}{2} \right). \quad (35)$$

Если неравенство (35) не выполняется, то:

$$b_c = 2 \cdot \left( \sqrt{2 \cdot \rho \cdot t_\phi - t_\phi^2} \right). \quad (36)$$

Безразмерная полуширина источника тепла  $H$ :

$$H = \frac{0,5V_\partial L}{60 \cdot 1000 \cdot 2a_{CT}}. \quad (37)$$

Коэффициент ввода теплоты в заготовку  $\alpha_{в CT}$ :

$$\alpha_{в CT} = \frac{1}{\left( 1,25 \frac{\lambda_\kappa}{\lambda_{CT}} \sqrt{\frac{a_{CT}}{21 \cdot 10^{-6} \cdot V_\kappa}} \right) + 1}. \quad (38)$$

Расчет силы поджима выполним по формулам (2) – (38) с помощью разработанной нами программы на ПЭВМ в среде MathCad по исходным данным, для кругов различной зернистости, приведенным в табл.1.

Таблица 1 – Данные для вычисления силы поджима комбинированного образца к РПК.

Наименование параметра	Числовое значение
1	2
$b_{ТС}$ – Ширина твердосплавной части образца, мм.	7
$b_{СТ}$ – Ширина стальной части образца, мм.	7
$R_\kappa$ – Радиус круга, мм.	125
$V_\kappa$ – Скорость круга, м/с.	35
$V_\partial$ – Скорость стола, м/мин.	6
$t_\phi$ – Глубина резания, мкм.	15
$T$ – Время шлифования (после правки), мин.	1
$K$ – Относительная концентрация алмазов, %.	100
Параметры распределения разновысотности (для зернистости 100/80)*, сформированные после электроэрозионной правки и описываемые законом Вейбулла: $m / X_0$	1,69 / 262
Параметры распределения разновысотности (для зернистости 160/125)*: $m / X_0$	1,71 / 539
Параметры распределения разновысотности (для зернистости 250/200)*: $m / X_0$	1,63 / 532
Параметры уравнения регрессии для расчета $K_\partial$ (зернистость 100/80): $\alpha_\partial / \beta_\partial$	14,32 / 0,112
Параметры уравнения регрессии для расчета $K_\partial$ (зернистость 160/125): $\alpha_\partial / \beta_\partial$	10,31 / 0,105

Продолжение таблицы 1.

1	2
Параметры уравнения регрессии для расчета $K_d$ (зернистость 250/200): $\alpha_d / \beta_d$	9,83 / 0,04
$N_{z\ 100/80}$ – Число зерен в одном карате зернистости 100/80, шт.	100000
$N_{z\ 160/125}$ – Число зерен в одном карате зернистости 160/125, шт.	29100
$N_{z\ 250/200}$ – Число зерен в одном карате зернистости 250/200, шт.	8410
$K_l$ – Коэффициент для расчета расстояния между зернами на РПК.	2,46
$k_{cp}$ – коэффициент, учитывающий влияние марки твердого сплава на параметр шероховатости.	0,94
$a_{TC}$ – коэффициент температуропроводности ВК8, м <sup>2</sup> /с	$0,246 \cdot 10^{-4}$
$a_{CT}$ – коэффициент температуропроводности стали 45, м <sup>2</sup> /с.	$0,08 \cdot 10^{-4}$
$\lambda_{TC}$ – Коэффициент теплопроводности ВК8, Вт/м·град.	54,4
$\lambda_{CT}$ – Коэффициент теплопроводности стали 45, Вт/м·град.	40,2
$\omega_l$ – Коэффициент температуропроводности алмаза, м <sup>2</sup> /с.	$0,83 \cdot 10^{-4}$
$\lambda_l$ – Коэффициент теплопроводности алмаза, Вт/м·град.	520
$\lambda_{KM}$ – коэффициент теплопроводности меди, Вт/м·град.	361
$\lambda_{KO}$ – коэффициент теплопроводности олова, Вт/м·град.	67
$Y_m$ – Объемная доля меди, %.	57,7
$Y_o$ – Объемная доля олова, %.	17,3
$Y_a$ – Содержание алмазов, %.	25
$\kappa_z$ – Коэффициент, учитывающий закон распределения нормальных напряжений на площадке износа.	1
Параметры для определения величины касательных напряжений в стали 45, $C$ (Па) и $\alpha$ (Па/°К).	$C=380 \cdot 10^6$ $\alpha=54 \cdot 10^3$
$\mu$ – Коэффициент трения (алмаз по стали).	0,2
$\delta$ – Коэффициент неравномерности нагрузки на зерне.	1,5
$T_{ок}$ – температура начала окисления алмазов марки АС6, °К	823
$K_{ш}$ – коэффициент шлифования.	0,35 [3]

\* Примечание: влияние времени обработки на параметры распределения разновысотности и длину контактных площадок в процессе шлифования для обоих компонентов, определяются по зависимостям, найденным для шлифования твердого сплава ВК8, как имеющей большую твердость по сравнению со сталью 45.

Для выяснения механизма влияния зернистости алмазных зерен на усилие поджима РПК к заготовке кроме результатов расчета на печать были выведены параметры рабочей поверхности модели круга, зависящие от зернистости (табл.2).

Таблица 2 – Влияние зернистости алмазов на силу поджима РПК к комбинированному образцу «сталь – твердый сплав» ( $V_k=35$  м/с,  $V_d=6$  м/мин,  $t_{\phi}=0,015$  мм, 1А1 250x76x15x5 АС6 100/80-М2-01, 1-я минута шлифования).

Характеристика круга	Шлифование твердосплавной части образца			$P_{yTC}$ , Н	Шлифование стальной части образца				$P_{yCT}$ , Н	$P_{nKO}$ , Н
	Параметры, влияющие на теплоотвод				Параметры модели круга					
	$z_p$ , шт	$f_z$ , мкм <sup>2</sup>	$f_z^{общ}$ , мкм <sup>2</sup>	$\gamma$ , °	$z_p$ , шт	$l_z$ , мкм	$S_x$ , мкм			
АС6 100/80-4-М2-01	18,4	$10,3 \cdot 10^3$	$189 \cdot 10^3$	41,6	-67	49	29	9,8	22,8	64,4
АС6 160/125-4-М2-01	7,63	$23,5 \cdot 10^3$	$179 \cdot 10^3$	35	-66	12	43	23	19,5	54,5
АС6 250/200-4-М2-01	5	$53,5 \cdot 10^3$	$267 \cdot 10^3$	50	-70,3	4,3	66	43	19,5	69,5

При шлифовании части образца, состоящей из твердого сплава, это количество одновременно контактирующих зерен  $z_p$ , площадь контакта цилиндрической модели зерна с поверхностью резания  $f_z$ , влияющие на условия отвода тепла в шлифовальный круг. При шлифовании стальной части были выведены параметры, влияющие на величину составляющих сил резания: количество одновременно контактирующих зерен, передний угол  $\gamma$ , длина площадки контакта  $l_z$  и ширина единичного среза  $S_x$ , описывающие модель режущей части зерна и круга.

Как видно из табл.2, при шлифовании стальной части, с увеличением зернистости уменьшается число зерен, а ширина среза увеличивается, что приводит к уменьшению силы  $P_{yCT}$ . При шлифовании твердого сплава, увеличение зернистости приводит к изменению площади контакта зерна с поверхностью резания, а соответственно, условий отвода тепла в шлифовальный круг. В результате, при шлифовании кругом зернистости 250/200 допустимая величина составляющей силы резания  $P_{yTC}$  больше, чем для зернистостей 100/80 и 160/125. Влияние зернистости круга на силу поджима комбинированного образца к РПК  $P_{nKO}$  качественно аналогично с влиянием зернистости на радиальную составляющую силы резания твердого сплава.

### Выводы

Предложена методика расчета силы поджима комбинированного образца к РПК при шлифовании кругами различных зернистостей.

### Список литературы

1. Матюха П.Г. Обобщенные режимы процесса шлифования, обеспечивающие стабильные показатели качества / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2010. – Вип.7(166). – С. 39 – 45.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Резникова. – М.: «Машиностроение», 1977. – 391 с.
3. Матюха П.Г. Определение усилия поджима комбинированного образца «конструкционная сталь – твердый сплав» к рабочей поверхности круга при шлифовании по упругой схеме / П.Г. Матюха, В.В. Габитов, Р.В. Кондрашов //

Надежность инструмента и оп-тимизация технологических сис-тем. Сборник научных трудов. – Краматорск, 2007. – Вып. 21. – С. 52-56.

4. Матюха П.Г. Определение силы поджима образца к кругу, ограниченной температурой графитизации алмазных зерен / П.Г.Матюха, В.Б.Стрелков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2004. – Вип.71. – С. 41 – 46.

5. Матюха П.Г. Вископродуктивне шліфування ванадієвих штампових та інструментальних сталей / П.Г. Матюха. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – 222 с.

6. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.

*Рецензент: Калафатова Л.П.*

*Надійшла до редколегії: 21.04.2011р.*

### **О.В. БУРДИН**

Донецький національний технічний університет

#### **ВПЛИВ ЗЕРНИСТОСТІ АЛМАЗІВ НА СИЛУ ПІДТИСКУ КОМБІНОВАНОГО ЗРАЗКА «СТАЛЬ – ТВЕРДИЙ СПЛАВ» ДО РІЗАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ КРУГА**

Запропонована методика розрахунку сили підтиску комбінованого зразка «сталь – твердий сплав» до різальної поверхні круга (РПК) при шліфуванні кругами різних зернистостей.

**Алмазне шліфування, сила підтиску, зернистість, комбінований зразок**

### **A.V. BURDIN**

Donetsk nation technical university

#### **INFLUENCE OF DIAMOND GRAININESS ON HOLD-DOWN PRESSURE OF COMBINED SAMPLE «STEEL – HARD ALLOY» TO WHEEL WORKING SURFACE**

The method of calculation of hold-down pressure of combined sample «steel – hard alloy» to wheel working surface with grinding by wheels of different graininess is proposed .

**Diamond grinding, hold-down pressure, graininess, combined sample**

УДК 621.92

**Я.В. ВАСИЛЬЧЕНКО** (канд.техн. наук, доц.)

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина

**ОПЕРАТИВНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ  
ПРИ ОБРАБОТКЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Предложен способ повышения производительности обработки крупногабаритных деталей за счет совершенствования технологических систем их изготовления и оптимизации режимов резания с учетом динамического состояния станочной системы. На основании статистического исследования предприятий были установлены необходимые конструктивные параметры станков, связанные с размерами обрабатываемых деталей и режимами резания. Предложено проводить оптимизацию параметров технологического процесса в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** Механическая обработка, тяжелый станок, крупногабаритная деталь, оптимальное управление, динамическая система

**Введение**

Тяжелые станки с позиций теории управления является многоконтурной системой с нелинейными элементами и нестационарными свойствами. Поиск эффективных методов решения задач оптимизации режимов механической обработки деталей ветроэнергетики с учетом фактического состояния оборудования в реальном времени является довольно затруднительным. Объясняется это тем, что тяжелые станки являются сложными объектами, структура динамической системы которых определяется особенностями генерации и распространения колебаний, вызывающих непрерывные изменения состояния даже в пределах обработки одной партии заготовок [1]

В связи с этим для более успешного решения задач оптимизации необходимыми становятся оперативная оценка и учет текущего динамического состояния оборудования на основе раскрытия и математического описания основных закономерностей взаимосвязи между параметрами состояния и колебательных процессов [2,3,4].

Целью исследования является повышение производительности обработки крупногабаритных деталей за счет совершенствования технологических систем их изготовления и оптимизации режимов резания с учетом динамического состояния станочной системы.

**Основное содержание работы**

Проведены статистические исследования предприятий тяжелого машиностроения. Использование станков оценивалось по характеристикам обрабатываемых деталей и технологических операций и по применяемым и потребным режимам резания.

Сведения о деталях и технологических операциях были систематизированы, а также была проведена оценка относительной повторяемости различных значений анализируемых характеристик. На основе данной оценки были построены распределения деталей в зависимости от соответствующих характеристик. Распределения дают наглядное представление о варьировании этих характеристик и облегчают определение средних и максимальных значений.

Сведения об относительном количестве валков холодной прокатки по диапазонам диаметров (рис.1) показывают, что около 55% от общего выпуска валков холодной прокатки составляют детали диаметром до 1450 мм, 30 % составляют валки диаметром 1450-1500 мм.

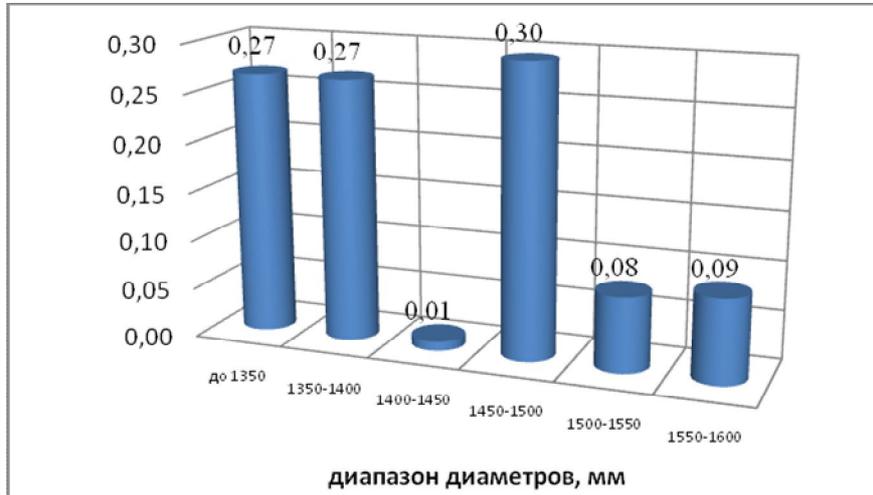


Рис. 1. Распределение диаметров валков холодной прокатки.

Сведения об относительном количестве валков горячей прокатки по диапазонам диаметров (рис.2) показывают, что большую часть от общего выпуска валков горячей прокатки составляют детали диаметром 1400-1500 мм (36%), валки диаметром 1500-1600 мм составляют 27%.

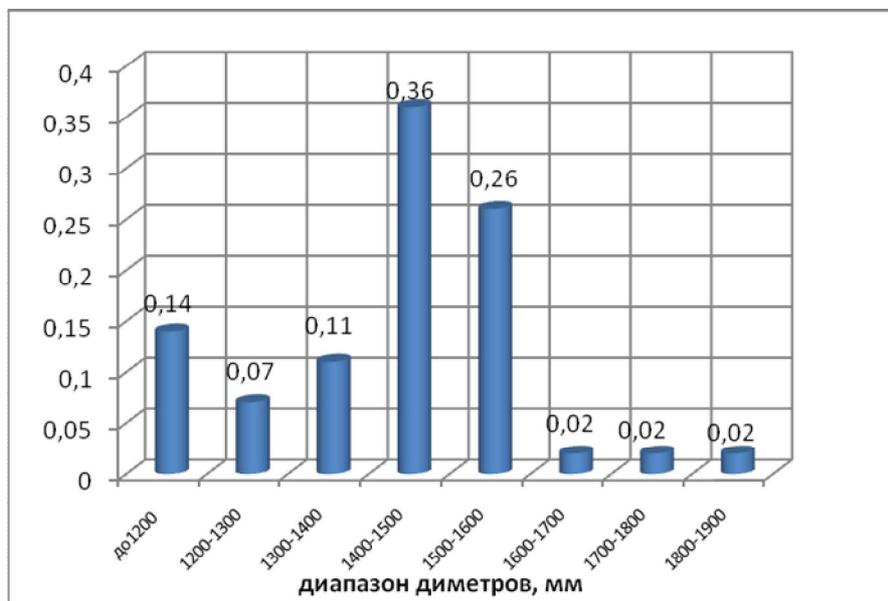


Рис. 2. Распределение диаметров валков горячей прокатки.

Исследования показали, что основную часть валков холодной прокатки составляют детали длиной 4750-5000мм (49%) и детали длиной 5000-5250 мм (32%).

Діаграма розподілення представлена рис.3.

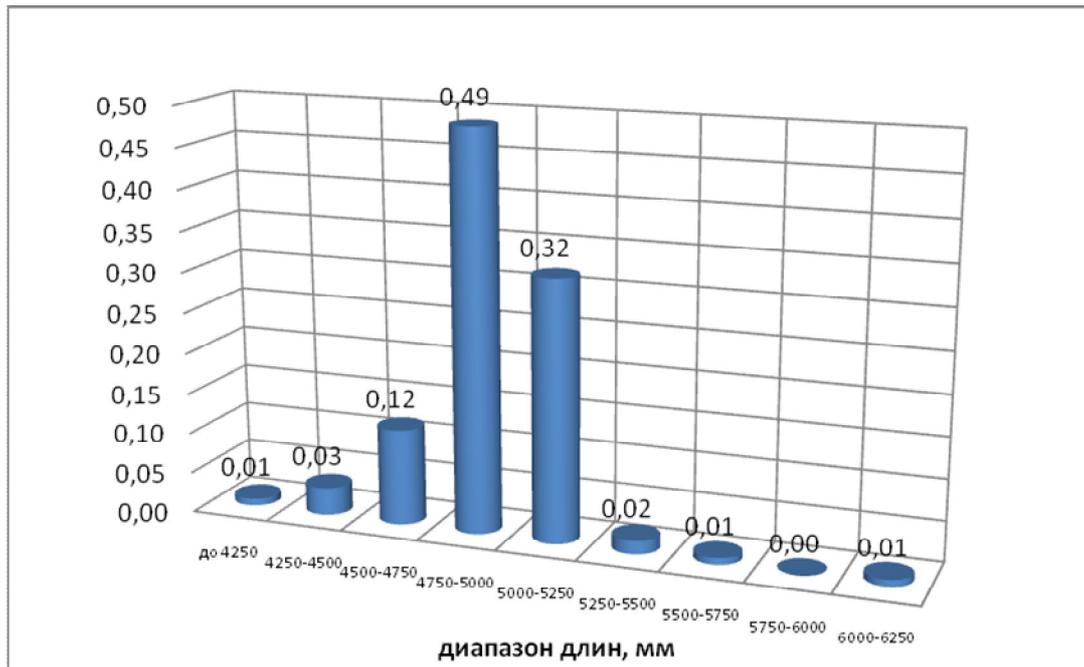


Рис. 3 Розподілення довжин валків холодної прокатки.

Аналіз відносного кількості валків гарячої прокатки по діапазнам довжин показує, що більш половини деталей мають довжину в діапазоні 5250-6000 мм, а близько 20% складають деталі довжиною 6000-6750 мм. Діаграма розподілення представлена на рис 4.

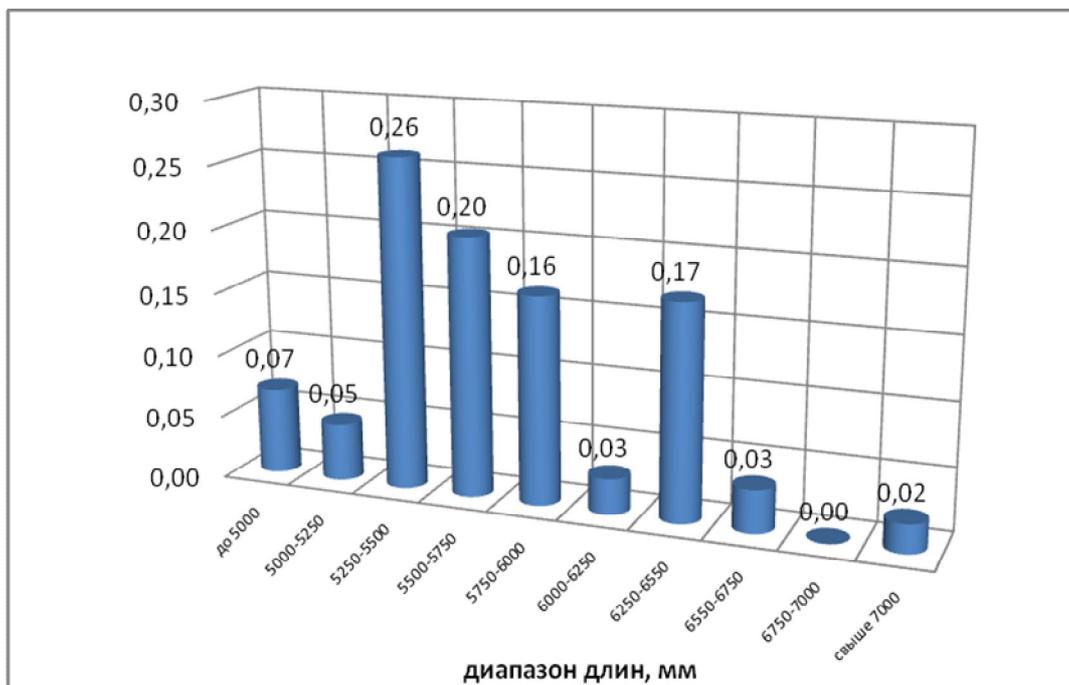


Рис. 4 Розподілення довжин валків гарячої прокатки.

Распределения валков в зависимости от массы показаны на соответствующих диаграммах (рис. 5, 6). Вес валков холодной прокатки в основном составляет до 32,5 т (около 50%) и 35-37,5 т (29%). Вес валков горячей прокатки в основном составляет 35-40 т (44%).

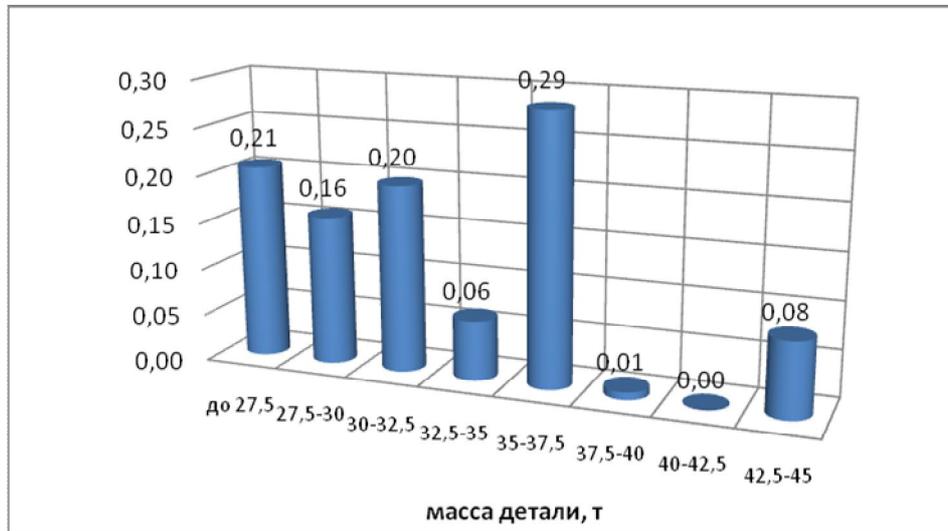


Рис.5. Распределение веса валков холодной прокатки.

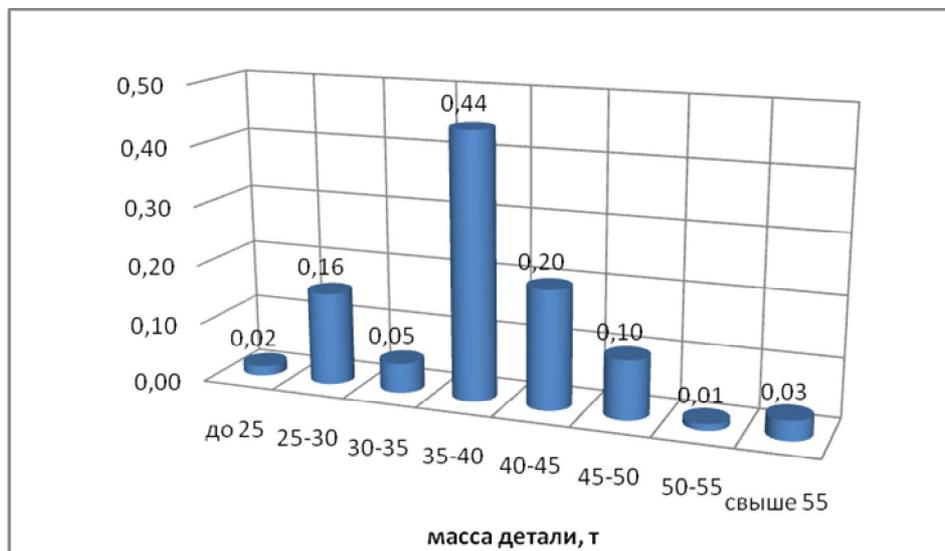


Рис. 6. Распределение веса валков горячей прокатки.

Также исследованы выполняемые технологические переходы и их относительная продолжительность. Примерно 80-90 % всего времени расходуется на обтачивание наружных поверхностей, растачивание отверстий и подрезание торцовых поверхностей. Около 1% времени приходится на выполнение отделочных операций – шлифование и накатывание. Ранее исследовались применяемые обрабатываемые материалы и режимы резания.

В настоящее время актуальной исследовательской задачей является глубокий аналитический анализ статической, динамической и геометрической точности поведения станков. Поведение механической структуры станка отображает сопротивление многокоординатной системы деформациям, которое можно проанализировать методом конечных элементов и методами многообъектного моделирования. Рис.7. показывает влияние на процесс резания механических и геометрических параметров.

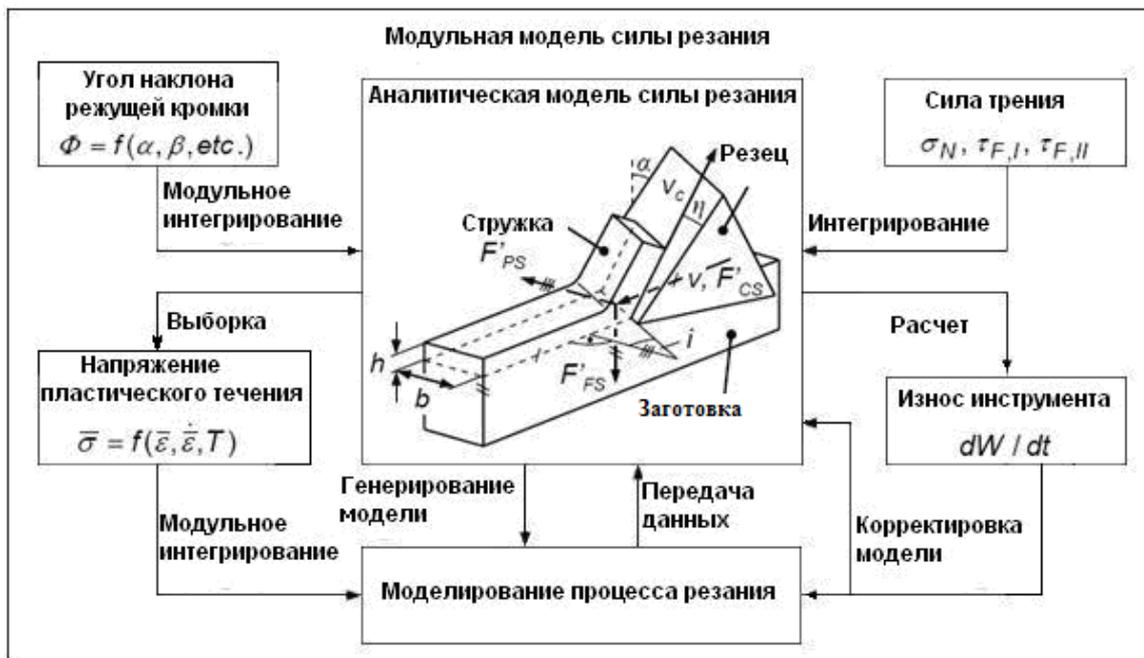


Рис. 7. Модель сил резания с определенными воздействиями на процесс резания

В тяжелых токарных станках имеется большое число источников колебаний, связанных с действием процессов в зоне резания, инерционных и диссипативных сил, наличием стыков, упругих элементов, вращающихся частей и т.д. [1]. Выявить и описать основные закономерности возникновения и распространения этих колебаний в упругой подсистеме станка на теоретическом уровне довольно сложно, даже при наличии ее динамической модели. Это связано с тем, что, будучи рассмотренными во времени, колебания, как правило, являются случайными процессами, характеристики которых определяются как случайные функции.

Задачу математического анализа структурной устойчивости станка можно решать различными методами, в частности, с использованием теории графов или, в более общем случае, симплицальных комплексов [4]. Симплициальный комплекс представляет собой знаковый орграф, циклы которого соответствуют контурам обратной связи; при этом связи, характеризующие усиление тенденции к отклонению от какого-либо состояния в какой-либо вершине, отвечают контурам положительной обратной связи, а циклы, характеризующие подавление этой тенденции, отвечают контурам отрицательной обратной связи.

На рис. 8 представлен орграф, формализующий взаимосвязь процессов, протекающих в динамической системе станка при резании. Его первый контур (1-2-3-4-3-2-1) образует процесс создания натяга в упругой подсистеме для съема припуска с заготовки.

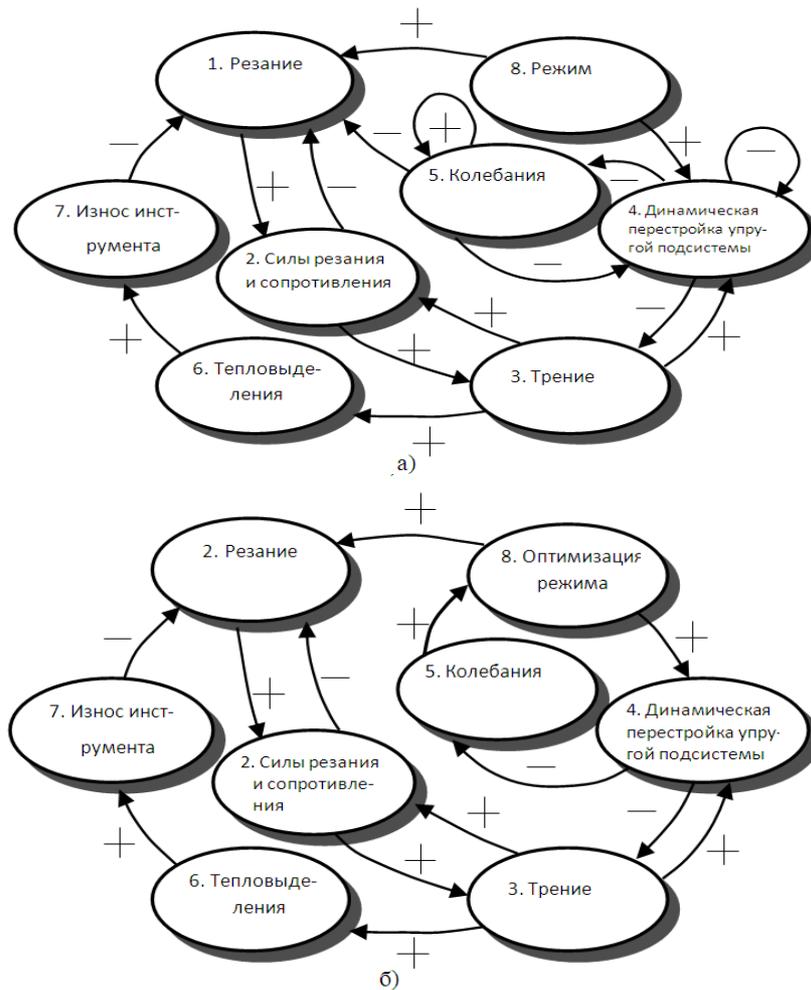


Рис. 8. Орграфы взаимосвязи процессов, протекающих в динамической системе тяжелого станка при резании без (а) и в условиях (б) оптимизации параметров.

Второй контур (1-2-3-6-7-1) отображает ситуацию, связанную с действием возмущающих факторов теплосиловой группы, приводящим к затуплению режущего инструмента и, как следствие, повышению погрешностей обработки (прежде всего на уровне ухудшения размерной точности изготовленных деталей).

Третий контур (4-5-5-4-4) представляет собой упругодемпфирующие взаимодействия элементов динамической системы (колебания), возникающие в результате ее перестройки под действием процесса резания.

Четвертый контур (1-2-3-4-5-1) является контуром, отражающим влияние возмущений от упругодемпфирующих взаимодействий, как на появление погрешностей формы, так и на ухудшение шероховатости обработанной поверхности.

Задание параметров режима обработки представлено вершиной 8, а ее влияние на процессы резания и динамической перестройки СС учтено в рамках традиционной для технологии машиностроения схемы "обрабатываемый материал–инструментальный материал" [1].

Такая система неустойчива. Полученный результат является закономерным, в том числе и потому, отражает пассивную роль традиционной схемы назначения параметров режима обработки в обеспечении устойчивости процесса резания.

В связи с этим рассмотрим возможности подхода, предлагаемого в работе, для чего в орграфе на слайде учтем возможность нахождения такого сочетания параметров режима обработки, которое позволит минимизировать не только потенциальную функцию станка, но и степень ее влияния на протекание процесса резания. Учтем также и предположение о влиянии параметров на динамическое состояние станка. Топологически это приведет к:

— включению 8 вершины в цепь обратной связи третьего контура и разрыву петель в его вершинах, означающему минимизацию колебательных процессов (5) и стабилизацию состояния тяжелого станка (4);

— замыканию на 8 вершине четвертого контура, определяющему ситуацию возможного улучшения параметров качества поверхности по результатам ее обработки на оптимальных режимах.

Полученная система является устойчивой.

Попытаемся раскрыть механизм, который лежит в основе этого результата. С этой целью рассмотрим и проанализируем с позиций структурной устойчивости тяжелого станка предельные случаи, которые могут иметь место в динамической системе при резании: вынужденные колебания, а также возникновение и установление автоколебаний, однозначно ухудшающие как качество обработки, так и стойкость режущего инструмента.

Вынужденные колебания будем анализировать как результат периодического действия возмущений силового (снятие неравномерного припуска, дискретный характер стружкообразования и т.д.) или кинематического (перекос осей, погрешности зубчатых колес, дисбаланс отдельных вращающихся частей и т.п.) характера. Действие возмущений вызывает дополнительные взаимные относительные смещения инструмента и заготовки; величины смещений определяются как значением вынуждающей силы, так и степенью совпадения частоты ее изменения с частотой основного колебательного процесса.

На рис. 9 и 10 представлен орграф, топология которого характеризует ситуацию возникновения вынужденных колебаний при наличии их источника в шпиндельной группе.



Рис. 9. Орграф взаимосвязи процессов, протекающих в динамической системе тяжелого токарного станка в режиме вынужденных колебаний



б)

Рис. 10. Орфограф взаимосвязи процессов, протекающих в динамической системе тяжелого токарного станка, соответствующий финальной фазе установления автоколебаний

В обоих случаях система перестает быть структурно устойчивой, но в отличие от режима вынужденных колебаний при автоколебаниях ее восстановление может длиться гораздо дольше во времени, а может и не произойти вообще.

Положительный эффект достигается только при включении оптимизации в цепь компенсации смещений инструмента и заготовки, вызванных действием возмущений. В условиях принципиальной невозможности устранения источников возмущений этот эффект может иметь место только в ситуации формирования с помощью оптимизации таких траекторий движения инструмента и заготовки, которые будут обеспечивать максимально возможную (кратную  $k \cdot \pi, k = 1, 3, 5 \dots$ ) разность фаз их взаимных относительных колебаний.

Полученный результат позволяет объяснить и второй эффект, зафиксированный при анализе структурной устойчивости системы: эффект влияния оптимизации на повышение стойкости режущего инструмента. Суть его состоит в установлении в зоне контакта инструмента и заготовки в условиях мало меняющейся силы резания некоторой мало меняющейся температуры. В результате этого сопротивления материала заготовки резанию становится малым, что приводит к замедлению скорости износа режущего инструмента

### Выводы

На основании статистического исследования предприятий были установлены необходимые конструктивные параметры станков, связанные с размерами обрабатываемых деталей и режимами резания.

Для реализации усовершенствования технологического процесса должна осуществляться разработка нового оборудования с учетом повышенных режимов резания и возможности оптимизации процесса резания в реальном времени.

Оптимизация параметров технологического режима на основе учета динамического состояния способствует уменьшению влияния на процесс резания не

только колебательных, но и теплосиловых возмущений, т.е. обеспечивает возможность адаптации тяжелого станка к их действию. С точки же зрения практики это означает повышение не только качества обработки деталей, но и стойкости режущего инструмента, т.е. не только параметрической, но и эксплуатационной надежности системы в целом.

### Список литературы

1. Иноземцев Г.Г. Оптимизация процесса резания с учетом динамического состояния оборудования / Г.Г. Иноземцев, В.В. Мартынов, М.Б. Бровкова // СТИН. - 1997.-№2.-С.13.
2. Касти Дж. Большие системы. Связность, сложность и катастрофы / Касти Дж. [пер. с англ.]. - М: Мир, 1982. - 216 с.
3. Маслеников И.Л. Структурно-параметрическая оптимизация токарной операции с использованием целевой функции / И.Л. Маслеников, Ю.А. Соколов // СТИН. -1997.-№1.-С.23-26.
4. Медведев Д.Д. Автоматизированное управление процессом обработки резанием / Д.Д. Медведев. - М.: Машиностроение, 1980. - 143 с.

*Рецензент: Мальшико І.О.*

*Надійшла до редколегії: 05.04.2011р.*

### **Я.В. ВАСИЛЬЧЕНКО**

Донбаська державна машинобудівна академія

### **ОПЕРАТИВНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЦІ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ДЕТАЛЕЙ**

Запропоновано спосіб підвищення продуктивності обробки великогабаритних деталей за рахунок вдосконалення технологічних систем їх виготовлення та оптимізації режимів різання з урахуванням динамічного стану верстатної системи. На підставі статистичного дослідження підприємств були встановлені необхідні конструктивні параметри верстатів, пов'язані з розмірами оброблюваних деталей і режимами різання. Запропоновано проводити оптимізацію параметрів технологічного процесу в режимі реального часу.

**Механічна обробка, важкий верстат, великогабаритна деталь,  
оптимальне управління, динамічна система**

### **Y.V. VASILCHENKO**

Donbas state engineering academy

### **OPERATIONAL OPTIMIZATION OF CUTTING PROCESS FOR MACHINING OF LARGE PARTS**

A method of raising of machining performance of large parts due to improvement of technological systems in their manufacture and optimization of cutting conditions, taking into account the dynamic state of machine system. Based on statistical investigation of enterprises the necessary design parameters of the machines associated with the dimensions of the workpieces and cutting conditions have established. It is proposed to optimize the technological process parameters in real time.

**Machining, heavy machine, large part, optimal control, dynamic system**

УДК 621.923

**В.В. ГУСЕВ** (д-р. техн. наук, проф., vladilgusev@mail.ru )  
**Л.П. КАЛАФАТОВА** (д-р. техн. наук, проф., lpk04nov@mail.ru)

**А.Л. МЕДВЕДЕВ** (ассистент)

**Д.Ю. СЕМЕНЮК** (аспирант)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

## **УПРАВЛЕНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ АЛМАЗНЫХ КРУГОВ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КЕРАМИКИ**

В статье рассмотрены закономерности изменения режущей способности алмазных кругов при шлифовании технической керамики и при их правке свободным абразивом. Скорость восстановления режущей способности определяется интенсивностью линейного износа шлифовального круга при правке, которая зависит от режима процесса правки.

**Ключевые слова:** Техническая керамика, шлифование, износ алмазных кругов, правка свободным абразивом, режим правки, режущая способность инструмента

### **Введение**

В настоящее время изделия из технической керамики (ТК) применяются практически во всех отраслях промышленности. В аэрокосмической технике, например, для производства обтекателей ракет используют такие виды материалов как кварцевая и алюмосиликатная керамики, ситаллы - разновидность стеклокерамики. Из различных видов керамики также производят тигли, муфели под электропечи, футеровки индукционных печей, лабораторную термостойкую и коррозионно-стойкую посуду, изоляторы, высоковольтные предохранители, износоустойчивые элементы машин, узлы трения, мелющие тела, режущие инструменты и т.д. В связи с разнообразием изделий требования, предъявляемые к их эксплуатационным характеристикам, также различны. Это, прежде всего, устойчивость к большим нагрузкам, износоустойчивость, высокие прочностные характеристики, стойкость к резким перепадам температур (вплоть до термоудара), высокие требования к аэродинамике и т.д.

Техническая керамика относится к категории труднообрабатываемых хрупких неметаллических материалов и механически обрабатывается преимущественно алмазным шлифованием. Технологические процессы механической обработки изделий из ТК предусматривают выполнение большого объема получистовых и чистовых операций – алмазного шлифования, полирования, алмазной доводки. Продолжительность финишных операций зависит от глубины и структуры дефектного слоя, который образуется на предыдущих технологических операциях и переходах и должен быть сведен к минимуму в готовом изделии, так как его наличие ухудшает эксплуатационные характеристики изделий. Таким образом, эффективность процессов механической обработки ТК связана с повышением производительности черновых операций при условиях обеспечения дефектного слоя такой глубины и структуры, которые гарантируют минимальную продолжительность финишных операций.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований [1] свидетельствуют о том, что при абразивной обработке хрупких материалов, такие параметры дефектности обработанной поверхности как размеры, плотность, глубина

проникновения дефектов, большие поверхностные напряжения в значительной степени определяются уровнем и направлением силового воздействия на материал при резании. Важным фактором, влияющим на ситуацию в зоне резания, является состояние рабочей поверхности алмазных кругов и их режущая способность, которая постоянно меняется во время обработки ТК [1, 2]. Так, например, при черновом шлифовании ситаллов алмазные круги через 5 – 10 минут эксплуатации теряют свою режущую способность, что связано с повышенными твердостью и прочностью обрабатываемого материала.

Состояние рабочей поверхности кругов (РПК) определяется геометрической формой вершин зерен и плотностью их распределения по глубине рабочего слоя инструмента. Износ зерен при обработке изделий из керамики и потеря режущей способности кругов сопровождается значительным ростом сил резания, особенно радиальной составляющей, которая может возрасти в 2-4 раза по сравнению с работой выправленным кругом. При этом увеличивается дефектность поверхностного слоя обрабатываемых изделий. Таким образом, при достижении силы резания (ее нормальной составляющей) предельного значения, определяемого из условий обеспечения требуемых параметров качества поверхностного слоя изделий, необходимо осуществлять управляющее воздействие на рабочую поверхность круга, восстанавливая его режущую способность, т.е., производить правку инструмента.

Вопросам правки алмазных шлифовальных кругов посвящено значительное количество исследований [3, 4]. В данное время наиболее известны следующие основные способы правки: электроэрозионные, электрохимические способы, основанные на электрическом и электрохимическом влиянии на связку алмазных кругов, способы механической правки кругов. Но, несмотря на общепризнанные достоинства, отмечаемые авторами, необходимо отметить и присущие им недостатки. Например, при правке способом электрической эрозии обязательна модернизация технологического оборудования, затруднена его реализация в производственных условиях, высока энергоемкость процесса, возникают сложности при соблюдении правил техники безопасности в условиях повышенной влажности в зоне работы станочника и наличия в ней же источника электрических разрядов большой силы тока, невозможность использования способа для кругов на неметаллической связке. Альтернативой электроэрозионному способу правки являются многочисленные механические способы правки, определяемые многообразием операций механического воздействия правящего инструмента на алмазный инструмент. Все эти способы направлены на исправление геометрии инструмента, который подвергается правке, и создание необходимого микропрофиля РПК.

Сотрудниками кафедры металлорежущих станков и инструментов ДонНТУ был разработан новый способ правки алмазных шлифовальных кругов (ШК) – правка свободным абразивом [5,6]. Главным отличием такой правки является целенаправленное внешнее воздействие абразивных зерен на связку ШК, осуществляющих как удаление изношенных и высвобождение острых алмазных зерен на режущей поверхности круга, так и исправление геометрии (макропрофиля) кругов.

Целью настоящего исследования является определение основных закономерностей изменения режущей способности алмазных шлифовальных кругов при правке свободным абразивом.

### **Основное содержание работы**

Для исследований использовался алмазный круг 1А1 200x76x10 250/200 А2 -4-М2-01, подвергавшийся периодической правке свободным абразивом [5], с

использованием специального устройства для правки. Правка осуществлялась следующим образом [6]. К шлифовальному кругу, который вращается на рабочей скорости, подводят до соприкосновения чугунный притир, повторяющий профиль правящегося круга. Притиру придается возвратно-поступательное движение вдоль образующей инструмента со скоростью 0,015-0,0175 мм/с. В зону контакта инструмента и притира подается абразив в условно свободном состоянии – в виде бруска, состоящего из 70% абразива и 30% гипса, который, разрушаясь обеспечивает подачу абразива в зону между притиром и РПК. В качестве правящего абразива использовался карбид кремния зеленого F 60 (размер зерна 250-315 мкм). Интенсивность вышлифовывания связки инструмента и материала притира определяется размером абразивных частиц, объемом подаваемого абразива и величиной зазора между инструментом и притиром. В свою очередь, зазор в процессе правки формируется автоматически при заданных значениях подачи притира, скорости вращения ШК и условий подачи абразива.

Для оценки изменений в состоянии РПК при правке производились измерения режущей способности круга  $W$  и его радиального износа  $\Delta L$ . Режущая способность ШК измерялась при реализации упругой схемы шлифования, путем поджатия образца из ситалла АС-370 ( $K_{1c}=2,1\pm 0,1$  МПа·м<sup>1/2</sup>) к поверхности ШК с постоянным усилием 41,5 Н. Измерения радиального износа ШК производились в 6-ти точках при помощи специального приспособления по разработанной методике [6]. Погрешность определения величины радиального износа не превышала 3 мкм.

При проведении экспериментальных исследований изучалось изменение режущей способности ШК  $W$  и его радиального износа  $\Delta L$  в зависимости от времени правки  $\tau$  (60-120 с) при определенных скоростях подачи притира и абразивного бруска.

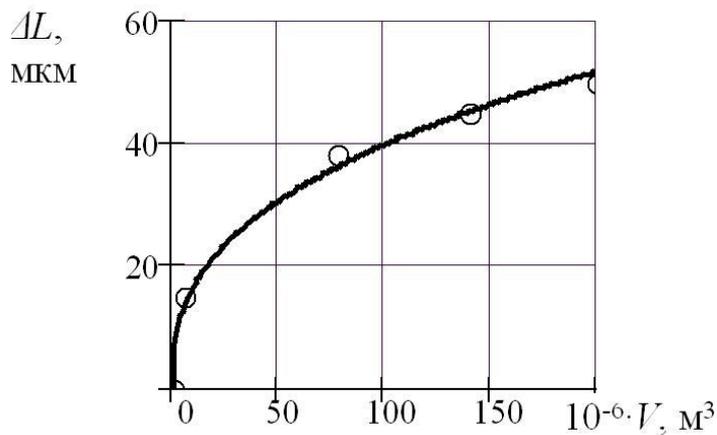


Рис. 1. Зависимость линейного износа  $\Delta L$  алмазного круга от объема удаленного материала при шлифовании ситалла АС-370

керамики  $V$ , удаленного с поверхности заготовки шлифовальным кругом, возрастает его линейный износ. При этом зависимость износа шлифовального круга от объема удаленного материала имеет нелинейный характер, который адекватно может быть описан степенной зависимостью. В начальный период работы круга ( $V=50\dots 100$  м<sup>3</sup>) интенсивность износа наибольшая. Это связано с активным разрушением зерен круга, наиболее выступающих из связки, на которые приходятся максимальные сечения

Степень износа алмазного абразивного инструмента при шлифовании керамики и уровень режущей способности РПК в значительной степени зависят от объема удаленного (сошлифованного) материала. На рис. 1 приведены зависимости линейного износа  $\Delta L$  алмазного круга от объема сошлифованного материала  $V$  при обработке образцов ситалла АС-370.

Как видно из представленного графика, при увеличении объема технической

единичного среза обрабатываемого материала, что сопровождается возникновением максимальных сил резания.

При работе алмазного круга имеют место четыре вида процессов, оказывающих влияние на его работоспособность и состояние РПК: истирание зерен об обрабатываемую поверхность с образованием площадок износа; хрупкое разрушение зерен микроскалыванием; вырывание зерен из связки; вышлифовывание связки стружкой, которая совместно с СОТС образует абразивный поток. С увеличением объема удаленного кругом обрабатываемого материала уменьшается глубина РПК, распределение вершин зерен по высоте рабочей поверхности изменяется и приобретает правостороннюю асимметрию, площадки износа на поверхности зерен возрастают [6], снижается уровень режущей способности круга (см. рис.2.а). Все это приводит к увеличению составляющих силы резания. Износ РПК приводит к уменьшению коэффициента абразивного резания (рис. 2, б), что может быть связано с ростом площадок износа на алмазных зернах. Нормальная составляющая силы резания  $P_y$  возрастает быстрее тангенциальной  $P_z$ , и как следствие, уменьшается коэффициент абразивного резания  $K_a = P_z/P_y$  (рис. 2, б). Уменьшение данного коэффициента сопровождается увеличением дефектов материала, образующихся в процессе шлифования.

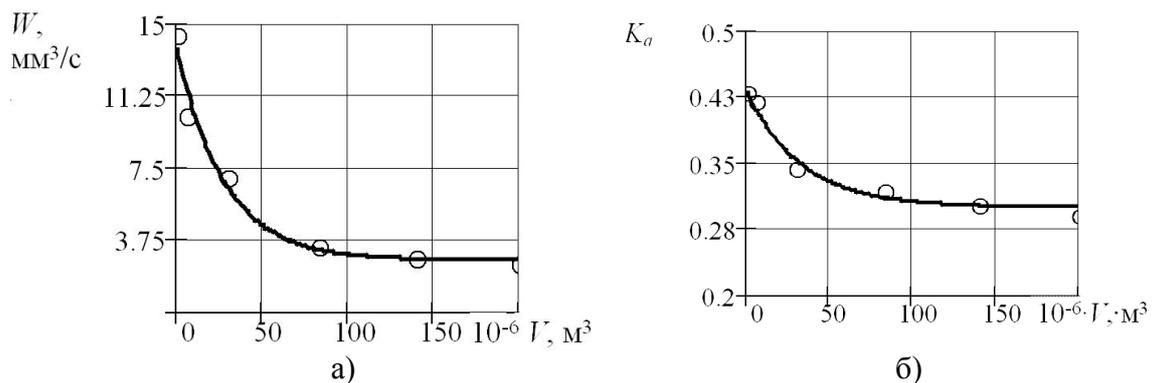


Рис. 2. Влияние объема удаленного материала припуска  $V$  при шлифовании ситалла АС-370 на изменение: а – режущей способности алмазного круга  $W$ ; б – коэффициента абразивного резания

Плотность  $f(l_o)$  распределения дефектов обработки по размерам  $l_o$  для ситаллов имеет вид:

$$f(l_o) = \frac{r_o + 1}{l_{o, \max}} \left( 1 - \frac{l_o}{l_{o, \max}} \right)^{r_o}, \quad 0 \leq l_o \leq l_{o, \max}, \quad (1)$$

$$l_{o, \max} = A_1 (HV/K_{1c})^2, \quad r_o = A_2 \cdot P_y \left( V_{\kappa, t, V_{\partial}, S, H_V / K_{1c}} \right)^{-0.5 + 0.07 \cdot (HV/K_{1c})},$$

где  $K_{1c}$  – трещиностойкость материала; Па·м<sup>1/2</sup>,  $HV$  – твердость по Виккерсу, Па;

$A_1$ ,  $A_2$  - коэффициенты пропорциональности, определяющие, соответственно, зависимость максимальной полудлины обработочной трещины  $l_{0max}$  и показатель степени  $r_0$ .

По мере удаления материала припуска на заготовке при шлифовании керамики происходит увеличение нормальной составляющей силы резания на зерне. Ее значения превышают критическую величину, при которой образуются медианные трещины, формирующие дефектный слой. Критическое значение силы резания на зерне  $P_{K3}$  можно определить из зависимости [7]:

$$P_{K3} = \kappa_{\phi} \cdot K_{1c}^4 / HV^3, \quad (2)$$

где  $\kappa_{\phi} = 2,17 \cdot 10^4$  – коэффициент, учитывающий вид обрабатываемого материала и условия обработки.

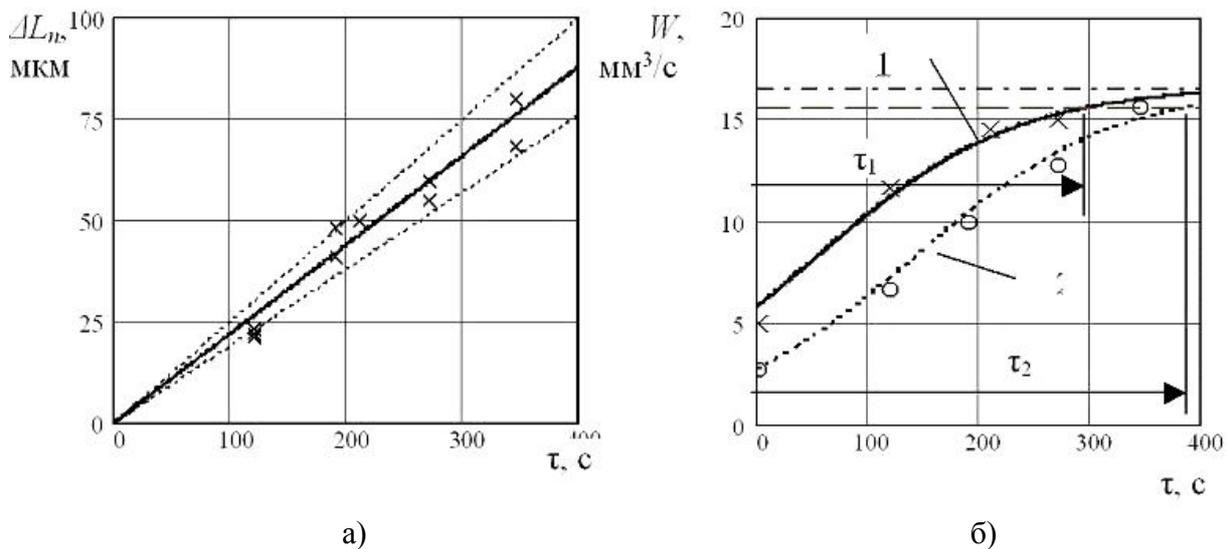


Рис.3. Влияние времени правки  $\tau$  свободным абразивом на: а – линейный износ ШК; б – текущую режущую способность ШК для его различной начальной режущей способности  $W_n$  перед правкой: 1 –  $W_n = 5 \text{ мм}^3/\text{с}$ ; 2 –  $W_n = 2,75 \text{ мм}^3/\text{с}$

Для восстановления режущей способности алмазного ШК был использован способ правки свободным абразивом. Как показали исследования, износ круга, сопровождающий процесс правки, адекватно описывается линейной зависимостью (рис. 3, а) при неизменных скоростях подачи притира и абразивной суспензии. На рисунке пунктирной линией показаны границы доверительного интервала при уровне значимости 0,1. По мере удаления алмазоносного слоя режущая способность ШК возрастает (рис. 3, б), достигая предельного значения  $W_{np}$  при времени правки ( $\tau_1$  или  $\tau_2$ ), зависящего от начального значения режущей способности круга перед правкой  $W_n$ , обусловленного степенью его износа.

Изменение режущей способности круга  $W_y$  от времени правки  $\tau$  может быть

адекватно описано следующей зависимостью:

$$W_y(\tau) = \frac{1}{a \cdot \exp(-b\tau - c)} + \frac{1}{W_{np}}, \quad (3)$$

где  $a$  - коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и характеристики инструмента, определяет нижнюю границу режущей способности ШК при принятых условиях обработки;

$b$  - коэффициент, зависящий от технологического регламента правки, определяет интенсивность правки;

$c$  - коэффициент, зависящий от исходного состояния РПК перед правкой (степени его износа), определяет длительность времени правки, необходимую для достижения кругом предельной режущей способности;

$W_{np}$  - предельная режущая способность круга при принятых условиях ее определения, зависящая от характеристики круга и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Параметры  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $W_{np}$  определяются экспериментальным путем для конкретных условий обработки и правки.

Предельная режущая способность используемого ШК при обработке ситалла АС-370 и среднем давлении 0,4 МПа на площади контакта обрабатываемого образца с кругом (штрихпунктирная горизонтальная линия на рис. 3, б) составляет  $W_{np} = 16.4$  мм<sup>3</sup>/с. Примем в качестве критерия, ограничивающего продолжительность правки, время достижения режущей способности круга значения  $0,95 W_{np}$  (на рисунке горизонтальная штриховая линия). Назовем это значение граничным значением режущей способности круга.

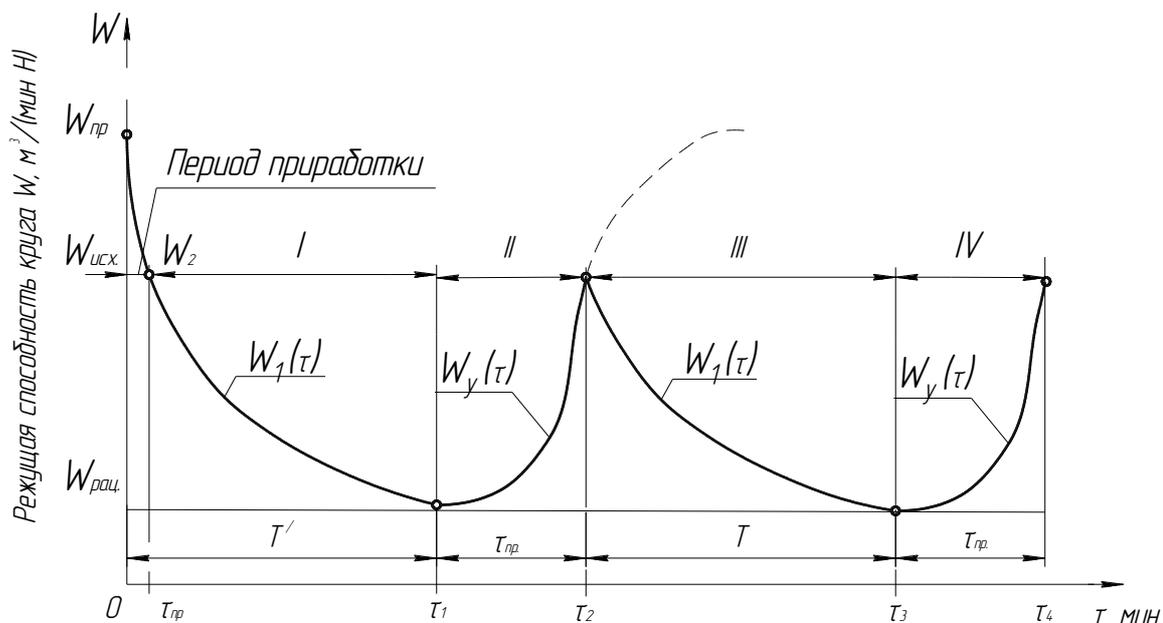


Рис. 4. Изменение режущей способности круга при шлифовании с периодическими управляющими воздействиями на РПК при правке способом свободного абразива

Таким образом, необходимо найти рациональный период времени между правками ШК при обработке технической керамики. Представим график, описывающий изменение режущей способности круга за исследуемое время обработки при шлифовании с периодическими воздействиями на РПК (правка свободным абразивом), осуществляемыми одновременно с обработкой детали, как чередование определенных периодов (рис. 4).

Промежуток времени  $0 - \tau_1$  представляет собой длительность работы предварительно заправленного круга  $T'$  до начала правки свободным абразивом с целью восстановления режущей способности РПК. Он содержит период приработки  $0 - \tau_{np}$ , характеризуемый быстрой потерей режущей способности кругом за счет выпадения из связки наиболее выступающих зерен, и период I длительностью  $T' - \tau_{np}$ . В этот период режущая способность круга продолжает уменьшаться, но с меньшей интенсивностью.

Изменения текущей режущей способности круга  $W_1(\tau)$  в периоды I и III на промежутках  $\tau_{np} - \tau_1$ ,  $\tau_2 - \tau_3$  описываются экспоненциальной зависимостью [8]:

$$W_1(\tau) = W_{рац} + \Delta W \cdot \exp(-\beta_g \cdot \tau), \quad (4)$$

где  $W_{рац}$  – уровень рациональной режущей способности круга,  $\text{мм}^3/\text{мин}$ , представляющая собой ее допустимое значение, исходя из обеспечения заданного качества изделия по параметрам дефектности, в соответствии с зависимостями 1 и 2;

$\Delta W$  – амплитуда снижения режущей способности круга,  $\text{мм}^3/\text{мин}$ ;

$\Delta W = W_n - W_{рац}$ , где  $W_n$  – исходная режущая способность круга,  $\text{мм}^3/\text{мин}$ ;

$\beta_g$  – эмпирический коэффициент,  $1/\text{мин}$ ;

$\tau$  – продолжительность шлифования, мин.

В промежутки времени  $\tau_1 - \tau_2$  и  $\tau_3 - \tau_4$  (периоды II и IV) режущая способность РПК увеличивается в результате воздействия на нее свободного абразива, что представлено зависимостью (3).

Это говорит о том, что объем удаленного алмазоносного слоя с круга при правке прямо пропорционален времени воздействия зерен свободного абразива на РПК. Для сокращения времени восстановления режущей способности воздействие свободного абразива на рабочую поверхность круга желательнее осуществлять при рациональных для данных условий параметрах режима правки (а именно, скоростей притира и абразива). Воздействие свободного абразива на РПК необходимо прекращать, когда режущая способность круга достигнет определенного, заданного уровня, что позволит исключить чрезмерный расход алмазов и нерациональный расход правящего абразива.

В качестве критерия выбора условий периодического воздействия на РПК, может быть использована удельная себестоимость обработки  $C_{уд}$ , представляющая собой отношение себестоимости процесса шлифования  $C_{шл}$  к количеству материала припуска  $V_m$ , удаленного с обрабатываемой заготовки за это же время  $C_{уд} = C_{шл}/V_m$ . В структуру  $C_{шл}$  помимо прочих расходов входят затраты на правку и расход алмазного инструмента, сопровождающий процесс управления режущей способностью РПК.

Эффективность предложенного способа может быть подтверждена следующим примером. Применение описанного способа правки, реализуемого на разработанном устройстве при шлифовании многогранных неперетачиваемых пластин из минералокерамики кругами на бакелитовой связке позволило при минимальном расходе алмазоносного слоя инструмента увеличить количество пластин, выпускаемых

между правками, по сравнению со способом правки кругов алмазными брусками на 50% при улучшении качества обрабатываемой поверхности в 1,5 раза при минимальных дополнительных затратах.

### Выводы

Высокоэффективные способы правки алмазного инструмента при шлифовании труднообрабатываемых материалов являются неотъемлемой частью технологического процесса их обработки. В качестве такого способа правки при шлифовании кругами с различными типами связок может быть эффективно использован способ на основе применения свободного абразива. Этот способ позволяет интенсифицировать процесс правки с минимальной затратой абразивного материала. Благодаря направленному и более щадящему воздействию абразивного порошка на режущие алмазные зерна, подаваемого в определенную зону контакта притира и круга, этот метод более продуктивен и эффективен по сравнению с другими видами правки абразивными инструментами и более универсален по сравнению с электроэрозионным способом правки, так как может быть использован для правки алмазных кругов на любой связке. Необходимы дальнейшие исследования по выбору рациональных условий правки, установления связи между режущей способностью круга и формированием структуры дефектного слоя.

### Список литературы

1. Калафатова Л.П. Особливості механічної обробки виробів із крихких неметалевих матеріалів / Л.П.Калафатова // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Зб. наук. праць: к 2-х ч. – 2007. – Ч. 1. – Вип. 5. – С. 72-87.
2. Гусев В.В., Калафатова Л.П. Обеспечение эксплуатационных характеристик изделий из конструкционной керамики на стадии их производства/В.В. Гусев, Л.П. Калафатова // Сучасні технології у машинобудуванні. Збірник наукових статей; за заг. ред. А.І. Грабченка. – Харків., 2006. – Том 2. – С. 334-346.
3. Чачин В.Н., Дорофеев В.Д. Профилирование алмазных шлифовальных кругов / В.Н. Чачин, В.Д. Дорофеев. – Мн: Наука и техника, 1974. – 160 с.
4. Матюха П.Г. Алмазне шліфування з електроерозійними керуючими діями на робочу поверхню круга/ П.Г. Матюха, В.В. Полтавець. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – 164 с.
5. Декларацийний патент на корисну модель 3838 UA, 7 B24B53/00 Спосіб правки абразивного інструмента / Калафатова Л.П., Поїзд С.А., Шевченко В.А. (Україна) – №2004032137/К. Заявлено 23.03.04; Опубл. 15.12.04, Бюл. №12, 2004. – 4 с.
6. Гусев В.В. Закономерности изменения режущей способности алмазных шлифовальных кругов при правке свободным и полусвязанным абразивом /В.В. Гусев, А.Л. Медведев // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2009. – Вип. 6 (154). – С.41-48.
7. Морозов Е.М. Контактные задачи механики разрушения/ Е.М. Морозов, М.В. Зернин. – М.: Машиностроение, 1999. – 544 с.
8. Матюха П.Г. Определение оптимального интервала времени между электроэрозионными воздействиями на рабочую поверхность круга при алмазном шлифовании твердого сплава/ П.Г. Матюха, В.В. Полтавец, В.Б. Стрелков // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наук. праць. – Донецьк, 2006. – Вип. 31. – С. 203-209.

Рецензент: Матюха П.Г.

Надійшла до редколегії: 15.04.2011р.

**ГУСЄВ В.В.  
Л.П. КАЛАФАТОВА  
А.Л. МЕДВЕДЄВ  
Д.Ю. СЕМЕНЮК**

Донецький національний технічний університет

**КЕРУВАННЯ РІЗАЛЬНОЮ ЗДАТНІСТЮ АЛМАЗНИХ КРУГІВ ЯК ФАКТОР  
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ КЕРАМІКИ**

У статті розглянуті закономірності зміни різальної здатності алмазних абразивних кругів при шліфуванні технічної кераміки і при їх правці вільним абразивом. Швидкість відновлення різальної здатності визначається інтенсивністю лінійного зносу шліфувального круга під час правки, яка залежить від режимів процесу правки.

**Технічна кераміка, шліфування, знос алмазних кругів, правка вільним абразивом, режим правки, різальна здатність інструменту**

**V.V. GUSEV  
L.P. KALAFATOVA  
A.L. MEDVEDEV  
D.Y. SEMENYUK**

Donetsk National Technical University

**CONTROL OF CUTTING CAPACITY OF DIAMOND WHEELS AS A FACTOR  
THAT INCREASING EFFICIENCY OF GRINDING OF CERAMICS PRODUCTS**

The article describes the regularity in cutting capacity of diamond wheels during grinding of technical ceramics and dressing by free abrasive. The rate of regeneration of cutting capacity is determined by intensity of linear wear of grinding wheel during dressing, which depends on dressing conditions.

**Technical ceramics, grinding, wear of diamond wheels, dressing by free abrasive, dressing mode, tool cutting capacity**

УДК 621.9: 658.5

**Т.Г. ІВЧЕНКО** (канд. техн. наук, доцент)

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ В ЗОНІ ОБРОБКИ**

Виконаний аналіз закономірностей формування теплових потоків и температур в зоні обробки в залежності від параметрів процесу алмазного вигладжування. Встановлені характер та ступінь впливу швидкості, робочого зусилля, радіуса індентора на максимальну та середню на поверхні деталі температуру під час вигладжування .

**Ключові слова:** Тепловий потік, температура, алмазне вигладжування, швидкість, зусилля.

### **Вступ**

Дослідження теплових явищ мають важливе значення для забезпечення якості поверхневого шару деталей машин та обґрунтування раціональних параметрів процесу механічної обробки. Особливо актуальні ці питання для операцій остаточної обробки, до яких відноситься поверхнево – пластичне деформування (ППД), що супроводжується інтенсивним тепловиділенням і підвищенням температури контактних поверхонь інструмента і деталі. У цьому зв'язку вельми актуальні і виконані дослідження по визначенню температур в зоні обробки під час алмазного вигладжування – одного з найбільш поширених методів ППД, особливо для матеріалів високої твердості.

В наступний час методи теплофізичного аналізу зони механічної обробки достатньо добре відомі [1, 2]. Проте, вони встановлюють лише загальні підходи до визначення тепловго стану зони обробки та насамперед на лезову обробку, інформація про методи ППД досить обмежена.

Загальні закономірності формування температур у деталі й інструменті під час алмазного вигладжування встановлені на підставі подання законів розподілу температур у безрозмірному вигляді [3]. Подальший розвиток методики розрахунку теплових потоків і фактичних температур для конкретних варіантів обробки вигладжуванням відбувся в роботах [4, 5]. В них виконаний аналіз закономірностей формування теплових потоків і особливостей розподілу температур на поверхні деталі та по її глибині під час алмазного вигладжування. Однак, в них не розглянуті питання впливу на температуру умов процесу вигладжування, що обмежує можливості раціонального вибору параметрів обробки, затримує широке використання вигладжування в сучасному машинобудуванні та потребує розширення досліджень в цьому напрямку.

Мета роботи - аналіз закономірностей формування теплових потоків і температур в зоні обробки під час алмазного вигладжування в різноманітних умовах його використання та встановлення взаємозв'язку температури з параметрами процесу вигладжування.

### **Основний зміст роботи**

В процесі алмазного вигладжування внаслідок роботи сил упругопластичного деформування матеріала деталі в зоні контакту з інструментом – алмазним індентором виділяється достатньо велика кількість теплоти.

Розподіл температур на поверхні деталі та по її глибині може бути описаний наступним чином [3]:

$$\Theta(x, y) = P_o T(\psi, \nu) = \frac{K_o l_1 q_{01}}{2\lambda_\delta \sqrt{\pi Pe}} \sum_{i=1}^4 n_i \int_0^{\Delta} \frac{f_i(\psi_u) d\psi_u}{\sqrt{\psi - \psi_u}} \exp\left(-\frac{Pe}{4} \frac{\nu^2}{\psi - \psi_u}\right). \quad (1)$$

де  $T(\psi, \nu)$  – безрозмірна температура;  $\psi = x/l_1$ ,  $\psi_u = x_u/l_1$ ,  $\nu = y/l_1$  – безрозмірні координати;  $l_1$  – довжина контакту зони пластичного деформування;  $P_o = K_o l_1 q_{01} / (2\lambda_\delta (\pi Pe)^{0.5})$  – розмірний коефіцієнт;  $K_o = 0,87$  – коефіцієнт, що враховує обмеженість джерела по ширині;  $Pe = Vl_1/\omega_\delta$  – критерій Пекле;  $V$  – швидкість деталі;  $\lambda_\delta$ ,  $\omega_\delta$  – коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності матеріалу деталі;  $\Delta$  – верхня межа інтеграла:  $\Delta = \psi$  при  $0 \leq \psi \leq 1$  і  $\Delta = 1$  при  $\psi > 1$ ;  $n_i = q_i/q_{01}$  – безрозмірні величини, що враховують відмінність теплових потоків:  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = q_{02}/q_{01}$ ,  $n_3 = q_1/q_{01}$ ,  $n_4 = q_2/q_{01}$ ;  $q_{01}$ ,  $q_{02}$  – максимальні інтенсивності джерел з несиметричними нормальними законами розподілу інтенсивностей у зоні пластичної деформації і у зоні пружного відновлення;  $q_1$  і  $q_2$  щільності рівномірно розподілених теплових потоків, спрямованих з деталі в інструмент, у зоні пластичної деформації у зоні пружного відновлення;  $f_i(\psi_u)$  – закони розподілу щільності теплових потоків.

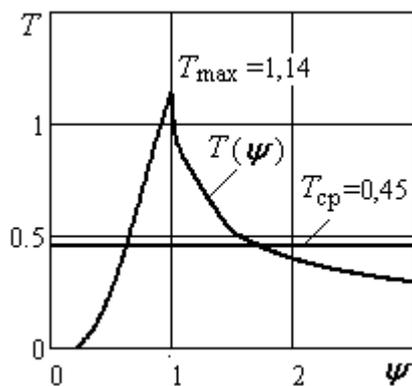


Рис.1. Графіки розподілу безрозмірних температур по поверхні деталі  $T(\psi)$  та середньої температури  $T_{cp}$

На рис. 1 представлений графік розподілу безрозмірної температури по поверхні деталі  $T(\psi)$ , а також середня на поверхні контакту деталі з інструментом температура  $T_{cp}$ :

$$T_{cp} = \frac{1+\beta}{\int_0^{1+\beta} T(\psi) / (1+\beta)}, \quad (2)$$

де  $\beta = l_2/l_1$  – безрозмірна довжина контакту зони пружного відновлення  $l_2$ .

Фактична середня на поверхні контакту деталі з інструментом температура  $\Theta_{cp}$  розраховується на підставі розмірного коефіцієнта  $P_o$ :

$$\Theta_{cp} = P_o T_{cp}, \quad (3)$$

Максимальна на поверхні деталі фактична температура може бути розрахована наступним чином [3]:

$$\Theta_{max} = P_o \left[ \int_0^{\Delta} \frac{e^{-3(1-\psi_u)^2}}{\sqrt{1-\psi_u}} d\psi_u + n_3 \int_0^{\Delta} \frac{d\psi_u}{\sqrt{1-\psi_u}} \right]. \quad (4)$$

Максимальні інтенсивності джерел з несиметричними нормальними законами розподілу інтенсивностей в контактних зонах пластичних деформацій  $q_{01}$  та пружного відновлення  $q_{02}$  [4]:

$$q_{01} = F_1 V / b l_1 = V (P_T - 0,25 b l_2 \mu \sigma_\epsilon) / b l_1; \quad q_{02} = \sqrt{3} b l_2 \mu \sigma_\epsilon V / 8 \sqrt{\pi} b l_2, \quad (5)$$

де  $P_T$  - тангенціальна сила, що діє в напрямку швидкості головного руху і визначається залежно від сили вигладжування  $P$ ;  $\mu$  - коефіцієнт тертя;  $\sigma_s$  - межа міцності матеріалу деталі;  $b = (l_1 + l_2)((R+r)R)^{0,5}$  - ширина контакту індентора радіуса  $r$  і деталі радіуса  $R$ .

Щільності рівномірно розподілених теплових потоків, спрямованих з деталі в інструмент, в зонах пластичних деформацій  $q_1$  та пружного відновлення  $q_2$  [4]:

$$q_1 = \frac{[K_2 N_2 - K_c K_1 q_{01} (N_2 I - M_2)] \lambda_u}{l_1 (N_1 N_2 - M_1 M_2 - M_1 N_2 I) - K_1 \lambda_u (M_2 + N_2 I - N_2 \chi_2)}; q_2 = \frac{I [(K_c q_{01} - q_1) - M_1 q_1 l_1]}{\sqrt{\beta}}, \quad (5)$$

де  $I = K_1 \lambda_u \sqrt{\beta} / N_2 l_2$ ;  $K_1 = 4K_o \sqrt{\omega_\delta l_1} / 3\lambda_\delta \sqrt{V}$ ;  $K_2 = K_c K_1 (q_{02} \sqrt{\beta} + \chi_1 q_{01})$ ;  $\lambda_u$ ,  $\omega_u$  - коефіцієнти теплопровідності і температуропровідності матеріалу інструмента;  $K_c = 0,55$  - коефіцієнт форми для двохвимірної джерела, що швидко рухається;  $\chi_1 = 0,6$ ,  $\chi_2 = 0,75$ ;  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  - безрозмірні функції, що визначають нагрів поверхні інструменту.

На підставі цих залежностей досліджений вплив параметрів процесу вигладжування на максимальні інтенсивності джерел в контактних зонах пластичної деформації і пружного відновлення  $q_{01}$  і  $q_{02}$ , а також щільності теплових потоків, спрямованих з деталі в інструмент  $q_1$  і  $q_2$ , представлених на рис.2.

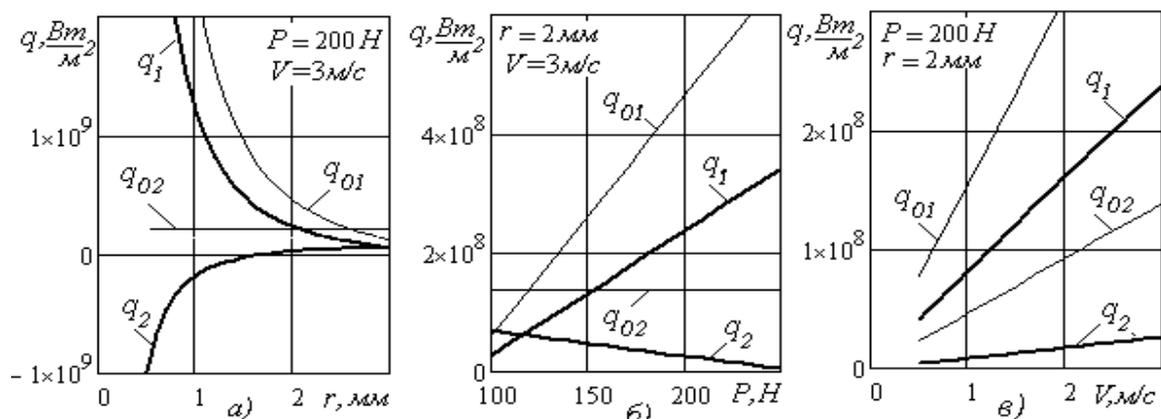


Рис. 2. Графіки зміни щільності теплових потоків  $q_1$  і  $q_2$  на поверхнях індентора та максимальні інтенсивності джерел  $q_{01}$  і  $q_{02}$  в контактних зонах від радіуса індентора  $r$  - а), зусилля вигладжування  $P$  - б) та швидкості  $V$  - в)

Залежності максимальної  $\Theta_{\max}$  та середньої  $\Theta_{\text{ср}}$  температури на поверхні деталі від параметрів процесу вигладжування представлені на рис. 3.

Зі збільшенням радіуса індентора теплові потоки у зоні пластичної деформації  $q_1$  і  $q_{01}$  різко зменшуються, у зоні пружного відновлення  $q_2$  - збільшується, що пояснюється поліпшенням тепловідведення у індентор при збільшенні його розмірів. Відповідно тепловим потокам з підвищенням радіуса індентора суттєво зменшуються і температури, як максимальна, так і середня. Зі зростанням зусилля вигладжування теплові потоки у зоні пластичної деформації  $q_1$  і  $q_{01}$  значно зростає, у зоні пружного відновлення  $q_2$  - зменшується, максимальна і середня температури підвищуються. Зі зростанням швидкості всі теплові потоки  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_{01}$ ,  $q_{02}$ , а також і температури збільшуються, що пов'язано зі збільшенням загальної кількості теплоти, яка виділяється під час вигладжування.

Для практичного використання визначених залежностей максимальної температури від параметрів процесу вигладжування доцільно виразити їх степеневими моделями та знайти відповідні рівняння регресії:

$$\Theta_{\text{рег}} = C_{\Theta} r^m P^n V^p, \quad (7)$$

де  $C_{\Theta}$  коефіцієнти,  $m$ ,  $n$ ,  $p$  - параметри регресії.

Графіки однопараметричних теоретичних  $\Theta_{\text{теор}}$  (4) і регресійних  $\Theta_{\text{рег}}$  (7) залежностей максимальної температури від параметрів процесу алмазного вигладжування наведені на рис. 4. Помилка в розрахунках по теоретичним і регресійним моделям для заданих умов обробки не перевищує 10%, що дозволяє вважати розроблені залежності адекватними.

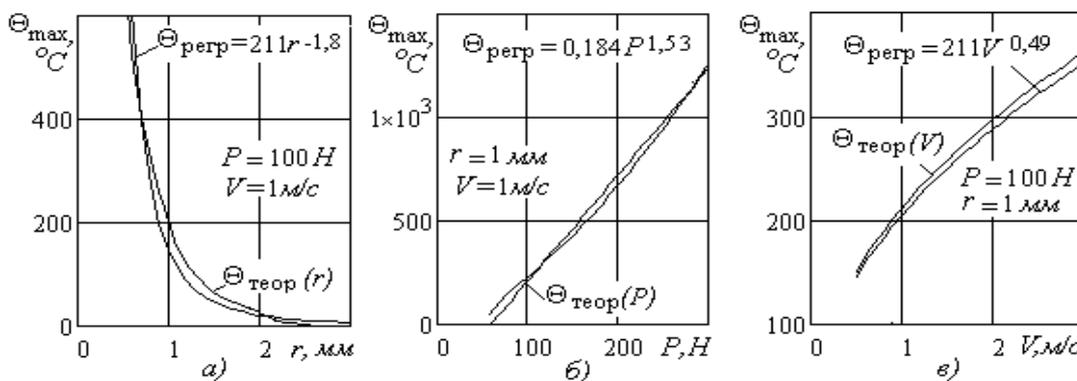


Рис.4. Графіки теоретичних  $\Theta_{\text{теор}}$  та регресійних  $\Theta_{\text{рег}}$  залежностей температури від радіуса індентора  $r$  - а), зусилля вигладжування  $P$  - б) та швидкості  $V$  - в)

Виходячи з розрахунків, степенева модель залежність максимальної температури від радіуса індентора, зусилля вигладжування та швидкості має наступний вигляд:

$$\Theta_{\text{рег}} = 0,184 r^{-1,8} P^{1,53} V^{0,49}. \quad (8)$$

Таким чином, на підставі розробленої методики можуть теоретично визначатися теплові потоки та температури в зоні обробки в залежності від умов вигладжування.

### Висновки

В результаті дослідження теплового стану зони обробки алмазним вигладжуванням розроблені теоретичні моделі визначення теплових потоків та температур на поверхні деталі та інструмента, на підставі яких встановлений вплив на максимальну температуру параметрів обробки - радіуса індентора, зусиль вигладжування та швидкості. Для практичного використання розроблені регресійні моделі визначення максимальних температур в залежності від радіуса індентора, зусиль вигладжування та швидкості деталі.

Розроблені моделі дають можливість обґрунтування раціональних параметрів процесу алмазного вигладжування. Розроблена методика визначення параметрів може бути використана для будь-яких видів обробки поверхнево - пластичним деформуванням.

**Перелік літератури**

1. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. - М.: Машиностроение, 1990. –288 с.
2. Ивченко Т.Г. Анализ закономерностей изменения температурного поля режущего инструмента в процессе его эксплуатации / Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк, 2009. – Вып. 37. – С.84 - 89.
3. Ивченко Т.Г. Анализ тепловых явлений при алмазном выглаживании / Т.Г. Ивченко, И.А. Петряева, Д.М. Шелкунова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – Донецк, 2010. – Вып. 39. – С.85-90.
4. Ивченко Т.Г. Определение тепловых потоков и температур в зоне обработки при алмазном выглаживании / Т.Г. Ивченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2010. – Вип. 7(166). - С.32-38.
5. Ивченко Т.Г.. Управление тепловыми потоками и температурами в зоне обработки при алмазном выглаживании / Т.Г.Ивченко, Д.М. Шелкунова, Е.В. Полякова // Известия ТТИ ЮФУ – ДонНТУ: материалы одиннадцатого научно-практического семинара [“Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы”]. – Таганрог, 2010. - Кн.3. - № 10. – С.164-169.

*Рецензент: Матюха П.Г.*

*Надійшла до редколегії: 13.02.2011р.*

**Т.Г. ИВЧЕНКО**

Донецкий национальный технический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО  
ВЫГЛАЖИВАНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ В ЗОНЕ ОБРАБОТКИ**

Выполнен анализ закономерностей формирования тепловых потоков и температур в зоне обработки в зависимости от параметров процесса алмазного выглаживания. Установлены характер и степень влияния скорости, рабочего усилия, радиуса индентора на максимальную и среднюю на поверхности детали температуру при выглаживании.

**Тепловой поток, температура, алмазное выглаживание, скорость, радиус, усилие**

**T.G. IVCHENKO**

Donetsk National Technnical University

**RESEARCH OF INFLUENCE OF PROCESS OF DIAMOND SMOOTHING  
PARAMETERS ON TEMPERATURE IN MACHINING AREA**

The analysis of conformities to law of forming of thermal streams and temperatures is executed in the area of machining depending on the parameters of process of diamond smoothing. Character and degree of influence of speed, working effort, indenter radius on a maximal and middle temperature on the detail surface at smoothing.

**Thermal stream, temperature, diamond smoothing, speed, radius, effort**

УДК 621.762:691:921

**В.С. МАЙБОРОДА** (докт. техн. наук, проф.)**Д.Ю. ДЖУЛИЙ** (студент)**И.В. ТКАЧУК** (студент)

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, г.Киев, Украина

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ В КОЛЬЦЕВОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ**

Экспериментально установлено, что процесс магнитно-абразивной обработки длинномерных деталей типа концевой инструмент на установке с кольцевым расположением рабочих зон целесообразно выполнять при использовании противоположно установленных восстанавливающих элементов под углами 35-55°.

**Ключевые слова:** Магнитно-абразивная обработка, магнитно-абразивный инструмент, восстанавливающий элемент, длинномерная деталь, кольцевая ванна

### **Введение**

Обеспечение эффективного процесса магнитно-абразивной обработки (МАО) в условиях больших рабочих зазоров на установках типа кольцевая ванна во многом связано с реализацией в процессе обработки трех основных условий [1]. Из них достижение равномерного прижима частиц магнитно-абразивного порошка к каждому участку обрабатываемой поверхности при МАО обеспечивается силами магнитного происхождения в комплексе с динамическими и кинематическими особенностями движения деталей в рабочих зазорах магнитно-абразивных установок. Реализация второго условия – наличие достаточной и равномерно распределенной по обрабатываемой поверхности тангенциальной составляющей скорости относительного перемещения элементов магнитно-абразивного инструмента и каждого участка поверхности обрабатываемой детали зависит от формы каждой конкретной детали, траектории и характера ее движения в магнитных зазорах. Третье условие – условие активного перемешивания частиц магнитно-абразивного инструмента (МАИ) в зонах обработки и способность к формированию и восстановлению формы МАИ в процессе обработки во многом связано с конструктивными особенностями магнитной системы [2,3], условиями расположения деталей в зонах обработки [4], применением дополнительных устройств, обеспечивающим восстановление формы МАИ и ее «фиксации» с одновременным выравниванием плотности МАИ по объему рабочих зон. Особенно актуальна проблема восстановления формы МАИ при позонной обработке сложнопрофильных длинномерных деталей при их консольном закреплении в оправках установок с кольцевым расположением магнитных зазоров. Применение подобной позонной обработки, таких деталей, как, например, лопатки ГТД, связано с технологическими особенностями процесса МАО, выполняемой с целью обеспечения равномерной обработки по высоте пера [3,4]. При выполнении второго условия эффективной обработки таких деталей, как концевой режущий инструмент, с целью недопущения образования при МАО теневых зон инструмент располагается под определенным углом к вектору вращения вокруг оси кольцевой ванны и совершает дополнительное вращение вокруг собственной оси. Спецификой обработки деталей

подобного типа является активное переформирование МАО, проявляющееся, в ряде случаев, в вытеснении магнитно-абразивного порошка из магнитных зазоров либо в верхнюю, либо в нижнюю часть, и за пределы рабочей зоны – в области с пониженной магнитной индукцией, т.е. в области, где магнитные силы не достаточны для формирования достаточной плотности и жесткости МАИ, и обеспечения выполнения первого условия эффективной МАО. Наиболее активно процесс вытеснения порошка имеет место при обработке деталей, изготовленных из диа- и парамагнитных материалов, например, специальных сталей, твердых сплавов, сплавов титана. При этом достаточно сложной задачей является прогнозирование условий и результатов МАО деталей по высоте зон обработки. Процесс активной обработки при этом осуществляется, как правило, в нижней или верхней части зазоров, за их пределами и является сложно контролируемым, зависящим от величины коэффициента заполнения рабочих зон, скорости обработки, свойств магнитно-абразивного порошка и пр.

Решение данной проблемы - обеспечения равномерной, контролируемой и производительной обработки по высоте рабочих зон может быть связано с использованием дополнительных приспособлений в виде контртел, которые выполняют роль элементов, способствующих восстановлению плотности МАИ по высоте рабочих зазоров за счет принудительного перемещения вытесненного порошка в зоны активной обработки – в межполюсное пространство рабочих зазоров. В [5] при обработке образцов, имитирующих процесс МАО концевой режущего инструмента, при условии, когда тангенциальная составляющая скорости обработки близка к оптимальной, и при этом учитываются реологические свойства МАИ [4] – при наклонном их расположении по отношению к вектору основного движения – вращения вокруг оси кольцевой ванны, теоретически было обосновано и экспериментально подтверждено наличие процесса “выдавливания” основной массы МАИ из рабочего пространства магнитных зазоров, как в условиях “натекания” на обрабатываемые рабочие поверхности, так и в режиме “стекания”. Полученные результаты позволили сделать предположение о том, что в случае расположения обрабатываемых изделий при МАО таким образом, чтобы один образец обрабатывался в режиме “натекания”, следующий за ним при обработке комплекта деталей – в режиме “стекания”, т.е. встречного базирования деталей, будет обеспечиваться выравнивание плотности МАИ по высоте рабочих зон магнитных зазоров. Особенно важно решение данной проблемы для условий МАО твердосплавного концевой инструмента, как слабо магнитного.

Таким образом, целью данной работы было определение возможности встречного базирования деталей в процессе МАО и определить необходимые углы их наклона по отношению к вектору основного движения для реализации эффективного процесса МАО.

### **Основное содержание работы**

Для исследований были выбраны модельные образцы с длиной рабочей части 70 мм, изготовленные из различных материалов – сплава титана BT3-1, нержавеющей стали X18H10T и углеродистой инструментальной стали У9А. Исходная шероховатость рабочих поверхностей образцов до МАО составила  $Ra=0,5-0,8$  мкм. МАО выполняли при идентичных условиях – скорость вращения вокруг оси кольцевой ванны 3 м/с, время обработки 60 с, магнитно-абразивный порошок Ферромап, который используется при МАО указанных типов материалов, размер частиц 200/160 мкм [6]. Обработку образцов выполняли в режиме “стекания” – когда происходит вытеснение МАИ в нижнюю часть магнитных зазоров [5]. Противоположно установленный,

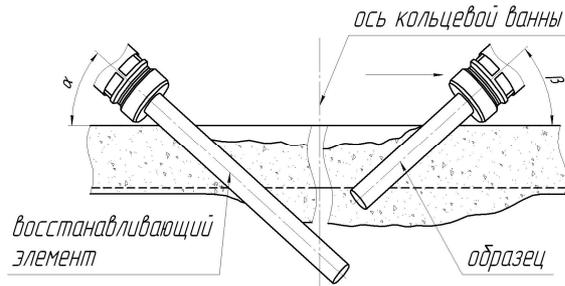
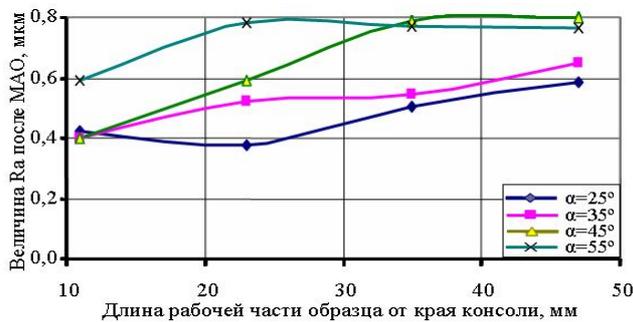
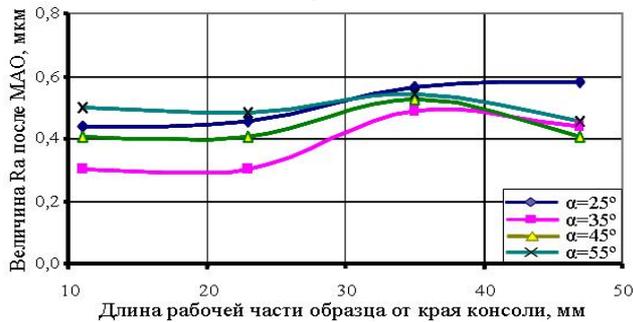


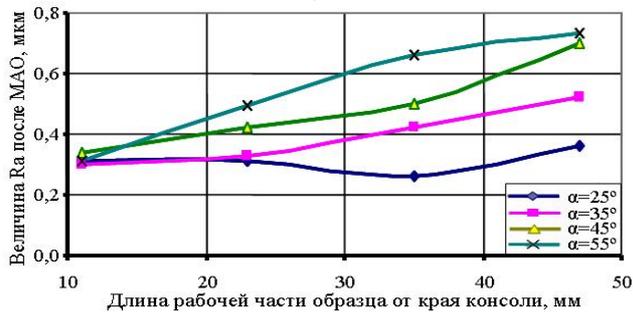
Рис.1 Схематическое представление расположения контрольного образца и восстанавливающего элемента в рабочих зазорах установки типа кольцевая ванна.



а)



б)



в)

Рис.2. Шероховатость контрольных образцов изготовленных из различных материалов при разных углах их базирования в рабочих зонах после MAO: а) титановый сплав, б) нержавеющая сталь, в) инструментальная углеродистая сталь.

восстанавливающий МАИ образец, имитирующий встречное базирование обрабатываемой детали был изготовлен из парамагнитного материала. Поперечные размеры, противоположно расположенного, восстанавливающего МАИ образца, соответствовали размерам контрольного, а его длина была выбрана таким образом, чтобы обеспечивалось полное его взаимодействие с вытесненным при MAO обрабатываемым образцом МАИ, т.е. длина была не менее чем на 20-30 мм больше (рис.1).

Исследования были разбиты на три этапа. На первом этапе обработку выполняли без использования противоположно расположенного образца – восстанавливающего элемента, т.е. в условиях, когда обрабатываемая деталь беспрепятственно вытесняет МАИ в нижнюю часть зазора. После MAO контролировали характер изменения шероховатости по длине контрольных образцов. Обработку выполняли при различных углах  $\alpha$  наклона контрольных образцов по отношению к вектору основного движения – вращения вокруг оси кольцевой ванны:  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $55^\circ$ . Результаты изменения параметра Ra по длине образцов после MAO приведены на рис.2.

Показано, что наиболее активно процесс MAO осуществляется у края образцов – в нижней части рабочих зазоров, в той зоне, где формируется повышенная плотность МАИ в результате смещения туда основной массы магнитно-абразивного порошка. При этом наилучшие результаты по получаемой шероховатости имеют место при углах наклона  $\alpha$ , равных  $25^\circ$  и  $35^\circ$ , что совпадает с ранее полученными результатами [4,7].

На втором этапе процесс МАО выполняли с использованием восстанавливающего элемента, работающего в режиме “натекания” под углами  $\beta = 40^\circ$  и  $60^\circ$ . Аналогично первому этапу исследований контрольные образцы обрабатывали в режиме «стекания» при углах наклона  $\alpha = 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ$  и  $55^\circ$ . Характер изменения шероховатости образцов -  $\Delta Ra$  по длине рабочей части на примере сплава титана и углеродистой инструментальной стали и, соответственно, полирующая способность рабочей зоны по высоте магнитного зазора и за его пределами представлен на рис. 3.

Полученные результаты показывают, что при углах  $\beta=40^\circ$  полирующая способность МАИ выше, чем при  $\beta=60^\circ$ , а в сравнении с процессом МАО без восстанавливающего элемента эффективность процесса повышается не менее, чем в 2 раза [8].

Важно отметить тот факт, что при использовании восстанавливающего элемента зона активной обработки по высоте расширяется на 10 – 15 мм, а сам процесс МАО реализуется в области, куда вытесняется МАИ – под магнитные зазоры. Причем при углах  $\beta=60^\circ$  зона с повышенной активностью несколько выше в нижней части магнитных зазоров, что можно объяснить тем фактом, что при подобных углах базирования восстанавливающего элемента он не обеспечивает достаточно полного восстановления МАИ по высоте рабочих зазоров, а приводит к формированию уплотненной области преимущественно в нижней части.

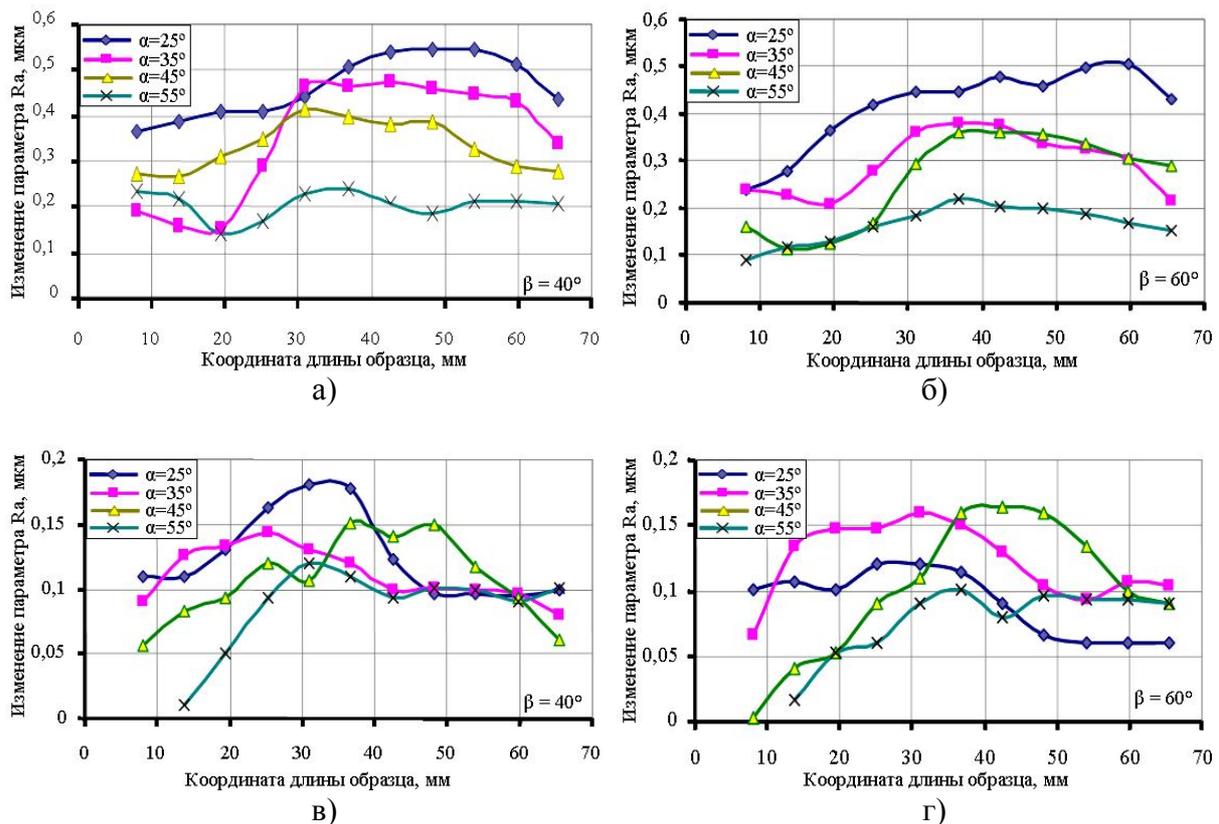


Рис.3 Изменение шероховатости контрольных образцов изготовленных из различных материалов при разных углах их базирования  $\alpha$  в рабочих зонах после МАО с использованием противоположно установленного восстанавливающего элемента под разными углами  $\beta$  : а), б) титановый сплав, в), г) инструментальная углеродистая сталь.

Наклон восстанавливающего, противоположно установленного элемента варьировали дискретно в диапазоне  $35-65^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Результаты изменения параметра  $R_a$  по длине контрольных образцов полученные для разных углов  $\alpha$  и  $\beta$  после МАО приведены на рис.4.

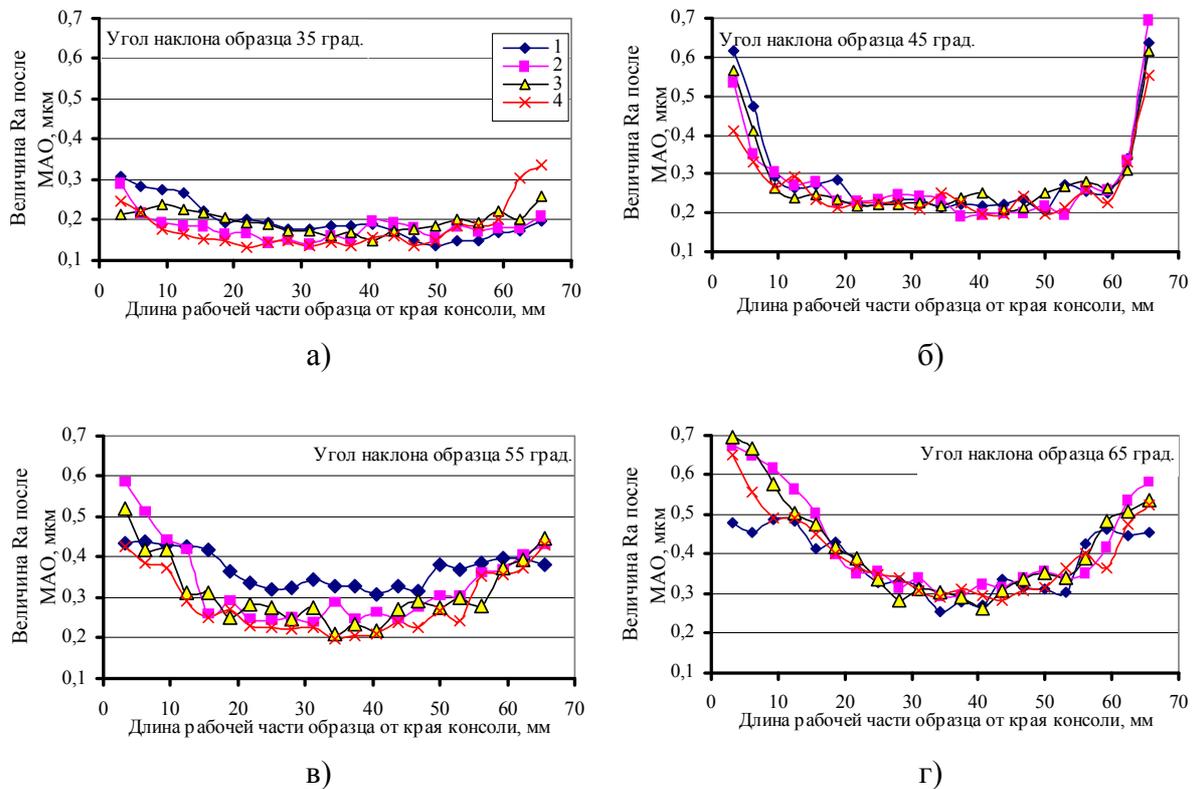


Рис.4. Изменение по длине контрольных образцов параметра  $R_a$  после МАО при разных углах наклона  $\alpha$  и углах наклона восстанавливающего элемента:  $\beta=35^\circ$ -кривая 1,  $\beta=45^\circ$ -кривая 2,  $\beta=55^\circ$ -кривая 3,  $\beta=65^\circ$ -кривая 4.

Анализ полученных результатов и их сравнение с характером изменения шероховатости поверхности образцов после МАО без восстанавливающего элемента (рис.2б) показали, что имеет место улучшение параметра  $R_a$  при углах близких к оптимальным, а также обеспечивается практически равномерная шероховатость по длине образцов.

Отметим, что минимальная шероховатость после МАО определяется величиной угла  $\alpha$  [4], а угол наклона восстанавливающего элемента –  $\beta$  влияет на равномерность обработки по длине деталей и на интенсивность процесса улучшения параметра  $R_a$ .

Зависимость изменения минимальной достижимой шероховатости –  $R_a$  образцов из нержавеющей стали от угла  $\alpha$  для данных условий МАО имеет практически линейный вид и описывается функцией  $R_a = 0,006 \cdot \alpha$ .

Характер изменения шероховатости образцов на разных участках их длины по сравнению с необработанными –  $\Delta R_a$  представлен на рис. 5.

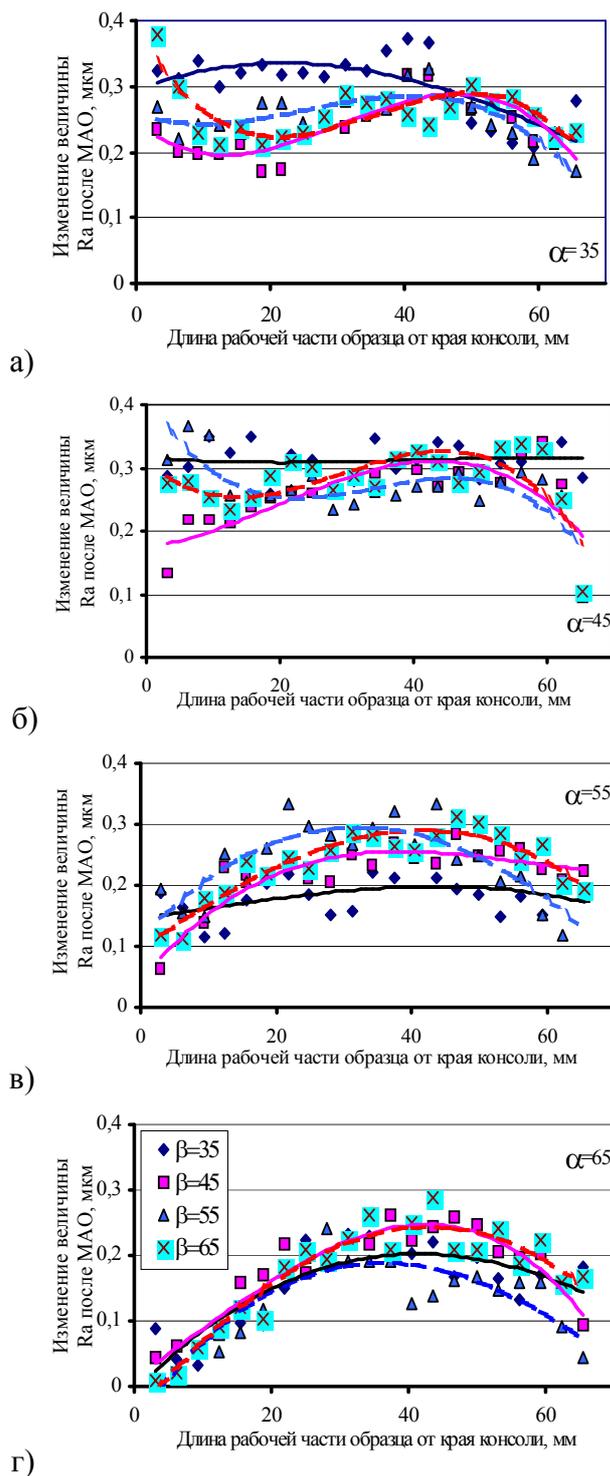


Рис.5. Изменение шероховатости контрольных образцов изготовленных из нержавеющей стали при разных углах их базирования  $\alpha$  в рабочих зонах после MAO с использованием противоположно установленного восстанавливающего элемента под разными углами  $\beta$ .

Показано, что наибольшее значение величины  $\Delta Ra$ , которое в ряде случаев достигает 0,3-0,4 мкм имеет место при углах наклона восстанавливающего элемента  $\beta=35-55^\circ$ . При указанных углах  $\beta$  обеспечиваются перемешивание магнитно-абразивного порошка, реализуются наилучшие условия для восстановления формы МАИ в рабочих зазорах, его абразивной и полирующей способности. В результате чего обеспечивается наиболее равномерная по длине контрольных образцов обработка. Наиболее интенсивный и равномерный процесс полирования реализуется при углах  $\alpha=35-45^\circ$  углах наклона противоположно установленного восстанавливающего элемента  $\beta=35-55^\circ$ . Анализ экстремумов на зависимостях, представленных на рис.5 и результаты представленные на рис.2 – рис.4 свидетельствует о том, что использование восстанавливающего элемента позволяет поднять область активной MAO в межполюсное пространство рабочих зазоров и прогнозировано осуществлять процесс относительно равномерной обработки.

**Выводы.** Экспериментально установлено, что процесс MAO длинномерных, консольно закрепленных образцов типа концевой инструмент целесообразно выполнять при использовании противоположно установленного восстанавливающего элемента под углами  $\beta$ , равными  $35-55^\circ$ . При этом угол наклона обрабатываемых изделий в рабочих зонах должен соответствовать углу трения в паре обрабатываемая деталь – магнитно-абразивный инструмент, что обеспечивает наиболее равномерную обработку сложных поверхностей.

**Список литературы.**

1. Майборода В.С. Дослідження властивостей магнітно-абразивного інструменту сформованого з сумішей порошків, Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць ЖДТУ, вип.6, 2009. - С.144-159.
2. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей (на примере лопаток компрессоров ГТД): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Киев, 1988. – 19 с.
3. Степанов О.В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной геометрической формы. Дисс... к.т.н. – Киев, 1997. – 145 с.
4. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Дисертація ... докт.техн.наук. – Київ, 2001. – 404 с.
5. Майборода В.С. Формування магнітно-абразивного інструменту в кільцевих щілинах з різною формою поперечних перерізів робочих зон при магнітно-абразивній обробці кінцевих та осьових інструментів. / Майборода В.С. ГейчукВ.М., Івановський О.А.//Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". Машиностроение.-вып.49. -2006.- С.153-164.
6. Оликер В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий. - М.: Металлургия, 1990. – 176 с.
7. Vyelyaev O. Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung. Dissertation Dr.-Ing. –Magdeburg, Germany, 2008.- 149 p.
8. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка деталей с консольным закреплением на установке типа кольцевая ванна /Майборода В.С. ГейчукВ.М.// Машиностроение и техносфера XXI века Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции 13-18.09.2010. Севастополь. Том 2. – 2010. – С.130-134.

*Рецензент: Гусев В.В.*

*Надійшла до редколегії: 11.04.2011р.*

**V.S. MAIBORODA**

**D.Y. DZHULII**

**I.V. TKACHUK**

National technical university of Ukraine  
«Kiev polytechnic institute », Kiev, Ukraine

**FEATURES OF FORMATION OF A MAGNETIC - ABRASIVE TOOL AT  
MAGNETIC - ABRASIVE MACHINING OF LONG-SIZED DETAILS  
IN A RING-TYPE WORKING AREA**

It is established experimentally, that the process of magnetic - abrasive machining of long-sized details such as the tip tool on the installation with ring-type arrangement of working areas is expedient for executing at usage of inversely mounted restoring members under angles of 35-55°.

**Magnetic-abrasive machining, magnetic-abrasive tool, restoring member,  
long-sized detail, ring-type area**

**В.С. МАЙБОРОДА.  
Д.Ю. ДЖУЛІЙ  
І.В. ТКАЧУК**

Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”, м.Київ, Україна

**ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТА  
ПРИ МАГНІТНО-АБРАЗИВНІЙ ОБРОБЦІ ДОВГОМІРНИХ ДЕТАЛЕЙ У  
КІЛЬЦЕВІЙ РОБОЧІЙ ЗОНІ.**

Експериментально встановлено, що процес магнітно-абразивної обробки довгомірних деталей типу кінцевий інструмент на установці з кільцевим розташуванням робочих зон доцільно виконувати при використанні протилежно встановлених елементів, що відновлюють, під кутами 35-55°.

**Магнітно-абразивна обробка, магнітно-абразивний інструмент, елемент що відновлює,  
довгомірна деталь, кільцева ванна**

УДК 621.923

**П.Г. МАТЮХА** (докт. техн. наук, проф.)**В.В. ГАБИТОВ** (аспирант, мл. научн. сотр., gabitov-v@ya.ru)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

## **ВЛИЯНИЕ ВИДА ШЛИФОВАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

В работе проанализировано влияние вида шлифования на шероховатость обработанной поверхности при прочих одинаковых условиях обработки. Установлено, что с позиции формирования идентичных параметров шероховатости внутреннее врезное шлифование позволяет вести обработку с большей производительностью по сравнению с круглым наружным и плоским врезным шлифованием.

**Ключевые слова:** Вид шлифования, параметр шероховатости, высота неровностей, единичный срез

### **Введение**

В условиях рыночных отношений обеспечение требуемого качества выпускаемых изделий является одним из условий конкурентоспособности продукции. При механической обработке, одним из критериев оценки качества деталей является обеспечение заданных параметров шероховатости обработанной поверхности.

В основу существующих методик расчета параметров шероховатости положен геометрический фактор, предполагающий образование неровностей на обработанной поверхности в процессе резания, форма которых копирует размеры и форму режущих зерен [1, 2]. Таким образом, формирование шероховатости обрабатываемой поверхности определяется кинематикой шлифования и геометрией рабочей поверхности круга (РПК). Известные способы расчета высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности [3, 4, 5] не учитывают разновысотного расположения зерен в процессе обработки, а используют ее лишь при определении количества активных зерен. В действительности, формирование шероховатости происходит разновысотно расположенными вершинами зерен, а глубина среза и их общее количество, участвующее в формировании параметров шероховатости, определяется не только разновысотностью, но и условиями контактирования зерна с обрабатываемой поверхностью, что учтено в методике расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности при плоском врезном шлифовании [6]. Наличие этой методики позволяет выполнить анализ влияния вида шлифования на параметр шероховатости обработанной поверхности, сведения о чем в литературе отсутствуют.

Цель работы: исследование влияния вида шлифования на шероховатость обработанной поверхности.

### **Основное содержание работы**

Перед выполнением исследований рассмотрим методику расчета высоты неровностей профиля шлифованной поверхности при круглом внутреннем шлифовании (рис. 1). При этом виде шлифования круг радиусом  $R_k$  вращается со скоростью  $V_k$ , м/с, деталь вращается в противоположном направлении со скоростью  $V_d$ , м/мин, а формирование неровностей на обработанной поверхности осуществляется преимущественно сегментообразными, неперекрывающимися в поперечном

направлении срезами.

Расчет высоты неровностей обработанной поверхности выполним при следующих допущениях:

- обрабатываемая поверхность в начальный период обработки представляет собой идеальную цилиндрическую поверхность, шероховатость на которой отсутствует;
- в пределах рассматриваемого интервала расчета режущие зерна на РПК считаются равновысокими, т.е. расположены на одной линии;
- упругие деформации системы СПИД и пластические искажения поперечного профиля срезов не учитываются.

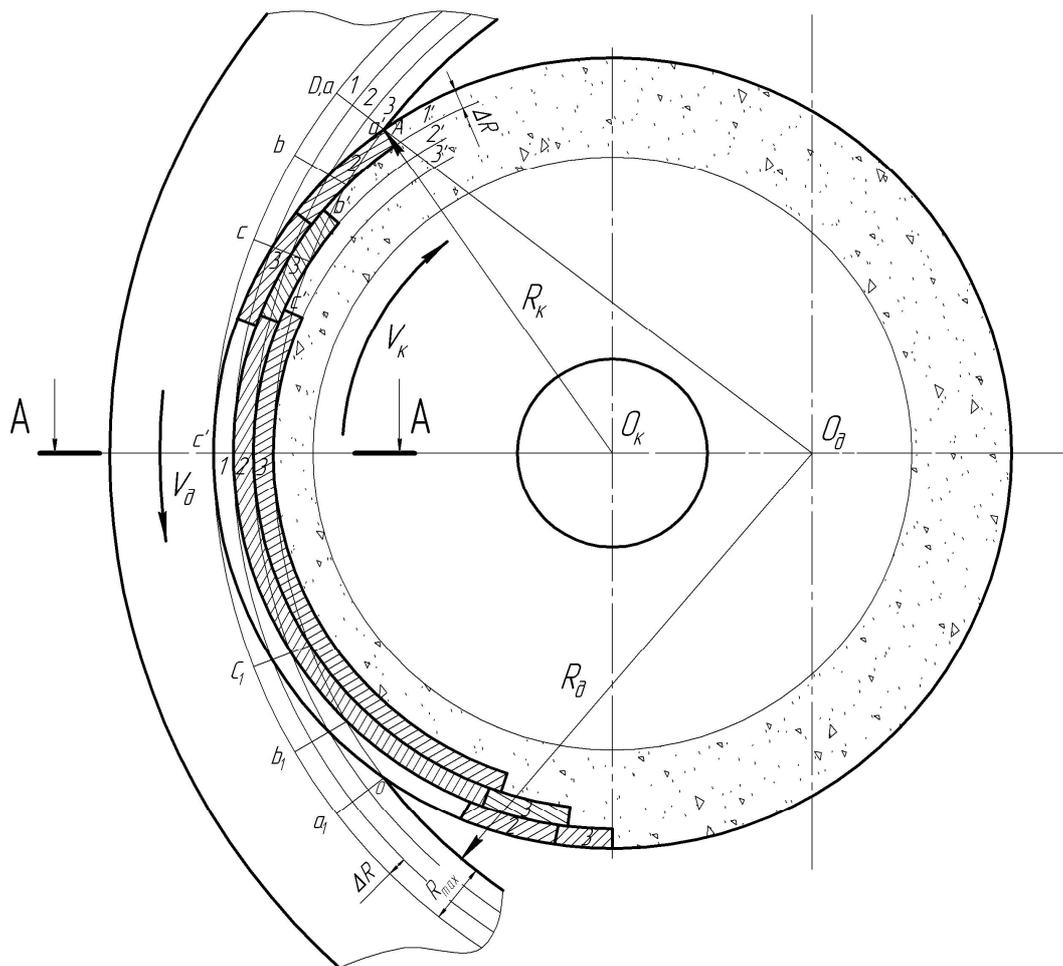


Рис. 1. Схема формирования неровностей на обработанной поверхности участками РПК при круглом внутреннем шлифовании

Рассмотрим порядок формирования поперечного профиля шлифованной поверхности заготовки (см. рис. 1), как совокупности следов отдельных зерен, расположенных на участке РПК и оставленных в рассматриваемом поперечном сечении. На рис. 2 показано сечение А-А обработанной поверхности, сформированное в соответствии с принятыми допущениями. Учитывая, что неровности располагаются на одной линии  $R_{max}$  примем равным  $R_z$ .

Наибольшую высоту неровностей профиля  $R_{max}$  разобьем на ряд малых интервалов  $\Delta R$ , величина которых определяется из условия попадания в единичный

интервал минимум одного зерна.

Рабочую поверхность круга, участвующую в формировании параметров шероховатости в поперечном сечении детали, также разобьем на ряд слоев толщиной  $\Delta R$  и определим участки на поверхности круга, зерна которых оставят следы в соответствующих интервалах сечения детали.

В общем случае в сечении  $AD$  (см. рис. 1) оставят свои следы зерна, вершины которых расположены в объеме шлифовального круга  $l_\phi \cdot R_{\max} \cdot l_{\delta a3} \cdot k$ :

где  $l_{\delta a3}$  – базовая длина профиля сечения обработанной поверхности, по которой рассчитывается параметр шероховатости, мм;

$l_\phi$  – длина дуги контакта круга с деталью, на которой расположены зерна, формирующие профиль неровностей, мм;

$k$  – коэффициент, учитывающий, что не все зерна на РПК более глубоких слоев, оставят следы в рассматриваемом сечении.

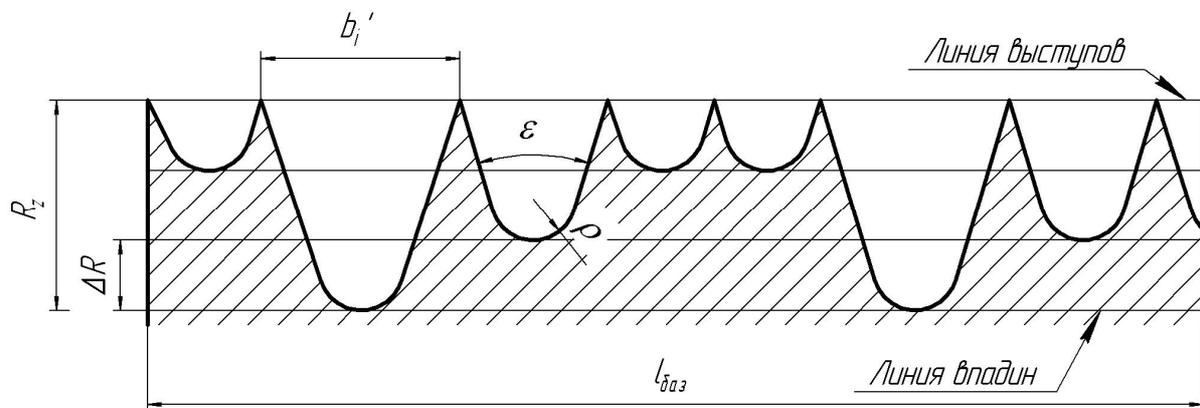


Рис. 2. Шероховатость обработанной поверхности, сформированная единичными срезами

Образование царапин на профиле  $AD$  начинается с момента его расположения в точке  $a$ . При перемещении сечения  $AD$  из точки  $a$  в точку  $b$  в результате вращения заготовки в работу вступят наиболее выступающие зерна, вершины которых расположены в слое 1' шлифовального круга. Зерна, расположенные в объеме  $a'b' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ , оставят следы в интервале 3 сечения  $AD$ , ширина срезов которых будет равна  $b'(\Delta R)$ . При дальнейшем перемещении из точки  $b$  в точку  $c$  в работу вступят зерна, расположенные в слое 1' объемом  $b'c' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ , и оставят следы в интервале 2 сечения шириной  $b'(2\Delta R)$ . Также в работу вступят вершины зерен, расположенные в более глубоком слое 2' круга объемом  $b'c'' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ . Эти зерна оставят следы в интервале 3 детали шириной  $b'(\Delta R)$ .

При перемещении сечения  $AD$  из точки  $c$  к оси круга в работу вступят зерна слоя 1' объемом  $c'c'' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ . Они оставят следы в интервале 1 шириной  $b'(3\Delta R)$ . Зерна слоя 2' объемом  $c'c''' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$  оставят следы в интервале 2 шириной  $b'(2\Delta R)$ . В работу также вступят зерна, расположенные в слое 3' объемом  $c'c'''' \times l_{\delta a3} \times \Delta R$ . Они оставят следы в интервале 3 шириной  $b'(\Delta R)$ .

После прохождения сечением  $AD$  линии центра шлифовального круга обработка

интервалов 1, 2, 3 закончится соответственно в точках  $c_1, b_1, a_1$ .

Таким образом, последовательно наращивая глубину шлифования на шаг  $\Delta R$ , будем определять суммарную ширину срезов в интервалах сечения 1, 2, 3 и т.д. Критерием полной обработки поперечного сечения обработанной поверхности будет условие, согласно которому суммарная ширина единичных срезов  $b'_i$ , оставленных отдельными зернами, будет больше или равна базовой длине  $l_{\text{баз}}$ :

$$\sum_{i=1}^{Z_c} b'_i \geq l_{\text{баз}} \cdot 10^3; \quad (1)$$

где  $Z_c$  – количество зерен, участвующих в формировании рельефа;

$b'_i$  – ширина среза единичным зерном в исследуемом  $i$ -м сечении, мкм.

Представим левую часть неравенства (1) как сумму произведений ширины единичных срезов на количество режущих зерен, оставивших свои следы в  $i$ -м сечении для каждого интервала расчета  $i$ , после чего неравенство (1) примет вид:

$$\frac{l_{\text{баз}} \cdot 60 \cdot V_k}{V_\partial \cdot S_{3n}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_\partial \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}{R_\partial - R_k}} \times \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^i (\sqrt{N_1} - \sqrt{(N_1 - 1)}) \cdot b'[(N - i - N_1 + 2) \cdot \Delta R] \geq l_{\text{баз}} \cdot 10^3 \quad (2)$$

где  $N$  – номер исследуемого интервала;

$i$  – номера интервалов, входящих в  $N$ ,  $i \in 1, 2, \dots, N$ ;

$N_1$  – участки поверхности круга, обрабатываемые  $i$ -е интервалы,  $N_1 \in 1, 2, \dots, N - i + 1$ ;

$F(i\Delta R)$  – вероятность попадания вершин зерен в  $i$ -й интервал, определяемый с использованием закона Вейбулла;

$S_{3n}$  – расстояние между зернами на рабочей поверхности круга.

Так как в правой и левой частях уравнения (2) находится базовая длина, то после ее сокращения, а также обозначения выражения:

$$\frac{60 \cdot V_k}{V_\partial \cdot S_{3n}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_\partial \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}{R_\partial - R_k}} = A,$$

уравнение (2) примет вид:

$$A \cdot \sum_{i=1}^N F(i\Delta R) \sum_{N_1=1}^i (\sqrt{N_1} - \sqrt{(N_1 - 1)}) \cdot b'[(N - i - N_1 + 2) \cdot \Delta R] \geq 10^3. \quad (3)$$

Величины, входящие в формулу (3), рассчитываются по следующим зависимостям:

$$F(i\Delta R) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{\Delta R^m}{X_0}\right), & \text{при } i = 1; \\ \exp\left(-\frac{(i-1) \cdot \Delta R^m}{X_0}\right) - \exp\left(-\frac{i \cdot \Delta R^m}{X_0}\right), & \text{при } i \geq 1; \end{cases} \quad (4)$$

где  $m$  и  $X_0$  – параметры распределения Вейбулла, описывающего распределение вершин зерен на РПК по высоте.

Ширина единичного среза определяется по зависимостям:

$$b'[(N-i-N_1+2)\Delta R] = \begin{cases} 2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho [(N-i-N_1+2) \cdot \Delta R] - [(N-i-N_1+2)\Delta R]^2}, \\ \text{при } (N-i-N_1+2)\Delta R < \rho \cdot (1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}); \\ 2 \cdot \left\{ \sqrt{2 \cdot \rho \cdot a_z - a_z^2} + [(N-i-N_1+2) \cdot \Delta R - a_z] \cdot \operatorname{tg} \frac{\varepsilon}{2} \right\}, \\ \text{при } (N-i-N_1+2)\Delta R \geq \rho \cdot (1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}); \end{cases} \quad (5)$$

$a_z$  – толщина единичного среза,  $a_z = \rho \cdot \left(1 - \sin \frac{\varepsilon}{2}\right)$ ;

$\varepsilon$ ,  $\rho$  – угол заострения и радиус округления вершины конической модели зерна соответственно (см. рис. 2).

При круглом наружном шлифовании коэффициент:

$$A = \frac{60 \cdot V_k}{V_d \cdot S_{3n}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}{R_d + R_k}},$$

а при плоском –

$$A = \frac{60 \cdot V_k}{V_d \cdot S_{3n}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_k \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}.$$

Расчет суммарной ширины срезов в сечении  $AD$  начинается с предположения, что глубина шлифования равна  $\Delta R$ . В этом случае неравенство (3) принимает вид:

$$A \cdot F(\Delta R) \cdot b(\Delta R) \geq 10^3. \quad (6)$$

Если неравенство (6) не выполняется, переходят к расчету суммарной ширины срезов в предположении, что глубина шлифования равна  $2\Delta R$ , при этом результаты расчета по неравенству (6) аннулируются. В этом случае для количества интервалов  $N = 2$  неравенство (3) запишется в виде:

$$A \cdot \sum_1^2 F(\Delta R) \cdot [b'(2 \cdot \Delta R) + (\sqrt{2} - 1) \cdot b'(\Delta R)] + F(2 \cdot \Delta R) \cdot b'(\Delta R) \geq 10^3, \quad (7)$$

Если же неравенство (7) также не выполняется, переходят к расчету ширины срезов для количества интервалов  $N = 3$ :

$$A \cdot \sum_1^3 F(\Delta R) \cdot [b'(3 \cdot \Delta R) + (\sqrt{2} - 1) \cdot b'(2 \cdot \Delta R) + (\sqrt{3} - \sqrt{2}) \cdot b'(\Delta R)] + \\ + F(2 \cdot \Delta R) \cdot [b'(2 \cdot \Delta R) + (\sqrt{2} - 1) \cdot b'(\Delta R)] + F(3 \cdot \Delta R) \cdot b'(\Delta R) \geq 10^3. \quad (8)$$

Аналогичным образом рассчитывают суммарную ширину срезов до тех пор, пока неравенство (3) не выполниться.

В случае выполнения неравенства (3) параметр  $R_z$  определяется по формуле:

$$R_z = N \cdot \Delta R,$$

где  $N$  – номер интервала, на котором выполнено неравенство (3).

Как отмечалось ранее, минимально допустимое значение величины интервала расчета  $\Delta R$  определяется, исходя из условия вероятного попадания в него минимум одного зерна. Учитывая, что параметр  $R_z$  неизвестен, а также с целью повышения точности расчета, вместо базовой длины  $l_{баз}$ , на которой определяются параметры шероховатости, заменим высотой шлифовального круга  $B$ . Тогда формула для расчета минимальной величины  $\Delta R$  при внутреннем шлифовании примет вид:

$$\frac{B \cdot 60 \cdot V_k}{V_d \cdot S_{zn}^2} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R_k \cdot R_d \cdot \Delta R \cdot 10^{-3}}{R_d - R_k}} \cdot F(\Delta R) \geq 1, \quad (9)$$

где  $B$  – ширина шлифовального круга, мм.

Неравенство (9) рассчитывается последовательным увеличением интервала  $\Delta R$  с принятым шагом.

Для оценки влияния вида шлифования на высоту неровностей профиля  $R_z$  обработанной поверхности с использованием предложенной методики была разработана программа для ПЭВМ в среде Mathcad.

Расчеты были выполнены для плоского, внутреннего и круглого наружного шлифования кругом 1A1 250×75×16×5 AC6 100/80–4–M2-01 при следующих режимах:  $V_k = 35$  м/с,  $V_d = 6$  м/мин, диаметр внутреннего шлифуемого отверстия  $D_d = 300$  мм, диаметр обработки при круглом шлифовании  $D_d = 100$  мм.

Параметры рельефа рабочей поверхности круга: модель зерен – конус с округленной вершиной радиусом  $\rho = 6,69$  мкм и углом заострения  $\varepsilon = 91^\circ$ , расстояние между рабочими зёрнами на РПК  $S_{zn} = 0,32$  мм, распределение разновысотности зерен описывается законом Вейбулла с параметрами  $X_0 = 81,2$  и  $m = 1,45$ .

Результаты расчета (табл.) показывают, что при одинаковых условиях обработки параметр шероховатости шлифованной поверхности  $R_a$  имеет наибольшую величину при наружном шлифовании и наименьшую – при внутреннем шлифовании. Это обусловлено различными значениями дуг контакта круга с обрабатываемой

поверхностью, которые через отношение  $\frac{60 \cdot V_k}{V_\partial}$  увеличивают длину участка РПК, принимающего участие в формировании неровностей в отдельном сечении обработанной поверхности, и, как следствие, количество активных зерен (см. столбец 2 табл. 1).

Таблица. Влияние вида шлифования кругом 1А1 250×76×15×5 АС6 100/80 4 М2-01 на шероховатость обработанной поверхности стали Р6М5Ф3

Вид шлифования	Длина дуги контакта $L$ , мм	Высота неровностей профиля $R_z$ , мкм	Среднее арифметическое отклонение профиля * $R_a$ , мкм
1	2	3	4
Внутренне ( $D_\partial = 300$ мм)	0,37	1,80	0,45
Плоское	0,23	2,64	0,66
Круглое ( $D_\partial = 100$ мм)	0,16	3,44	0,86

\*Примечание: среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  определяли по параметру  $R_z$ , используя следующие зависимости [8]:  $R_a = \frac{R_z}{4}$ ,  $R_a = \frac{R_z}{5}$ , для, соответственно, диапазонов  $R_a = 0,025 \div 3,2$  мкм и  $R_a = 3,2 \div 6,3$  мкм.

### Выводы

1. При одинаковых режимах обработки наименьшее значение параметра шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  обеспечивается при внутреннем шлифовании ( $R_a = 0,45$  мкм) и наибольшее – при круглом шлифовании ( $R_a = 0,86$  мкм), что обусловлено различной длиной участка РПК, формирующего неровности в каждом исследуемом сечении поверхности детали.

2. С позиции формирования идентичных параметров шероховатости обработанной поверхности внутреннее врезное шлифование, при прочих равных условиях, позволяет вести обработку с большей производительностью по сравнению с круглым наружным и плоским врезным шлифованием.

3. Режимы шлифования, обеспечивающие заданные параметры шероховатости, найденные для одного вида шлифования нельзя переносить на другие виды шлифования.

### Список литературы

1. Ящерицын П.И. Качество поверхности и точность деталей при обработке абразивными инструментами. – Минск: Высшая школа, 1959 г. – 230 с.

2. Маталин А.А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: ГНТИ, 1956. – 252 с.

3. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. – Саратов, 1975 г. – 189 с.

4. Редько С.Г., Королев А.В. Вероятностный расчет шероховатости шлифованной поверхности. Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки. – Л.: 1974 – С. 73-79.

5. Кулинич С.И. Вероятность участия зерен шлифовального круга в процессе резания. – Резание и инструмент. 1971, №3, с. 20-24.

6. Матюха П.Г., Терехова Л.К. Расчет параметров шероховатости шлифованной поверхности. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. М.: МВТУ им. Баумана, 1982, №10. – С. 101-105.

7. Матюха П.Г. Исследование форм среза при врезном алмазно-искровом шлифовании // Синтетические алмазы. 1979 г. Вып. 1. С. 39-42.

8. Краткий справочник конструктора: Справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1983. – 464 с.

*Рецензент: Калафатова Л.П.*

*Надійшла до редколегії: 04.04.2011р.*

**П.Г. МАТЮХА**

**В.В. ГАБИТОВ**

Донецький національний технічний університет

**ВПЛИВ ВИДУ ШЛІФУВАННЯ НА ШОРСТКІСТЬ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ**

В роботі проаналізовано вплив виду шліфування на шорсткість обробленої поверхні при інших однакових умовах оброблення. Встановлено, що з позиції формування ідентичних параметрів шорсткості внутрішнє врізне шліфування дозволяє проводити оброблення з більшою продуктивністю в порівнянні з круглим зовнішнім та плоским врізним шліфуванням.

**Вид шліфування, параметр шорсткості, висота нерівностей, одиничний зріз**

**P.G. MATYUHA**

**V.V. GABITOV**

Donetsk national technical university

**INFLUENCE OF KIND OF GRINDING ON THE ROUGHNESS OF FINISHED SURFACE**

In the paper the influence of grinding kind article on the roughness of machined surface is analyzed with equal other machining conditions. It is find, that for forming of equal roughness parameters the inside cut-in grinding allows to perform the processing with highest productivity as compared with round outside grinding and plane cut-in grinding.

**Grinding kind of, roughness parameter, roughness height, single cut**

УДК 621.923

**В.В. ПОЛТАВЕЦ** (канд. техн. наук, доц., vvardon@mail.ru)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

**РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОГО  
МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ  
ПУТЁМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРОЦЕССА**

Описано развитие экспериментально-теоретического метода оптимизации режимов шлифования путём использования обобщенного показателя процесса, которое позволило упростить математическую модель оптимального режима шлифования за счёт уменьшения количества математических выражений, описывающих совокупность технических ограничений.

**Ключевые слова:** Шлифование, оптимальный режим, техническое ограничение, целевая функция, режущая способность, глубина резания, подача на врезание

**Введение**

Среди всех используемых на практике методов определения оптимальных или рациональных режимов резания наибольшую научную ценность и наибольшее практическое применение имеет аналитический способ определения режимов. Этот способ основывается на использовании функциональных зависимостей между входными факторами и выходными параметрами, характеризующими процесс обработки. Совокупность этих зависимостей образует математическую модель процесса обработки.

С использованием математической модели процесса определение режимов резания аналитическим способом при шлифовании выполняется в три этапа [1]:

а) составление системы уравнений, описывающих технические ограничения, налагаемые на режим резания требованиями к детали, станком, инструментом и условиями производства;

б) математическое описание целевой функции, т.е. функции, выражающей цель оптимизации;

в) совместное рассмотрение технических ограничений и целевой функции и определение на этой основе оптимального режима шлифования.

Математические выражения, описывающие технические ограничения, однотипны и представляются в виде неравенств [1]:

$$Z^* < (>) Z(v, v_1, t, \dots),$$

в левой части которых приведено заданное (предельное) значение какой-либо ограничивающей величины или параметра  $Z^*$ , а в правой – фактическое значение этой величины или параметра при той или иной комбинации элементов режима резания и других условий обработки ( $v$  – скорость круга,  $v_1$  – скорость подачи заготовки,  $t$  – глубина резания и др).

Технические ограничения, налагаемые на режим резания при шлифовании требованиями к изделию (ТИ), следующие [1]:

– предельно допустимая высота неровностей профиля обработанной поверхности  $Ra^*$  (ТИ1);

– требуемая точность детали после шлифования (допуск на размер шлифованной поверхности  $\delta^*$ ) (ТИ2);

– температура шлифуемой поверхности  $\Theta_{\max}^*$ , предельно допустимая с точки зрения прижогов, остаточных напряжений или других показателей качества поверхностного слоя (ТИЗ).

Технические ограничения, налагаемые на режим резания станком (ТС) [1]:

- мощность привода шлифовального круга  $N^*$  (ТС1);
- наибольшая и наименьшая частоты вращения шпинделя ( $n_{\max}^*$ ,  $n_{\min}^*$ ) (ТС2);
- наибольшее и наименьшее значения продольной и поперечной подач ( $v_{1\max}^*$ ,  $v_{1\min}^*$ ,  $S_{2\max}^*$ ,  $S_{2\min}^*$ ) (ТС3).

Технические ограничения, налагаемые на режим резания шлифовальным кругом (ТК) [1]:

- требуемая стойкость инструмента  $T^*$  (ТК1);
- предельная температура на режущих зёрнах  $\Theta_3^*$  (ТК2);
- прочность круга  $v_{\max}^*$  (ТК3).

Целевые функции представляют математическое описание цели, с которой производят оптимизацию режима шлифования. Такими целями (критериями оптимизации) могут быть: наименьшая себестоимость обработки, наибольшая производительность, минимальные затраты на эксплуатацию шлифовального инструмента и другие [2].

Математические выражения технических ограничений ТИ1 - ТИЗ, ТС1 - ТС3, ТК1 - ТК3 совместно с математической записью целевой функции представляют математическую модель классического поиска оптимального режима шлифования (рис. 1).

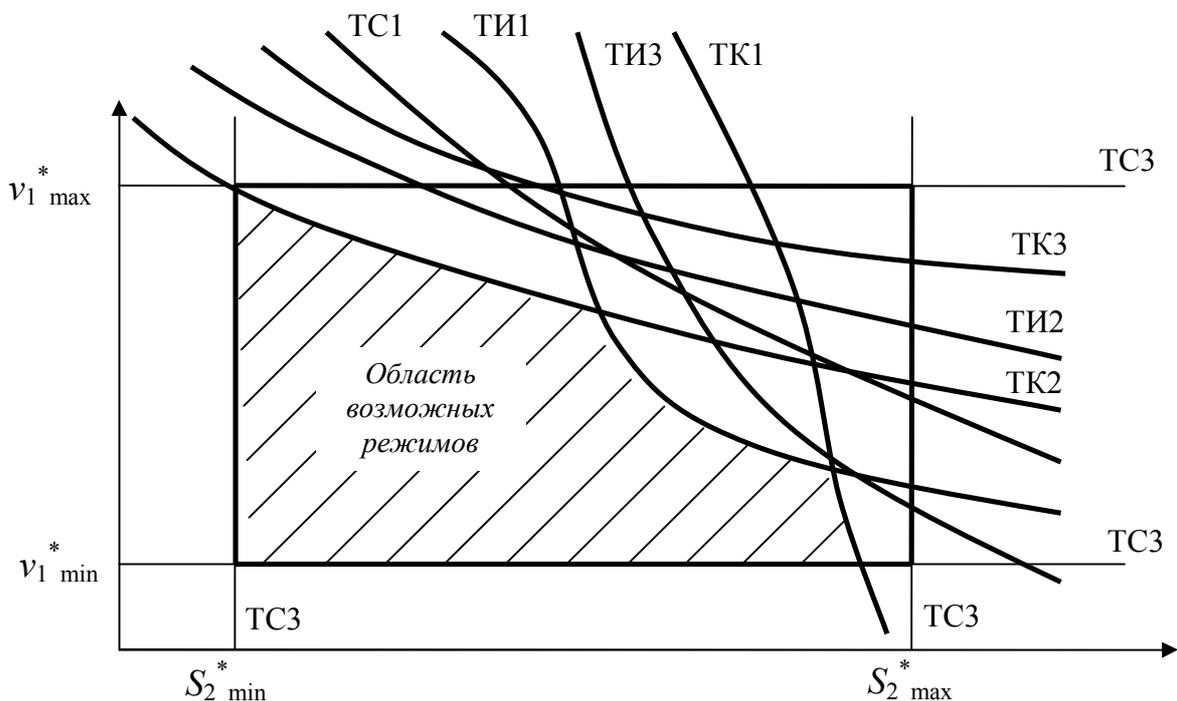


Рис. 1. Принципиальная схема области возможных режимов резания при шлифовании [1]

ТИ1-ТИЗ – технические ограничения, налагаемые на режим резания изделием;  
 ТС1, ТС3 – технические ограничения, налагаемые на режим резания станком;  
 ТК1-ТК3 – технические ограничения, налагаемые на режим резания шлифовальным кругом

Поскольку частота вращения шпинделя шлифовального станка и, соответственно, скорость круга чаще всего не являются управляемым параметром процесса обработки, то, как видно из рис. 1, техническое ограничение по частоте вращения шпинделя ТС2 в математическую модель поиска оптимального режима шлифования классическим методом не включено.

Если ограничения и целевая функция представлены в виде линейных многочленов, то решение этой системы выполняют методом линейного программирования [3]. Если же выражения для ограничений и целевой функции нельзя линеаризовать, используют нелинейные методы оптимизации, в частности, методы многофакторного планирования [4], теории функциональных определителей и метод множителей Лагранжа [2].

Методика определения режимов, изложенная в [1], подразумевает проведение комплекса экспериментальных исследований с целью получения зависимостей, описывающих технические ограничения ТИ1, ТИ2, ТИ3, ТК1, ТК2. Это обуславливает её высокую трудоёмкость.

Целью данной работы является развитие описанной выше классической экспериментально-теоретической методики оптимизации режимов шлифования на основе использования обобщенного показателя процесса обработки, включающего в себя сразу несколько технических ограничений из рассмотренной их совокупности, что приведёт к снижению трудоёмкости поиска оптимальных режимов.

### **Основное содержание работы**

Сущность предлагаемого направления развития классической теоретико-экспериментальной методики оптимизации режимов алмазно-абразивной обработки состоит в уменьшении количества математических выражений, образующих математическую модель оптимального режима за счёт использования обобщенного показателя процесса шлифования. В качестве обобщенного показателя процесса шлифования нами предлагается новое понятие – мгновенная текущая лимитированная режущая способность шлифовального круга, которая представляет собой количество сошлифованного материала в любой момент времени работы круга на режимах, удовлетворяющих лимитирующему техническому ограничению [5].

Приведём обоснование использования текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга в качестве обобщенного показателя процесса. Сущность этого показателя в явном виде проявляется при упругой схеме обработки, когда величина съёма обрабатываемого материала является переменной во времени.

Известно, что, с одной стороны, закономерность изменения режущих свойств круга при обработке по упругой схеме отражает изменение производительности обработки в условиях нестационарности процесса. С другой стороны, лимитированная режущая способность круга отражает усилие поджима заготовки к рабочей поверхности круга (РПК), которое выступает одновременно в качестве технического ограничения ТИ3, налагаемого на режимы обработки деталью (температура фазово-структурных превращений в поверхностном слое заготовки или другие показатели качества поверхностного слоя), а также ограничений ТК2 и ТК3, налагаемых на режимы обработки инструментом (температура окисления алмазов при алмазном шлифовании, прочность зёрен сверхтвёрдых материалов (СТМ), прочность шлифовального круга).

Усилие поджима заготовки к РПК при обработке по упругой схеме, удовлетворяющее перечисленным ограничениям, рассчитывается аналитически или же

определяется экспериментально.

Как видно из вышесказанного, текущая лимитированная режущая способность круга аккумулирует в себе сразу три технических ограничения, которые в классическом методе поиска оптимальных режимов шлифования описывают несколькими отдельными уравнениями (ограничения ТИЗ, ТК2, ТК3). На основе этого можно утверждать, что текущая лимитированная режущая способность шлифовального круга при описании процесса алмазно-абразивной обработки и оптимизации его режимов выступает в качестве обобщенного (интегрального) показателя процесса.

Техническое ограничение ТИ2 по требуемой точности детали после шлифования для упругой схемы обработки можно не учитывать, так как эта схема более часто применяется для таких видов обработки, при которых требования по точности размеров изделия не предъявляются (например, затачивание инструмента), а определяющими являются требования по состоянию обработанной поверхности (например, отсутствие дефектов поверхностного слоя).

При шлифовании с управляющими воздействиями на рабочую поверхность шлифовального круга для поддержания его высокой режущей способности структура комплекса используемых технических ограничений существенно изменяется, так как оптимизации подвергаются как режимы шлифования, так и режимы управляющих воздействий. Наличие управляющих воздействий даёт возможность исключить из совокупности ограничений ограничение по стойкости круга (ТК1), так как появляется возможность варьировать этой величиной в зависимости от вида и условий обработки.

Прочность современных кругов из сверхтвёрдых материалов такова, что условия превышения допустимых напряжений в корпусе круга за счёт высоких режимов на подавляющем большинстве современных шлифовальных станков практически недостижимы. Если же в процессе обработки возникнут большие силы резания, то это в первую очередь приведёт к невыполнению технических ограничений, налагаемых на режим резания требованиями к изделию (ТИ1, ТИ2, ТИ3). Соответственно, кривая ТК3 в оптимизационном поле (см. рис. 1) заведомо будет расположена выше любой из кривых ТИ1, ТИ2, ТИ3, и ограничение по прочности круга ТК3 также можно исключить из комплекса включаемых в модель ограничений.

Таким образом, при шлифовании кругами из СТМ по упругой схеме с управляющими воздействиями на рабочую поверхность круга математическая модель процесса определения режимов резания аналитическим способом будет иметь следующий вид (рис. 2):

1. Совокупность технических ограничений, состоящая из трёх компонентов:

а) технические ограничения, налагаемые на режим резания при шлифовании требованиями к изделию (ТИ), которые включают в себя предельно допустимую высоту неровностей профиля обработанной поверхности  $Ra$  (ТИ1);

б) технические ограничения, налагаемые на режим резания станком (ТС):

– мощность привода шлифовального круга  $N^*$  (ТС1);

– наибольшая и наименьшая частоты вращения шпинделя ( $n_{\max}^*$ ,  $n_{\min}^*$ ) (ТС2);

– наибольшее и наименьшее значения продольной и поперечной подач ( $v_{1\max}^*$ ,  $v_{1\min}^*$ ,  $S_{2\max}^*$ ,  $S_{2\min}^*$ ) (ТС3).

б) закон изменения во времени текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга (ТЛРСШК) для конкретных условий обработки, выступающий в качестве обобщенного параметра процесса обработки, который аккумулирует технические ограничения по температуре шлифуемой поверхности ТИЗ и температуре на зёрнах сверхтвёрдого материала ТК2.

2. Целевая функция, в качестве которой в большинстве случаев удобнее всего принять удельную технологическую себестоимость процесса шлифования, т.е. затраты на осуществление процесса обработки, приходящиеся на единицу изготавливаемой продукции или на единицу объема сошлифованного материала.

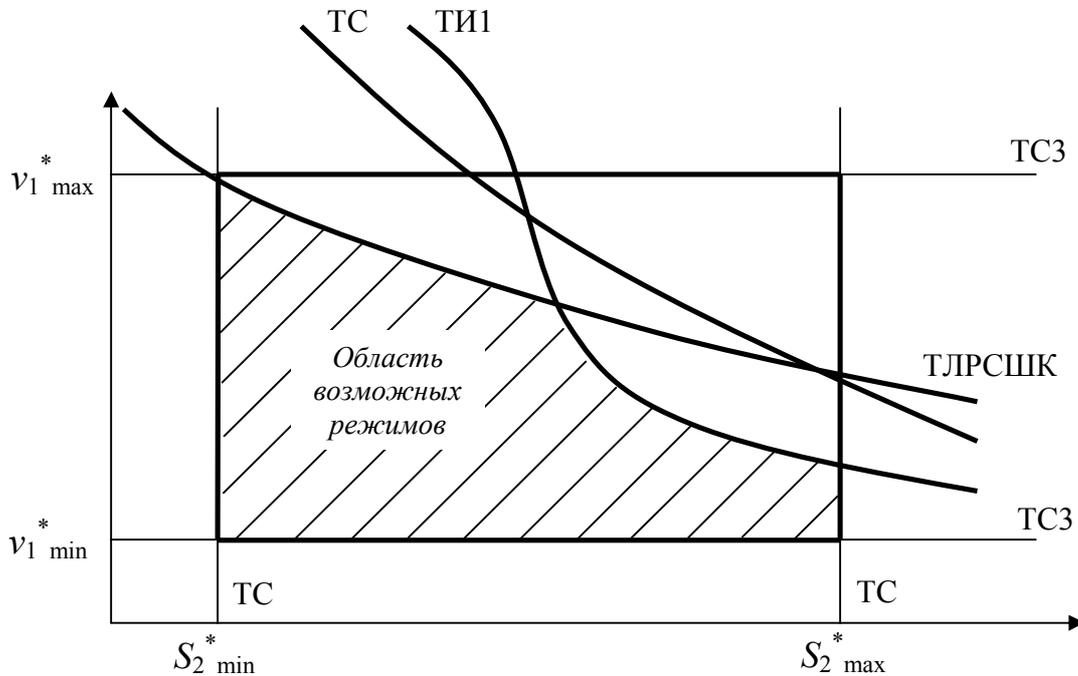


Рис. 2. Схема области возможных режимов резания при шлифовании по упругой схеме с управляющими воздействиями на РПК

ТИ1 – техническое ограничение по предельно допустимой высоте неровностей профиля обработанной поверхности

ТС1, ТС3 – технические ограничения, налагаемые на режим резания станком

ТЛРСШК – техническое ограничение, определяемое законом изменения во времени текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга

Ограничения, налагаемые требуемыми параметрами шероховатости обработанной поверхности, можно найти как теоретически [6], так и экспериментальным путем. Ограничения, налагаемые на режим резания станком, полностью определяются его паспортными данными.

При шлифовании по упругой схеме с поддержанием постоянной радиальной силы поджима заготовки к шлифовальному кругу, которая уравнивает радиальную составляющую силы резания (сила поджима  $P_n = P_y$ ), снижение со временем режущей способности РПК проявляется через изменение глубины шлифования. Таким образом, эволюция подсистемы резания технологической системы алмазно-абразивной обработки во времени в результате ухудшения режущих свойств РПК при обработке по упругой схеме однозначно описывается изменением во времени фактической глубины шлифования  $t_\phi = f(\tau)$ .

Закономерность изменения глубины шлифования  $t_\phi$  во времени обработки  $\tau$  по упругой схеме вследствие ухудшения режущих свойств РПК в результате процессов изнашивания зёрен, засаливания межзёрненного пространства, засаливания микрорельефа зёрен и т.п. описывается экспоненциальным выражением вида:

$$t_{\phi}(\tau) = t_{ycm} + \Delta t \cdot \exp(\alpha \tau), \quad (1)$$

где  $t_{ycm}$  – установившаяся глубина шлифования;

$\Delta t = t_0 - t_{ycm}$  – амплитуда снижения глубины шлифования;

$t_0$  – исходная глубина шлифования рельефом РПК, параметры которого сформированы после подготовки шлифовального круга к работе (например, электроэрозионной правкой);

$\alpha$  – эмпирический коэффициент.

Уравнение (1) отражает закон изменения текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга во времени при обработке по упругой схеме. Этот закон имеет аналогичный вид и отличается от зависимости (1) только размерностью. В дополнение к этому уравнение (1) является также передаточной функцией, позволяющей обеспечить одинаковые условия работы зёрен шлифовального круга при упругой и кинематически аналогичной жёсткой схемах обработки.

Для кинематически аналогичной жёсткой схемы шлифования оптимальными будут режимы, при которых обеспечивается изменение во времени подачи на врезание, соответствующее закономерности (1) или (при отсутствии технической возможности добиться идентичности подачи на врезание с глубиной резания для упругой схемы) достаточно близкое к этой закономерности [7].

### Выводы

1. Текущая лимитированная режущая способность шлифовального круга является обобщенным показателем процесса шлифования, который аккумулирует в себе несколько технических ограничений, используемых при поиске оптимальных режимов шлифования аналитическим способом.

2. Шлифование с одновременными управляющими воздействиями на рабочую поверхность шлифовального круга даёт возможность исключить из совокупности ограничений ограничение по стойкости круга, так как появляется возможность варьировать стойкостью в зависимости от вида и условий обработки.

3. Развитие теоретико-экспериментальной методики оптимизации режимов алмазно-абразивной обработки путём использования обобщенного показателя процесса позволяет упростить математическую модель оптимального режима шлифования за счёт уменьшения количества математических выражений, описывающих совокупность технических ограничений.

### Список литературы

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник/ Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.

2. Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 144 с.

3. Книппер Э.Е. Назначение режимов резания с применением ЭВМ / Э.Е. Книппер. – Брянск: БГТУ, 1997. – 179 с.

4. Ящерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Вышэйшая школа, 1990. – 512 с.

5. Полтавец В.В. Описание процесса алмазного шлифования ванадиевых инструментальных сталей по упругой схеме с использованием понятия текущей лимитированной режущей способности круга/ В.В. Полтавец // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і

машинознавство. Випуск 92. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – С. 92-98.

6. Матюха П.Г. Исследование высоты неровностей профиля поверхности резания при шлифовании / П.Г. Матюха, Л.К. Терехова // Резание и инструмент. Респ. межвед. научно-техн. сб. – Харьков: Изд-во “Основа”. – 1990. – Вып. 44. – С. 114-121.

7. Матюха П.Г. Обобщенные режимы процесса шлифования, обеспечивающие стабильные показатели качества / П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 7 (166). – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – С. 39-45.

*Рецензент: Калафатова Л.П.*

*Надійшла до редколегії: 09.04.2011р.*

### **В.В. ПОЛТАВЕЦЬ**

Донецький національний технічний університет

#### **РОЗВИТОК ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНОГО МЕТОДУ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ШЛІФУВАННЯ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО ПОКАЗНИКА ПРОЦЕСУ**

Описано розвиток експериментально-теоретичного методу оптимізації режимів шліфування шляхом використання узагальненого показника процесу, який дозволив спростити математичну модель оптимального режиму шліфування за рахунок зменшення кількості математичних виразів, що описують сукупність технічних обмежень.

**Шліфування, оптимальний режим, технічне обмеження, цільова функція,  
різальна здатність, глибина різання, подача на врзання**

### **V.V. POLTAVETS**

Donetsk National Technical University

#### **DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL METHOD OF GRINDING CONDITIONS OPTIMIZATION BY USE OF INTEGRATED PROCESS INDICATOR**

Development of experimental and theoretical method of grinding conditions optimization by use of integrated process indicator is described. This development has allowed to simplify the mathematical model of optimum grinding condition by means of reduction of quantity of mathematical expressions describing the set of technical restrictions.

**Grinding, optimum condition, technical restriction, criterion function,  
cutting capacity, cutting depth, straight-in down feed**

УДК 621.923

**Dr.-Ing. O. BYELYAYEV,**  
**Geschäftsführer D. HOFFMANN,**  
**Dipl.-Ing. (FH) J. PFROMMER**

*Firma ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH, Magdeburg, Deutschland*

**Prof. Dr.-Ing. habil. V. S. MAIBORODA,**  
**Dr.-Ing. W.N. GEICHUK**

*Nationale Technische Universität der Ukraine „Kiever polytechnisches Institut“*

### **EINIGE ASPEKTE DER SCHNEIDKANTENVERRUNDUNG AN BOHRWERKZEUGEN**

Im Artikel werden die wichtigsten Aspekte der Schneidkantenpräparation an Bohrwerkzeugen betrachtet. Es wird der erste industrielle Anlage-Prototyp zur magnetabrasiven Bearbeitung (MAB) von spanenden Schaftwerkzeugen präsentiert. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen belegen die hohe Effektivität des Einsatzes der MAB und untermauern die Notwendigkeit der Anpassung der Schneidkanten-Mikrogeometrie an die jeweilige Anwendung.

**Stichwort:** Magnetic-abrasive Behandlung, Schneidwerkzeug, Schneidkanten

Höhere Standzeiten und höhere Produktivität - sind die Hauptvoraussetzungen, die bei der Entwicklung und Herstellung von konkurrenzfähigen Zerspannungswerkzeugen erfüllt werden müssen. Neben der Entwicklung von neuen Werkzeuggeometrien und -materialien sowie von leistungsfähigeren Hartstoffschichtsystemen wird gegenwärtig das Hauptaugenmerk bei der Werkzeugherstellung verstärkt auf die Mikrogestalt der Werkzeugschneidkanten gerichtet. Hierbei handelt es sich vor allem um die Schneidkantenverrundung und die Qualität der Schneidkante [1-5].

Die in den letzten Jahren vorangetriebenen Forschungsarbeiten zur Schneidkantenmikro-strukturierung zeigen deutlich, dass die gezielte Schneidkantenverrundung eine wesentliche Erhöhung der Standzeit und somit der Leistungsfähigkeit des Werkzeugs ermöglicht (Bild 1).

Eine besondere Herausforderung stellt die Reproduzierbarkeit und die Kontrollierbarkeit der Kantenverrundung dar. Dies betrifft insbesondere Hochpräzisionswerkzeuge, die eine komplexe Geometrie aufweisen, wie z. B. Spiralbohrer, Stufenbohrer, Gewindebohrer, Schaftfräser, Reibahle. Darüber hinaus muss die Schneidkantenmikrogestalt der späteren Anwendung angepasst werden. Die Kenntnisse über die optimalen Schneidkantenradien bezogen auf den jeweiligen Einsatzfall bleiben jedoch immer noch sehr mangelhaft.

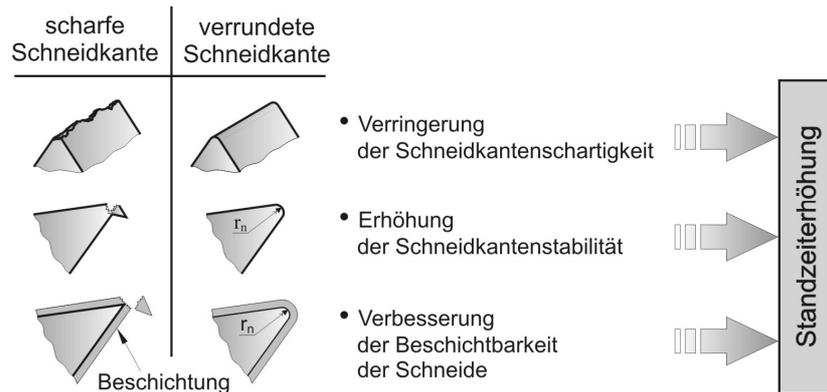


Bild 1: Standzeiterhöhung durch eine Kantenverrundung

Eine besondere Herausforderung stellt die Schneidkantenpräparation von Spiralbohrern dar. Da die Schnittgeschwindigkeit an der Schneidenspitze auf Null abfällt, wird der Materialabtrag in diesem Bereich nicht durch die freie Spanbildung, sondern durch Scher- und Quetschvorgänge erzeugt. Durch die Verrundung der Querschneide können diese Vorgänge erschwert werden, was zur Erhöhung der Reibung und somit zu einer höheren thermischen Belastung des Bohrers führt. Demzufolge werden ein schlechteres Verschleißverhalten und eine geringere Standzeit des Bohrers verursacht. Aus diesem Grunde liegt bei der Schneidkantenpräparation von Spiralbohrern die Aufgabe vor, die Hauptschneiden ohne starke Abstumpfung der Querschneide zu verrunden. Im Idealfall sollen die Schneidkanten eine Verrundung aufweisen, deren Größe mit zunehmendem Abstand von den Schneidenecken abnimmt. Dadurch kann ein verbessertes Schneidverhalten sowie eine höhere Standzeit des Bohrers gewährleistet werden.

Die Schneidenecken des Bohrers, die während des Bohrprozesses maximalen thermischen und mechanischen Belastungen unterzogen werden, weisen auf einen weiteren wichtigen Aspekt hin, der beim Thema Schneidkantenverrundung häufig unbetrachtet bleibt. Daher wird die Leistungsfähigkeit des Bohrers auch durch die Mikrogeometrie seiner Schneidenecken signifikant beeinflusst. Wird der Bohrer nach dem Schleifen einer nachgeschalteten Schneidkantenpräparation unterzogen, muss unbedingt beachtet werden, dass die Verrundung des Schneidenecken den optimalen Wert nicht überschreitet. Unter optimalem Wert wird dabei eine der Anwendung angepasste Eckenverrundung verstanden, die eine maximale Stabilität des Schneidenecken gewährleistet und dabei keinen negativen Einfluss auf den Materialabtrag hat. Wird dieser Wert geringfügig überschritten, so kann es zu einer rasanten Abnahme der Werkzeugstandzeit führen.

Für die Schneidkantenpräparation haben in den letzten Jahren vor allem solche Verfahren wie das Mikrostrahlen, das Bürsten und das Schleppschleifen an Bedeutung gewonnen.

Das Thema Schneidkantenpräparation steht auch seit Jahren im Mittelpunkt der vielfältigen Forschungsaktivitäten der Fa. ZOM Oberflächenbearbeitung GmbH. Zur Erzeugung definierter Kantenverrundungen an Zerspanungswerkzeugen werden sowohl das Verfahren Bürsten als auch ein innovatives Verfahren, die sog. magnetabrasive Bearbeitung (MAB) im Ringbad, eingesetzt [1, 5, 6].

Zur Realisierung des MAB-Verfahrens hat die Fa. ZOM zusammen mit ihrem ukrainischen Partner NTUU Kiev eine universale Anlage entwickelt und aufgebaut, die zur Schneidkantenpräparation von meistens rotierenden Schaftwerkzeugen eingesetzt wird (Bild2).

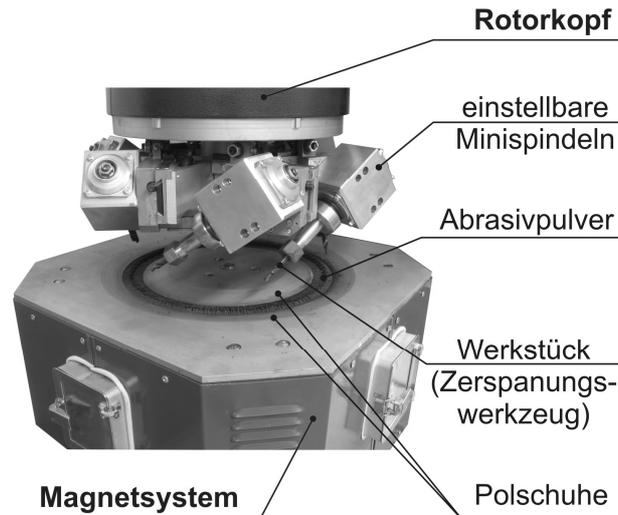


Bild 2: Hauptmodule der Anlage zur MAB im Ringbad „ZOMB-I“

Die Hauptmodule der Anlage „ZOMB-I“ sind ein Rotorkopf und ein Magnetsystem. Das Magnetsystem besteht aus zwei ringförmigen, koaxial gerichteten Polschuhen eines Elektromagneten. Die Polschuhe bilden eine Arbeitszone, die mit einem ferromagnetischen Abrasivpulver gefüllt wird. Mit Hilfe des Magnetfeldes wird das Pulver zu einem elastischen abrasiven Werkzeug geformt.

Die zu bearbeitenden Zerspanungswerkzeuge werden in 6 einstellbaren Spindeln eingespannt und in das mit dem Abrasivpulver gefüllte Ringbad getaucht. Während der Bearbeitung dreht sich der Rotorkopf um seine eigene Achse, wobei die zu bearbeitenden Werkzeuge zusätzlich in Eigenrotation versetzt werden. Das elastische Abrasivpulver passt sich der Werkzeugform an, wodurch nicht nur eine Kantenverrundung, sondern auch ein gleichmäßiges Polieren der funktionalen Werkzeugoberflächen gewährleistet wird.

Das Bild 3 zeigt den Zustand der Stirn- und der Umfangsschneide eines VHM-Schaftfräasers vor und nach der magnetabrasiven Bearbeitung. Es wird sichtbar, dass die durch den Schleifprozess bedingte Schneidkantenschartigkeit mittels der MAB verringert wird. Die gleichmäßig verrundeten Schneiden nehmen dabei eine nahezu geradlinige Form an. Außerdem wird die Qualität der die Schneidkanten bildenden Werkzeugoberflächen wesentlich verbessert, was durch Mikroabtrag und Glättung der Profilsitzen erklärt werden kann.

Sowohl die Bearbeitungskinematik, als auch die Prozessparameter werden in Abhängigkeit von dem Werkzeugmaterial, der Werkzeuggeometrie und von der Größe der Kantenverrundung bestimmt. Dabei wird die zu erzeugende Schneidkantenarchitektur durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst. Das sind beispielsweise Pulvertyp und Korngröße, Einstellwinkel des Werkzeuges, Bearbeitungsgeschwindigkeit, Eintauchtiefe, Magnetfeldstärke etc. Daher sind zur Erzeugung definierter Kantenmikrogeometrie detaillierte Kenntnisse über den Einfluss der einzelnen technologischen Prozessparameter der MAB erforderlich.

Die Universalität der „ZOMB-I“ Anlage wird durch die einstellbaren Minispindeln gewährleistet, die sich sowohl in der vertikalen Ebene einstellen lassen, als auch tangential zum Mitteldurchmesser des Ringbades verstellbar sind. Dadurch lassen sich Werkzeuge mit einer Länge von bis zu 200 mm und einem Durchmesser von bis zu 25 mm bearbeiten.

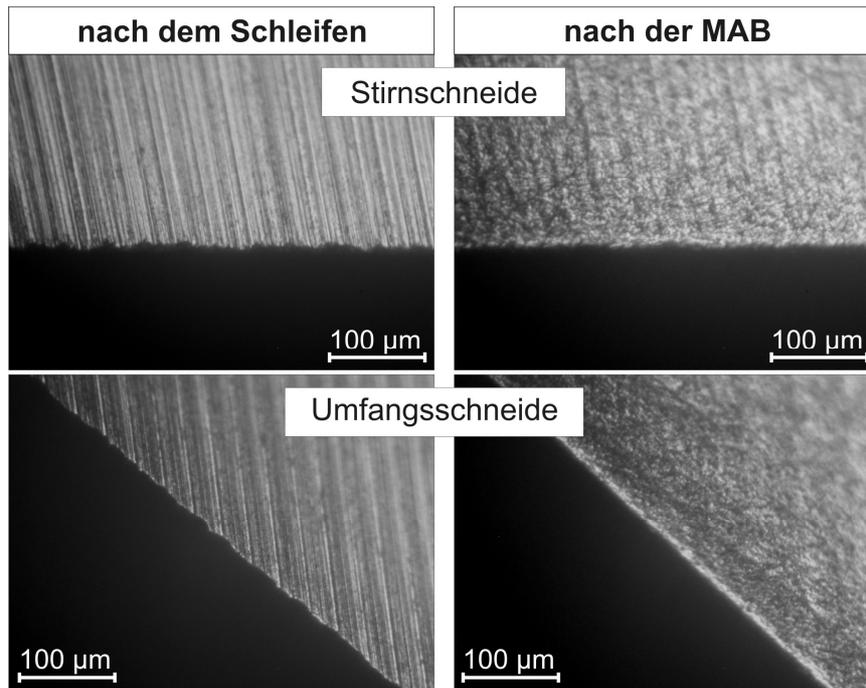


Bild 3: Kantenzustand eines Schaftfräsers vor und nach der MAB

Im Bild 4 sind die Aufnahmen einer durch die MAB verrundeten Schneidkante und einer gefeilten Schneidkante gegenübergestellt. Die manuell erzeugte Schutzfase weist eine rauhe und ungleichmäßige Oberflächentopographie auf. Demgegenüber ist bei dem magnetabrasiv bearbeiteten Bohrer eine glatte und gleichmäßige Kantenverrundung zu erkennen.

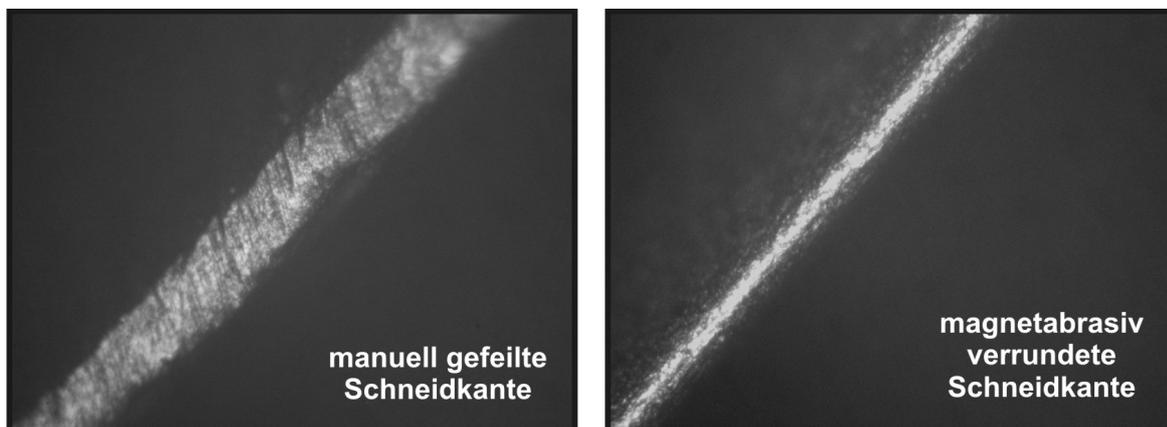


Bild 4: Kantenzustand eines Bohrers nach dem Feilen und nach der MAB

Die Dauer der Schneidkantenpräparation mittels der MAB ist hauptsächlich vom Werkzeug-durchmesser und von der Größe der erzeugten Kantenverrundung abhängig. Sie wird sehr stark durch die eingesetzte Pulverart und die Einstellung des Werkzeuges im Ringbad beeinflusst. Bei den Werkzeugen aus Schnellarbeitsstahl können definierte Kantenradien bereits nach 30 Sekunden Bearbeitung erreicht werden, wobei die Bearbeitungszeiten bei den Hartmetallwerkzeugen von 2 bis zu 10 min betragen.

Handelt es sich um Hartmetallspiralbohrer, so kann die Kantenverrundung mittels des MAB-Verfahrens mit einer Schutzfase kombiniert werden, die auf die Hauptschneiden unmittelbar beim Schleifen mit der CNC-Schleifmaschine angebracht wird (Bild 5).

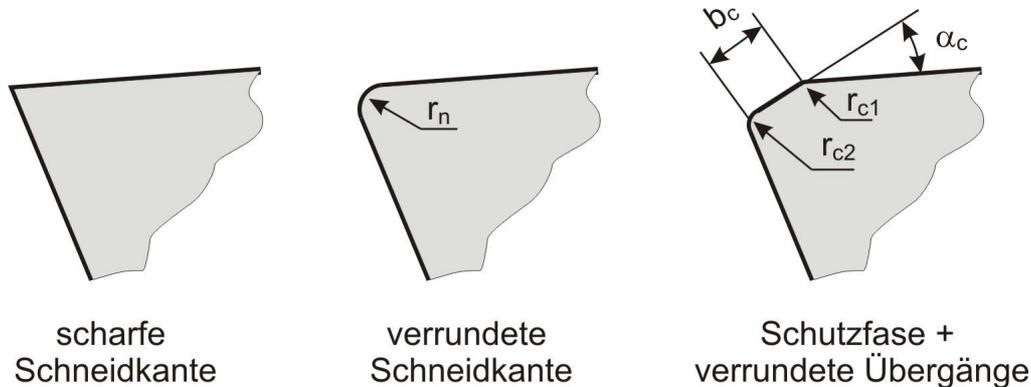


Bild 5: Kombination der Schutzfase mit der Kantenverrundung

Bei einer kombinierten Schneidkantenpräparation müssen die Breite der Schutzfase  $b_c$ , ihr Neigungswinkel  $\alpha_c$  und die Größe der Kantenverrundung, die durch die Übergangsradien  $r_{c1}$  und  $r_{c2}$  charakterisiert wird, an die jeweilige Anwendung angepasst werden.

Das in Bild 6 dargestellte Diagramm zeigt ein Ergebnis der Optimierung der Schneidkanten-Mikrogeometrie, das im Rahmen der gemeinsamen Untersuchungen der Fa. ZOM und der Fa. IFA Rotorion Holding GmbH erzielt wurde. Durch eine kombinierte Schneidkantenpräparation mit anschließender Abscheidung einer feinkristallinen Arc-PVD-Hartstoffschicht Mtec konnte fast eine 3-fache Standzeiterhöhung der Bohrer erreicht werden.

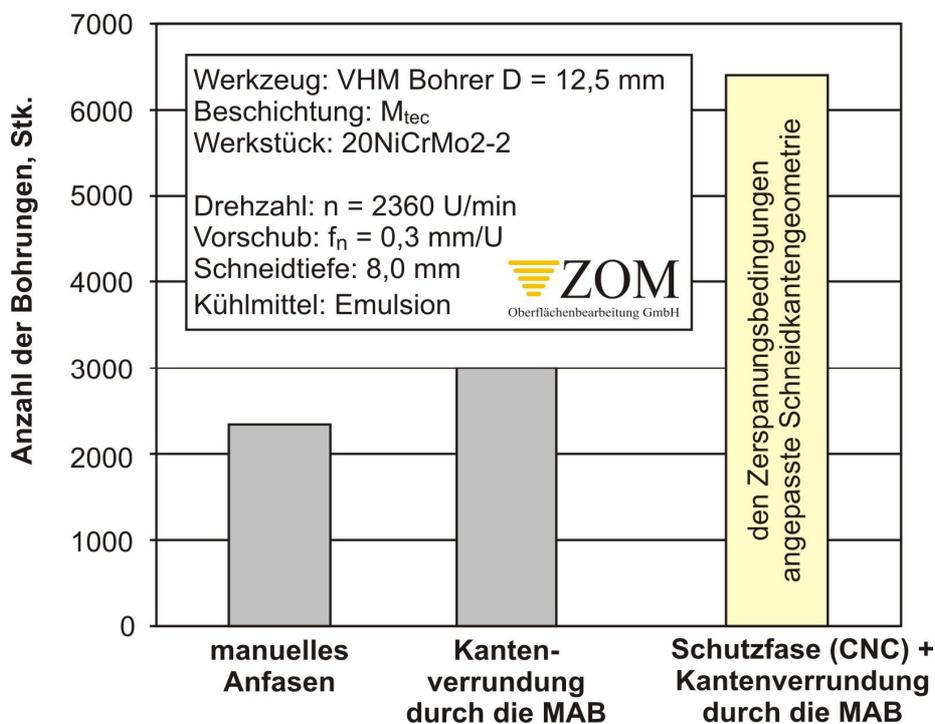


Bild 6: Kombination der Schutzfase mit der Kantenverrundung

Dieses Beispiel untermauert nochmals die wichtige Bedeutung einer gezielten Schneidkanten-Mikrostrukturierung. Dabei übernimmt die magnetabrasive Bearbeitung die wichtigste Rolle. Sie ermöglicht nicht nur die reproduzierbare Erzeugung definierter Schneidkantenverrundungen, sondern auch eine deutliche Verbesserung der Oberflächenqualität des gesamten Schneidteils des Bohrers und somit eine wesentliche Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Bohrers. Ist die Mikrogeometrie der Schneidkanten den Einsatzbedingungen optimal angepasst, so können auch nachgeschliffene Werkzeuge in der gleichbleibenden Qualität auf dem Niveau von Neuwerkzeugen wieder aufgearbeitet werden, wodurch eine absolute Prozesssicherheit garantiert wird.

#### Literaturverzeichnis:

1. O. Byelyayev «Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung», Dr.-Ing. Diss., Universität Magdeburg, 2008
2. K. Risse «Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl», RWTH Aachen, Dr.-Ing. Diss., 2006
3. F. Tikai, R. Bienemann, L. Heckmann «Schneidkantenpräparation. Ziele, Verfahren und Messmethoden», Berichte aus Industrie und Forschung, Universität Kassel, 2009
4. K. Weinert, D. Kötter «5-achsiges Strahlen optimiert die Schneide», WB Werkstatt und Betrieb 12/2005, S. 56-59
5. B. Karpuschewski, O. Byelyayev, V. S. Maiboroda, «Magneto-abrasive machining for the mechanical preparation of high-speed steel twist drills» In: International Institution for Production Engineering Research : CIRP annals . - Oxford: Elsevier, Bd. 58.2009, 1, S. 295-298
6. Майборода В. С. «Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь», Дис. докт. техн. Наук, НТУУ «КПІ» - Київ, 2001, 404 с.

Рецензент: Горобець І.О.

Надійшла до редакції: 13.04.2011р.

**О. БЕЛЯЕВ** (канд. техн. наук,  
**Д. ХОФФМАН** (управляющий директор)  
**Й. ПФРОММЕР** (дипломированный инженер)  
**В.С. МАЙБОРОДА** (д-р. техн. наук, проф.)  
**В.Н. ГЕЙЧУК** (д-р. техн. наук.)

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г.Киев, Украина

#### **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ОБРАБОТКИ РЕЖУЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СВЕРЛ**

В статье изложены некоторые аспекты округления режущих кромок на сверлильном инструменте. Представлена первая промышленная установка-прототип для магнитно-абразивной обработки (МАО) концевой режущего инструмента. Результаты экспериментальных исследований подтверждают высокую эффективность использования МАО а также необходимость оптимизации микрогеометрии режущих кромок под конкретные условия эксплуатации инструмента.

**Магнитно-абразивная обработка, режущий инструмент, режущие кромки**

## **Проектування прогресивних конструкцій різальних інструментів та технологічного оснащення**

УДК 621.923

**Н.В. АЗАРОВА** (канд. техн. наук, доц.)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНА И ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНОВЫСОТНОСТИ АЛМАЗНЫХ ЗЕРЕН НА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА**

Определены параметры закона распределения разнорысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна на рабочей поверхности алмазных кругов, сформированной различными способами. Установлено, что разнорысотность зерен описывается распределением Вейбулла.

**Ключевые слова:** Шлифовальный круг, алмазные зерна, разнорысотность зерен

#### **Введение**

Производительность алмазного шлифования, режимы обработки определяются параметрами рабочей поверхности круга (РПК), к числу которых относятся количество зерен на РПК, расстояние между ними, разнорысотность зерен и величина выступания зерен из связки. Характеристики РПК являются основой для определения формы и размеров среза, шероховатости обработанной поверхности.

Разнорысотность зерен алмазных кругов как после правки, так и при установившемся в процессе шлифования рельефе поверхности описывается различными законами распределения: равномерным [1]; нормальным [2, 3]; показательным [4]; Релея [5]; бета-распределением [6]; гамма-распределением [7]; распределением Вейбулла [8, 9]; комбинацией нескольких законов [10, 11, 12].

Такое многообразие мнений по вопросу о законе распределения разнорысотности зерен объясняется как различным методологическим подходом к оценке рельефа РПК, так и различным состоянием режущей поверхности исследуемого инструмента.

Целью работы является установление закона и определение параметров распределения разнорысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна на рабочей поверхности алмазного круга. Эти данные необходимы для расчета параметров шероховатости шлифованной поверхности.

#### **Основная часть**

Исследования проводили на измерительном комплексе, позволяющем регистрировать рельеф рабочей поверхности кругов на металлической связке методом профилографирования с последующей записью данных на ПЭВМ [13], по разработанной нами методике [14].

Параметры разнорысотности рельефа определяли по результатам профилографирования рабочей поверхности шлифовальных кругов 1А1 250×76×15×5 с характеристиками АС6 100/80-4-М2-01 и АС6 160/125-4-М2-01 в состоянии поставки (правка шлифованием абразивным кругом в заводских условиях), после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, за-

правленными электроэрозионным способом. Режимы правки: скорость круга 30 м/с, скорость стола равна нулю, поперечная подача – ручная, вертикальная подача 0,002...0,007 мм/ход, средняя сила тока 5...8 А, напряжение холостого хода 50 В, правящий электрод – брусок из меди М1, правка осуществлялась в рабочей зоне. Режимы обработки: скорость круга  $v_k = 30$  м/с, скорость стола  $v_{ст} = 6$  м/мин, глубина шлифования  $t = 0,015$  мм. Выборки формировали по двум профилограммам рабочей поверхности, записанным в направлении, перпендикулярном оси круга, со смещением трасс профилографирования вдоль оси круга.

Формирование выборок осуществляли на ПЭВМ с помощью специально разработанной программы. Затем определяли статистические характеристики выборок и подбирали теоретический закон, описывающий распределение разновысотности зерен относительно наиболее выступающего зерна.

Проверку принадлежности выборок объемом  $n_1$  и  $n_2$  одной генеральной совокупности выполняли путем сравнения средних значений  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  и дисперсий  $s_1^2, s_2^2$  выборок [15]. Сравнимые выборки считали однородными, если подтверждались гипотезы о равенстве выборочных средних и дисперсий выборок.

Для проверки гипотезы о равенстве выборочных средних вычисляли наблюдаемое значение критерия  $t_{набл} = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2| / \sqrt{s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2}$ . По таблице критических точек распределения Стьюдента по заданному уровню значимости  $\alpha$  и числу степеней свободы  $f = n_1 + n_2 - 2$  находили критическую точку  $t_{кр}(\alpha, f)$ . Гипотеза о равенстве выборочных средних подтверждалась, если  $t_{набл} \leq t_{кр}$ .

Для проверки равенства дисперсий двух выборок вычисляли отношение большей выборочной дисперсии к меньшей  $F_{набл} = s_1^2/s_2^2$ . По таблице критических точек распределения Фишера – Снедекора по заданному уровню значимости  $\alpha$ , числам степеней свободы  $f_1 = n_1 - 1$  и  $f_2 = n_2 - 1$  находили критическую точку  $F_{кр}(\alpha, f_1, f_2)$ . Гипотеза о равенстве выборочных дисперсий подтверждалась, если  $F_{набл} < F_{кр}$ .

Данные сравнения выборочных средних и выборочных дисперсий разновысотности зерен на рабочей поверхности круга, сформированной различными способами правки, а также в процессе плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом, приведены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, значения разновысотности зерен на РПК по двум различным трассам для каждого из рассмотренных способов подготовки поверхности круга с вероятностью 0,95 принадлежат одной генеральной совокупности и не зависят от места профилографирования, что подтверждает стационарность рельефа РПК.

Статистическая проверка законов распределения (нормального, гамма-распределения, распределения Вейбулла) по критерию согласия Пирсона показала, что наиболее подходящим для описания всех возможных случаев закона распределения разновысотности зерен на рабочей поверхности круга является двухпараметрическое распределение Вейбулла, которое имеет частные случаи, представляющие собой асимметричные с право- и левосторонней асимметрией формы распределения.

Функция распределения Вейбулла имеет вид:

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, \quad (1)$$

плотность распределения:

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры закона.

Таблица 1. Сравнение параметров распределений разновысотности зерен на рабочей поверхности кругов 1A1 250×76×15×5 различной зернистости, сформированной различными способами

Шлифовальный круг	Способ формирования РПК		Трасса	Объем выборки	Выборочное среднее $\Delta R_i$ , мкм	Выборочная дисперсия $S_i^2$ , мкм <sup>2</sup>	Критерий Фишера		Критерий Стьюдента			
							$F_{набл}$	$F_{кр} (\alpha=0,05)$	$t_{набл}$	$t_{кр} (\alpha=0,05)$		
АС6 100/80-4-М2-01	Электро-эрозионная правка	ЭЭП 1	1	200	37,62	257,14	1,04	1,64	1,25	1,26		
			2	200	39,61	246,41						
		ЭЭП 2	1	200	49,92	283,93	1,24		0,03			
			2	200	49,97	351,63						
	Правка шлифовальным абразивным кругом	1	200	22,01	43,94	0,79	1,24					
		2	200	22,51	35,51							
	Плоское алмазное шлифовальное валие стали Р6М5Ф3	1	200	23,59	176,89	1,06	0,89					
		2	200	22,39	186,64							
	АС6 160/125-4-М2-01	Электро-эрозионная правка	ЭЭП 1	1	200	47,36	641,33	1,17	1,64		0,75	1,26
				2	200	49,19	548,08					
ЭЭП 2			1	200	61,18	843,57	1,16	0,44				
			2	200	62,42	728,54						
Правка шлифовальным абразивным кругом		1	200	42,17	297,09	1,23	0,96					
		2	200	40,60	241,17							
Плоское алмазное шлифовальное валие стали Р6М5Ф3		1	200	43,80	573,71	1,16	0,38					
		2	200	42,92	493,84							

Распределение Вейбулла описывает положительные случайные величины [16]. В данном случае такая величина – разновысотность  $\Delta R$ , которая подставляется в уравнения (1) и (2) вместо аргумента  $x$ .

Для определения параметров распределения Вейбулла по экспериментальным данным воспользуемся методикой, изложенной в [17].

В соответствии с этой методикой вначале определяются оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения исследуемой величины. В качестве таких оценок принимаем выборочные среднее  $\bar{x}$  и среднее квадратическое отклонение  $s$ .

Далее рассчитывается оценка коэффициента вариации исследуемой величины  $x$ :

$$V_x = \frac{s}{\bar{x}}.$$

Затем по таблице для полученного значения  $V_x$  находят параметр  $\alpha$  и промежуточная величина  $k_\alpha$ , а параметр  $\beta$  рассчитывается по формуле:

$$\beta = \frac{\bar{x}}{k_\alpha}.$$

Параметры распределения Вейбулла разновысотности зёрен на поверхности кругов 1A1 250×76×15×5 с характеристиками АС6 100/80-4-М2-01 и АС6 160/125-4-М2-01, подвергнутых правке электроэрозионным способом и правке шлифованием абразивным кругом в заводских условиях, а также после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом, приведены в таблице 2.

Проверка соответствия экспериментальных данных распределению Вейбулла выполнена с использованием критерия согласия Пирсона  $\chi^2$ . Экспериментальные значения  $\chi^2$  найдены по формуле [18]

$$\chi^2 = N \sum_{i=1}^k \frac{(p_i^{\text{эк}} - p_i)^2}{p_i},$$

где  $N$  – количество значений случайной величины (объём выборки);

$k$  – число разрядов (интервалов группирования) случайной величины;

$p_i^{\text{эк}}$  – экспериментальная вероятность попадания случайной величины в  $i$ -й интервал;

$p_i$  – гипотетическая вероятность попадания случайной величины в  $i$ -й интервал, рассчитанная по теоретическому распределению (Вейбулла в нашем случае).

Теоретические значения критерия Пирсона  $\chi^2$  для различных уровней значимости найдены по таблицам [19].

Из таблицы 2 видно, что гипотеза о распределении разновысотности зерен по закону Вейбулла подтверждается для всех выборок при всех принятых уровнях значимости.

Таблица 2. Параметры распределений разновысотности зёрен на рабочей поверхности шлифовальных кругов 1A1 250×76×15×5 различной зернистости, сформированной различными способами

Шлифовальный круг	Способы формирования РПК		Трасса	Параметры распределения Вейбулла		Критерий согласия Пирсона				
				$\alpha$	$\beta$	$\chi^2_{\text{эксп}}$	$\chi^2_{\text{табл}}$	Уровень значимости		
АС6 100/80-4-M2-01	Способ правки	Электро-эрозионный	ЭЭП 1	1	2,5	42,41	15,78	16,81	0,010	
			ЭЭП 2	2	2,7	44,56	11,86	12,59	0,05	
			ЭЭП 1	1	3,2	55,71	24,59	24,74	0,025	
			ЭЭП 2	2	2,9	56,08	16,53	16,81	0,010	
		Шлифованием абразивным кругом	1	3,5	24,50	12,18	13,28	0,010		
			2	4,25	24,75	13,41	14,07	0,05		
	Плоское алмазное шлифование	1	1,84	26,56	13,24	15,09	0,010			
		2	1,69	25,07	5,39	9,24	0,10			
	АС6 160/125-4-M2-01	Способ правки	Электро-эрозионный	ЭЭП 1	1	1,95	53,42	11,82	12,83	0,025
				ЭЭП 2	2	2,22	55,52	9,61	10,64	0,10
ЭЭП 1				1	2,23	69,05	5,88	9,24	0,10	
ЭЭП 2				2	2,48	70,39	9,85	11,07	0,05	
Шлифованием абразивным кругом			1	2,63	47,47	8,83	10,64	0,10		
			2	2,83	45,602	12,26	12,59	0,05		
Плоское алмазное шлифование		1	1,90	49,38	14,56	16,81	0,010			
		2	2,02	48,44	8,25	10,64	0,10			

Гистограммы распределений разности высот зёрен рабочей поверхности кругов 1A1 250×76×15×5 исследованных зернистостей, сформированной правкой шлифованием абразивным кругом в заводских условиях, электроэрозионной правкой и после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом, и аппроксимирующие их кривые распределения Вейбулла приведены на рис. 1.

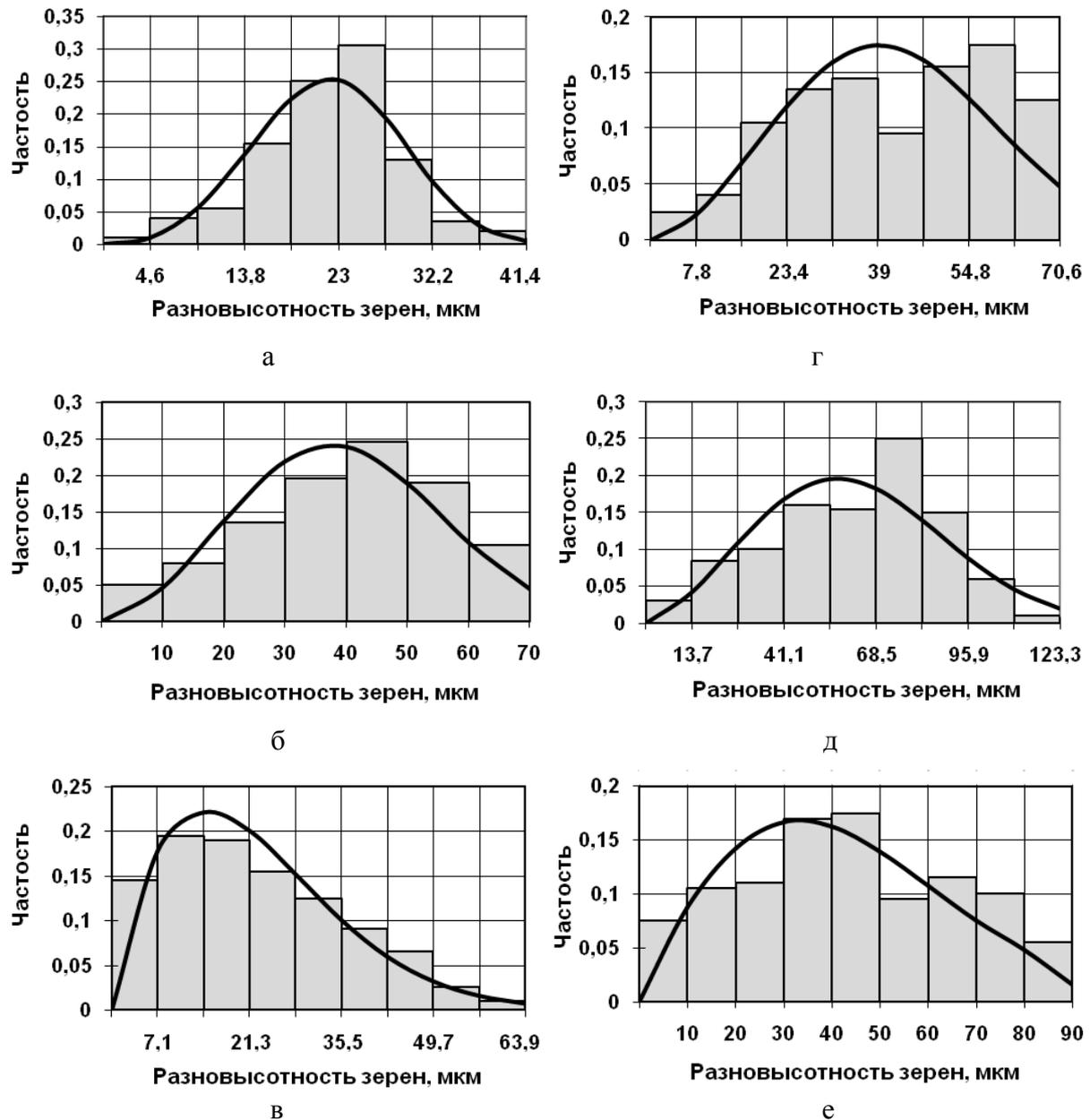
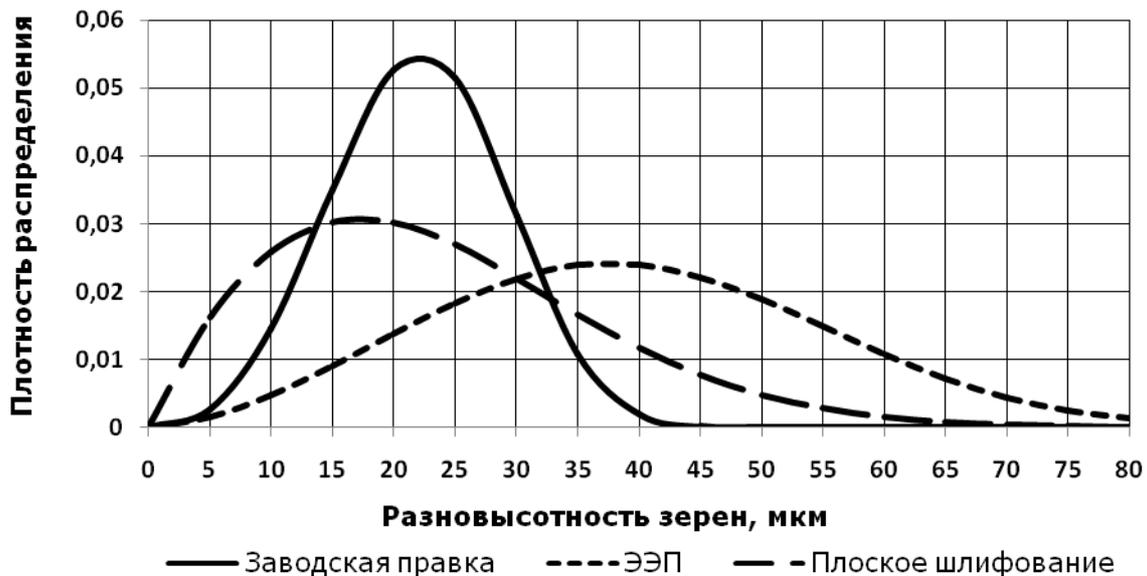


Рис. 1. Выравнивание экспериментальных распределений разности высот зерен на рабочей поверхности кругов АС6 100/80-4-М2-01 (а, б, в) и АС6 160/125-4-М2-01 (г, д, е), сформированной правкой шлифованием абразивным кругом в заводских условиях (а, г), электроэрозионной правкой (б, д) и в процессе плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом (в, е), распределением Вейбулла

Исследованные распределения разновысотности зерен на рабочей поверхности алмазных кругов в состоянии поставки (заводская правка шлифованием абразивным кругом), после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, запрограммированными электроэрозионным способом, сравним между собой.

Построим графики плотности распределений разновысотности (рис. 2) с использованием параметров распределения Вейбулла (см. табл. 2).



а



б

Рис. 2. Плотность распределений Вейбулла разновысотности зерен рабочей поверхности кругов АС6 100/80-4-М2-01 (а) и АС6 160/125-4-М2-01 (б), сформированной различными способами

Рассмотрим, влияет ли способ правки на распределение разновысотности.

Графики плотности распределений разновысотности (см. рис. 2), построенные с использованием параметров распределения Вейбулла (см. табл. 2), показывают, что разновысотность зерен на рабочей поверхности кругов зернистостей АС6 100/80 и АС6 160/125 после электроэрозионной правки имеет сходное распределение с разновысотностью зерен после правки шлифованием абразивным кругом в заводских условиях, однако распределения для электроэрозионной правки имеют значительно большие математическое ожидание и дисперсию. Средняя разновысотность зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает среднюю разновысотность зерен после заводской правки шлифованием абразивным кругом в среднем в 1,7 раза (в 1,7 – 2,3 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 1,2 – 1,5 раза для круга зернистости АС6 160/125). Выборочная дисперсия распределения разновысотности зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает дисперсию после заводской правки шлифованием абразивным кругом в среднем в 5,2 раза (в 5,6 – 9,9 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 1,8 – 3,5 раза для круга зернистости АС6 160/125). Это объясняется, по всей видимости, тем, что рельеф круга после электроэрозионной правки более выражен, что обеспечивает более высокую режущую способность круга [14].

Сравним распределения разновысотности зерен после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования.

Средняя разновысотность зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает среднюю разновысотность зерен после 30 мин плоского алмазного шлифования в среднем в 1,6 раза (в 1,6 – 2,2 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 1,1 – 1,5 раза для круга зернистости АС6 160/125). Выборочная дисперсия распределения разновысотности зерен (см. табл. 1) после электроэрозионной правки превышает дисперсию после 30 мин плоского алмазного шлифования в среднем в 1,5 раза (в 1,3 – 2,0 раза для круга зернистости АС6 100/80 и в 1,1 – 1,7 раза для круга зернистости АС6 160/125). График плотности вероятности распределения разновысотности зерен на РПК (см. рис. 2), сформированной электроэрозионной правкой симметричен, а график плотности распределения разновысотности зерен на РПК, сформированной в процессе плоского алмазного шлифования стали Р6М5Ф3 кругами, заправленными электроэрозионным способом, имеет явно выраженную правостороннюю асимметрию. В зоне больших разновысотностей наблюдается резкое уменьшение частостей. Это может быть обусловлено механическим истиранием зерен алмаза в процессе шлифования, выпадением наиболее выступающих зерен, засаливанием субмикрорельефа контактных площадок зерен, а также межзеренного пространства продуктами обработки и, кроме того, различным уровнем связки, в результате чего зерна закрываются связкой не на одном уровне [8, 20].

### Выводы

1. Статистические характеристики выборок значений разновысотности зерен на РПК, найденные для каждого из рассмотренных способов формирования поверхности круга (правка шлифованием абразивным кругом, электроэрозионная правка, алмазное шлифование), по результатам обработки профилограмм по двум различным трассам отличаются незначимо. Средняя разновысотность и выборочная дисперсия с достаточной полнотой характеризуют всю генеральную совокупность, которой является разновысотность зерен на рабочей поверхности алмазного шлифовального круга.

2. Разновысотность зерен на рабочей поверхности кругов 1А1 250×76×15×5 с характеристиками АС6 100/80-4-М2-01 и АС6 160/125-4-М2-01 в состоянии поставки

(правка шлифованием абразивным кругом в заводских условиях), после электроэрозионной правки и после 30 мин плоского алмазного шлифования описывается распределением Вейбулла.

3. Числовые характеристики распределений разновысотности зерен на РПК, сформированные электроэрозионной правкой и правкой шлифованием абразивным кругом, различны. Так, средняя разновысотность, сформированная электроэрозионной правкой, превышает среднюю разновысотность, сформированную правкой шлифованием абразивным кругом в заводских условиях, в 1,7 раза. При этом выборочная дисперсия после электроэрозионной правки превышает дисперсию после правки шлифованием абразивным кругом в 5,2 раза. Электроэрозионная правка обеспечивает более высокую режущую способность круга и уменьшает возможность контактирования связки с обработанной поверхностью в процессе шлифования, что в свою очередь способствует снижению сил резания. Таким образом, при подготовке алмазного круга на металлической связке предпочтение необходимо отдать электроэрозионной правке.

### Список литературы

1. Seiki Metsui. Statistical approach to grinding mechanism on a few experiments / Metsui Seiki, Syoji Katsuo // Technol. Repts Tokoku Univ. – 1975. – 40. – N 2. – P. 353-369.
2. Резников А.Н. Теплофизика резания / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
3. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Часть 1. Состояние рабочей поверхности инструмента / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – 160 с.
4. Редько С.Г. Расположение абразивных зёрен на рабочей поверхности шлифовального круга / С.Г. Редько, А.В. Королёв // Станки и инструменты. – 1970. – № 5. – С. 40-41.
5. Королев А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А.В. Королев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 189 с.
6. Филимонов Л.Н. Статистический анализ распределения режущих кромок на рабочей поверхности шлифовального круга / Л.Н. Филимонов, В.Г. Степаненко, Ю.П. Приймак // Абразивы. – 1976. – № 10. – С. 10-13.
7. Konig W. Three dimensional measurement of grinding wheel surface-evaluation and effect of cutting behavior / W. Konig, W. Lortz // CIRP Ann. – 1976. – 25. – N 1. – P. 197-202.
8. Матюха П.Г. Високопродуктивне шліфування ванадієвих штампових та інструментальних сталей / П.Г. Матюха. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – 222 с.
9. Полтавец В.В. Обоснование режимов шлифования труднообрабатываемых материалов при электроэрозионном воздействии на рабочую поверхность круга: дис... епени канд. техн. наук: спец. 05.03.01 / Полтавец Валерий Васильевич – Донецк, 2000. – 319 с.
10. Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании / С.Г. Бишутин. – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 144 с.
11. Горленко О.А. К вопросу о распределении по высоте вершин абразивных зерен в рабочей поверхности шлифовального круга / О.А. Горленко, С.Г. Бишутин // Физические процессы при резании металлов: межвуз. сб. научн. тр. – Волгоград, 1997. – С. 11-14.

12. Шейко М.Н. Влияние биения круга на структуру его «кинематического» поверхностного слоя / М.Н. Шейко // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 3. – С. 44-47.

13. Пат. 75483 С2 Україна, МПК G01D 7/00. Пристрій для реєстрації рельєфу поверхні абразивних інструментів на металевій зв'язці / П.Г. Матюха, С.В. Константинов, В.П. Цокур, Н.В. Азарова, В.В. Полтавець, О.В. Литвиненко; заявник і патентовласник Донецький національний технічний університет. – № 20040604600; заявл. 14.06.2004; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4.

14. Азарова Н.В. Влияние способа правки алмазного круга на характеристики его рабочей поверхности / Н.В. Азарова, П.Г. Матюха // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ. – 2007. – Вип. 4. – С. 16-20.

15. Грановский В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях / В.А. Грановский, Т.Н. Сирая. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с.

16. Теория вероятностей / [А.В. Печинкин, О.И. Тескин, Г.М. Цветкова и др.] – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1999. – 456 с.

17. Груничев А.С. Таблицы для расчета надежности при распределении Вейбулла / А.С. Груничев, А.И. Михайлов, Я.Б. Шор. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 64 с.

18. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

19. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

20. Азарова Н.В. Удельная себестоимость процесса плоского шлифования ванадиевой быстрорежущей стали кругами из сверхтвердых материалов / Н.В. Азарова, П.Г. Матюха, В.В. Полтавец // Сверхтвердые материалы. – 2008. – №2. – С. 65-71.

*Рецензент: Полтавець В.В.*

*Надійшла до редколегії 3.04.2011р.*

#### **Н.В. АЗАРОВА**

Донецький національний технічний університет

#### **ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОМУ ТА ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛУ РІЗНОВИСОТНІСТІ АЛМАЗНИХ ЗЕРЕН НА РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА**

Визначені параметри закону розподілу різновисотності зерен відносно найбільш виступаючого зерна на робочій поверхні алмазних кругів, яка була сформована різноманітними способами. Встановлено, що різновисотність зерен може бути описана розподілом Вейбулла.

#### **Шліфувальний круг, алмазні зерна, різновисотність зерен**

#### **N.V. AZAROVA**

Donetsk National Technical University

#### **DETERMINATION OF PARAMETERS OF DISTRIBUTION LAW OF DIFFERENT HEIGHT OF DIAMOND GRAINS ON THE WORKING SURFACE OF GRINDING WHEEL**

The parameters of distribution law of different height of grains about the most overhang grain on diamond wheel working surface, which was formed by different means, are determinate. It is proved that different height of grains characterizes by Weibull distribution.

#### **Grinding wheel, diamond grains, different height of grains**

УДК 621.9.01

**А.Г. ДЕРЕВЯНЧЕНКО** (д-р. техн. наук, проф.)**О.Ю. БАБИЛУНГА** (канд. техн. наук, доц.)**Е.В. КОСС** (канд. техн. наук, доц.)**А.О. СОЦЕНКО**

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

**ПОДХОД К РАСПОЗНАВАНИЮ МИКРОДЕФЕКТОВ ОТКАЗАВШИХ  
ИНСТРУМЕНТОВ В СТРУКТУРЕ ПРОЦЕССА ИХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

Разработан подход к распознаванию микродефектов поверхностей инструментов. Он основан на анализе текстур изображений зон износа.

**Ключевые слова:** Режущий инструмент, микродефекты, анализ текстур, зона износа

**Введение**

Стремительное увеличение информационных потоков в современных интегрированных производствах уровня CIM (Computer Integrated Manufacturing) обуславливает необходимость автоматизации и интеллектуализации соответствующего оборудования – гибких производственных модулей (ГПМ) [1]. В связи с этим все большее распространение здесь приобретают методы и системы интеллектуальной обработки и анализа данных для решения широкого круга задач, в том числе – экономии материальных и энергетических ресурсов. Одной из важных является задача сокращения расходов на дорогостоящие режущие инструменты (РИ) ГПМ. Неполное использование рабочего ресурса таких РИ вследствие принудительной смены, их непредвиденные отказы приводят к необходимости создания значительных запасов инструментов. Очевидна необходимость разработки интеллектуальной системы диагностирования, ориентированной на решение задач прогнозирования состояний и отказов РИ, своевременной замены инструментов на стадии предотказа, анализа режущей части (РЧ) отказавших РИ и последующего восстановления с наименьшими потерями инструментального материала. Информация об особенностях состояния РЧ отказавшего РИ, присутствия тех или иных дефектов и микродефектов (следов действия тех или иных механизмов изнашивания) может быть использована для коррекции условий эксплуатации (в частности – режимов резания) после реализации процесса восстановления инструмента.

В современных ГПМ диагностирование состояний РИ может выполняться с применением методов цифровой обработки изображений зон износа или поломки [1], с учетом комплекса признаков, определяемых формой, размерами и пространственным положением границ зон износа (дефектов) и их текстурных составляющих (микродефектов).

Целью работы является повышение вероятности правильного распознавания микродефектов (текстур) зон износа РЧ на основе использования статистического подхода к анализу соответствующих фрагментов цифровых изображений РИ.

**Основная часть**

Изображения РЧ РИ, сформированные с использованием системы контроля, оснащенной телекамерой [1], имеют, как правило, сложную структуру. Она определяется двумя составляющими: 1. многообразием форм зон износа РЧ в целом

(дефектов); 2. особенностями внутренней структуры РЧ (микродефектов), в состав которой входят следы концентрированного износа, локальные нарушения целостности покрытий и другие. С позиций обработки изображений каждый класс микродефектов РЧ характерен определенным типом текстуры. Своевременное распознавание этих элементов в структуре РЧ РИ обеспечивает идентификацию модели отказа РИ уже в начальный период работы.

Для иллюстрации подхода выделены три класса текстур фрагментов изображений зон износа задних поверхностей резцов для чистовой обработки (рис. 1):

- класс 1: равномерный износ – микродефекты отсутствуют (рис. 1.а);
- класс 2: износ со следами локального разрушения покрытия на поверхности РЧ (рис. 1.б);
- класс 3: концентрированный износ (рис. 1.в).

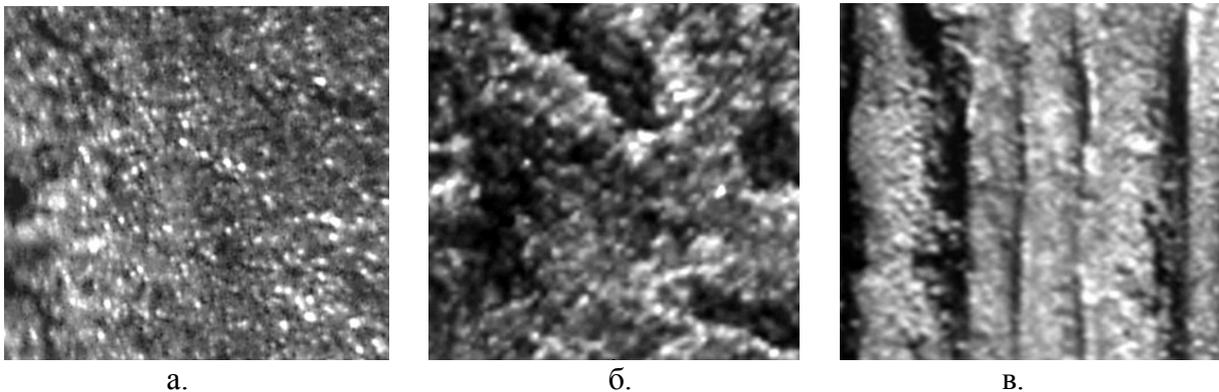


Рис. 1. Фрагменты цифровых изображений зон износа задних поверхностей РЧ резцов для чистовой обработки, характерные различными классами текстур (микродефектов).

Для реализации процесса автоматического распознавания микродефектов (текстур) зон износа РЧ целесообразно использовать известные методы обработки изображений [2 - 4]. Задача распознавания текстур цифровых изображений [2] обычно решается в следующей последовательности:

1. Формируется учебная выборка из  $Q$  классов изображений  $W_1, W_2, \dots, W_Q$ . Изображения, полученные системой контроля, вследствие действия различных помех имеют неравномерную освещенность, слабую контрастность, что усложняет их компьютерную обработку. Поэтому производятся фильтрация, контрастирование изображений и др.

2. Формируется  $l$ -мерное пространство признаков, в котором каждому изображению соответствует вектор признаков  $V = (v_1, v_2, \dots, v_l)^T$ . Изображения одного класса могут быть представлены эталонным вектором. Компоненты этого вектора представляют собой средние арифметические значений соответствующих компонент всех изображений, формирующих класс.

3. Реализуется процедура классификации. Решение о принадлежности изображения к одному из классов принимается на основании минимума заранее заданной меры отличия вектора признаков от эталона.

В данной работе основное внимание уделяется реализации второго этапа распознавания. Ранее нами был рассмотрен спектральный метод описанию текстурных

изображений, основанный на вычислении энергетического спектра Фурье. Достоверность диагностирования микродефектов РЧ этим методом, определяемая вероятностью правильного распознавания, составляла 0,87. Такой результат не является удовлетворительным. Предлагается выполнять формирование признакового пространства с использованием статистического подхода к описанию текстур [3, 4], который базируется на вычислении матрицы смежности интенсивности фрагментов цифровых изображений зон износа РЧ.

В работе [3] предложено использование матриц смежности интенсивности изображений (уровней «серого») для расчета признаков текстуры. Пусть  $D: \{\theta, d\}$  – оператор позиционирования изображения РЧ и  $A$  – специальная матрица. Ее компоненты отображают, сколько раз элемент изображения РЧ с интенсивностью  $f_i$  граничит (в направлении, определенной оператором  $D$ ) с элементом интенсивности  $f_j$  (где  $1 \leq i, j \leq k$ ). Порядок матрицы  $A$  определяется количеством разных градаций интенсивности во входном изображении.

Пусть  $r$  – число пар элементов изображения РЧ, которые удовлетворяют требованиям оператора  $D$  (сумма всех элементов матрицы  $A$ ). Если построить матрицу  $P$  путем деления всех элементов матрицы  $A$  на  $r$ , то  $P_{ij}$  будет оценкой вероятности следующего события: пара пикселей со взаимным положением, определенным правилом  $D$ , будет принимать значение  $(f_i, f_j)$ . Такая матрица  $P$  является матрицей смежности интенсивности фрагмента изображения РЧ. Поскольку она зависит от оператора  $D$ , присутствующие в изображении РЧ участки с заданной текстурой можно выявлять, выбирая соответствующий оператор позиционирования.

Алгоритм реализации статистического подхода к описанию текстурных изображений РЧ на основе построения матрицы смежности включает следующие этапы:

*Этап 1.* Квантование значений интенсивности оттенков «серого» изображения.

*Этап 2.* Построение матрицы смежности: 1. определение направления обработки изображения из набора значений  $\theta = (0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$ ; 2. определение расстояния  $d$  между пикселем  $i$  и  $j$  изображения; 3. вычисление матрицы:

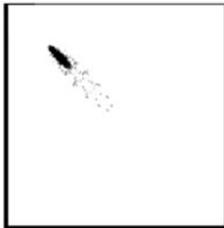
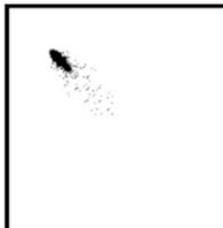
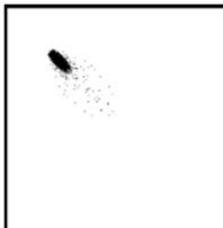
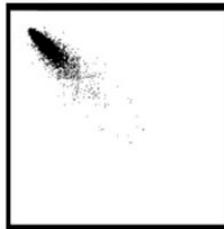
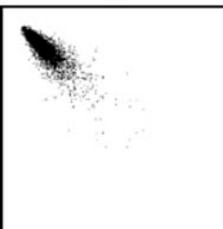
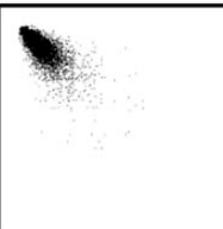
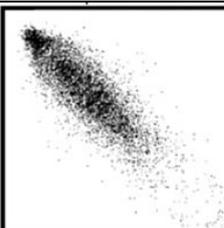
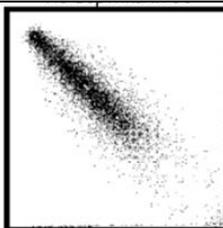
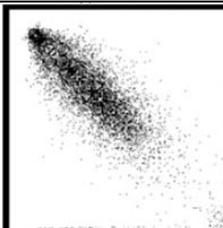
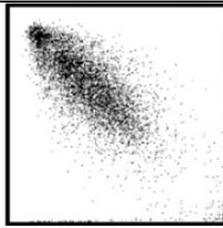
$$A(i, j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \begin{cases} 1, \text{ если } (f(i, j) = i) \text{ и } (f(i + d, j + d) = j), \\ 0, \text{ в остальных случаях;} \end{cases}$$

4. приведение формы матрицы к симметричной; 5. транспонирование полученной матрицы –  $A^T$ ; 6. суммирование матриц:  $A = A + A^T$ ; 7. нормализация матрицы  $A$ .

Анализ работ [3, 4] позволил определить набор основных признаков, которые вычисляются по матрице смежности интенсивности изображения и используются для описания текстур зон износа РЧ: второй угловой момент ( $v_1$ ), контраст ( $v_2$ ), коэффициент корреляции ( $v_3$ ), обратной момент разницы ( $v_4$ ), суммарное значение ( $v_5$ ), суммарная энтропия ( $v_6$ ) и др. В соответствии с алгоритмом реализации статистического подхода к описанию текстурных изображений, для каждого класса микродефектов РЧ РИ построены матрицы смежности (табл. 1) и вычислены соответствующие признаки. Отбор признаков для анализа на информативность осуществлялся с учетом распределения значений признаков по классам текстур изображений РЧ. Признаки, которые имели неустойчивые значения в пределах одного

из классов, были исключены из последующего рассмотрения. Методом полного перебора [2] были проанализированы разные комбинации признаков текстур (микродефектов) изображений РЧ РИ (рис. 2). Отбирались комбинации, для которых распределение значений признаков соответствовало требованию компактности классов микродефектов РЧ и достигалась высокая вероятность их правильного распознавания. Их анализ показал, что наиболее рациональным для распознавания классов микродефектов РЧ является пространство трех признаков -  $v_1, v_2, v_4$  (соответственно второй угловой момент; контраст; обратный момент разницы (табл. 2)).

Таблица 1. Примеры матриц смежности для различных классов текстур зон износа РИ

Номер класса текстуры РИ	Матрицы смежности интенсивности изображений участков РЧ РИ при разных значениях угла $\theta$ , определяющего направление обработки изображения			
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 135^\circ$
1				
2				
3				

Реализации системы распознавания текстурных изображений выполненная в среде разработки Microsoft Visual Studio C#. Разработанный программный комплекс имеет удобный графический интерфейс, который позволяет загрузить изображение РЧ РИ, отображаемое в главном окне программы. Если оно имеет большие размеры, то в программе есть возможность его уменьшения для отображения на экране монитора. Представленная система может работать:

- в ручном режиме, что позволяет выбрать фрагмент изображения РЧ скользящим окном заданного размера (64, 128, 256, 512 пикселей) и просмотреть все этапы обработки изображения РЧ и получения результатов;

- в автоматическом режиме, который выдает результат распознавания класса микродефекта РЧ в форме сообщения.

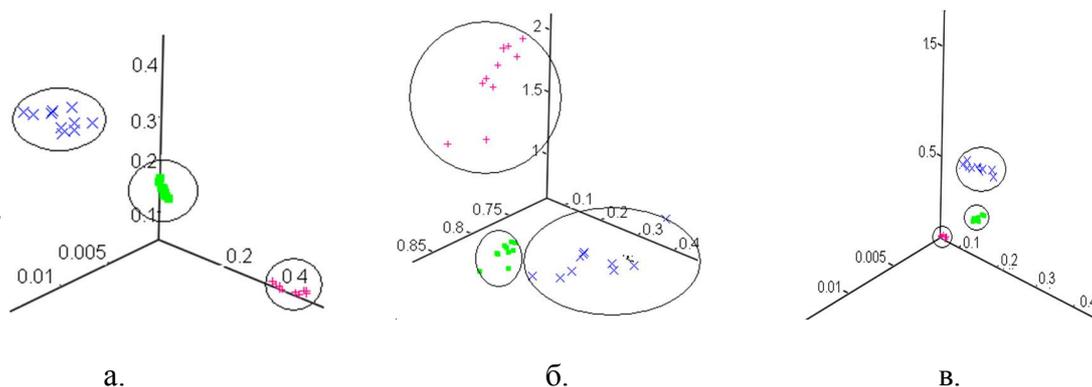


Рис. 2. Представление областей классов текстур зон износа РЧ резцов в трехмерных пространствах разных комбинаций признаков, характерных различной разделяемостью классов: а – признаки  $v_1, v_2, v_4$ ; б – признаки  $v_4, v_5, v_6$ ; в – признаки  $v_1, v_4, v_5$ . По осям (соответственно – левая, вертикальная, правая) отложены значения соответствующих признаков

Таблица 2. Формулы для расчета выбранных признаков матрицы смежности

Название признака	Формула
Второй угловой момент	$v_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij}^2$
Контраст	$v_2 = \sum_{n=0}^{N-1} n^2 \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N p_{ij} \right],  i-j =n$
Момент обратной разницы	$v_4 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{p(i,j)}{1+(i-j)^2}$

Для улучшения качества фрагментов изображений РИ в системе реализованы процедуры: предобработка (рис. 3,а): редактирование интенсивности, контрастности, осуществление медианной фильтрации, обработка с помощью масок и др.

В окне графического интерфейса для вычисления признаков текстур можно выбрать метод формирования описания изображения РЧ. При выборе метода вычисления признаков по матрице смежности выводится матрица смежности начального изображения (рис. 3, б)

Для определения вероятности правильного распознавания текстур изображений (микродефектов зон износа) РЧ РИ было проведено компьютерное моделирование процесса распознавания. Приняты следующие граничные условия:

- заданы три класса фрагментов изображений зон износа РЧ: равномерный износ, износ с нарушением целостности покрытия, концентрированный износ;
- изображения разделены на две подвыборки: учебную (30 изображений) и тестовую (45 изображений);
- для вычисления вектора информативных признаков классов микродефектов РЧ использовалась матрица смежности изображения;
- классификация проводилась с помощью вероятностной нейронной сети [5].

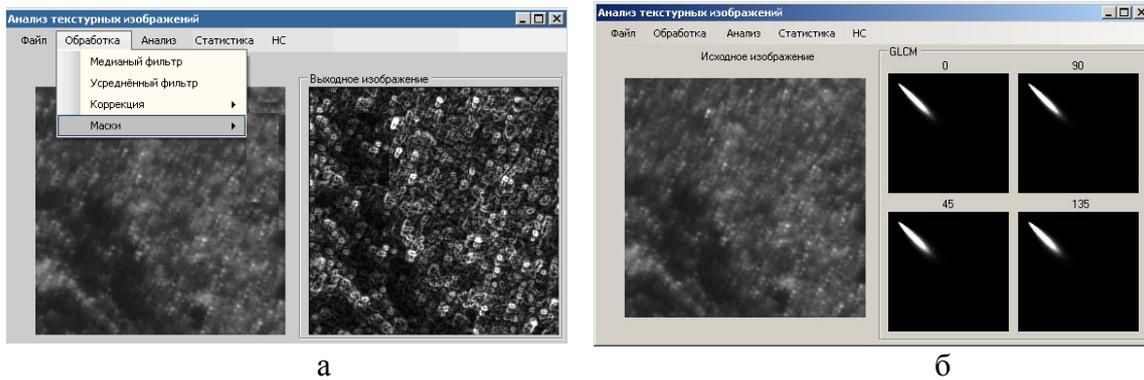


Рис. 3. Интерфейс системы: а – окно выбора предобработки изображения зоны износа РЧ; б – окно отображения матрицы смежности изображения зоны износа РЧ

В результате компьютерного моделирования процесса диагностирования классов текстур зон износа РЧ получены следующие значения вероятности правильного распознавания: равномерный износ РЧ – 0,95; локальные нарушения целостности покрытия РЧ – 0,94; концентрированный износ РЧ – 0,95.

### Выводы

Разработан подход к распознавания микродефектов изношенных и отказавших резцов на основе анализа текстур фрагментов изображений зон износа РИ. Для описания классов текстуры использован метод, основанный на вычислении матрицы смежности интенсивности изображений РЧ РИ. При построении классификатора микродефектов РЧ применена вероятностная нейронная сеть. Проведен анализ информативности признаков микродефектов, вычисленных по матрице смежности.

Распознавание текстурных фрагментов изображений зон износа РЧ РИ (для трех классов текстур) с использованием статистического их описания обеспечило вероятность правильного распознавания классов микродефектов не ниже 0,94. Данный результат значительно превосходит полученные ранее (с использованием спектрального метода). Это свидетельствует о перспективности применения изложенного подхода в интеллектуальных системах диагностирования дефектов и отказов РИ, восстановления их режущей части.

Информация о классах микродефектов РЧ, формирующихся вследствие действия тех или иных механизмов изнашивания, в комплексе с оценкой особенностей дефектов может быть использована для коррекции условий эксплуатации инструментов (в частности – режимов резания) после реализации процесса восстановления РИ.

### Список литературы

1. Дервянченко А.Г. Диагностирование состояний режущих инструментов при прецизионной обработке / А.Г. Дервянченко, В.Д. Павленко, А.В. Андреев. – Одесса: Астропринт, 1999. – 184 с.
2. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. Сойфера В.А. – 2-е изд., испр. – М.: Физ-мат. лит, 2003. – 784 с.
3. Haralick R.M. Statistical and Structural Approaches to Texture / R.M. Haralick // Proceeding of the IEEE. – 1979. – Vol. 67. – P. 786-804.

4. Gotlieb C. Texture descriptors based on Co-occurrence Matrices / C. Gotlieb, H. Kreyszig // Comput. Vision Graphics Image Processing – 1990. – V. 51. – №1. – P. 70.

5. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан // – М.: Изд. дом “Вильямс”, 2001. – 291 с.

*Рецензент: Матюха П.Г.*

*Надійшла до редколегії: 15.03.2011р.*

**О.Г. ДЕРЕВ'ЯНЧЕНКО**

**О.Ю. БАБИЛУНГА**

**Є.В. КОСС**

**А.О. СОЦЕНКО**

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна

**ПІДХІД ДО РОЗПІЗНАВАННЯ МІКРОДЕФЕКТІВ ІНСТРУМЕНТІВ, ЩО  
ВІДМОВИЛИ, В СТРУКТУРІ ПРОЦЕСУ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ**

Розроблений підхід до розпізнавання мікроефектів поверхонь інструментів. Він заснований на аналізі текстури зображень зон зносу.

**Різальний інструмент, мікроефекти, аналіз текстур, зона зносу**

**A.G. DEREVIANCHENKO**

**O.U. BABILUNGA**

**E.V. KOSS**

**A.O. SOTSENKO**

Odessa national polytechnical university, Odesa, Ukraine

**AN APPROACH OF REFUSING OF CUTTING TOOLS MICRODEFECTS  
RECOGNITION IN STRUCTURE OF PROCESS OF THEIR RENEWAL**

An approach of cutting tools surface microdefects recognition is developed. He is based on the analysis of textures of images of wear areas.

**Cutting tool, microdefects, analysis of structures, wear area**

УДК 621.623

**В.Д. КУРІЛОВИЧ** (мол. наук. співроб.)**С.В. КОВАЛЬОВ** (мол. наук. співроб.)**Ю.Д. ФІЛАТОВ** (д-р. техн. наук, проф., ст. наук. співроб.)

Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ, Україна

## СУЧАСНІ ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ВИРОБІВ З ПРИРОДНОГО КАМЕНЮ

Визначені найбільш раціональні конструкції інструменту для фінішної обробки плоских та складнопрофільних поверхонь виробів з природного каменю. Розроблені комп'ютерні моделі інструментів з прививчастою робочою поверхнею. Описані способи виготовлення інструменту із алмазно-полімерного волокна з використанням технології Rapid Prototyping та на термоформованому каркасі.

**Ключові слова:** Інструмент, природний камінь, модель, складнопрофільна поверхня

### Вступ

Полірування поверхонь виробів з природного каменю (ПК) до теперішнього часу досить часто здійснюється за допомогою суспензій і паст (оксиду хрому, двооксиду церію, алмазних суб- і мікропорошків), вибір полірувальних порошоків для яких базується на основі експериментального досвіду. Аналіз представлених на ринку України інструментів для обробки будівельних та декоративно-художніх виробів з каменю, що виготовляються провідними виробниками: ДГП «Алмазінструмент» (Україна, Київ), «Композит» (Україна, Київ), «ВД» (Україна, Львів), «ДІ-СТАР» (Україна, Полтава), s.r.l. Super Selva (Італія, Верона), Precision Industries Diamond Tools (Італія), 3М (США), s.r.l. Fabbrica Abrasivi Tiburtina (Італія, Рим), фірми “Marmoelettromeccanica” (Італія), «Епаз» (Білорусь, Ліда) та ін., показав, що використання інструментів для фінішної обробки вказаних виробів є недоцільним із-за високої вартості або неможливості виконання вимог, що висуваються до їх якості [1–2].

Експлуатаційні параметри виробів з природного каменю визначаються саме станом оброблених поверхонь, їх шорсткістю, відбиваючою здатністю, глибиною дефектного шару. Художня й декоративна цінність виробів, а також їх експлуатаційні характеристики, що напряму залежать від глибини дефектного шару оброблених поверхонь, в значній мірі визначаються технологією їх фінішної обробки, а саме параметрами процесів тонкого (ТАШ), надтонкого (НТАШ) алмазного шліфування і полірування інструментом зі зв'язаними полірувальними порошками. При виготовленні декоративно-художніх і ювелірних виробів з природного та штучного каменю для забезпечення необхідної якості іноді достатньо обмежитись операцією надтонкого алмазного шліфування. Мета роботи полягає в розробці конструкції робочого шару інструмента для фінішної обробки складнопрофільних поверхонь виробів з природного каменю, методів комп'ютерного моделювання і способів виготовлення інструмента.

Сучасний стан проблеми високоякісної фінішної обробки складнопрофільних поверхонь виробів з природного та штучного каменю характеризується окремими успіхами у вирішенні питань, пов'язаних з розробкою нових інструментів зі складною конструкцією робочого шару. Для НТАШ і полірування високоякісних складнопрофільних поверхонь будь-якого профілю з природного каменю використовуються фасонні круги, робочий шар яких утворений з алмазно-полієфірного або абразивно-

поліефірного волокна на основі поліетилентерефталату за рахунок його повного або часткового розплавлення [3]. Приривчастий робочий шар, за рахунок якого забезпечується його еквідистантний знос та стала форма його поверхні в процесі обробки на протязі тривалого часу, конструктивно виконується за рахунок заглиблень спеціального профілю, змінних за глибиною та шириною. При заданій кількості заглиблень (8 або 4), їх розміри розраховуються в залежності від кривини робочого шару інструмента, режимних і кінематичних параметрів процесу обробки тощо [4].

### Основна частина

**Розробка інструменту з алмазно-поліефірного волокна для фінішної обробки природного каменю.** Вироби з ПК характеризуються наявністю на їх полірованих поверхнях подряпин і виколів, що залишилися з попередніх операцій обробки, дефектів, нанесених безпосередньо полірувальним інструментом (подряпини, сітка дрібних подряпин тощо), пор та інших дефектів техногенного або природного походження. Це пояснюється недосконалістю технології фінішної обробки виробів з ПК, відсутністю інструментів, здатних забезпечувати необхідну якість обробки протягом тривалого часу та стабільну продуктивність знімання оброблюваного матеріалу, а також неможливістю повного контролю їх якості, особливо в умовах масового виробництва, та складністю її автоматичного забезпечення і регулювання.

При аналізі процесу витягування алмазних волокон з розплаву полімерного композита через філь'єру установлені закономірності впливу діаметра філь'єри, швидкості витягування, висоти рівня розплаву, його густини, в'язкості та поверхневого натягу на дебіт розплаву і діаметр волокна [3]. Закономірності течії розплаву через філь'єру вивчалися на основі рівняння Нав'є–Стокса й нерозривності:

$$\frac{dU}{dt} = F - \frac{1}{\rho} \text{grad}P + \nu \Delta U, \quad \text{div}U = 0,$$

де:  $\rho$  – густина розплаву;  $F$  – масові сили;  $\Delta$  – оператор Лапласа;  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості;  $U$  – швидкість;  $P$  – тиск;  $t$  – час).

За стаціонарних умов:

$$\frac{dU}{dt} = 0; \quad \frac{dU}{dz} = 0; \quad \text{grad}P = \frac{\partial P}{\partial z} = f(r),$$

коли сила  $F_1 = -\frac{6\sigma d_0 \cos\vartheta}{\rho d^3}$  ( $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу;  $\vartheta$  – кут змочування

розплавом поверхні філь'єри;  $d$  і  $d_0$  – діаметр філь'єри й діаметр її каналу відповідно, залежність швидкості течії розплаву від координати  $r$  визначається формулою

$$U(r) = \frac{\rho g}{4\eta} \left( \frac{d_0^2}{4} - r^2 \right) \left[ \frac{H_u}{H} + \frac{6\sigma d_0 \cos\vartheta}{\rho g d^3} \right],$$

де  $\eta = \rho\nu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості;  $H_u$  – висота рівня розплаву;  $H$  – довжина каналу філь'єри;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Об'ємні витрати розплаву визначаються при цьому формулою [1]

$$Q = 2\pi \int_0^{\frac{d_0}{2}} U(r) r dr = \frac{\pi \rho g d_0^4}{128\eta} \left[ \frac{H_u}{H} + \frac{6\sigma d_0 \cos\vartheta}{\rho g d^3} \right],$$

яка на відміну від класичної формули Пуазейля–Гагена містить ще один доданок, який залежить від поверхневого натягу розплаву й змочування розплавом поверхні філь'єри.

Діаметр волокна залежить від швидкості  $V$  витягування волокна і визначається формулою

$$d_f = \frac{\rho g d_o^2}{8 \eta V} \left[ \frac{H_u}{H} + \frac{6 \sigma d_o \cos \vartheta}{\rho g d^3} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

При виготовленні інструменту і формуванні робочого шару з алмазних волокон, які не уможливають контактування окремих зерен, забезпечується повне виключення конгломератів зерен, що дозволяє стабільно забезпечувати необхідну якість обробки виробів з ПК.

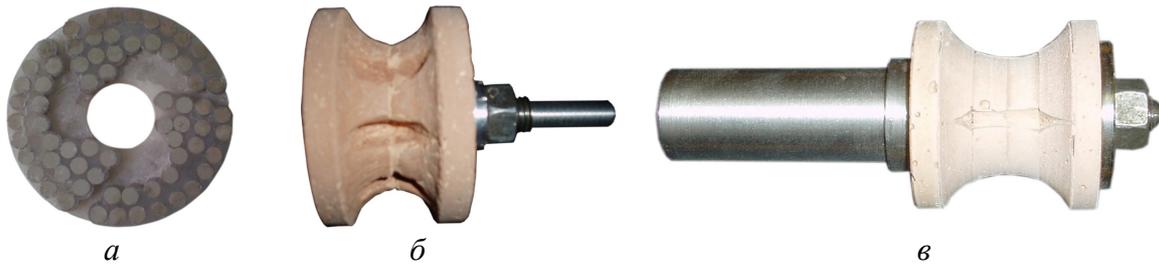


Рис. 1. Інструменти для фінішної обробки виробів з природного каменю

Робочий шар інструменту, що зображений на рис. 1 *a*, виготовлений з алмазно-поліефірного волокна [5], що виключає можливість утворення конгломератів зерен алмазного мікропорошку завдяки тому, що забезпечується рівномірний розподіл алмазних зерен у робочому шарі інструменту із умови, що зерна алмазів розташовувалися по одному у кожному поперечному перерізі алмазно-полімерного волокна. Для виконання цієї умови діаметр волокна  $D$  визначався із співвідношення  $d_{\max} < D < 2d_{\min}$ , де  $d_{\max}$  і  $d_{\min}$  - верхня і нижня границі основної фракції зерен абразивного порошку, відповідно, що і сприяло еволюції форми лопатей. Для забезпечення рівномірного зносу полімерної матриці і робочих елементів, розроблена конструкція робочого шару інструмента з коефіцієнтом заповнення алмазно-полімерним композитом, який змінюється по коловим зонам. Робочий шар інструменту виконаний у вигляді окремих елементів з алмазно-полімерного волокна діаметром  $d$ , зафіксованих в полімерній матриці. З метою покращення виведення шламу із зони обробки. Робочі елементи, розташовані на передньому фронті лопаті інструмента по логарифмічній спіралі  $r = r_0 \exp(m\varphi)$  ( $r$ ,  $\varphi$  – координати,  $r_0$  – радіус центрального отвору інструменту,  $m$  - постійний параметр), а на задньому фронті – вздовж лінії, утвореної двома параболічними спіралями  $r_{1,2}^2 = 2 \cdot p_{1,2} \cdot (\varphi - \varphi_{01,02})$  з параметром  $p_1 = 2000$  і кутовим зсувом  $\varphi_{01} = \pi/10$  та параметром  $p_2 = 10000$  і кутовим зсувом  $\varphi_{02} = 2\pi/3$  в центральній та периферійній зонах, відповідно та колом радіуса  $R = (2,1-2,4)r_0$ . Профіль полімерної матриці по передньому і задньому фронтах є еквідистантним боковій поверхні елементів робочого шару [6].

**Розробка інструменту для фінішної обробки складнопрофільних поверхонь виробів з природного каменю.** Результати розрахунку ширини заглиблень, що виконуються на робочій поверхні інструмента для полірування складнопрофільної поверхні дозволили виявити зв'язок ширини заглиблення з величиною лінійного зносу криволінійної ділянки робочого шару в процесі роботи. Показано, що в процесі зношування робочої поверхні складнопрофільного інструменту в процесі фінішної обробки виробів з природного каменю тороїдальної або циліндричної форми для забезпечення її еквиди-

стантного зносу необхідно, щоб коефіцієнт заповнення інструмента робочим шаром  $k_r(y)$  зменшувався. Зменшення загальної протяжності робочого шару на ділянці з координатою  $y$  по відношенню до довжини кола (за визначенням коефіцієнта заповнення) еквівалентно зменшенню ширини заглиблень в кутовому вимірі, що може бути досягнуте за рахунок програмованого зменшення ширини заглиблення по мірі збільшення їх глибини.

Комп'ютерне моделювання форми робочого шару інструменту здійснювалось на основі розрахунку інтенсивності зносу та коефіцієнта заповнення його поверхні робочим шаром. Дослідження еволюції форми робочого шару в процесі фінішної обробки складнопрофільної поверхні виробу з природного каменю, профіль якої задано аналітично (тороїдальна поверхня певного радіуса кривини), показують, що радіус кривини інструмента практично не змінюється. Форма обробленої поверхні виробу з природного каменю визначається у відповідності до форми робочої поверхні інструмента з урахуванням її протилежного знаку кривини.

Використовуючи комп'ютерну модель інструмента з привчатою робочою поверхнею для полірування складнопрофільних поверхонь виробів з природного каменю, за технологією Rapid Prototyping [8] в умовах ЗАТ «Конструкторсько-технологічне бюро верифікаційного моделювання та підготовки виробництва», створеного при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків), була виготовлена мастер-модель. Для матеріалізації теоретичної 3D моделі було вибрано спосіб Rapid Prototyping (RP) лазерної стереолітографії (SLA – Stereo Lithographics Apparatus), оскільки він забезпечує можливість виготовлення прототипів або виробів на основі 3D CAD проектування не завдяки відділенню, зняттю припуску з заготовки, а шляхом нарощування, пошарового додавання матеріалу, тобто генеративним способом. Нарощування матеріалу при SLA методі відбувається в перехідній фазі від рідини, або в вигляді порошку до твердого стану. Виготовлення мастер-моделі в даному випадку не вимагає ніяких форм та інструментів і не залежить від зносу інструмента при формоутворення різанням, штамповкою або ковкою. Цей спосіб є найефективнішою складовою інтегрованого процесу швидкісного формоутворення та виготовлення виробів та прототипів, оскільки він дозволяє реалізувати прямий перехід від електронного образу до твердо тільної мастер-моделі при мінімальному часі створення виробу довільної, самої складної форми, причому чим складніша конфігурація виробу, тим більші ефективність і переваги процесу [8]. Після отримання прототипу за генеративною технологією Rapid Prototyping проводилась верифікація моделі, яка, зазвичай, виконується в такій послідовності: створення 3D CAD моделі – електронного образу прототипу; побудова твердотільного прототипу за технологією Rapid Prototyping Manufacturing (RPM) на устаткуванні для SLA; контроль RPM прототипу для виявлення похибок; корегування 3D CAD моделі і остаточне виготовлення мастер-моделі за виправленою електронною моделлю; перевірка виправленої твердотільної RPM моделі-прототипу на відповідність вимог до її геометричних параметрів форми [8].

Для відтворення інструмента за мастер-моделлю остання була розпиляна спеціальним ультратонким відрізним кругом на дві однакові частини. В литевій формі були виготовлені окремі симетричні елементи складнопрофільного інструмента на основі кремнійорганічної сполуки Віксинт-К-68, каталізатора K18 та полірувального порошку  $SeO_2$  [9]. Інструмент для фінішної обробки складнопрофільних поверхонь виробів з природного каменю, що складався з двох симетричних елементів, наведено на рис. 1 б.

В промисловому виробництві все більшого використання набувають гнучкі шліфувальні та полірувальні диски на полімерній основі, що виробляються з викорис-

танням термоформованого каркасу, які характеризуються економічними перевагами та широкими технологічними можливостями створення інструментів різноманітної геометрії. За розробленою нами дослідною технологією виготовлення складнопрофільного полірувального інструмента були сформовані робочі елементи профільного круга на термоформованому каркасі. Форма, кривина робочої поверхні, геометричні розміри і розміри заглиблень на бічній поверхні елементів симетричного інструмента розраховані у відповідності до методики розрахунку конструкції робочого шару інструменту для обробки будівельних та декоративних виробів з каменю, викладеної в [4]. Характеристика елементів круга на термоформованому каркасі: полірувальний порошок - суперабразив «FR-Remillox», матеріал зв'язуючого - спеціальні термореактивні смоли та полімерні композиції – при оптимальному співвідношенні.

За розробленою технологією виготовлення складнопрофільного полірувального інструмента були сформовані робочі елементи профільного круга на термоформованому каркасі. Форма, кривина робочої поверхні, геометричні розміри і розміри заглиблень на бічній поверхні симетричних елементів інструменту розраховані у відповідності до викладеного вище на основі комп'ютерного моделювання конструкції робочого шару інструменту (рис. 1 в) для обробки будівельних та декоративних виробів з каменю, виконаного на термоформованому каркасі [7]. Характеристика елементів круга на термоформованому каркасі: полірувальний порошок - суперабразив «FR-Remillox», матеріал зв'язуючого - спеціальні термореактивні смоли та полімерні композиції – при оптимальному співвідношенні.

### Висновки

Експериментальна перевірка працездатності описаних вище інструментів при фінішній обробці виробів із природного каменю плоскої форми та з профілем, що являє собою частину кола на тороїдальній або циліндричній поверхні, показала, що робочий шар цих інструментів зношується еквідистантно, форма робочих поверхонь інструментів остається незмінною на протязі тривалого часу, а якість оброблених поверхонь задовольняє вимогам міжнародних стандартів.

### Список літератури

1. Підвищення ефективності фінішної обробки складнопрофільних поверхонь деталей з природного каменю / Ковальов С.В., Філатов Ю.Д., Ковальов В.А., Курілович В.Д. // Матер. 11-го Междунар. научн.-техн. сем. «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте», 21-25 февраля 2011 г. – г. Свалява. – Киев: АТМ України, 2011.– С. 133–135.

2. Инструменты на термоформованном каркасе для финишной обработки неметаллических материалов / Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Крамар В.Г., Ковалев С.В., Замотаев П.В., Филипович А.Ю. // Сб. научных трудов «Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения». – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2006.– С. 369–372.

3. Філатов Ю. Д., Курілович В. Д. Виготовлення алмазно-полієфірного волокна для фінішної обробки природного каменю // Матер. 11-го Междунар. научн.-техн. сем. «Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте», 21-25 февраля 2011 г. – г. Свалява. – Киев: АТМ України, 2011. – С. 305–307.

4. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Ковалев С.В. Износ рабочего слоя инструмента при финишной алмазно-абразивной обработке деталей из неметаллических материалов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. научн.-техн. Сб. – Ха-

рьков: НТУ «ХПИ», 2007. – Вып. 73. – С. 329–334.

5. Патент на корисну модель № 38450 Україна, МПК 7 B24D 17/00. Абразивне волокно / Філатов Ю. Д., Курілович В. Д., Сідорко В. І., Ковальов С. В., Крамар В. Г.; ІНМ НАН України. – № u200810470, заявл. 18.08.2008 р., Опубл. 12.01.2009 р., Бюл. № 1. – 4 с.

6. Патент на корисну модель № 43681, B24D17/00 Інструмент для фінішної обробки / Філатов Ю. Д., Сідорко В. І., Курілович В. Д., Біловол В. С.; ІНМ НАН України. – Опубл. 25.08.2009, Бюл. № 3. – 4 с.

7. Філатов Ю. Д., Ковальов С. В., Сідорко В. І. Вплив кінематичних і режимних параметрів процесу обробки природного та штучного каменю на якість оброблених поверхонь / Матер. 9-го Междунар. научн.-техн. сем. «Современные проблемы подготовки производства, заготовительного производства, обработки, сборки и ремонта в промышленности и на транспорте», 23-27 февраля 2009 г. – г. Свалява. – Киев: АТМ Украины, 2009. – С. 280–284.

8. Введение в организацию производства: учеб. Пособие / Э. Весткемпер, М. Декер, Л. Ендуби, А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок; пер. С нем.; под. об. Ред. А.И. Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 376 с.

9. Декларацийний патент 15433 Україна, МПК (2006) B24D3/20. Маса для виготовлення робочого шару абразивного інструмента / Новіков М. В., Філатов Ю. Д., Сідорко В. І., Скрябін В. В., Крамар В. Г., Ковальов С. В., Богатирьова Г. П., Полтарацький В. Г., Нікітін Ю. І.; ІНМ НАН України. – Опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.

*Рецензент: Гусев В. В.*

*Надійшла до редколегії: 23.03.2011 р.*

**КУРИЛОВИЧ В. Д.  
КОВАЛЁВ С. В.  
ФИЛАТОВ Ю. Д.**

**Інститут надтвердих матеріалів НАН України, м. Київ, Україна  
СОВРЕМЕННЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПРИРОДНОГО КАМНЯ**

Определены наиболее рациональные конструкции инструмента для финишной обработки плоских и сложнопровильных поверхностей изделий из природного камня. Разработаны компьютерные модели инструментов с прерывчатой рабочей поверхностью. Описаны способы изготовления инструмента из алмазно-полимерного волокна с использованием технологии Rapid Prototyping и на термоформованном каркасе.

**Інструмент, природний камінь, модель, складнопрофільна поверхність**

**V.D. KURILOVICH  
S.V. KOVALYOV  
Y.D. FILATOV**

**Institute of superhard materials NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
MODERN TOOLS FOR FINISH MACHINING OF PRODUCTS FROM NATURAL STONE**

The most rational designs of the tool for finishing machining of profile-composite surfaces of details from a natural stone are determined. Computer models of tools with discrete working surface are developed. The methods of manufacturing of the tool with diamond-polymer fibre technology with Rapid Prototyping and thermoformed frame are described.

**Tool, natural stone, model, complex-profile surface**

УДК 621.922:621.762

**В.С. ПОЛЩУК** (д-р. техн. наук)

Науково-технологічний центр «Реактивелектрон» НАН України, м. Донецьк, Україна

**П.Г. МАТЮХА** (д-р. техн. наук, проф., [stanki-donntu@mail.ru](mailto:stanki-donntu@mail.ru))**М.Я. ГОНОПОЛЬСКИЙ** (студент)

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕРНОВОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗО-АБРАЗИВНОГО ПОРОШКУ ДЛЯ МАГНІТНО - АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ

Виконані дослідження зернового складу залізо-абразивних порошків для магнітно-абразивної обробки, що дозволили визначити вміст крупної, основної та мілкої фракцій в порошках різної зернистості, які необхідні для розрахунків середніх зважених розмірів часток.

**Ключові слова:** Магнітно-абразивна обробка, залізо-абразивні порошки, зернистість, фракції

### Вступ

Виготовлення продукції, яка спроможна конкурувати, в ряді випадків обумовлене формоутворенням деталей з високою точністю та низькою шорсткістю робочих поверхонь, які, як правило, формуються на фінішних операціях.

Одним з найбільш поширених способів фінішної обробки, що забезпечує низькі параметри шорсткості обробленої поверхні, є магнітно-абразивна обробка (МАО) – обробка феромагнітними порошками у магнітному полі.

Переваги МАО перед традиційними методами механічної абразивної обробки обумовлені особливими властивостями магнітно-абразивного інструменту (МАІ) зі спеціальними властивостями, а саме: відсутністю жорсткого зв'язку між феромагнітними частками, рухомо-скоординованим станом порошкового середовища, здатністю нівелювати відносно оброблюваної поверхні. Все це дозволяє здійснювати рівномірну, продуктивну і високоефективну механічну обробку деталей простої і складної просторових форм, в тому числі виготовлених з важкооброблюваних матеріалів, які мають високу твердість, в'язкість і крихкість.

Аналізуючи існуючі моделі МАІ, які запропоновані в роботах [1-3], необхідно відмітити, що вони не мають інформації про методики, за якими необхідно розраховувати геометричні розміри кульової моделі порошку, що використовується в моделях МАІ. Щоб усунути цей недолік, необхідно спершу дослідити зерновий склад залізо-абразивного порошку різних фракцій.

Метою роботи є визначення параметрів зернового складу залізо-абразивного порошку різних фракцій для МАО.

### Основна частина роботи

Досліджували залізо-абразивні порошки для МАО, виготовлені в науково-технологічному центрі «Реактивелектрон», м. Донецьк, з наступними характеристиками: зернистість порошку 180/100, абразив – синтетичний алмаз зернистістю 7/5, розташування абразиву по поверхні, вміст абразиву – 40%; зернистість порошку 180/100, абразив – карбід титану TiC зернистістю 7/5, розташування абразиву по об'єму, вміст абразиву – 50%; зернистість порошку 250/180, абразив – карбід титану TiC зернистістю 7/5, розташування абразиву по об'єму, вміст абразиву – 50%.

Статистичне дослідження геометричних розмірів зерен (висоти  $h$  ширини  $b$ , довжини  $l$ ) проводили вибіркоким методом, сутність якого полягає в наступному. З генеральної сукупності, якою є досліджуваний залізо-абразивний порошок, вибирали  $n$  об'єктів (зерен). Надалі дослідженню піддавалися ці  $n$  об'єктів для визначення характеристик всієї генеральної сукупності.

Обсяг вибірки визначали, скористувавшись теоремою Колмогорова [4], тому що вона справедлива не тільки для нормального, але й для будь-якого безперервного теоретичного розподілу:

$$\lambda = D\sqrt{n}, \quad (1)$$

де  $n$  – об'єм вибірки;

$\lambda$  – квантілі розподілу Колмогорова;

$D = |F_n(x) - F(x)|$  – максимальна абсолютна величина різниці між теоретичною та емпіричною функціями розподілу; тут  $F_n(x)$  – емпірична функція розподілу;  $F(x)$  – невідома функція розподілу.

Вирішивши формулу (1) відносно  $n$ , будемо мати:

$$n = \left(\frac{\lambda}{D}\right)^2. \quad (2)$$

Обсяг вибірки розраховували на рівні значущості 0,05, прийнятому в технічних дослідженнях, при максимальній величині різниці між теоретичною та емпіричною функціями розподілу рівній 0,1; тоді

$$n = \left(\frac{1,36}{0,1}\right)^2 = 185.$$

Для подальших досліджень зернового складу залізо-абразивного порошку обсяг вибірки приймали  $n = 200$  штук.

Визначення геометричних розмірів зерен магнітно-абразивного порошку виконували на мікротвердомірі ПМТ-3 (рис. 1), додатково оснащеному мікрометром та сіткою (рис. 2). Сітка була встановлена в окуляр мікротвердоміра, а об'єктив 3 забезпечував збільшення в 130 разів.

Зерна досліджуваного порошку розміщували на поверхні підкладки з глянцевого картону 1, встановленій на предметний столик 2 мікротвердоміра, після чого виконували вимірювання висоти, ширини та довжини зерна.

Висоту зерна  $h$  вимірювали за допомогою мікрометра 4, закріпленого за допомогою магнітної стійки 5 на стійці 6 мікротвердоміра ПМТ-3. При цьому фокусування оптичної системи мікротвердоміра робили спочатку на глянцева підкладку, а потім на найвищу точку зерна. Різницю показань мікрометра при фокусуванні на підкладку та найвищу точку зерна приймали за висоту зерна.

Ширину  $b$  та довжину зерна  $l$  знаходили за кількістю кліток, які займала проекція зерна на сітці. Точність вимірювань ширини та довжини зерна дорівнювала 2,5 мкм.

Результати вимірювань трьох вибірок об'ємом 200 зерен для кожної характеристики залізо-абразивного порошку заносили в протокол, які піддавали статистичному аналізу з метою визначення однорідності досліджуваних параметрів.

Статистичні характеристики вибірок наведені в таблиці 1.



Рис. 1. Мікротвердомір ПМТ-3, оснащений для вимірювання розмірів зерен залізо-абразивного порошку

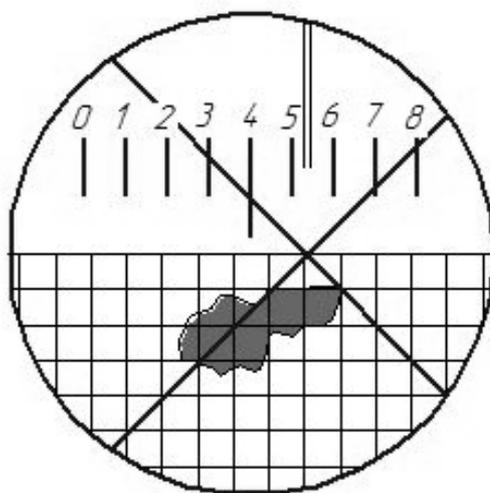


Рис. 2. Вид поля окуляра при вимірі довжини та ширини зерна за допомогою сітки

Таблиця 1. Статистичні характеристики вибірок зерен залізо-абразивного порошку

Характеристики порошку	Розміри порошку	Вибірки	Вибіркове середнє значення, мкм	Вибіркова дисперсія, мкм <sup>2</sup>	Розрахункове значення критерію Кохрана	Табличне значення критерію Кохрана
1	2	3	4	5	6	7
250/180* Fe + TiC	Висота, $h_i$	1	213,38	455,76	0,345	0,4031
		2	217,68	438,16		
		3	213,18	425,92		
	Ширина $b_i$	1	202,08	1194,04	0,358	
		2	196,63	1028,13		
		3	199,00	1117,09		
	Довжина, $l_i$	1	291,75	3028,33	0,358	
		2	278,00	3791,21		
		3	283,75	3798,68		
180/100 Fe + TiC	Висота $h_i$	1	130,02	410,42	0,341	
		2	124,32	403,93		
		3	124,70	401,91		
	Ширина, $b_i$	1	113,15	513,40	0,336	
		2	112,57	512,55		
		3	110,37	516,80		
	Довжина, $l_i$	1	161,97	811,50	0,336	
		2	156,52	815,00		
		3	159,32	808,00		
180/100 Fe + AC	Висота, $h_i$	1	130,02	425,60	0,339	
		2	124,32	427,70		
		3	124,70	432,30		
	Ширина, $b_i$	1	113,15	885,30	0,336	
		2	112,57	891,40		
		3	110,37	895,60		
	Довжина, $l_i$	1	161,97	1788,00	0,336	
		2	156,52	1780,00		
		3	159,32	1796,00		

\* Дослідження розмірів зерен порошку Fe + TiC 250/180 виконані Бугайовим Р.А

Скориставшись даними стовпця 5 таблиці 1 виконаємо перевірку вибірок на однорідність з використанням критерію Кохрана [4] за формулою:

$$g_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{i=1}^k S_i^2}, \quad (3)$$

де  $S_{\max}^2$  – максимальна вибіркова дисперсія серед порівнюваних;

$\sum_{i=1}^k S_i^2$  – сума всіх вибірових дисперсій.

Для 95% довірчої вірогідності для  $n=144$  та  $k = 3$  табличне значення критерію Кохрана  $g_{\text{табл}}$  дорівнює 0,4031 [4].

Враховуючи, що для висоти, ширини та довжини зерен розрахункове значення критерію Кохрана  $g_p$  менше  $g_{\text{табл}}$  (див. табл. 1), вибірки являються однорідними. Це дозволяє використовувати для оцінки параметрів генеральної сукупності середньозважену дисперсію  $S^2_{c_{зв}}$  та розраховувати середні значення геометричних розмірів зерен за формулами [4]:

$$S^2_{c_{зв}} = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i^2}{3}; \quad (4)$$

$$h_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^3 \bar{h}_i}{3}; \quad (5)$$

$$b_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^3 \bar{b}_i}{3}; \quad (6)$$

$$l_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^3 \bar{l}_i}{3}. \quad (7)$$

95%-ві довірчі інтервали на середні величини висоти, ширини та довжини зерен знаходимо, скориставшись середньозваженою дисперсією  $S^2_{c_{зв}}$  та критерієм Стьюдента [4], за формулою

$$\Delta h, \Delta b, \Delta l = \pm \frac{\sqrt{S^2_{c_{зв}} \cdot t_{0,95}}}{\sqrt{n}}, \quad (8)$$

де  $t_{0,95}$  – критерій Стьюдента; значення якого при  $n = 200$  дорівнює 1,98 [4];

$n$  – кількість вимірів, за якими знаходиться середнє значення параметру, що визначається.

Значення геометричних розмірів зерен порошку для МАО для об'єднаних вибірок наведені в таблиці 2, а вміст фракцій – в таблиці 3.

Як видно із табл. 3 великий відсоток складають крупна та основна фракції. Це обумовлено використанням ситового способу для розділення зерен по розміру, при якому розмір отвору верхнього сита обмежує тільки розміри поперечного перетину зерна порошку, тобто висоту та ширину. В цьому випадку зерно, яке має довжину, що перевищує розмір отвору в верхньому ситі має можливість пройти через отвір, якщо зерно орієнтовано перпендикулярно до площини сита. Дрібна фракція зерен може з'явитись в порошок лише випадково, що підтверджується її незначним відсотком.

### Висновки

1. Вибірки, залізо-абразивного порошку вмішують крупну та основну фракції, відсоток яких залежить від зернистості та марки порошку. Вміст дрібної фракції незначний.

2. Довжина зерен порошку перевищує розмір сітки верхнього сита, що може призвести до помилки в розрахунках моделі порошку з використанням розмірів верхнього та нижнього сит.

3. Виконані дослідження є вихідними даними для розрахунку розмірів моделі зерен залізо-абразивного порошку.

Таблиця 2. Розміри зерен порошку для об'єднаних вибірок об'ємом 600 зерен

Характеристики порошку	Параметр зерна	Середньозважена дисперсія, мкм <sup>2</sup>	Середнє значення параметру, мкм	95% довірчий інтервал
250/180 Fe + TiC	Висота, $h_{\text{сер}}$	439,95	214,75	$\pm 2,9$
	Ширина, $b_{\text{сер}}$	1119,09	199,24	$\pm 4,7$
	Довжина, $l_{\text{сер}}$	3539,41	284,50	$\pm 8,35$
180/100 Fe + TiC	Висота, $h_{\text{сер}}$	405,42	126,35	$\pm 2,83$
	Ширина, $b_{\text{сер}}$	514,25	111,96	$\pm 3,17$
	Довжина, $l_{\text{сер}}$	811,50	159,27	$\pm 3,98$
180/100 Fe + AC	Висота, $h_{\text{сер}}$	428,53	126,34	$\pm 2,89$
	Ширина, $b_{\text{сер}}$	890,76	112,03	$\pm 4,17$
	Довжина, $l_{\text{сер}}$	1788,00	159,27	$\pm 5,92$

Таблиця 3. Вміст крупної, основної і дрібної фракцій в об'єднаних вибірках об'ємом 600 зерен

Характеристика порошку	Параметри вибірки	Зерна крупної фракції, мкм	Зерна основної фракції, мкм	Зерна дрібної фракції, мкм
250/180 Fe + TiC *	Кількість зерен у вибірці	$550 \geq l \geq 275$	$250 \geq l \geq 180$	$175 \geq l \geq 150$
		357	229	14
	Вміст зерен у порошку, %	59,5	38,1	2,4
		Кількість зерен у вибірці	$300 \geq l \geq 200$	$180 \geq l \geq 100$
180/100 Fe + TiC	Вміст зерен у порошку, %	103	492	5
		17,2	82	0,8
180/100 Fe + AC	Кількість зерен у вибірці	$325 \geq l \geq 185$	$180 \geq l \geq 100$	$95 \geq l \geq 75$
		253	341	6
	Вміст зерен у порошку, %	42,17	56,83	1

### Список літератури

1. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.
2. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Мн.: Наука и техника, 1981. – 328 с.
3. Майборода В.С. Основы створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – Київ: НТУУ «КПІ», 2002. – 37 с.
4. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

Рецензент: Полтавець В.В.

Надійшла до редколегії: 4.04.2011р.

**В.С. ПОЛИЩУК**

Научно-технологический центр «Реактивэлектрон» НАН Украины

**П.Г. МАТЮХА**

**Н.Я. ГОНОПОЛЬСКИЙ**

Донецкий национальный технический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗО-АБРАЗИВНОГО  
ПОРОШКА ДЛЯ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ**

Выполнены исследования зернового состава железо-абразивных порошков для магнитно-абразивной обработки, которые позволили определить содержание крупной, основной и мелкой фракций, необходимых для расчета средневзвешенных кубических размеров частиц порошка.

**Магнитно-абразивная обработка, железо-абразивные порошки,  
зернистость, фракции**

**V.S. POLISCHUK**

Scientific and Technological Centre «REACTIVELEKTRON» of Ukrainian  
National Academy of Sciences

**P.G. MATJUHA**

**N.Y. GONOPOLSKY**

Donetsk National Technical University

**RESEARCH OF GRAIN STRUCTURE OF IRON-ABRASIVE POWDER  
FOR MAGNETIC ABRASIVE MACHINING**

Researches of grain structure of iron-abrasive powders for magnetic-abrasive machining which have allowed to determine the maintenance of large, basic and small fractions which are necessary for calculation of average weighed cubic sizes of powder particles are executed.

**Magnetic abrasive machining, iron-abrasive powders, graininess, fractions**

УДК 621.9

**Н.С. РАВСЬКА** (д-р. техн. наук, проф., kafedratp@online.ua)  
**О.А. ОХРИМЕНКО** (канд. техн. наук, доц. alexhobs77@online.ua)  
**А.С. КУЛІНІЧ** (студент)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м.  
Київ, Україна

## **ОСОБЛИВОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПЕРЕДНЬОЇ ЛІНІЙЧАТОЇ ГВИНТОВОЇ ПОВЕРХНІ ЗУБІВ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ**

В роботі запропоновано визначення профілю дискового інструменту для точної обробки лінійчатих гвинтових поверхонь на основі вирішення просторової задачі формоутворення. Досліджено на прикладі формоутворення гвинтової стружкороздільної канавки черв'ячних фрез зміну форми профілю круга від установочних параметрів. Також запропоновано заміну криволінійного профілю круга дугою кола, за методом невизначених множників Лагранжа.

**Ключові слова:** Профіль інструменту, формоутворення, обробка, черв'ячна фреза

### **Вступ**

В сучасному машинобудуванні при обробці складних фасонних поверхонь фрезеруванням широке застосування отримав інструмент з гвинтовими стружкороздільними канавками. Найбільш розповсюдженими представниками таких фрез є черв'ячні фрези [1], які використовуються для отримання на заготовках деталей поверхні періодичного профілю. Особливістю таких фрез є те, що передня поверхня зубів їх виконана як лінійчата гвинтова поверхня, яку не можливо геометрично точно обробити дисковим інструментом з прямолінійними твірними. В залежності від точності виготовлення такої поверхні залежить точність геометричних параметрів деталі яка буде оброблятися таким інструментом, тому для таких інструментів, як черв'ячні фрези пред'являються додаткові вимоги на прямолінійність твірної передньої поверхні.

Для отримання точної передньої поверхні використовують корекцію профілю формоутворюючого інструменту. В сучасних джерелах [1, 2, 3] пропонуються різні методи корекції (правки) профілю інструменту. Проте враховуючи сучасний розвиток обчислювальної техніки та широке застосування верстатів з ЧПК при виготовленні інструментів вирішена в не повній мірі задача визначення профілю інструменту для геометрично точної обробки лінійчатої гвинтової поверхні.

Точне вирішення цієї задачі базується на розв'язанні задачі формоутворення передньої гвинтової поверхні зуба фрези дисковим інструментом. В роботах [1, 2, 3] було розглянуте дане питання, однак просторова задача вирішувалась спрощено, що не в повній мірі відповідає сучасним вимогам до вирішення цих питань і не дає відповіді якою повинна бути теоретично точна поверхня інструменту для оброблення такої гвинтової поверхні.

### **Основна частина**

#### **Формоутворення лінійчатої гвинтової поверхні**

Задачу точного формоутворення лінійчатої гвинтової поверхні вирішувати будемо з врахуванням установочних параметрів дискового інструменту та просторового характеру формоутворення. Для визначення профілю дискового

інструменту розглянемо наступні системи координат (рис.1) , які зображені в початковому стані.

Де  $S(X, Y, Z)$  - система зв'язана з фрезою;

$S_1(X_1, Y_1, Z_1)$  - допоміжна система координат;

$S_2(X_2, Y_2, Z_2)$  - система зв'язана із дисковим інструментом.

При вибраних системах координат установочними технологічними параметрами будуть:

- $l_{akt}$  – висота по передній поверхні заточуваної частини зуба;
- $r_a$  – радіус вершин зубів фрези;
- $r_f$  – радіус нижньої точки западини зубів фрези, що заточується;
- $H$  - проекція  $l_{akt}$  на вісь  $Y, Y_1$ , висота зуба;
- $\eta$  - кут профілю конічного шліфувального круга;
- $\varepsilon$  - кут розвороту шліфувального круга;
- $A$  - міжцентрова відстань між системами  $S(X, Y, Z)$  та  $S_1(X_1, Y_1, Z_1)$ ;
- $A_1$  – найменша відстань від осі  $X_2$  до центру системи координат  $S(X, Y, Z)$ ;
- $a_2$  - зміщення початку конічної поверхні круга відносно центру координат у системі  $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$ ;
- $\gamma_{instr}$  – передній інструментальний кут фрези;
- $\gamma_{уст}$  – кут установки круга відносно передньої поверхні зуба фрези;
- $R_{kr}$  – радіус заточного круга в проекції його контакту з найнижчою точкою заточуваного зуба фрези по висоті;
- $r_{kr}$  – радіус заточного круга в проекції його контакту з найвищою точкою заточуваного зуба фрези по висоті.

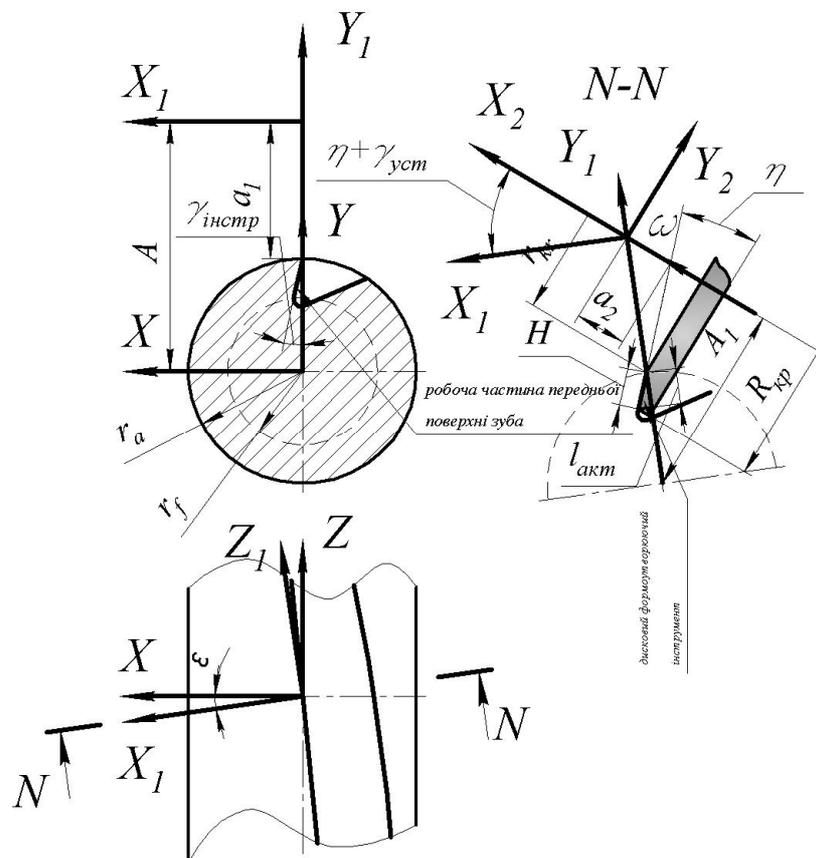


Рис. 1. Установка дискового інструменту при утворенні передньої поверхні зуба фрези

Зв'язок між системами координат визначається залежностями  $S(X, Y, Z)$  та  $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$  :

$$\begin{cases} X_2 = Z \sin \varepsilon + (X \cos(\eta + \gamma_{ycm}) - Y \sin(\eta + \gamma_{ycm})) \cos \varepsilon \\ Y_2 = A + X \sin(\eta + \gamma_{ycm}) + Y \cos(\eta + \gamma_{ycm}) \\ Z_2 = Z \cos \varepsilon + (X \cos(\eta + \gamma_{ycm}) - Y \sin(\eta + \gamma_{ycm})) \sin \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

Установочні параметри з побудови визначаються наступними рівняннями:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma_{ycm} &= \frac{\operatorname{tg} \gamma_{инстр}}{\cos \varepsilon}, \quad a_1 = \frac{R_{kr} - (r_a - r_f) \sin \eta / \cos \gamma_{ycm}}{\cos(\eta + \gamma_{ycm})} \\ r_{kr} &= R_{kr} - (r_a - r_f) \frac{\sin \eta}{\cos \gamma_{ycm}}, \quad A = r_a + a_1 \\ a_2 &= \frac{(R_{kr} \cos \gamma_{ycm} - (r_a - r_f) \cos \eta)(\operatorname{tg}(\eta + \gamma_{ycm}) - \operatorname{tg} \eta)}{\cos \gamma_{ycm}} \end{aligned}$$

Рівняння лінійчатої гвинтової передньої поверхні зуба фрези запишеться:

$$\begin{cases} X_p = (u \sin \gamma_{инстр} - r_a \sin \gamma_{инстр} \cos \gamma_{инстр}) \cos t + (u \cos \gamma_{инстр} + r_a \sin^2 \gamma_{инстр}) \sin t \\ Y_p = -(u \sin \gamma_{инстр} - r_a \sin \gamma_{инстр} \cos \gamma_{инстр}) \sin t + (u \cos \gamma_{инстр} + r_a \sin^2 \gamma_{инстр}) \cos t \\ Z_p = pt \end{cases}$$

де:

- $t$  – незалежний параметр гвинтової поверхні, що визначає положення прямолінійної твірної у просторі;
- $u$  – незалежний параметр гвинтової поверхні, що визначає положення, точки на прямолінійній твірній гвинтової поверхні;
- $p$  – гвинтовий параметр стружкороздільної канавки.

Для фрез з переднім нульовим інструментальним кутом  $\gamma_{инстр} = 0$  рівняння лінійчатої гвинтової передньої поверхні зуба фрези запишеться:

$$\begin{cases} X_p = u \sin t \\ Y_p = u \cos t \\ Z_p = pt \end{cases}$$

### Визначення вихідної інструментальної поверхні

Визначимо вихідну інструментальну поверхню  $I$  дискового інструменту як огинаючу гвинтової поверхні при її обертанні навколо заданої осі  $X_2$ . Для цього

запишемо рівняння контакту в кінематичній формі.

Рівняння вектора нормалі до лінійчатої гвинтової передньої поверхні зуба фрези з довільним переднім кутом в системі  $S(X, Y, Z)$  буде:

$$\bar{N} = \cos(t + \gamma_{инструм}) \bar{i} - \sin(t + \gamma_{инструм}) \bar{j} - \frac{u}{p} \bar{k}$$

- з нульовим інструментальним переднім кутом:

$$\bar{N} = \cos t \bar{i} - \sin t \bar{j} - \frac{u}{p} \bar{k}$$

Швидкість довільної точки гвинтової поверхні при її обертанні навколо осі  $X_2$  в системі  $S(X, Y, Z)$  в загальному виді:

$$\bar{V} = \bar{\omega} \times \bar{R} + \bar{A}_1 \times \bar{\omega}, \quad (2)$$

де:

- $\bar{\omega}$  – одиничний вектор кутової швидкості обертання навколо осі  $X_2$  в системі координат  $S(X, Y, Z)$ ;
- $R$  - радіус вектор довільної точки гвинтової поверхні;
- $A_1$  – радіус вектор мінімальної відстані від центру координат системи  $S(X, Y, Z)$  до напрямку дії вектора  $\bar{\omega}$ .

$$\bar{\omega} = \cos(\eta + \gamma_{ycm}) \cos \varepsilon \bar{i} + \sin(\eta + \gamma_{ycm}) \bar{j} - \cos(\eta + \gamma_{ycm}) \sin \varepsilon \bar{k}$$

$$\bar{A}_1 = -A \sin(\eta + \gamma_{ycm}) \cos(\eta + \gamma_{ycm}) \cos \varepsilon \bar{i} + A \cos^2(\eta + \gamma_{ycm}) \bar{j}$$

$$- A \sin(\eta + \gamma_{ycm}) \cos(\eta + \gamma_{ycm}) \sin \varepsilon \bar{k}$$

В розгорнутому вигляді рівняння (2) запишеться:

- лінійчата гвинтова передня поверхня зуба фрези з довільним переднім кутом;

$$\bar{V} = \cos(\eta + \gamma_{инструм}) \sin \varepsilon (-A + r_a \sin \gamma_{ycm} \sin(\gamma_{ycm} + t) + u \cos(\gamma_{ycm} + t)) +$$

$$pt \sin(\eta + \gamma_{инструм}) \bar{i} - \cos(\eta + \gamma_{инструм}) (pt \cos \varepsilon + \sin \varepsilon (u \sin(\gamma_{ycm} + t) -$$

$$r_a \sin \gamma_{ycm} \cos(\gamma_{ycm} + t))) \bar{j} + \cos(\eta + \gamma_{инструм}) \cos \varepsilon (-A + r_a \sin \gamma_{ycm} \sin(\gamma_{ycm} + t) +$$

$$u \cos(\gamma_{ycm} + t)) + pt \sin(\eta + \gamma_{инструм}) \bar{k}$$

- лінійчата гвинтова передня поверхня зуба фрези з нульовим переднім кутом;

$$\begin{aligned} \bar{V} = & \cos\eta \sin\varepsilon (u \cos t - A) + p t \sin\eta \bar{i} - \cos\eta (p t \cos\varepsilon + u \sin t - r_a \sin t \sin\varepsilon) \bar{j} + \\ & \cos\eta \cos\varepsilon (u \cos t - A) - u \sin\eta \sin t \bar{k} \end{aligned}$$

Рівняння контакту запишеться:

- лінійчата гвинтова передня поверхня зуба фрези з довільним переднім кутом;

$$\begin{aligned} \bar{NV} = & \frac{1}{p} (\cos(\eta + \gamma_{\text{інструм}}) (\cos\varepsilon (u (A - u \cos(\gamma_{\text{узм}} + t)) + \\ & \sin(\gamma_{\text{узм}} + t) (p^2 t - r_a u \sin \gamma_{\text{узм}})) + \\ & \sin(\eta + \gamma_{\text{інструм}}) (\cos(\gamma_{\text{узм}} + t) (p^2 t - r_a u \sin \gamma_{\text{узм}}) + u^2 \sin(\gamma_{\text{узм}} + t))) = 0 \end{aligned}$$

- лінійчата гвинтова передня поверхня зуба фрези з нульовим переднім кутом;

$$\begin{aligned} \bar{NV} = & \frac{1}{p} (\cos\eta \cos\varepsilon (u (A - u \cos t) + p^2 t \sin t) \\ & + p \cos\eta \sin\varepsilon (u - a \cos t) + \sin\eta (p^2 t \cos t + u^2 \sin t)) = 0 \end{aligned}$$

Розв'язок рівняння контакту будемо знаходити чисельно задаючись зміною параметру  $u$  в межах, що описує робочу ділянку поверхні і знаходимо значення параметру  $t$ . Підставивши знайдені значення параметрів  $u$ ,  $t$  в рівняння лінійчатої гвинтової передньої поверхні зуба фрези отримуємо значення точок характеристики  $(X_{2ХАР}, Y_{2ХАР}, Z_{2ХАР})$  – контакту вихідної інструментальної поверхні з гвинтовою поверхнею (рис.2).

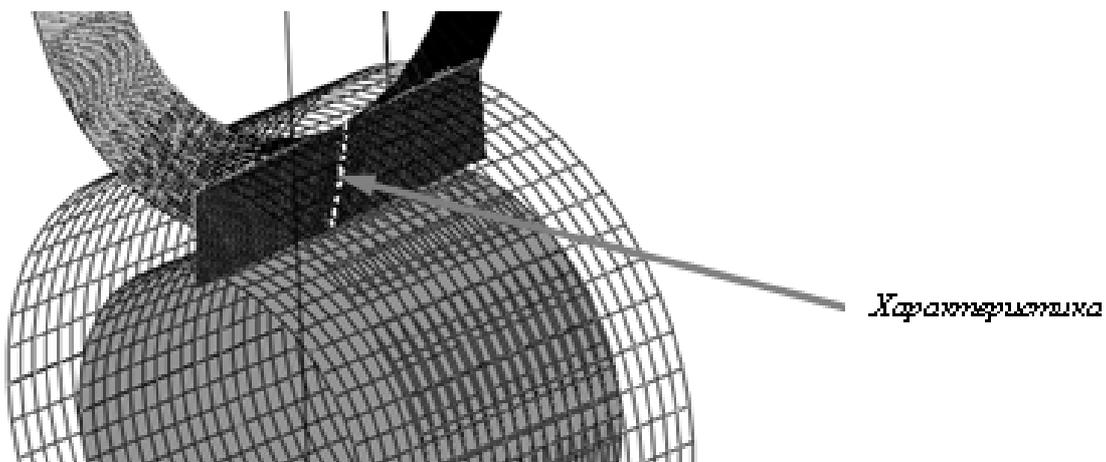


Рис. 2. Характеристика контакту вихідної інструментальної поверхні з гвинтовою передньою поверхнею зуба

Підставивши координати характеристики в рівняння зв'язку між системами координат  $S$  та  $S_2$  (1) отримуємо характеристику в системі пов'язаної з вихідною інструментальною поверхнею (ВІП). Координати точок осевого профілю ВІП дискового інструменту в системі  $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$  визначаються за залежностями:

$$R_{instr} = \sqrt{Y_{2XAP}^2 + Z_{2XAP}^2}; \quad X_{instr} = X_{2XAP}$$

### Визначення профілю правки заточного круга

Кінцева операція виготовлення фрези заточка її по передній поверхні конічним кругом, тому необхідно розрахувати криву правки (рис.3) цього круга вздовж його прямолінійної твірної за наступними залежностями:

$$\begin{cases} X_{np} = -X_{instr} \sin \eta + R_{instr} \cos \eta \\ Y_{np} = X_{instr} \cos \eta + R_{instr} \sin \eta \end{cases}, \quad (3)$$

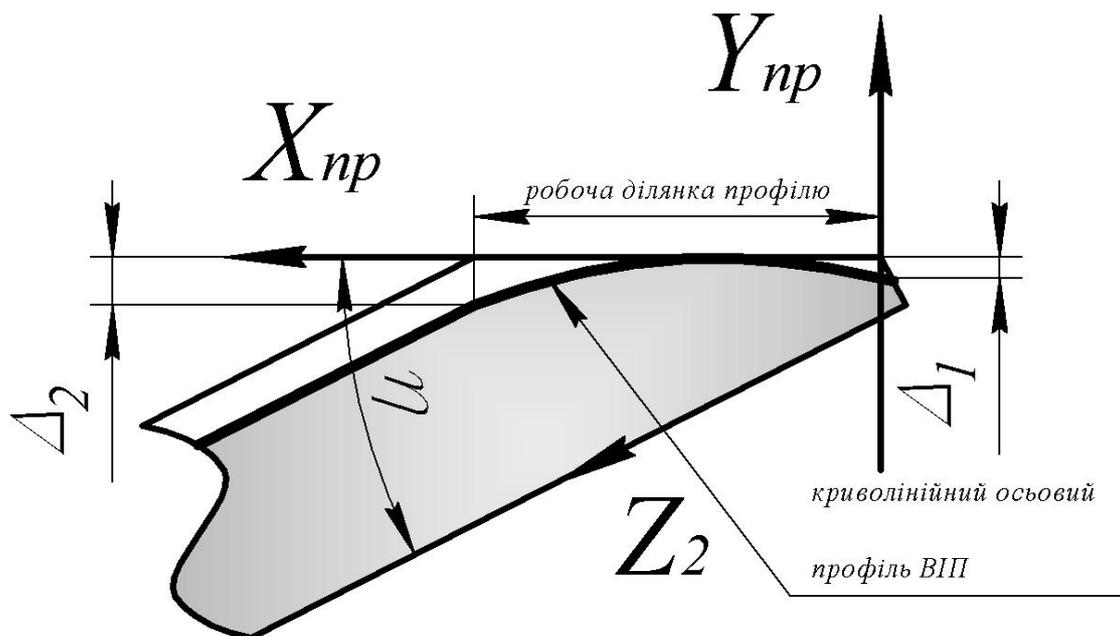


Рис. 3. Схема правки шліфувального круга

Для прикладу розраховано криву правки круга рис.4. для заточки гвинтової стружкороздільної канавки поверхні черв'ячної фрези  $t=10$  мм,  $d_a=180$  мм з параметрами крок  $7532$ мм,  $r_a=90$ мм,  $r_f=65$ мм,  $R_{kr}=100$ мм,  $\varepsilon=3.7^\circ$ ,  $\gamma_{instrum}=0$  при різних кутах профілю круга  $\eta$   $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ . За результатами розрахунків зі зменшення кута профілю конічного шліфувального круга збільшується величина правки круга, причому за значенням  $\Delta_2 < \Delta_1$ .

Було розраховано вплив розмірів заточного круга на величину правки рис.5. За результатами розрахунків зі збільшенням діаметру круга величина правки зростає.

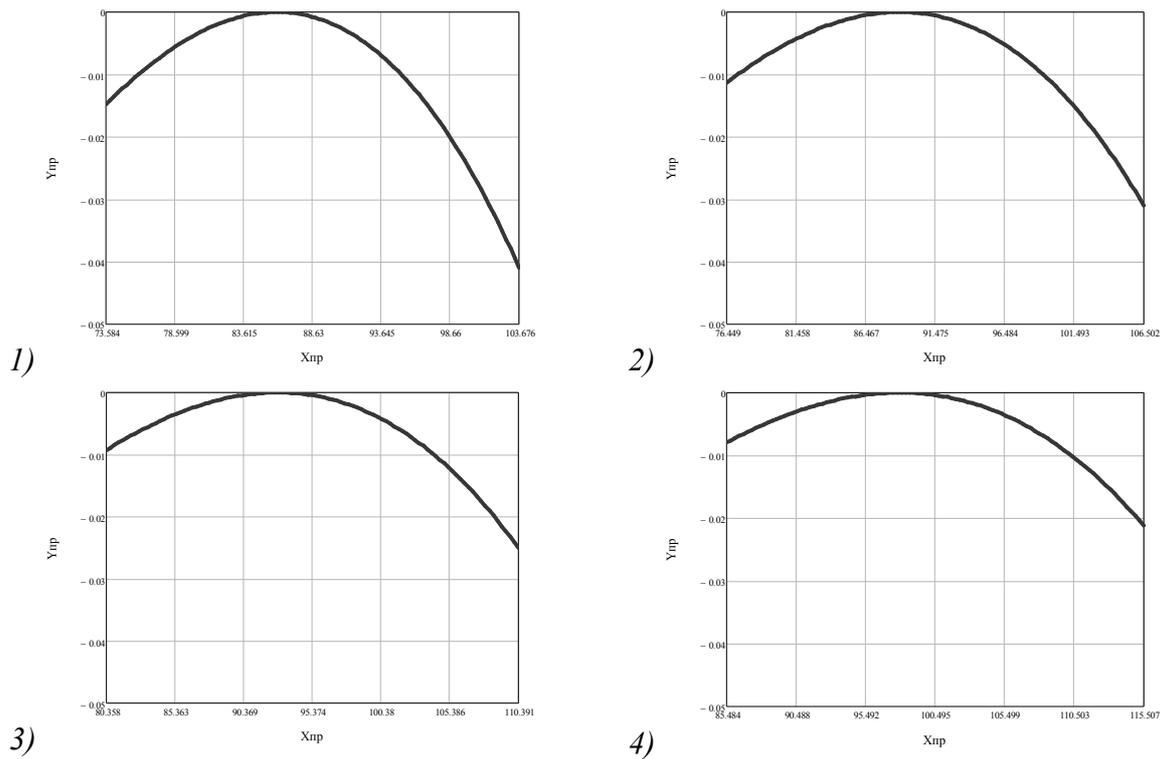


Рис. 4. Крива правки круга при заточуванні гвинтової поверхні з параметрами крок 7532мм,  $r_a=90$ мм,  $r_f=65$ мм,  $R_{kr}=100$ мм,  $\varepsilon=3.7^0$ ,  $\gamma_{інструм}=0$  при різних кутах профілю круга  $\eta$  1)-  $15^0$ , 2)-  $20^0$ , 3)-  $25^0$ , 4)-  $30^0$

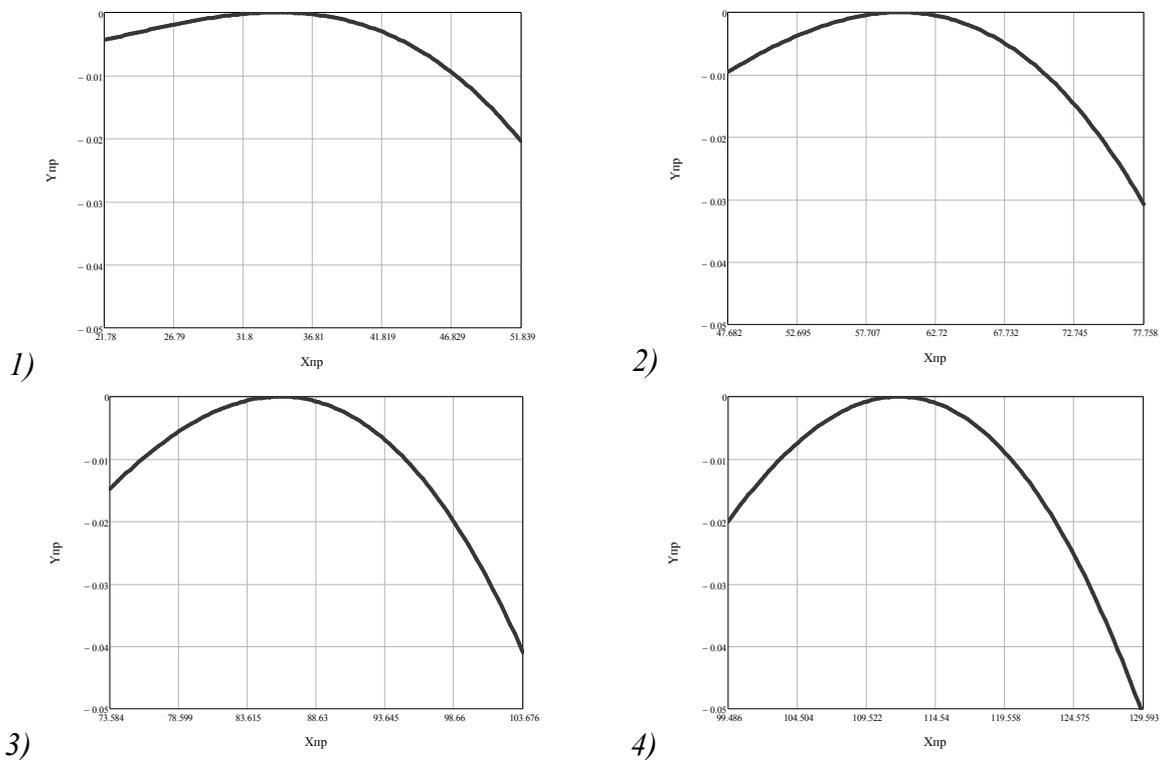


Рис. 5. Крива правки круга при заточуванні гвинтової поверхні з параметрами крок 7532мм,  $r_a=90$ мм,  $r_f=65$ мм,  $\eta_f=15^0$ ,  $\varepsilon=3.7^0$ ,  $\gamma_{інструм}=0$  при різних значеннях радіуса заточного круга  $R_{kr}$  1)- 50 мм, 2)- 75 мм, 3)- 100 мм, 4)- 125мм

Для заточних верстатів, що не мають в своїй конструкції ЧПК механізму правки, має практичне застосування розрахунок параметрів сферичної правки круга, що заміняє криволінійний профіль круга рис.6. Для цього необхідно розрахувати параметри заміни криволінійного профілю круга, що описується рівнянням (3).

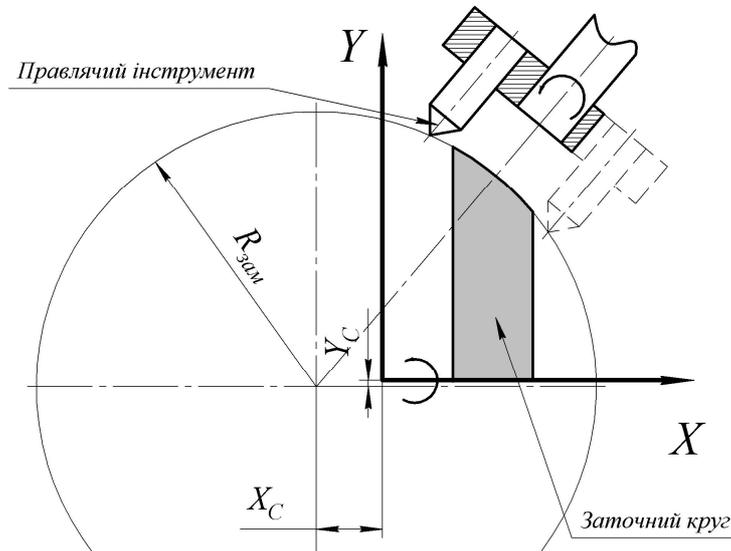


Рисунок 6. Сферична правка круга.

Особливістю заміни є те, що профіль круга, який заміняє, повинен проходити через точку, яка має мінімальне відхилення значення величини правки  $\Delta$ , що дорівнює  $\theta$  в точці  $[X_k \ Y_k]$  і це коло має дотичну в цій точці під кутом профілю прямолінійної твірної круга, що для обраної системи координат (рис.6)  $\psi = \pi/2 + \eta$ . Вважаючи те, що профіль круга отримуємо у вигляді набору точок  $[X_i \ Y_i]$ , де  $i=1 \dots N$ ,  $N$  - кількість розрахункових точок, то параметри заміняючого кола знайдемо за допомогою методу невизначених множників Лагранжа [4], вирішуючи систему наступну рівнянь:

$$F(A, B, C, \lambda 1, \lambda 2) = \sum_{i=1}^N [(X_i^2 + Y_i^2 - A \cdot X_i - B \cdot Y_i + C)^2 + \lambda 1 (X_k^2 + Y_k^2 - A \cdot X_k - B \cdot Y_k + C) + \lambda 2 (2X_k + 2Y_k \operatorname{tg} \psi - A - B \operatorname{tg} \psi)];$$

$$\frac{\partial F(A, B, C, \lambda 1, \lambda 2)}{\partial A} = 0; \quad \frac{\partial F(A, B, C, \lambda 1, \lambda 2)}{\partial B} = 0; \quad \frac{\partial F(A, B, C, \lambda 1, \lambda 2)}{\partial C} = 0; \quad \frac{\partial F(A, B, C, \lambda 1, \lambda 2)}{\partial \lambda 1} = 0;$$

$$\frac{\partial F(A, B, C, \lambda 1, \lambda 2)}{\partial \lambda 2} = 0; \quad X_c = A/2; \quad Y_c = B/2; \quad R_{\text{зам}} = \sqrt{X_c^2 + Y_c^2 - C}$$

На прикладі розрахованої кривої правки круга для заточки гвинтової поверхні з параметрами крок 7532мм,  $r_a=90$ мм,  $r_f=65$ мм,  $R_{kr}=100$ мм,  $\varepsilon=3.7^\circ$ ,  $\gamma_{\text{інструм}}=0$ ,  $\eta=15^\circ$ , при кількості заміняючих точок  $N=100$ , було розраховано параметри заміняючого кола і отримані наступні значення  $X_c = -3686.6$ мм,  $Y_c = -898.6$  мм,  $R_{\text{зам}} = 3793.6$  мм. Розраховані значення технологічно реалізуються на заточному верстаті і даний метод може бути використаний при розрахунках параметрів правки за вказаним методом.

### Висновок

В роботі вирішена задача визначення профілю дискового інструменту при обробці лінійчатих гвинтових поверхонь на прикладі формоутворення стружкороздільних гвинтових канавок черв'ячних фрез. Досліджено зміну профілю

дискового інструменту в залежності від установочних параметрів. Показано, що зі зменшенням кута профілю конічного шліфувального круга збільшується величина правки круга, при чому за значенням  $\Delta_2 < \Delta_1$ , зі збільшенням діаметру круга величина правки зростає.

Запропоновано залежності для заміни криволінійного профілю круга дугою кола для сферичної правки круга.

#### Список літератури

1. Лагутин С.А., Сандлер А.И. Производство червячных передач. – М.: Машиностроение, 2008. – 324 с.
2. Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа: справочник/ Под. ред. Г.А. Харламова. – М.: Машиностроение, 2007. – 240 с.
3. Родин П.Р., Климов В.И., Якубсон С.Б. Технология изготовления зуборезного инструмента. – К.: Техника, 1982. – 208 с.
4. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 1986. – 319 с.

*Рецензент: Гриньов Ю.О.*

*Надійшла до редколегії: 20.04.2011р.*

**Н.С. РАВСКАЯ  
А.А. ОХРИМЕНКО  
А.С. КУЛИНИЧ**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

#### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМОБРАЗОВАНИЯ ПЕРЕДНЕЙ ЛИНЕЙЧАТОЙ ВИНТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

В работе предложено определение профиля дискового инструмента для точной обработки линейчатых винтовых поверхностей на основе решения пространственной задачи формообразования. Исследовано на примере формообразования винтовой стружечной канавки червячных фрез изменение формы профиля круга в зависимости от установочных параметров. Также предложено замену криволинейного профиля круга дугой окружности используя метод неопределенных множителей Лагранжа.

**Профиль инструмента, формообразование, обработка, червячная фреза**

**N. RAVSKAJA  
A. OHRIMENKO  
A. KULINICH**

National technical university of Ukraine “The Kyiv polytechnical institute”, Kyiv, Ukraine

#### **FEATURES OF SURFACE GENERATION OF FRONT LINEAR SCREW SURFACE OF CUTTING TOOL TEETH**

In the paper the determination of profile of disk tool for exact machining of linear screw surfaces on the basis of the decision of spatial problem of surface generation is offered. Change of the form of profile of wheel depending on adjusting parameters is investigated on an example of surface generation of screw cutting part flutes of worm mills. Also it is offered the replacement of a curvilinear profile of wheel with an arch of circle using a method of uncertain multipliers of Lagrange.

**Tool profile, surface generation, processing, worm mill**

УДК 621.9

**Н.С. РАВСЬКА** (д-р. техн. наук, проф., kafedratp@online.ua)  
**О.А. ОХРИМЕНКО** (канд. техн. наук, доц. alexhobs77@online.ua)  
**Я.Р. ДУБИК** (студент)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м.  
Київ, Україна

## ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ЗАТОЧКИ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ

В роботі розглядається спосіб підвищення точності черв'ячних фрез з гвинтовими стружкороздільними канавками при їх заточці за рахунок вибору параметрів заточування такого інструменту.

**Ключові слова:** Механічна обробка, черв'ячні фрези, заточування інструменту

### Вступ

З розвитком машинобудування зростають вимоги до складових елементів машин і механізмів. Одними із таких, є зубчасті передачі. Якість та точність виготовлення яких впливає на роботу всього механізму чи машини.

Найбільш поширеним способом виготовлення зубчастих циліндричних коліс є процес зубофрезерування черв'ячними фрезами. Тому для якісного виготовлення зубчастих коліс необхідно спроектувати та виготовити працездатний зуборізний інструмент – точну черв'ячну фрезу.

Створення точних черв'ячних фрез для виготовлення зубчастих коліс вимагає вирішення ряду серйозних задач, пов'язаних з проектуванням фрез їх виготовленням та експлуатацією.

До яких відносяться:

- забезпечення раціональної геометрії різальної частини;
- проектування черв'ячних фрез, які б забезпечували необхідну точність зубчастих коліс;
- забезпечення необхідної точності фрези при її виготовленні.

Питання технології виготовлення черв'ячної фрези є важливою проблемою, так як ці питання майже не враховуються на етапі проектування цього різального інструменту. Черв'ячні фрези виготовляються, як з прямими так із гвинтовими стружкороздільними канавками. Фрези з гвинтовими канавками мають більш раціональну геометрію різальної частини ніж фрези з прямими канавками тому вони більш поширені [6].

Однією з проблем при виготовленні таких фрез є забезпечення необхідної точності передньої гвинтової поверхні зуба, точність якої регламентується відхиленням від прямолінійності передньої поверхні зуба [8]. Це пов'язано з тим, що не можна точно обробити передню гвинтову поверхню зуба заточним кругом з конічною поверхнею. В наслідок чого на передній поверхні зуба виникає випуклість чи ввігнутість в залежності від установочних параметрів при заточуванні, величина якої при стандартних параметрах установки значно перевищує допуск на точність передньої поверхні.

Для точної обробки необхідно правити круг по криволінійній твірній, що ускладнює процес заточки таких фрез. При чому в більшості заточних верстатів правка круга виконується по прямій чи по округлій твірній, що не дає змоги теоретично точно

обробити передню поверхню зуба фрези. Для того, щоб точно обробити таку поверхню необхідно застосовувати спеціальну криволінійну правку поверхні заточного круга [1, 2, 3, 4], що ускладнює процес виготовлення таких фрез і збільшує вартість виготовлення такого інструменту.

На підприємствах де використовуються черв'ячні фрези не завжди для виготовлення нової деталі виготовляють нові фрези, або замовляють придбання нових фрез, а намагаються за необхідності використовувати черв'ячні фрези, які вже є в наявності, так як цей інструмент дорогий у своєму виготовленні. Тому в роботі [7] було вирішено питання, чи можна за рахунок зміни технологічних параметрів формоутворення передньої гвинтової поверхні при заточці зменшити відхилення від прямолінійності передньої поверхні фрези і підвищити точність і знизити витрати на виготовлення та експлуатацію такого інструменту. Було доведено, що за рахунок установочних параметрів заточного круга можна зменшити відхилення передньої поверхні від прямолінійності конічним кругом без використання криволінійної правки. На рис.1 показано що за рахунок зміни установочних параметрів круга, це кут розвороту  $\varepsilon$  та кут установки  $\gamma$  шліфувального круга, отримуємо різний профіль передньої поверхні, який характеризується максимальним відхиленням від прямолінійності  $f_\gamma$ . В залежності від кута розвороту шліфувального круга  $\varepsilon$  отримуємо різний профіль передньої поверхні зуба від випуклого рис1.а для  $\varepsilon = \beta$  - кут підйому гвинтової лінії на ділільному циліндрі рис1.а для до увігнутого для  $\varepsilon = 0^\circ$  рис1.б, однак максимальна величина відхилення  $f_\gamma$  буде мати значення в межах допуску.

Тому виникає питання чи можливо розрахувати так установочні параметри заточки кругом, щоб профіль передньої поверхні мав нульову кривизну  $f_\gamma = 0$ .

### Основна частина

Для цього необхідно було вирішити оптимізаційну задачу для, яких параметрів  $\varepsilon$  та  $\gamma$  - установки круга при заточуванні черв'ячної фрези відхилення  $f_\gamma$  буде найменшим.

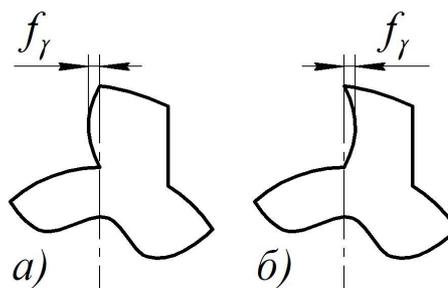


Рис. 1. Профіль передньої поверхні зуба черв'ячної фрези з гвинтовою стружкороздільною канавкою отриманий заточуванням конічною стороною шліфувального круга при різних параметрах його установки а) випуклий профіль, б) увігнутий профіль

Використовуючи результати роботи [7] постійними установочними параметрами є при обраній системі координат (рис.2):

- $l_{akt}$  – висота по передній поверхні заточуваної частини зуба;
- $r_{a0}$  – радіус вершин зубів фрези;
- $H$  - проекція  $l_{akt}$  на вісь  $Y$ ,  $Y_1$ , висота зуба;
- $\eta$  - кут профілю шліфувального круга;

- $a$  - міжцентрова відстань між системами  $S(X, Y, Z)$  та  $S_1(X_1, Y_1, Z_1)$ ;
  - $a_2$  - зміщення початку конічної поверхні круга відносно центру координат у системі  $S_2(X_2, Y_2, Z_2)$ ;
  - $R_{kr}$  – радіус заточного круга в проекції його контакту з найнижчою точкою заточуваного зуба фрези по висоті;
  - $r_{kr}$  – радіус заточного круга в проекції його контакту з найвищою точкою заточуваного зуба фрези по висоті.
  - $p_1$ - гвинтовий параметр стружкової канавки.
- Параметри які підлягають оптимізації:
- $\varepsilon$  - кут розвороту шліфувального круга;
  - $\gamma$  – передній інструментальний кут фрези (кут установки);

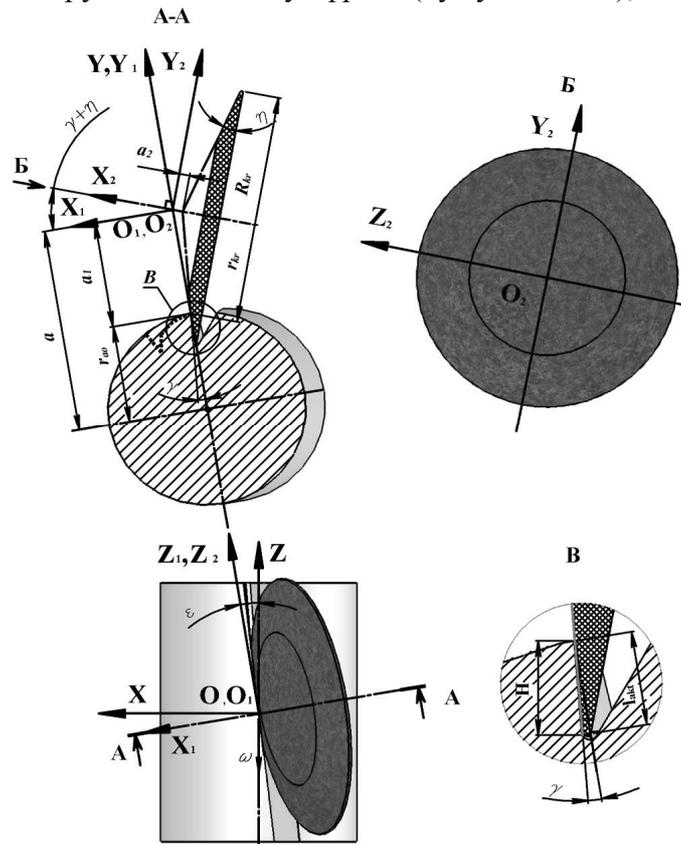


Рис. 2. Установка заточного круга при формоутворенні передньої поверхні зуба фрези.

Згідно роботи [7] рівняння контакту є наступним:

$$l_{akt} = \frac{H}{\cos \gamma} ; a_1 = \frac{R_{kr} - H \sin \eta / \cos \gamma}{\cos(\eta + \gamma)} ; r_{kr} = R_{kr} - H \frac{\sin \eta}{\cos \gamma} ;$$

$$a_2 = \frac{(R_{kr} \cos \gamma - H \cos \eta)(\operatorname{tg}(\eta + \gamma) - \operatorname{tg} \eta)}{\cos \gamma} ; a = r_a + a_1 ;$$

$$\operatorname{tg} \varepsilon [p_1 \cos(\eta + \gamma) + l \operatorname{cost} \cdot \sec^2 \eta \cdot \sin(\eta + \gamma) - (a \operatorname{cost} + (-a_2 \operatorname{cost} + p_1 \sin t \sin(\eta + \gamma)) \operatorname{tg} \eta)] -$$

$$[a \cos(\eta + \gamma) + l \sec^2 \eta \cdot \sin t + (p_1 \operatorname{cost} + \sin t (a_2 - a \sin(\eta + \gamma))) \operatorname{tg} \eta] = 0 \quad (1)$$

де  $l, t$  – незалежні змінні параметри, що описують конічну поверхню заточного круга і відповідають за радіус і кутове положення точки конічної поверхні відповідно, що розглядається. Змінюючи параметр  $l$  в вибраних межах підставляючи в рівняння контакту (1) знаходимо значення параметра  $t$ .

Підставляючи знайдені значення в рівняння конічної поверхні знаходимо координати характеристики – лінії контакту конічної сторони круга з передньою гвинтовою поверхнею зуба фрези.

Координати точок осевого перерізу підраховуються за наступними залежностями :

$$\rho_{хар} = \begin{pmatrix} -l \operatorname{tg} \eta - a_2 \\ l \sin t \\ l \cos t \end{pmatrix};$$

$$\theta_{хар} = -\frac{z_{хар} \cos \varepsilon - (x_{хар} \cos(\eta + \gamma) - y_{хар} \cos(\eta + \gamma)) \sin \varepsilon}{p_1};$$

$$x_{ос} = (z_{хар} \sin \varepsilon + (x_{хар} \cos(\eta + \gamma) - y_{хар} \sin(\eta + \gamma)) \cos \varepsilon) \cos \theta_{хар} + (x_{хар} \sin(\eta + \gamma) + y_{хар} \cos(\eta + \gamma) + a) \sin \theta_{хар};$$

$$y_{ос} = -(z_{хар} \sin \varepsilon + (x_{хар} \cos(\eta + \gamma) - y_{хар} \sin(\eta + \gamma)) \cos \varepsilon) \sin \theta_{хар} + (x_{хар} \sin(\eta + \gamma) + y_{хар} \cos(\eta + \gamma) + a) \cos \theta_{хар}.$$

За допомогою системи автоматизації математичних розрахунків MATLAB та пакету прикладних програм Optimization Toolbox була вирішена задача знаходження таких установочних параметрів для яких значення  $f_\gamma$  було б мінімальним.

Як показали розрахунки, існує таке значення установочних параметрів  $\varepsilon$  і  $\gamma$  для яких значення  $f_\gamma$  найменшим ніж приведеними у роботі [5] рис.3.

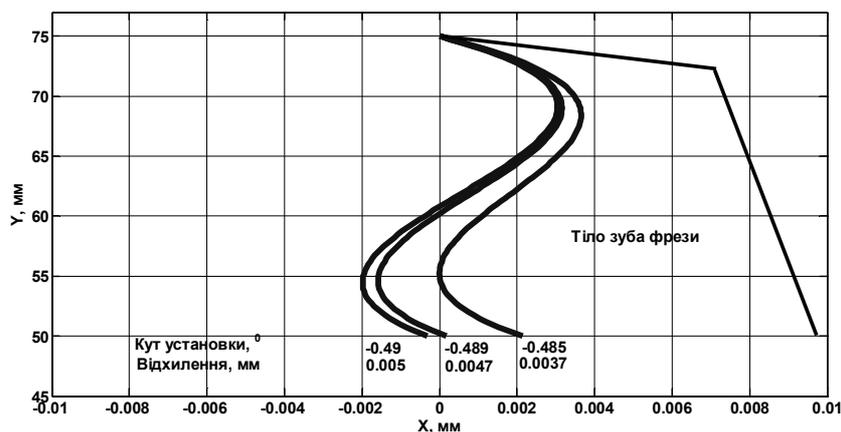


Рис. 3. Профіль передньої поверхні фрези  $m=10\text{мм}$ ,  $d_{a0}=150\text{мм}$ ,  $D_{kr}=200\text{мм}$ ,  $\eta=15^\circ$ ,  $\gamma_{фрези}=0^\circ$ , в залежності від кута розвороту  $\varepsilon=1,28^\circ$ , кут нахилу гвинтової лінії на ділільному циліндрі складає  $\beta=4,5886^\circ$

Розрахунки показали, що неможливо отримати профіль передньої поверхні зуба фрези з нульовою кривизною при її формоутворенні конічною поверхнею заточного круга, однак за рахунок раціонального вибору установочних параметрів круга при

заточці можна зменшити суттєво ці відхилення, при чому профіль передньої поверхні зуба буде складатись, (рис.3) як випуклої ділянки у ніжки зуба так і опуклої ділянки у вершини зуба фрези. Кут розвороту круга при цьому для випадку показаного на рис 3.  $\epsilon = 1,28^\circ$  для кута підйому гвинтової лінії фрези на ділильному циліндрі  $\beta = 4,59^\circ$ , і за значеннями вони не будуть виходить за межі допуску згідно стандартну на контроль параметру  $f_\gamma$ . Для наведеного прикладу розрахунку найбільше значення похибки для параметрів ( $\epsilon = 1,28^\circ$ ,  $\gamma = -0,485^\circ$ ) склало  $\Delta = 0,0037$  мм, що значно менше допуску на виготовлення для таких фрез класу А, який становить 0,04 мм.

Були проведені розрахунки допустимих меж зміни установочних параметрів круга при заточуванні черв'ячних фрез для різних модулів (3мм, 5мм, 10мм) класу А (рис 4, 5, 6). Показані межі допустимих установочних параметрів для допуску згідно [8], а також межі технологічного допуску на виготовлення, це пов'язано з тим, що в технології виготовлення прийнято допуск на виготовлення, установку інструмента зменшувати в три рази від номінального, тим самим забезпечуючи запас на інші похибки від складових технологічної системи.

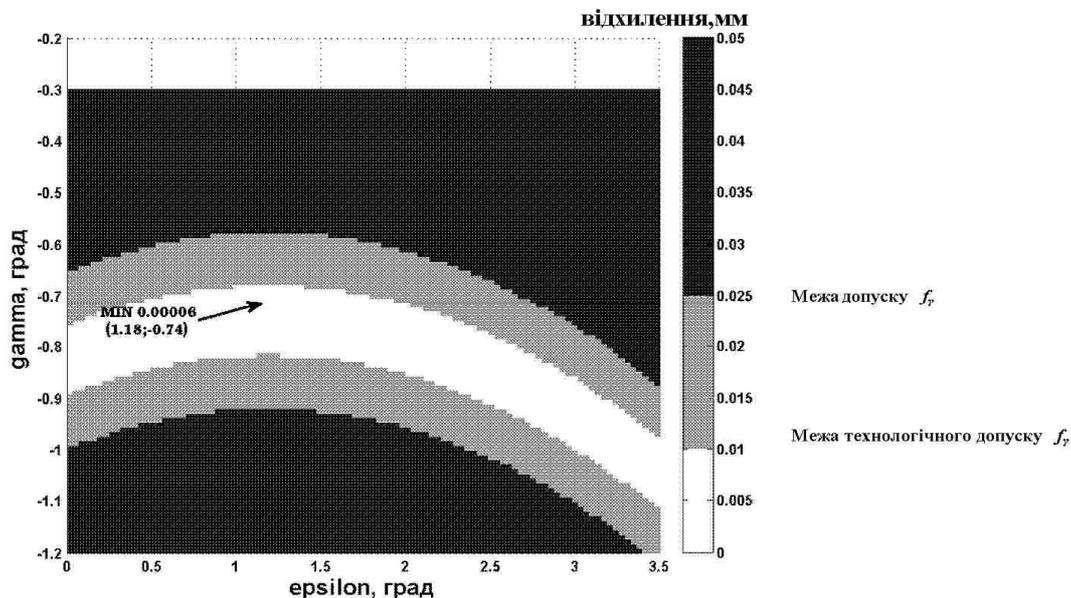


Рис. 4. Допустимі межі зміни установочних параметрів круга при заточуванні черв'ячних фрез  $m=3$ мм,  $d_{a0}=80$ мм,  $D_{kr}=80$ мм,  $\eta=15^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ , кут нахилу гвинтової лінії на ділильному циліндрі складає  $\beta=2,3715^\circ$

З розрахунків показано (рис.4 – 6), що границі допусків є криволінійними, тому для кожного випадку заточування їх необхідно розраховувати в залежності від початкових установочних параметрів круга  $\epsilon$  (epsilon), чи  $\gamma_{кр}$  (gamma). Суттєвий вплив на зміну відхилення від прямолінійності впливає зміна кута  $\gamma_{кр}$  (gamma) установки круга ніж зміна кута розвороту круга  $\epsilon$  (epsilon), що необхідно враховувати при заточуванні черв'ячних фрез.

Для схем заточування при яких  $\epsilon < \beta$  бажано використовувати круги з меншими значеннями кута профілю  $\eta$  і перевіряти чи не має підрізання затилка зуба фрези при заточуванні не робочою частиною круга фрези, а також враховувати це при виборі конструктивних параметрів фрез – кут розгорнутості стружкової канавки фрези та її форму.

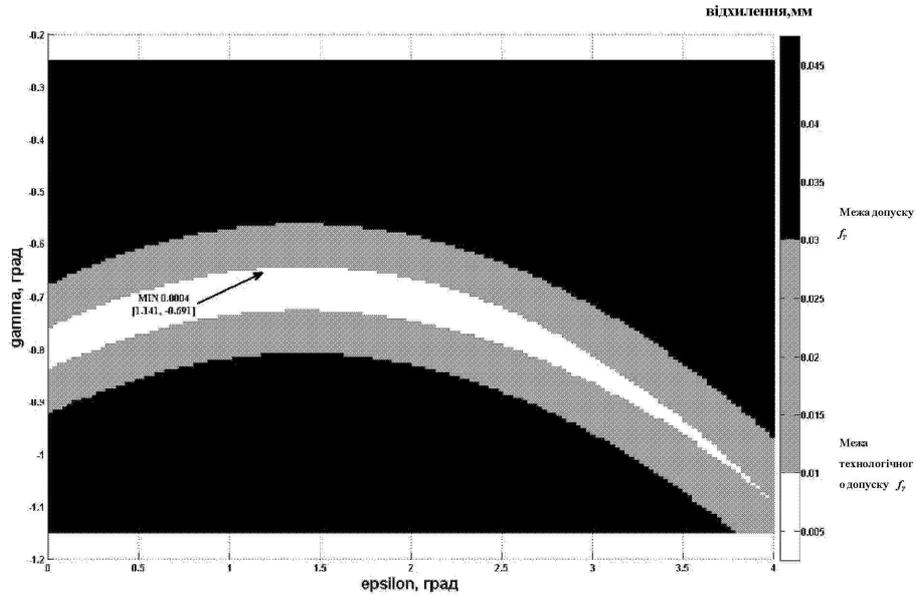


Рис. 5. Допустимі межі зміни установочних параметрів круга при заточуванні черв'ячних фрез  $t=5\text{мм}$ ,  $d_{a0}=100\text{мм}$ ,  $D_{kr}=125\text{мм}$ ,  $\eta=15^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ , кут нахилу гвинтової лінії на ділильному циліндрі складає  $\beta=3,2788^\circ$

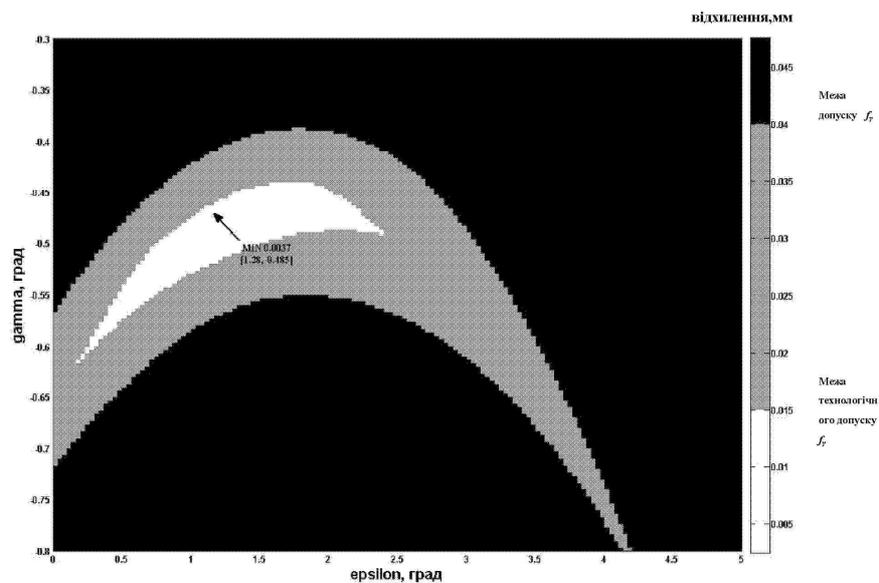


Рис. 6. Допустимі межі зміни установочних параметрів круга при заточуванні черв'ячних фрез  $t=10\text{мм}$ ,  $d_{a0}=150\text{мм}$ ,  $D_{kr}=200\text{мм}$ ,  $\eta=15^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ , кут нахилу гвинтової лінії на ділильному циліндрі складає  $\beta=4,5886^\circ$

### Висновок

В роботі розглянуто спосіб зменшення відхилення профілю передньої поверхні черв'ячних фрез від прямолінійності за рахунок більш раціональних значень установочних параметрів шліфувального круга, наведені допуски на технологічні параметри установки кругів при заточування таких фрез з гвинтовими стружкорозділними канавками. Це дозволяє не використовуючи спеціальну криволінійну правку заточного круга отримувати відхилення передньої поверхні зуба фрези в межах допуску, що значно спрощує виготовлення, знижує затрати на виробництво та експлуатацію такого інструменту.

**Список літератури**

1. Альшименкэ Н.И., Чичерин В.И. Выбор максимального диаметра шлифовального круга при заточке червячных фрез. //Станки и инструмент. - 1980. - №3. - С.16-18.
2. Антонюк В.Е., Кане М.М., Старжинский В.Е. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач. - Минск: УТ Технопринт, 2003. - 766 с.
3. Формоутворення черв'ячних зуборізних фрез./ Богуслаєв В.О., Равська Н.С., Качан О.Я., Балушок К.Б., Мозговий В.Ф., Охріменко О.А. - Запоріжжя, вид. ВАТ «Мотор Січ», 2007р. – 179с.
4. Лагутин С.А., Сандлер А.И. Шлифование винтовых и затылованных поверхностей. - М.: Машиностроение, 1991, - 112 с.
5. Лагутин С.А., Сандлер А.И. Производство червячных передач. - М.: Машиностроение, 2008, - 324 с.
6. Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа: справочник/ под. ред. Г.А. Харламова. - М.: Машиностроение, 2007, - 240 с.
7. Равська Н.С., Охріменко О.А., Дубик Я. Р. Заточування черв'ячних зуборізних фрез. Вісник ЖДТУ №1(29), 2009. Житомир. С.42-48.
8. ГОСТ 9424-80. Фрезы чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем.

*Рецензент: Гриньов Ю.О.*

*Надійшла до редколегії: 20.04.2011р.*

**Н.С. РАВСКАЯ  
А.А. ОХРИМЕНКО  
Я.Р. ДУБИК**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
г. Киев, Украина

**ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ЗАТОЧКИ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ**

В работе рассматривается способ повышения точности червячных фрез с винтовыми стружкораздельными канавками при их заточке за счет более рационального выбора параметров заточки такого инструмента.

**Механическая обработка, червячные фрезы, заточка инструмента**

**N. RAVSKAJA  
A. OHRIMENKO  
J. DUBIK**

National technical university of Ukraine « Kiev polytechnical institute » Kiev, Ukraine  
**INCREASE OF ADAPTABILITY TO MANUFACTURE OF SHARPENING OF  
WORM MILLS**

In the paper the way of increase of accuracy of worm mills with screw flutes for chip division at their sharpening due to more rational choice of sharpening parameters of such tool is considered.

**Machining, worm mills, tool sharpening**

УДК 621.951

**А.Г. ТАТЬЯНЧЕНКО** (д-р. техн. наук, проф., [sopromat@donntu.edu.ua](mailto:sopromat@donntu.edu.ua))**З.С. СЕРГЕЕЧЕВ** (аспирант, [sergeev-z@ya.ru](mailto:sergeev-z@ya.ru))

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПОГРЕШНОСТЯМИ

Рассмотрено моделирование процесса механической обработки резанием поверхности с погрешностями формы и размеров от предыдущих операций. Разработана математическая модель ортогонального резания в условиях, соответствующих обработке отверстий осевым инструментом. Исследованы особенности возникновения и развития динамической составляющей тангенциальной силы резания при резании «по следу».

**Ключевые слова:** Динамическая составляющая силы резания, резание «по следу», поверхность с геометрической погрешностью, термомеханическая модель

### Введение

В настоящее время резервы повышения точности механической обработки, связанные с качеством изготовления технологического оборудования, практически исчерпаны. Однако, существенным резервом является прогнозирование и устранение негативного влияния динамических и тепловых процессов в технологической системе (ТС). В последнее время для компенсации тепловых и динамических процессов в современном машиностроении активно используются различные следящие системы, в частности, станки-гексаподы [1]. Однако, применение такого оборудования для операций механической обработки резанием, использующих формообразующий инструмент (развертывание, зенкерование, протягивание) затруднено ввиду сложности технических решений для реализации следящих систем в ограниченной зоне обработки. Поэтому основным направлением борьбы с негативным влиянием динамических и тепловых процессов на точность обработки таких операций остается развитие математических моделей рабочих динамических и тепловых процессов и поиск на их основе эффективных технологических и технических решений повышения точности лезвийной обработки [2].

Одной из основных причин развития динамических процессов при лезвийной обработке отверстий осевым инструментом является возникновение периодической динамической составляющей силы резания [3] вследствие смещения оси инструмента и отверстия, неравномерности заточки, обработки поверхности «по следу» от предыдущей операции. Влияние первых двух факторов можно уменьшить за счет повышения точности элементов ТС. Последний фактор является объективным следствием процесса обработки многолезвийным инструментом. Поэтому для его устранения необходимо проведение комплексных исследований рабочих процессов на основе термомеханических моделей резания. Ввиду сложности происходящих в зоне резания рабочих процессов, создание аналитических термомеханических моделей при обработке многолезвийным инструментом не представляется возможным. Однако, решению этой проблемы в последние годы способствует развитие численных методов моделирования процессов резания с использованием современных пакетов метода конечных элементов (МКЭ).

Поэтому в настоящей работе поставлена цель – выявление особенностей развития динамической составляющей силы резания на основе численного моделирования рабочих процессов обработки поверхности с погрешностью формы от предыдущих операций с учетом особенностей формообразования при лезвийной обработке отверстия.

### Основное содержание статьи

#### Анализ геометрии поверхности перед чистовой обработкой осевым инструментом.

Получение чистовых отверстий осевыми инструментами является многооперационным процессом, при котором каждая последующая операция повышает качество обрабатываемой поверхности. Известно [4], что погрешность поверхности, полученная на предыдущей операции полностью или частично переносится на последующие операции. Так, появление неуравновешенной периодической силы резания [5, 6], приводит к появлению овальности и огранки отверстия (рис. 1).

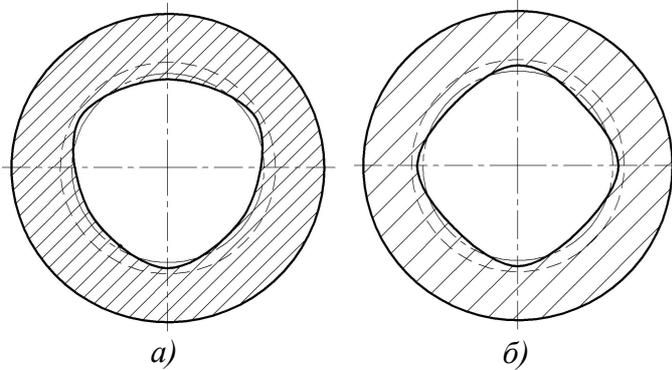


Рис. 1. Огранка отверстия полученная после:  
а) сверления ( $z = 2$ ); б) зенкерования ( $z = 3$ )

При последующих операциях обработки этой поверхности или резании «по следу», такие погрешности могут стать причиной возникновения негативных динамических процессов, снижающие качество обработки. В результате огранки отверстие представляет собой поверхность с периодически повторяющимися неровностями (рис. 2), или волнистой поверхностью. Волнистость занимает промежуточное положение между макрогеометрией и микрогеометрией, поскольку высотные параметры близки к шероховатости, а шаговые – к макрогеометрии. Условно границу между различными порядками отклонений поверхности можно установить по значению отношения шага  $S$  к высоте неровностей  $H$ . При  $(S/H) < 50$  отклонения относят к шероховатости поверхности, при  $50 < (S/H) < 100$  – к волнистости, при  $(S/H) > 100$  – к отклонениям формы.

При обработке отверстий длина волнистой поверхности равна длине окружности диаметром  $d$ :  $l = \pi \cdot d$  (см. рис. 2). При этом шаг волнистой поверхности:

$$S = \pi \cdot d / (z + 1),$$

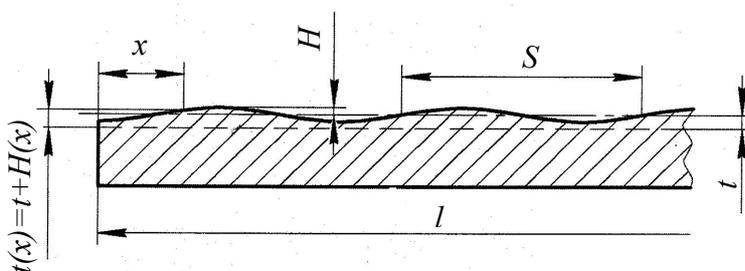


Рис. 2. Структура погрешности геометрии обрабатываемой поверхности

рической погрешности от предыдущих операций обработки отверстия можно описать аналитической зависимостью, вида:

где  $z$  – число зубьев осевого инструмента на предыдущей операции. Высота неровностей близка к шероховатости поверхности  $H \approx R_a$  (при сверлении  $R_a = 3,2 - 25$  мкм, при зенкерования  $R_a = 1,25 - 12,5$  мкм). Таким образом, форму геомет-

$$u(x, \tau) = A \cdot \cos \varphi = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot \tau + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $A$  – амплитуда колебания,  $\varphi$  – фаза волны,  $k$  – волновое число,  $\omega$  – циклическая частота,  $\varphi_0$  – начало фазы,  $\tau$  – время.

Для условий обработки отверстий многолезвийным осевым инструментом  $A = H$ ,  $k = 2\pi/S$ ,  $\varphi_0 = \pi$ ,  $0 \leq x \leq \pi \cdot d$ . Тогда, с учетом (1) отклонение от номинального размера для поверхности, представленной на рисунке 2 можно представить в виде:

$$H(x) = H \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot (z+1)}{d} \cdot x + \pi\right) = H \cdot \cos\left(\frac{z+1}{r} \cdot x + \pi\right),$$

где  $r$  – радиус отверстия,  $d$  – диаметр отверстия,  $H$  – амплитудное значение волнистой поверхности (см. рис. 2),  $x$  – координата положения.

Изменение фактической глубины резания при обработке отверстия с погрешностью геометрии от предыдущей операции примет вид:

$$t(x) = t + H \cdot \cos\left(\frac{n+1}{r} \cdot x + \pi\right),$$

где  $t$  – технологически принятая глубина резания.

## 2. Разработка математической модели процесса обработки поверхностей с геометрическими погрешностями.

Для реализации численного моделирования рабочих процессов обработки поверхности с погрешностью формы от предыдущих операций, воспользуемся алгоритмом последовательного создания модели ортогонального резания на основе стандартного пакета МКЭ LS-DYNA, включающим в себя такие основные этапы: создание объектов, задание граничных и начальных условий, задание свойств контактного взаимодействия.

На этапе создания объектов, для каждого объекта системы формируется конечно-элементная (КЭ) модель: создается геометрическая модель объекта, задаются свойства элементов и свойства материалов, создается КЭ-сетка. Для упрощения и ускорения процесса расчета рассматривалась только часть заготовки. Геометрическая модель заготовки характеризуется длиной  $L$  и толщиной  $h$  (рис. 3). Величина  $h$  принималась равной  $3 \div 5$  глубины резания при развертывании  $t = 0,15$  мм. Длина  $L$  была уменьшена в 10 раз по сравнению с длиной волнистой поверхности на рисунке 2. Для перехода к ортогональному резанию реальный осевой инструмент заменялся геометрией плоского сечения одного зуба развертки. Лезвие зуба имеет передний угол  $\gamma = 0^\circ$ , задний угол  $\alpha = 10^\circ$ .

Среди входных данных одними из наиболее важных являются данные о механических свойствах обрабатываемого материала. Известно, что свойства пластических материалов описываются кривой текучести на диаграмме растяжения-сжатия. Также свойства материалов имеют математическое описание. Большое распространение на сегодня получили эмпирические и полуэмпирические уравнения.

Для описания свойств материала заготовки (сталь 45) была использована модель *Johnson – Cook*. Уравнение, предложенное Джонсоном – Куком [7], наиболее подходит при моделировании процесса обработки резанием пластических материалов:

$$\sigma_s = [A + B \cdot (\bar{\epsilon}^p)^n] \cdot [1 + C \ln(\dot{\bar{\epsilon}}^{p*})] \cdot [1 - (T^*)^m],$$

где  $\sigma_s$  – текущая величина границы текучести,  $\bar{\varepsilon}^p$  – величина интенсивности пластической деформации,  $\dot{\varepsilon}^{p*}$  – интенсивность скорости пластической деформации,  $T^*$  – гомологическая температура. Коэффициенты ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) и показатели степени ( $n$ ,  $m$ ) определяются из диаграммы растяжения при разных скоростях и температурах деформации.

$$T^* = (T - T_0) / (T_{nl} - T_0),$$

где  $T$  – текущая температура,  $T_0$  – температура окружающей среды,  $T_{nl}$  – температура плавления материала.

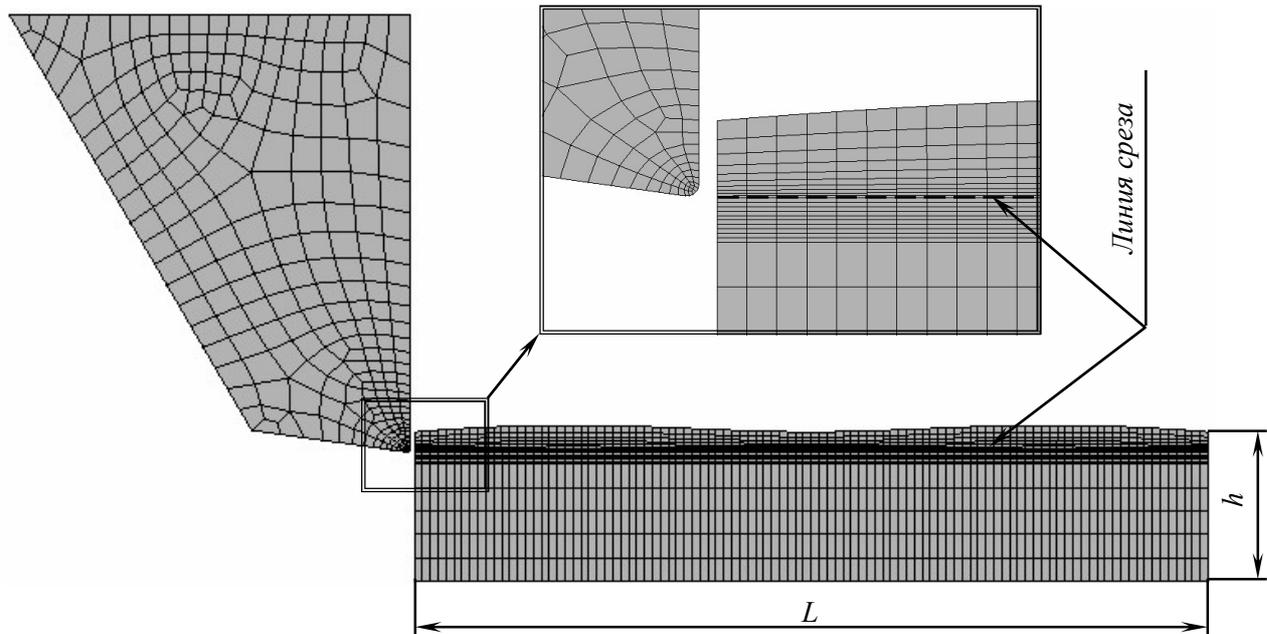


Рис. 3. Расчетная конечно-элементная модель обработки поверхности с погрешностью геометрии

Так как процесс резания сопровождается разрушением материала, то дополнительно к перечисленным свойствам добавляют критерий разрушения (*Eos – Linear Polynomial*). Наиболее общим и чаще всего используемым для моделирования обработки пластических материалов является критерий накопленных пластических деформаций, который впервые предложил В. Л. Колмогоров, а позднее использовали G.R. Johnson и W.H. Cook [7]:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon_f} \geq 1,$$

где  $\varepsilon_f$  – предельно-допустимая величина пластической деформации,  $\Delta \varepsilon$  – приращение пластической деформации.

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \cdot (1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) \cdot (1 + D_5 T^*),$$

где  $\dot{\varepsilon}^*$  – начальная скорость пластической деформации,  $\sigma^* = \sigma / \sigma_{эке}$ ,  $\sigma$  – гидростатическое давление,  $\sigma_{эке}$  – эквивалентное напряжение,  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$  и  $D_5$  – коэффициенты, определяются отдельно для каждого материала в ходе экспериментальных исследований [7].

Инструмент будем рассматривать как абсолютно жесткое тело. Свойства материала такого объекта описывается моделью *Rigid* заданной модулем упругости – 620 ГПа, коэффициентом Пуассона – 0,3 и плотностью материала – 14400 кг/м<sup>3</sup>.

Граничные условия задаем жестким закреплением заготовки по ее нижнему краю. Инструмент перемещается относительно заготовки вдоль оси  $x$  со скоростью  $V = 3,667$  м/с, и ограничен во вращении относительно всех координат.

Контактные условия были заданы моделью разрушения (*Contact – Eroding*) с коэффициентом трения  $f = 0,28$ .

### 3. Исследование динамической составляющей при обработке поверхности с погрешностью геометрии.

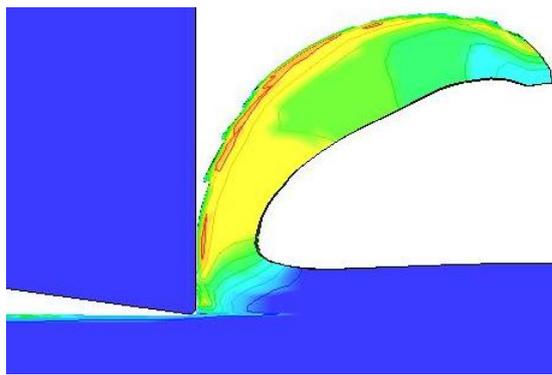


Рис. 4. Характер разрушения материала при численном моделировании

Для выделения динамической составляющей при обработке «по следу» в работе было смоделировано и исследовано два процесса резания – при обработке идеальной поверхности и при обработке поверхности с различными параметрами огранки и волнистости. На рисунке 4 представлена модель разрушения материала при обработке поверхности с геометрической погрешностью.

В качестве основного параметра динамического воздействия рассматривалось изменение тангенциальной составляющей силы резания.

На рисунке 5 представлена диаграмма изменения тангенциальной составляющей силы резания при обработке идеальной поверхности (рис. 5,б) и при обработке поверхности с предварительной погрешностью (рис. 5,а) при амплитуде волнистой поверхности  $H = 0,02$  мм.

Анализ полученных диаграмм для различных значений параметра  $H$  показал, что изменение тангенциальной составляющей силы резания сопровождается двумя типами динамических воздействий – от автоколебаний вследствие неравномерности стружкообразования и от динамического воздействия за счет периодического изменения толщины срезаемого слоя. Поскольку автоколебания при стружкообразовании представляют собой низкочастотные колебания, которые оказывают влияние преимущественно на шероховатость поверхности, для устранения влияния автоколебаний на диаграммах рассматривались только усредненные значения тангенциальной составляющей силы резания.

Динамическая составляющая  $\Delta P_z$  (рис. 5,в) от динамического воздействия за счет периодического изменения толщины срезаемого слоя определялась как разница между усредненными диаграммами изменения тангенциальной составляющей силы резания при обработке поверхности с погрешностью (см. рис. 5,а) и идеальной поверхности (см. рис. 5,б).

Средне-амплитудное значение динамической составляющей силы резания  $\Delta P_z$  (см. рис. 5,в) составило  $A_{cp}^P = 0,037$  кН при среднем значении  $P_z = 0,267$  кН. Анализ динамической составляющей для различных значений параметра  $H$  показал, что при  $H$  приближающемся или равным установленной глубине резания  $t$  амплитуда динамиче-

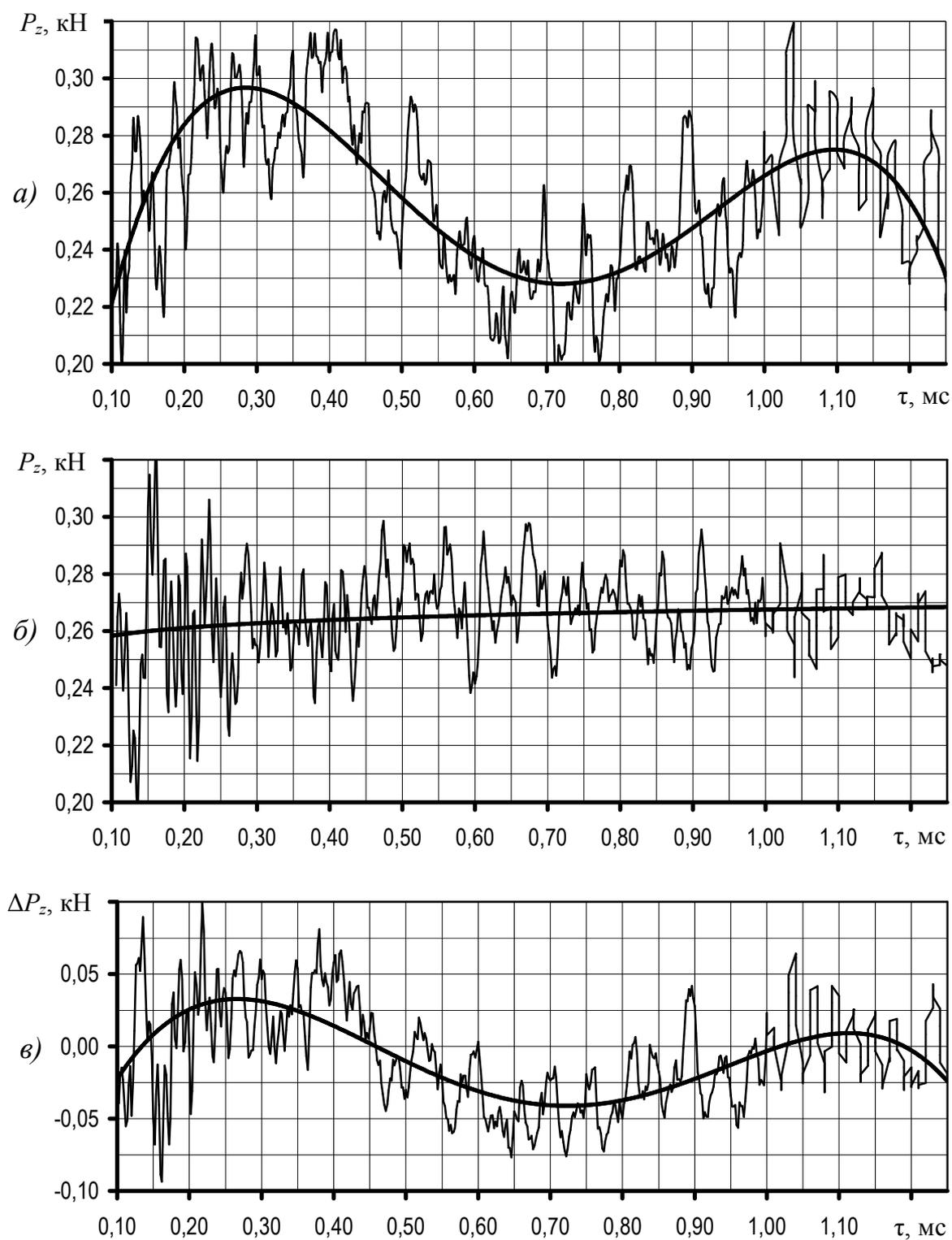


Рис. 5. Изменение тангенциальной составляющей силы резания:

- а) при обработке поверхности с предварительной погрешностью;
- б) при обработке идеальной поверхности;
- в) динамическая составляющая  $\Delta P_z$  при обработке «по следу»

ской составляющей  $\Delta P_z$  может быть сопоставима по величине со статической составляющей  $P_z$  силы резания.

Анализ динамической составляющей тангенциальной силы резания (см. рис. 5,в) показал, что характер ее изменения описывается гармонической зависимостью вида

$$\Delta P_z(\tau) = A_{cp}^P \cdot \cos(\omega \cdot \tau + \varphi'_0), \quad (2)$$

а ее частотные характеристики совпадают с аналогичными параметрами геометрии обрабатываемой поверхности. При этом для всех вариантов нагружения наблюдается смещение фаз колебаний по времени.

Для приведенного варианта (см. рис. 5) смещение фазы составило  $\Delta\tau = 0,025$  мс. Тогда при  $\omega = k \cdot V = 2,5 \cdot V = 9,166 \text{ с}^{-1}$ ,  $\varphi'_0 = \varphi_0 - \Delta\varphi_0 = \pi - 0,07\pi = 0,93\pi$  и  $A_{cp}^P = 0,037$  кН изменение динамической составляющей тангенциальной силы резания согласно (2) определяется зависимостью:

$$\Delta P_z(\tau) = 0,037 \cdot \cos(9,166\tau + 0,93\pi).$$

Аналогичные зависимости были получены для всех вариантов геометрии обрабатываемой поверхности. Анализ этих зависимостей показал, что смещения фаз увеличивается с увеличением геометрической погрешности обрабатываемой поверхности.

### Выводы

1. Проведенные исследования процесса ортогонального резания на основе математической термомеханической модели обработки поверхности с геометрической погрешностью показали, что погрешности от предыдущих операций являются существенным фактором, оказывающим влияния на динамические процессы в зоне резания.

2. Получены аналитические зависимости, связывающие параметры погрешности от предыдущих операций с амплитудой и частотой динамической составляющей силы резания.

3. На основе анализа динамической составляющей силы резания установлено, что применительно к условиям резания при развертывании отверстий амплитуда динамической составляющей может быть сопоставима по величине со статической составляющей.

4. Полученные результаты являются основой для совершенствования динамической модели процесса развертывания отверстий при его полномасштабном моделировании.

### Список литературы

1. Потапов, В. А. Прецизионное оборудование нового поколения [Текст] / В. А. Потапов // СТИН. – 1999. – № 1. – С. 28-31. – ISSN 0869-7566.

2. Малышко, И. А. Современное состояние и перспективы повышения точности чистовой обработки отверстий осевым инструментом [Текст] / И. А. Малышко, А. Г. Татьянченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2007. – № 22. – С. 35-40. – ISBN 966-7851-19-2.

3. Орликов, М. Л. Динамика станков [Текст] / М. Л. Орликов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К. : Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 272 с. – ISBN 5-11-001338-1.

4. Кирсанов, С. В. Влияние конструкции развертки на огранку обработанных отверстий [Текст] / С. В. Кирсанов // СТИН. – 2000. – №4. – С. 22-23. – ISSN 0869-7566.
5. Холмогорцев, Ю. П. Оптимизация процессов обработки отверстий [Текст] / Ю. П. Холмогорцев. – М. : Машиностроение, 1984. – 184 с.
6. Малышко, И. А. Исследование влияния конструктивных элементов разверток на точность обработки отверстий [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Малышко Иван Александрович. – Донецк, 1979. – 24 с.
7. Johnson, G. R. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures/ G. R. Johnson, W. H. Cook // Proceedings of the 7<sup>th</sup> int. Symp. on Ballistics. – 1983. – С. 541-547.

Рецензент: Гриньов Ю.О.

Надійшла до редколегії: 21.04.2011р.

**О.Г. ТАТЬЯНЧЕНКО**

**З.С. СЕРГЕЄЧЕВ**

Донецький національний технічний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ ОБРОБЛЕННІ  
ПОВЕРХОНЬ ІЗ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ПОХИБКАМИ**

Розглянуто моделювання процесу механічної обробки різанням поверхні з похибками форми та розмірів від попередніх операцій. Розроблена математична модель ортогонального різання в умовах, що відповідають обробці отворів осьовим інструментом. Досліджено особливості виникнення та розвитку динамічної складової тангенціальної сили різання при різанні "по сліду".

**Динамічна складова сили різання, різання "по сліду",  
поверхня з геометричної похибкою, термомеханічна модель**

**A.G. TATYANCHENKO**

**Z.S. SERGEYECHEV**

Donetsk National Technical University

**STUDY OF DYNAMIC COMPONENT OF CUTTING FORCE AT MACHINING OF  
SURFACES WITH GEOMETRICAL ERRORS**

Modelling of machining process of a surface with errors of the form and the sizes from the previous operations is considered. The mathematical model of orthogonal cutting in the conditions corresponding to hole-making operations by the round-shank tool is developed. Features of occurrence and development of dynamic component of tangential cutting force at «trail» cutting operation are investigated.

**Dynamic component of cutting force, «trail» cutting operation,  
rough shape surface, thermo-mechanical model**

## **Створення і застосування прогресивних технологій в машинобудуванні**

УДК 621.002

**Л. М. БОГДАНОВА** (канд. техн. наук, ст. преп.),

**Е. М. ЛЮТАКОВА** (ст. преп.)

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина

### **ПОВЫШЕНИЕ УПРАВЛЯЕМОСТИ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Предложена структура информационной системы управления технологическим процессом механической обработки в условиях тяжелого машиностроения, которая основана на принципах индивидуализации и интеллектуализации управления. Определено место экспертной системы в общей структуре информационной системы. Выделены основные управляемые параметры. В составе единого информационного пространства предприятия данная система позволит улучшить качество принимаемых решений в области технологической подготовки производства, а также доставить необходимую информацию до каждого рабочего места.

**Ключевые слова:** Технологический процесс, информационные технологии, автоматизация

#### **Введение**

Информационные технологии (ИТ) превратились из вспомогательного ресурса, дающего дополнительные преимущества для бизнеса, в основную, необходимый для развития экономики. Однако, современные системы CAD/CAM/PDM/FRP/MRP/MES ориентированы на автоматизацию и формирование баз данных (БД) в определенной области деятельности. Они не решают проблему создания единого информационного пространства (ЕИП), предназначенного для синхронизированного обмена данными между различными участниками жизненного цикла изделий (ЖЦИ). Разные автоматизированные информационные системы (АИС) имеют различную организацию и структуру входных и выходных данных, что в частности, ограничивает применение новых ИТ. В результате сильно снижается эффективность всех видов деятельности, и в том числе, связанной с технической подготовкой и оперативным управлением производством. Актуальная задача создания ЕИП и интеграции всех стадий ЖЦИ изделий машиностроения в разной степени решается разработчиками АИС и САПР.

Так, фирма «1С» выпустила ПМК «1С: Машиностроение 8» (ведущий разработчик ЗАО АППИУС), ключевая конфигурация которой содержит отраслевое решение «1С: PDM Управление инженерными данными», охватывающее конструкторско-технологическую подготовку производства. Программное обеспечение (ПО) позволяет параметризовать техпроцесс, осуществлять необходимые технологические расчеты и пересчеты по формулам.

Фирма «Интермех» предлагает продукт Intermech Professional Solutions (IPS), содержащий, среди прочих, модули ведения иерархических справочников, контроля проведения изменений в инженерных данных, экспертную систему, позволяющую проводить проектные расчеты значений любого атрибута, в том числе и режимов резания, по формуле, с помощью таблиц, скриптов, проверять условия на выполнение [1].

В системе управления подготовкой производства и производством Omega Production наряду с другими решается задача управления процессом механообработки деталей на основе расчета режимов резания для широкой номенклатуры инструмента с определением его стойкости, а также шероховатости обработки.

Прогрессивными являются САМ-системы, организованные на основе автоматизации задач, связанных с обработкой конструкторско-технологических элементов (КТЭ), например FeatureCAM фирмы Delcam. Стандартизация данных о детали на основе формализации параметров КТЭ, создание конфигураций обработки, предназначенных для отдельных рабочих мест (или их групп) могут существенно повысить эффективность технологической подготовки для станков с ЧПУ. Кроме того, использование решения в форме КТЭ позволяет автоматизировать передачу конструкторской информации на этап создания технологического процесса обработки детали.

В программном продукте Teamcenter Express V4, на основе использования Web-клиента, реализована возможность просмотра данных для передачи необходимой информации для цехового персонала – операторов станков, контролеров, сборщиков.

Подсистема Lotsia PDM Plus системы Lotsia Soft включает модули для работы со специальным аппаратным обеспечением – терминалы сбора данных, сканеры штрих-кодов, фискальные регистраторы для планирования и контроля подготовки производства.

Перспективным является включение в модуль САМ возможностей многоканальной обработки на станках с ЧПУ, реализованные в рамках системы ADEM-VX, что увеличило число одновременно работающих каналов управления на станке. Под каналом понимается объект, объединяющий совокупность технологических переходов, определяющих перемещения закрепленного за ним рабочего органа станка. Это позволит при установке дополнительных датчиков получить необходимую текущую информацию с суппорта и инструментальной головки.

Таким образом, имеются различные решения по созданию систем автоматизации на базе ЕИП и интеграции стадий ЖЦИ, а также предложены способы получения более полной информации с различных участков производства и передачи ее участникам производственного процесса. Однако, пока еще немного систем, которые решают задачи задания параметров производственного процесса применительно к конкретному станку.

Целью данной статьи является определение возможностей ИТ в управлении параметрами механообработки деталей на конкретном рабочем месте в условиях тяжелого машиностроения.

### **Основное содержание работы**

Механообработка в последовательности этапов технологического процесса проводится после заготовительного этапа и термообработки. Точность крупных заготовок низкая, их параметры являются случайными величинами. Колебания параметров станка, оснастки и режущего инструмента тоже является случайными. Резание тоже является случайным процессом. Черновая и получистовая обработка производится на универсальных станках, чаще всего токарных. Станочник должен оценить влияние всей гаммы случайных факторов и выбрать параметры обработки – глубину резания, подачу, скорость резания, которые, как известно, значительно влияют на качество детали. Как показали исследования валков горячего проката на ЗАО НКМЗ, качество детали во многом закладывается уже на стадии получистовой обработки.

Поэтому важно вовремя обеспечить станочника крупного универсального станка нужными рекомендациями. Для станков с ЧПУ режимы задаются в управляющей программе (УП), но с учетом конкретных условий обработки они тоже должны корректироваться [2].

Кроме того, Старков В. К. [3] указывает, что индивидуальный подход к назначению инструмента и режимов резания с помощью ЭВМ при наличии заранее полученных показателей свойств конкретной заготовки и режущего инструмента обеспечит повышенную надежность обработки. Это особенно важно для единичного и мелкосерийного производства, для дорогостоящих деталей, где используют особые специфичные приемы.

Кроме учета принципа индивидуализации важным является использование принципа интеллектуализации, который обеспечивает реальную автоматизацию выработки решений. Развитие искусственного интеллекта создает необходимые предпосылки для этого. Существуют десятки моделей представления знаний [4]: продукционные модели, семантические сети, фреймы, формальные логические модели. Созданы различные виды интеллектуальных систем (ИС), наиболее распространенными из которых являются экспертные системы, ядром которых являются базы знаний (БЗ), где хранят знания в виде закономерностей предметной области. Так как одним из способов определения понятий БЗ является определение через данные, для хранения которых используются базы данных (БД), то должна обеспечиваться связь между БЗ и БД.

Рассмотрим процесс обработки деталей, начиная от разработки технологического процесса до получения готового изделия на примере механообработки. Поток информации, циркулирующий в технологической системе (ТС) при механообработке представлен на рисунке 1.

На вход системы поступают конструкторская документация (КД), которая относится к проектной части процесса, а также сведения об инструменте, приспособлении, заготовке и станке, которые можно отнести к обеспечивающей части системы. Проектированием структурной части технологического процесса занимаются в ОГТ. Технологи ОГТ проектируют ТП без учета свойств реальной обеспечивающей части, сведения о которой поступают практически на рабочем месте станочника, поэтому параметры процесса (подача  $s$ , скорость  $v$ , глубина  $t$ ), передаваемые от ОГТ, можно рассматривать как рекомендуемые. Эти параметры необходимо уточнять на каждом рабочем месте при обработке каждой детали. Этими вопросами занимается блок «Корректировка ТП». В случае использования универсального оборудования, опытный рабочий, зная характеристики своего станка, оценив характеристики поставленного инструмента, приспособления и заготовки, может откорректировать параметры технологического процесса и даже подстроить их в процессе обработки. Для подстройки параметров особенно важно знать характеристики заготовки. Опыт рабочего может дополнить или заменить экспертная система, которая по мере накопления разнообразных данных из подсистем обеспечивающей части, может готовить качественные рекомендации по коррекции параметров обработки. Эти отклонения в большей степени являются статическими, поскольку не учитывают отклонения, связанные с особенностями заготовки, которые влияют на процесс обработки детали.

Блок «Учет отклонений заготовки» обрабатывает данные о реальной заготовке, которые промеряются по направлениям обработки детали, преобразует их в параметры

ТП, которые зависят от времени (динамические параметры). Именно эти данные превращаются в управляющие сигналы, которые поступают на станок.

Станок на рисунке изображен в виде одного блока «Система управления и управляемый механизм». Этот блок охвачен обратной связью по параметрам управляемого механизма, которые берутся с датчиков, установленных на движущихся частях станка, координаты которых необходимо контролировать.

Большой интерес для производителя представляют параметры готового изделия. Эти параметры снимаются с выхода блока «Объект обработки». После процесса измерения выходных параметров и сравнения их с исходными из КД, можно определить отклонения от заданных параметров, которые получились в данном конкретном случае при обработке конкретной детали. Полученные сведения поступают в экспертную систему, которая различными методами, с учетом накопленных в БД входных условий обеспечивающей части, может улучшить рекомендации по технологическим параметрам обработки.

В перспективе на основе накопленных данных можно строить различные модели совершенствования производства с использованием систем принятия решений (СПР).

Подсистемы обеспечивающей части выделены в отдельные блоки, поскольку организационно отделены от процесса производства. Например, в настоящее время инструмент поставляется специализированными предприятиями. Вопросы качества поставленного инструмента частично отрабатываются при входном контроле, но основные сведения о качестве инструмента могут быть получены в процессе его эксплуатации на станке. Поэтому реализация подсистемы инструмента является достаточно сложной задачей, т.к. подсистема является распределенной и требует организационной перестройки. Подсистемы приспособлений должна обрабатывать данные о точности приспособлений с учетом индивидуализации данных.

В экспертную систему поступают входные данные из подсистем, которые обслуживают станок, инструмент, приспособление, заготовку, а также данные о соответствии полученных параметров детали заданным в конструкторской документации параметрам, которые поступают из ОТК (рис.2).

Проанализируем источники поступления данных в ЭС. На предприятиях сведения ведутся различными службами, но зачастую они не передаются в БД. Современные станки с ЧПУ оборудованы специальными измерительными устройствами, которые позволяют получить требуемые для экспертной системы данные, однако не все. В таблице 1 представлены сравнительные характеристики, описывающие место возникновения данных и доступность для различных станков [5].

Таким образом, на основании анализа можно предложить ряд мероприятий, способствующих обеспечению недостающей информацией ЭС для выработки рекомендаций по параметрам механической обработки для конкретного станка:

1. Уточнение регрессионных моделей за счет пополнения БД новыми данными, характерными для данного станка.
2. Обеспечение передачи результатов входного контроля качества режущего инструмента от технадзора в БД.
3. Измерение твердости, припуска, физико-механических свойств по длине и сечению заготовки для всех деталей с передачей данных в БД.
4. Организация передачи параметров жесткости, точности, надежности станка и приспособления от службы механика в БД.

Причем, во всех случаях имеется в виду организация автоматической передачи всех необходимых параметров в БД.

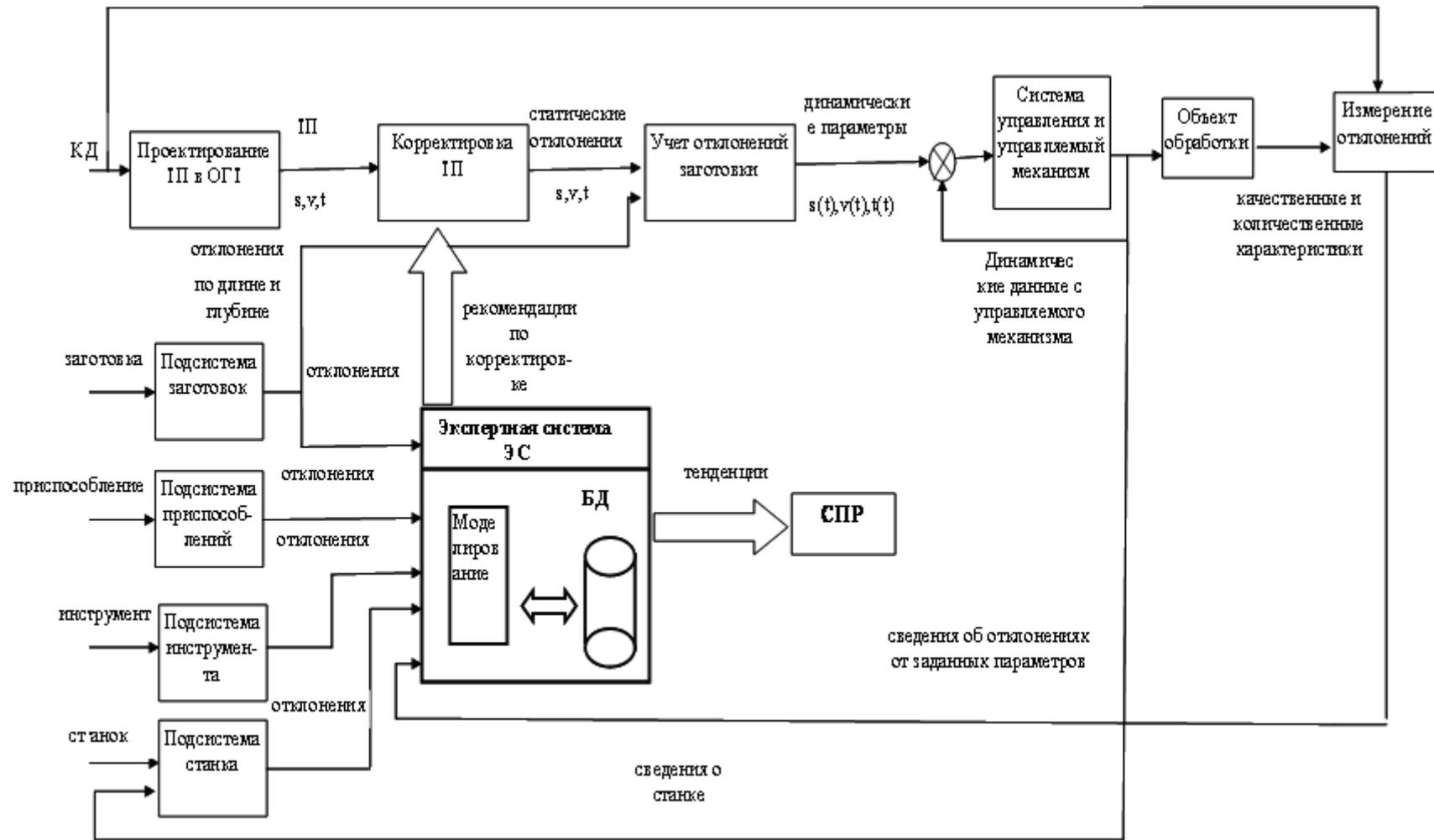


Рис. 1. Место экспертной системы в маршруте изготовления детали с учетом принципа индивидуализации



Рис. 2. Окружение экспертной системы

Таблица 1. Сравнительный анализ возможностей обеспечения ЭС входными параметрами для различных типов станков

Наименование параметра	Универсальный токарный станок	Токарный станок с ЧПУ
Последовательность операций, переходов	Известна	Известна
Данные чертежа	Известны	Известны
Размеры, материал пластины, геометрия	Известны	Известны
Показатели качества режущего инструмента	Определяются технадзором	Определяются технадзором
Параметры точности приспособлений	Ведутся технологами	Передать из СЧПУ
Характеристики жесткости, точности станка	Ведутся службой механика	Передать из СЧПУ
Изменение НВ, $\sigma_b$ , $t$ по длине и сечению заготовки	Не определяется	Определяется для особо точных деталей
Параметры готовой детали	Определяются ОТК	Определяются ОТК

### Выводы

Предложенный подход в использовании ИТ технологий позволяет:

1. Подключить данные с каждого рабочего места в ЕИП, что делает их доступными каждому пользователю а также пополняет корпоративную память предприятия.
2. Высвободить время цехового технолога, станочника для проведения других мероприятий. За счет передачи результатов работы ЭС на рабочие места исключить случаи принятия решений персоналом в режиме недостатка времени.
3. Обеспечить выработку более качественных и надежных решений за счет передачи в ЭС результатов моделирования на основе постоянно пополняющихся данных, характерных для конкретного рабочего места.

#### Список литературы

1. «САПР и графика», №1, 2009, 23-25 с.
2. Канне М.М. Управление качеством продукции в машиностроении / М. М. Кане, А. Г. Суслов и др. – М: Машиностроение, 2010. – 416 с.
3. Старков В. К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1984. – 120 с.
4. Гаврилова Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 384 с.
5. Босинзон М.А. Современные системы ЧПУ и их эксплуатация / М.А. Босинзон. – М. Academia, 2010. – 192 с.

*Рецензент: Гусев В.В..*

*Надійшла до редколегії: 14.03.2011р.*

**Л.М. БОГДАНОВА**

**О.М. ЛЮТАКОВА**

*Донбаська державна машинобудівна академія*

#### **ПІДВИЩЕННЯ КЕРОВАНOSTІ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Запропонована структура інформаційної системи керування технологічним процесом механічної обробки в умовах важкого машинобудування, яка заснована на принципах індивідуалізації та інтелектуалізації управління. Визначено місце експертної системи в загальній структурі інформаційної системи. Виділені головні параметри для управління. В складі об'єднаного інформаційного простору підприємства дана система дозволить покращити якість рішень управління технологічною підготовкою виробництва, а також доставити необхідну інформацію до кожного робочого місця.

**Технологічний процес, інформаційні технології, автоматизація, база даних**

**L.M. BOGDANOVA**

**O.M. LYUTAKOVA**

*Donbas state machinebuilding academy*

#### **IMPROVING THE MANAGEABILITY OF MACHINING PROCESS BY USING OF INFORMATION TECHNOLOGIES**

Structure of information system to manage technological process of machining at the conditions of heavy engineering is offered. It is based on principles of management individualization and intellectualization. The place of expert system in the general structure of the information system is determined. The basic parameters for control are distinguished. This system as the part of enterprise common information space will allow improving the quality decision making in technological preparation and delivering of necessary information to every workplace.

**Technological process, information technologies, automation, database**

УДК 621.90.47

**С.М. БРАТАН** (д-р. техн. наук, проф. [tm@sevntu.com.ua](mailto:tm@sevntu.com.ua))**С.Е. САЗОНОВ** (ассистент, [tm@sevntu.com.ua](mailto:tm@sevntu.com.ua))**Н.А. МИНАЕВ** (аспирант, [tm@sevntu.com.ua](mailto:tm@sevntu.com.ua))

Севастопольский национальный технический университет г. Севастополь, Украина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРОВ АНОДНО-МЕХАНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В статье приведены результаты экспериментальных исследований, характеризующие возможность обработки прецизионных поверхностей упругих элементов анодно-механическим методом

**Ключевые слова:** Анодно-механическая обработка, шероховатость, прецизионный упругий элемент прибора, плотность тока, концентрация электролита

### Введение

Технологическая задача получения равнопрочного структурного состояния и требуемого комплекса свойств по всему сечению миниатюрной детали может решаться в принципе по двум направлениям:

1. соблюдению неизменности химического состава поверхностного слоя детали в процессе обработки;
2. удалению образующегося дефектного слоя при окончательной обработке [1].

В [2] указывается на необходимость предусмотрения в качестве окончательной операции технологического процесса применения методов электрохимической обработки деталей с целью удаления дефектных поверхностных слоёв.

Целью статьи является исследование возможности обработки упругих элементов типа «подвес» анодно-механическим способом.

### Основное содержание работы

Материал исследуемых образцов – бронза БрБ2, подвергнутая ступенчатому старению по режиму: 200-2100 С - 1 ч. и 3400 С - 1,5 ч. Образцы в виде полос 25×1×0,3 мм получали разрезкой холоднотянутой ленты в специальном приспособлении. Изучалась возможность использования анодно-механического способа обработки упругих элементов «подвесов» из бериллиевой бронзы. Осуществлялся поиск наиболее рациональных режимов, которые обеспечивают заданное качество и точность обработки. Производился подбор наиболее пригодных для этой цели электролитов.

Опыты производились на установке, схема которой показана на рис. 1. На стол сверлильного станка мод НСП-2 устанавливалось приспособление 4 с закреплённым на нём блоком ванн. В ваннах 3 неподвижно размещались образцы 2, соединённые с «плюсом» блока питания, а инструмент 1, в качестве которого использовались цилиндрические стержни из стали Р6М5 диаметром 1 мм и шероховатостью Ra 0,32-0,16 мкм, а также свёрла с винтовыми канавками, закреплялись в патроне сверлильного станка и соединялись посредством угольной щётки 6 с «минусом» блока питания.

Усилие прижатия регулировалось за счёт перемещения ванны относительно вращающегося инструмента с помощью микрометрического винта 5. Величина усилия прижатия инструмента к образцу определялась по тарировочному графику (рис. 2).

В качестве электролитов были использованы 5-, 10-, 15-, 25%-ные растворы натриевой соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , смеси растворов азотно- и фосфорнокислых солей в различных пропорциях и концентрациях, водные растворы силикатов натрия  $\text{Na}_2\text{O}_n\text{SiO}_2$  и нитратов натрия  $\text{NaNO}_3$ .

В результате лабораторных исследований образцов выявлена целесообразность проведения процесса обработки в два этапа с целью получения бездефектного поверхностного слоя.

Первый этап – черновая обработка – проводился в следующих режимах: рабочее напряжение 6-7 В, анодная плотность тока  $0,05 \text{ А/мм}^2$ , удельная электропроводность электролита  $0,08 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ , выход по току 40%.

Толщина срезаемого слоя на черновом режиме составляла 0,1 мм, время обработки – 8-10 минут, что несколько превышает теоретическое значение времени обработки (около 6 минут), определяемое по выражению [3]:

$$t = \frac{\delta \cdot d \cdot S}{K \cdot J \cdot \eta},$$

где  $K$  - электрохимический эквивалент металла;  $J$  - сила тока;  $S$  - площадь контакта;  $d$  - плотность металла;  $\delta$  - толщина снимаемого слоя;  $\eta$  - выход по току.

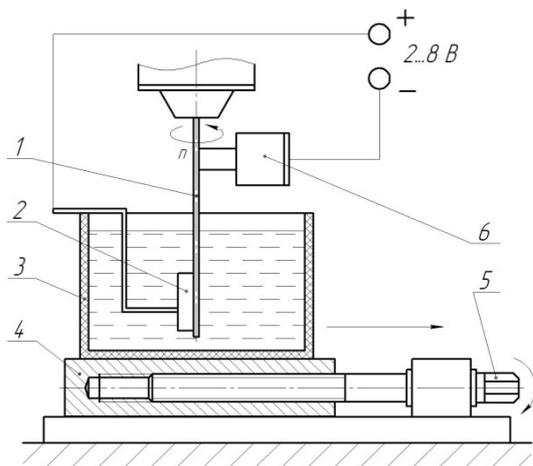


Рис. 1. Схема лабораторной установки

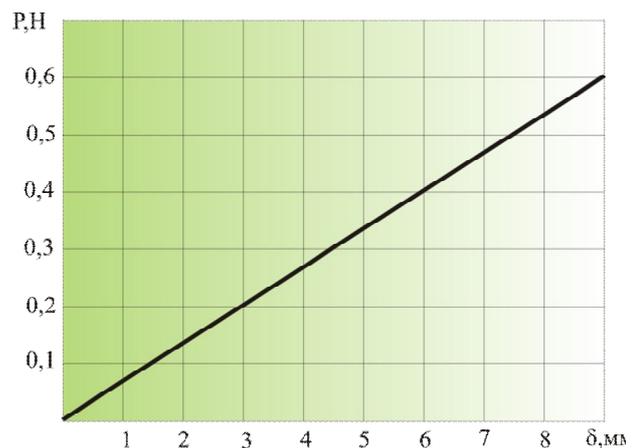


Рис. 2. Тарировочный график

Второй этап – чистовая обработка – выполняется на следующих режимах: рабочее напряжение 2-3 В, анодная плотность тока  $0,01 \text{ А/мм}^2$ , удельная электропроводность электролита  $0,08 \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$ , выход по току 50%.

Толщина снимаемого слоя составляла 0,04 мм, время обработки – 5-6 минут, что приблизительно совпадает с теоретическим значением (около 5,5 минут).

Производительность обработки оценивалась по величине съема материала посредством измерения глубины лунки за фиксированное время обработки. Качество обработки определялось по шероховатости поверхности лунки. Для оценки этих показателей использовали эталонный образец и оптиметр мод. ИКВ-3 со специально изготовленным измерительным наконечником. Шероховатость поверхности лунки определялась путём сравнения с шероховатостью образца-эталона с помощью инструментального микроскопа ММИ и путём измерения на профилографе-профилометре мод. 201.

Результаты выполненных исследований подтверждают принципиальную возможность использования анодно-механической обработки в качестве финишной операции при изготовлении прецизионных упругих элементов приборов. Припуск 0,12-0,16 мм при оптимальном сочетании режимов снимается за 22-24 мин. (расчётное время 14-

16 мин.) При механической доводке «подвесов» аналогичный припуск удалялся за 150-180 мин. Таким образом, применение анодно-механической обработки позволяет уменьшить трудоёмкость чистой операции более чем в 6 раз.

На производительность процесса анодно-механической обработки, по нашим наблюдениям, наибольшее влияние оказывают: плотность тока, концентрация электролита, сила давления инструмента на обрабатываемую поверхность, скорость вращения инструмента. С увеличением концентрации электролита объём снимаемого металла увеличивается при всех частотах вращения (рис. 3).

Это связано с активизацией электрохимических процессов в зазоре инструмент-заготовка.

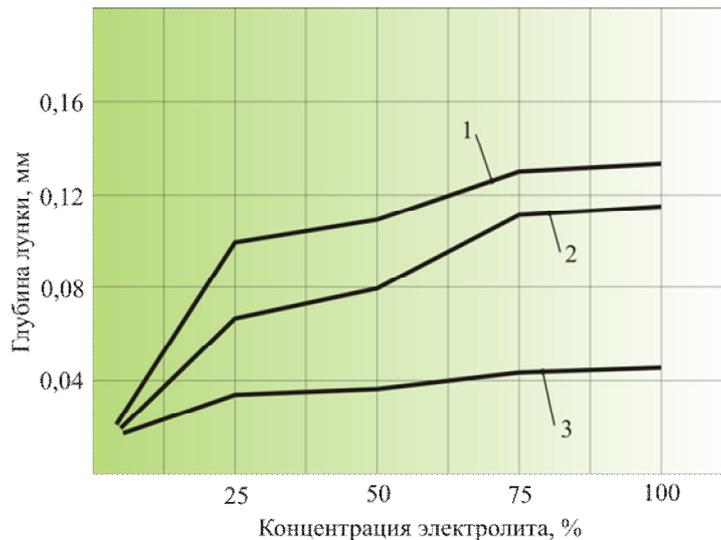


Рис.3. Зависимость глубины лунки  $h$  от частоты вращения инструмента  $n$  и концентрации электролита  $\text{Na}_2\text{O}_n\text{SiO}_2$  при силе подачи  $P = 0,35$  и плотностью тока  $0,125$   $\text{А/мм}^2$ :

1 –  $n = 900$   $\text{мин}^{-1}$ , 2 –  $n = 1800$   $\text{мин}^{-1}$ , 3 –  $n = 2000$   $\text{мин}^{-1}$

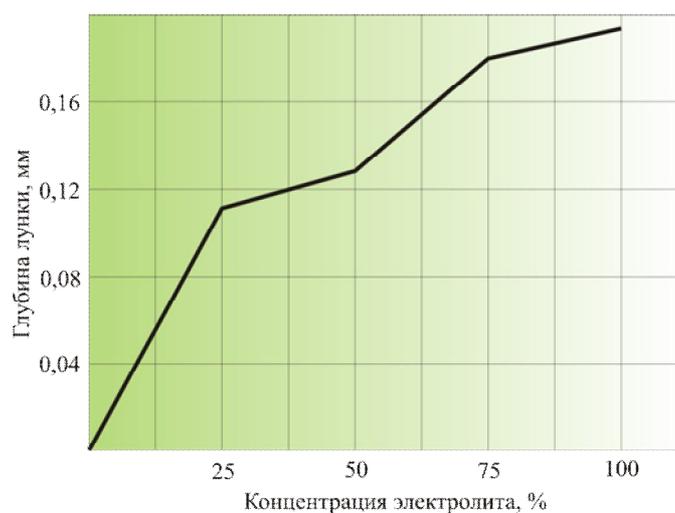


Рис. 4. Зависимость глубины лунки  $h$  от концентрации электролита  $\text{Na}_2\text{O}_n\text{SiO}_2$  при усилии прижатия  $P = 0,35$  Н, и плотности тока  $0,06$   $\text{А/мм}^2$

Сопоставление рис. 3 и рис. 4 показывает, что при увеличении плотности тока с 0,06 до 0,125 А/мм<sup>2</sup>, т.е. более чем в два раза, глубина лунки увеличивается лишь в 1,4–1,6 раза. Это объясняется тем, что с увеличением плотности тока снижается выход по току, вследствие появления в зоне контакта электроэрозионных процессов.

С увеличением силы прижатия инструмента к заготовке съём металла увеличивается (рис. 5).

Зависимость глубины лунки от усилия прижатия носит почти пропорциональный характер (рис. 5), т.к. с увеличением силы прижатия быстрее истирается пассивирующая плёнка, увеличивается плотность тока.

Более сложный характер носит зависимость съёма металла от скорости вращения инструмента (рис. 6).

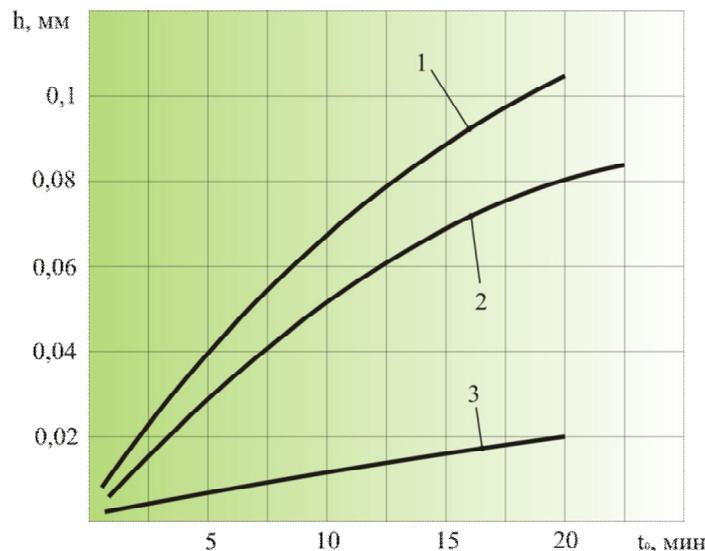


Рис. 5. Зависимость глубины лунки  $h$  от усилия  $P$  и времени обработки  $t_0$  при 100% концентрации электролита  $\text{Na}_2\text{O}_n\text{SiO}_2$ : 1 –  $P = 0,2$  Н, 2 –  $P = 0,1$  Н, 3 –  $P = 0,05$  Н

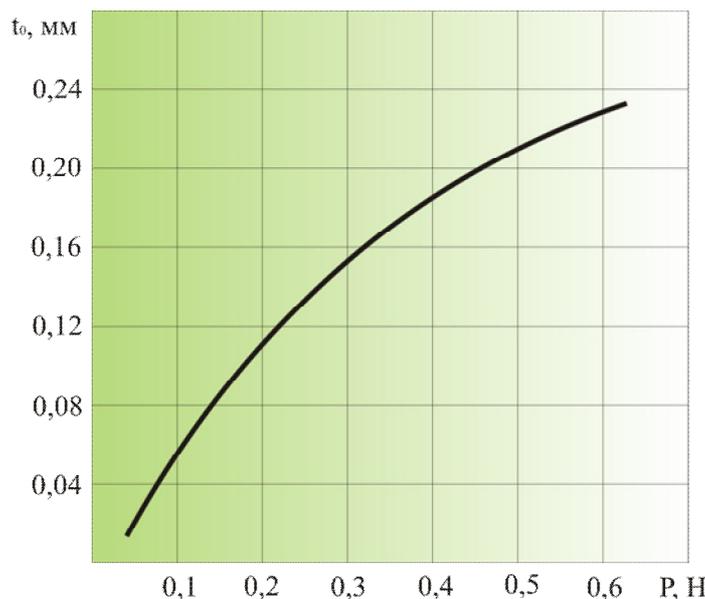


Рис. 6. Зависимость глубины лунки  $h$  от усилия  $P$

Увеличение глубины лунки  $h$  с повышением скорости с 10 до 25 м/мин связано с более быстрым разрушением пассивирующей плёнки. Снижение глубины

лунки в диапазоне скоростей 25-30 м/мин связано с увеличением межэлектродного зазора.

В ходе экспериментов выявлена возможность гибкого управления процессом формирования поверхности за счёт изменения электрических параметров. Так с изменением напряжения от 2 до 8 В (рис. 8) производительность процесса возрастает более чем в 8 раз.



Рис. 7. Зависимость глубины лунки от скорости обработки  $V$  при плотности тока  $0,125 \text{ А/мм}^2$  в 5% концентрации  $\text{NaNO}_3$

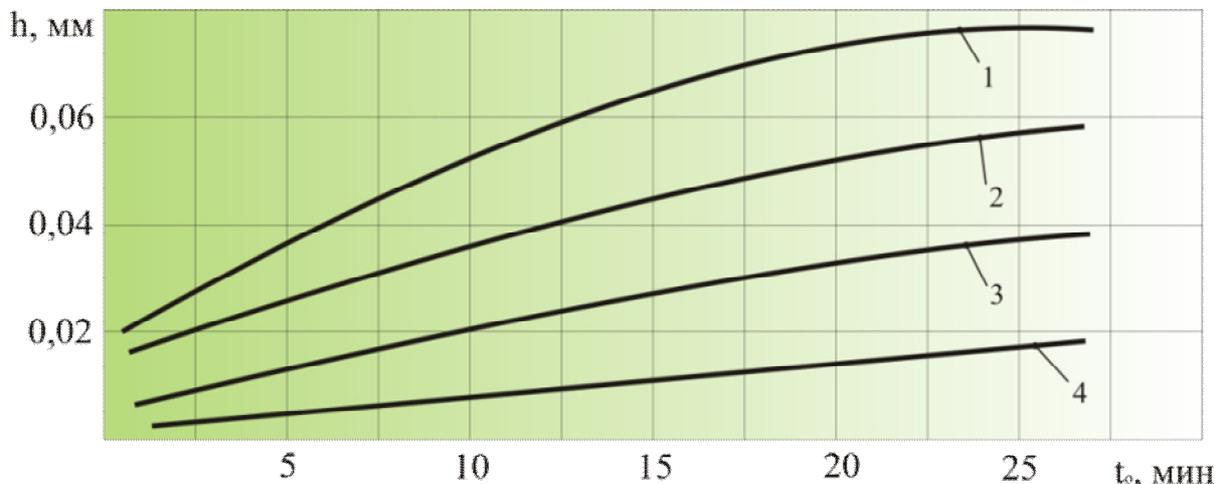


Рис. 8. Зависимость глубины лунки  $h$  от напряжения  $U$  и времени обработки  $t_0$  в 5% концентрации  $\text{NaNO}_3$ : 1 –  $U=8 \text{ В}$ , 2 –  $U=5 \text{ В}$ , 3 –  $U=3,5 \text{ В}$ , 4 –  $U=2 \text{ В}$

### Выводы

Результаты экспериментальных исследований указывают на возможность использования анодно-механического метода для обработки деталей приборов. Однако требуются дополнительные исследования, характеризующие физико-механическое состояние поверхностного слоя деталей, работоспособность маятников при воздействии на них знакопеременных нагрузок, что является перспективами дальнейших исследований в данной области.

### Список литературы

1. Братан С.М. Технологічні основи забезпечення якості і підвищення стабільності високопродуктивного чистового тонкого шліфування: автореф. дис. на здобуття на-

ук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування»/ С.М. Братан. – Одеса, 2006.—35 с.

2. Братан С.М., Новоселов Ю.К., Минаев Н.А. Моделирование электрохимической составляющей Съема материала на операции комбинированного шлифования в пассивирующих средах // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування машинознавство. Випуск 6 (154). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С.20-28. 3. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н Подураев. – М.: Машиностроение, 1977, – 304 с

*Рецензент: Матюха П.Г.*

*Надійшла до редколегії: 22.04.2011р.*

**С.М. БРАТАН  
С.Є. САЗОНОВ  
М.О. МІНАЄВ**

Севастопольський національний технічний університет  
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБРОБКИ  
ПРЕЦИЗІЙНИХ ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПРИЛАДІВ  
АНОДНО-МЕХАНІЧНИМ МЕТОДОМ**

У статті приведені результати експериментальних досліджень, що характеризують можливість обробки прецизійних поверхонь пружних елементів анодно-механічним методом.

**Анодно-механічна обробка, шорсткість, прецизійний пружний елемент приладу,  
щільність струму, концентрація електроліту**

**S.M. BRATAN  
S.E. SAZONOV  
N.A. MINAEV**

Sevastopol National Technical University  
**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF MACHINING  
OF PRECISION RESILIENT ELEMENTS OF DEVICES  
BY ANODAL-MECHANICAL METHOD**

In the paper the results of experimental researches, characterizing possibility of machining of precision surfaces of resilient elements by an anodal-mechanical method, are presented.

**Anodal-mechanical machining, roughness, precision resilient element of device,  
current density, electrolyte concentration**

УДК 621.92

**В.В. ГУСЕВ** (д-р. техн. наук, проф., gusev@ mech.dgtu.donetsk.ua)**С.В. КУЧЕРЕНКО** (студент)**К.С. СУХОРУЧКО** (студент)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

## МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований магнитно-абразивной обработки внутренних отверстий деталей из твердого сплава. Исследования позволили определить наличие рациональных значений зазора между инструментом и заготовкой, скоростей инструмента и заготовки при магнитно-абразивной обработке. Результаты нашли применение при финишной обработке волок.

**Ключевые слова:** Магнитно-абразивная обработка, волокна, твердый сплав, режимы обработки

### Введение

Развитие техники обуславливает применение новых материалов в конструкциях изделий машиностроения, приборостроения, ядерной энергетики, ракетостроения, самолетостроения, космической техники, к которым предъявляются повышенные требования по жаростойкости, износостойкости, коррозионной стойкости, стойкости к воздействию химикатов. Такими материалами, удовлетворяющими перечисленным требованиям, является техническая керамика (ТК) и твердый сплав (ТС). К таким изделиям относится волокна, которая в зависимости от протягиваемых материалов, изготавливается из ТС (ВК8), ТК ( $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ), карбида вольфрама и поликристаллических алмазов. От качества поверхности сверхтвердого прецизионного инструмента фактически зависит конечный успех при изготовлении проволоки, состояние ее поверхностного и приповерхностного слоев.

Хорошо известно [1], что состояние поверхностного слоя деталей определяет их эксплуатационные свойства. В Европе потребители предпочитают волоочильный инструмент, изготовленный с тщательной полировкой рабочих поверхностей, включая все конусообразные части фильеры. Высокое качество материала фильер в сочетании с геометрией и состоянием их поверхностного слоя – самая лучшая гарантия длительного срока их службы и обеспечения результатов процессов волочения проволоки.

Возрастающие требования к качеству поверхностного слоя ( $Ra$  0,1..0,16 мкм) вызывают потребность к совершенствованию и созданию новых способов отделочной и упрочняющей технологий. Одним из перспективных направлений финишной обработки является магнитно-абразивная обработка (МАО) [2,3].

Сущность метода: магнитно-абразивный порошок располагается между полюсами электромагнитов, создавая режущий инструмент в виде своеобразной "полирующей щетки". При движении заготовки через рабочую зону порошок оказывает давление на деталь в каждой точке поверхности, что приводит к съему материала и сглаживанию микронеровностей. В роли связки абразивных зерен используется магнитное поле, обладающее упругими силами воздействия на единичные зерна. Отличительной чертой МАО является небольшое давление на обрабатываемое изделие в отличие от традиционных методов обработки, при которых зерна закреплены жестко.

Целью работы является исследование влияния режимов МАО на формирование микрорельефа поверхности в отверстиях деталей из твердого сплава.

### Основная часть

На кафедре металлорежущие станки и инструменты ДонНТУ разработано устройство для экспериментальных исследований МАО внутренних поверхностей на базе токарно-револьверного станка 1341, показанное на рис. 1. Обрабатываемый образец представляет собой втулку, изготовленную из твердого сплава ВК6 ГОСТ 3882-74, с внутренним отверстием диаметром 30 мм. В зависимости от необходимой исходной шероховатостью поверхности перед МАО отверстие во втулке предварительно обрабатывались с помощью алмазных шлифовальных кругов 1А1 20×10×10 АС4 250/200 – 4 - М2-01 или 1А1 10×10×6 АС4 100/80 - 4 - В2-01 ГОСТ 16167-90, что позволяло обеспечить необходимую исходную шероховатость по параметру Ra 0.5 мкм или 0,25мкм, а также требуемую геометрическую точность отверстия.

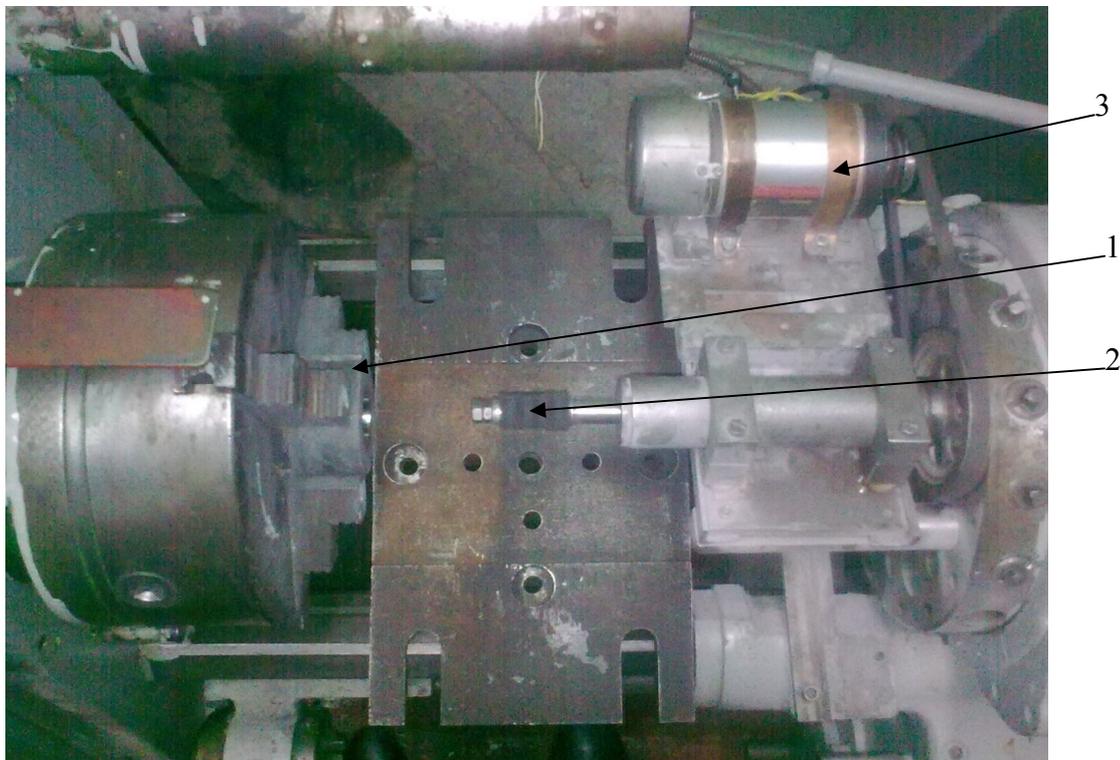


Рис.1 Вид сверху на экспериментальную установку для МАО внутренних поверхностей на базе токарно-револьверного станка 1341:

- 1- заготовка из ВК6 в патроне станка; 2 – оправка с магнитными кольцами;
- 3 – привод вращения оправки

Технические трудности представляет реализация МАО при обработке отверстий малого диаметра. Поэтому для его реализации нами выбрана схема обработки с постоянными магнитами в виде колец [2], которые устанавливались противоположно заряженными полюсами по отношению друг к другу на оправке 2 (см. рис.1). Четыре магнитных неодимовых кольца расположены по отношению друг к другу противоположной полярностью при обеспечении суммарной магнитной индукцией 0,8 Тл. Между магнитами установлены стальные кольца, которые пропускают через себя магнитный поток, создаваемый двумя соседними магнитами.

В качестве магнитно-абразивного порошка использовали железно-абразивный порошок с синтетическим алмазом в виде абразивных включений производства НТЦ ВИИЭлектрон г. Донецк. Размер фракции порошка 180/100, размер абразива 7/5, содержание абразива в зерне 40%. Магнитно-абразивный порошок удерживается на рабочей поверхности индуктора, создавая своеобразную магнитную щетку. Вращение оправки осуществляется от регулируемого двигателя постоянного тока с частотой от 1000 до 2500 об/мин, обеспечивая скорость резания микропорошком  $V_p$ . Кроме этого при MAO оправке сообщается постоянное возвратно-поступательное движение относительно заготовки, которая вращается с частотой  $n$  и обеспечивает скорость заготовки.

Необходимый рабочий зазор  $\delta$  между магнитами и обрабатываемой поверхностью настраивается путем кругового перемещения револьверной головки станка. Зазор между обрабатываемым изделием и оправкой с магнитами устанавливался с точностью 0,1 мм.

Измерение шероховатости обработанной поверхности отверстия втулки осуществляли с помощью профилометра модели 296 без снятия заготовки со станка. При каждом сочетании варьируемых параметров определяли среднее значение шероховатости по двенадцати измерениям (в шести радиальных сечениях производили по два измерения вдоль образующей) и среднеквадратическое отклонение  $S$ . Оценку однородности среднеарифметических значений  $Ra$  оценивали с помощью критерия Крамера. Оценка существенности отличий между средними и дисперсиями по F-критерию определялись при уровне значимости 0,05.

Изменение параметра микронеровности  $Ra$  обработанных отверстий втулки от времени полирования  $\tau$ , как показали экспериментальные исследования, описывается экспоненциальной зависимостью следующего вида

$$Ra = a \cdot \exp(-b \cdot \tau) + b, \quad (1)$$

где  $b$  – коэффициент, который характеризует установившееся значение  $Ra$  изделия после MAO;

$a$  – коэффициент, который характеризует величину уменьшения параметра  $Ra$  при MAO по отношению к исходной шероховатости.

Как видно из рис. 2, изменение шероховатости поверхности отверстия втулки происходит в течение первых пяти минут работы. Чем меньше исходное значение параметра  $Ra$  после алмазного шлифования, тем меньше значение шероховатости после MAO. Это связано с существованием предельного значения сечения среза на зерне, обусловленного интенсивностью магнитного поля [4], которое в наших исследованиях оставалось неизменным.

Изменяя параметры зазора, при остальных неизменных условиях обработки (рис. 3), можно уменьшить значение установившейся величины  $Ra$ , что обусловлено влиянием жесткости «магнитной щетки» в месте ее воздействия на обрабатываемый материал. Поэтому в дальнейшем можно принять для условий проведения эксперимента рациональным зазор между магнитом и обрабатываемым материалом величиной зазора  $\delta = 1 \dots 1,5$  мм, в пределах которого может содержаться не менее 4-х слоев магнитного абразивного материала и достигается наименьшее значение установившейся шероховатости и.

Характер изменения высотного параметра микрорельефа  $Ra$  от времени обработки для MAO при разной частоте вращения заготовки и при постоянных значениях величины зазора  $\delta$  и исходного значения высотного параметра носит экспоненциальный

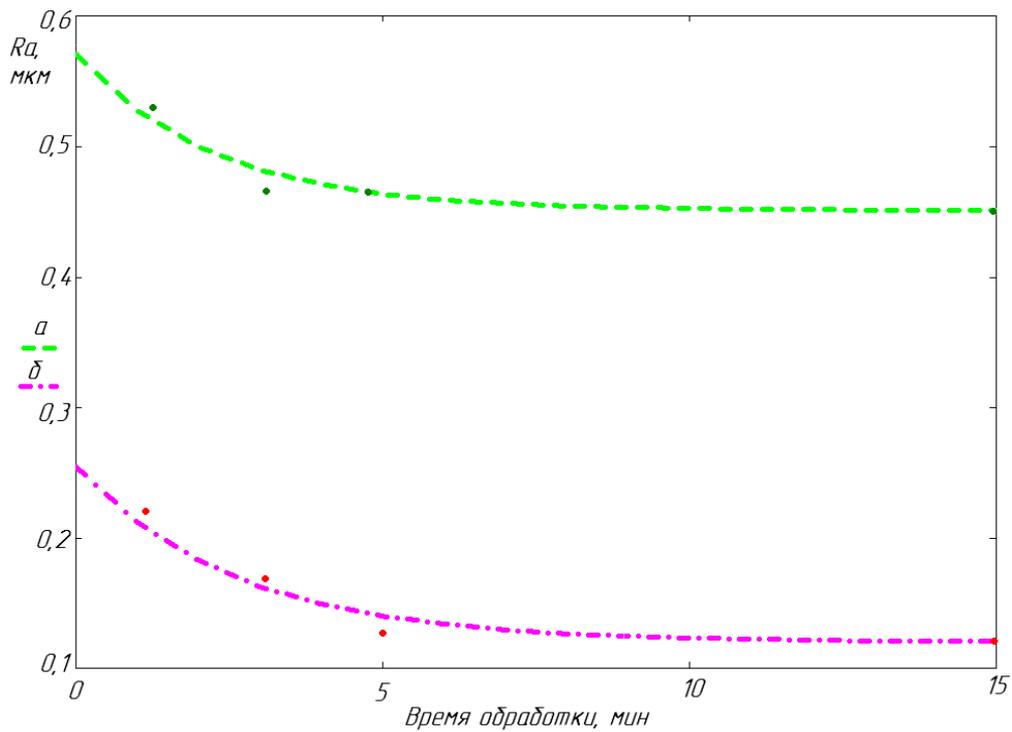


Рис. 2. Изменение параметра микрорельефа  $Ra$  от времени МАО при режиме:  $\delta=1$  мм,  $V_p=4$  м/с,  $n=60$  об/мин при различной исходной шероховатости отверстия втулки: 1 –  $Ra=0,58$  мкм; 2 –  $Ra=0,27$  мкм

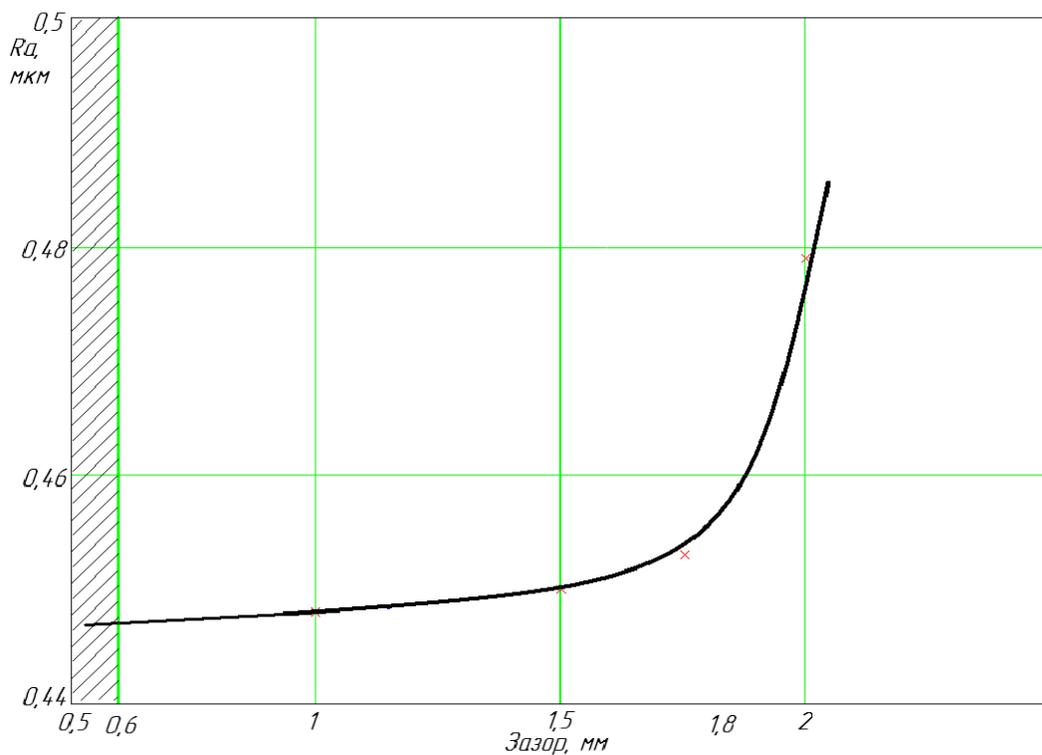


Рис. 3. Влияние величины зазора  $\delta$  на установившееся значение параметра  $Ra$ . Режим обработки: скорость резания  $V_p=4$  м/с; частота вращения заготовки  $n=60$  об/мин; исходное значение  $Ra=0,56$  мкм

характер в соответствии с зависимостью 1. Изменение установившегося значения параметра  $Ra$  от частоты вращения заготовки носит нелинейный характер, который может быть описан функцией следующего вида

$$Ra(n) = 3,99 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 - 1,428 \cdot 10^{-3} \cdot n + 0,0559.$$

Зависимость установившегося значения параметра  $Ra$  от частоты вращения заготовки  $n$ , приведена на рис. 4. Таким образом существуют рациональные значения частоты вращения заготовки (160...200 об/мин), при которых обеспечиваются наименьшие значения установившейся величины  $Ra$ .

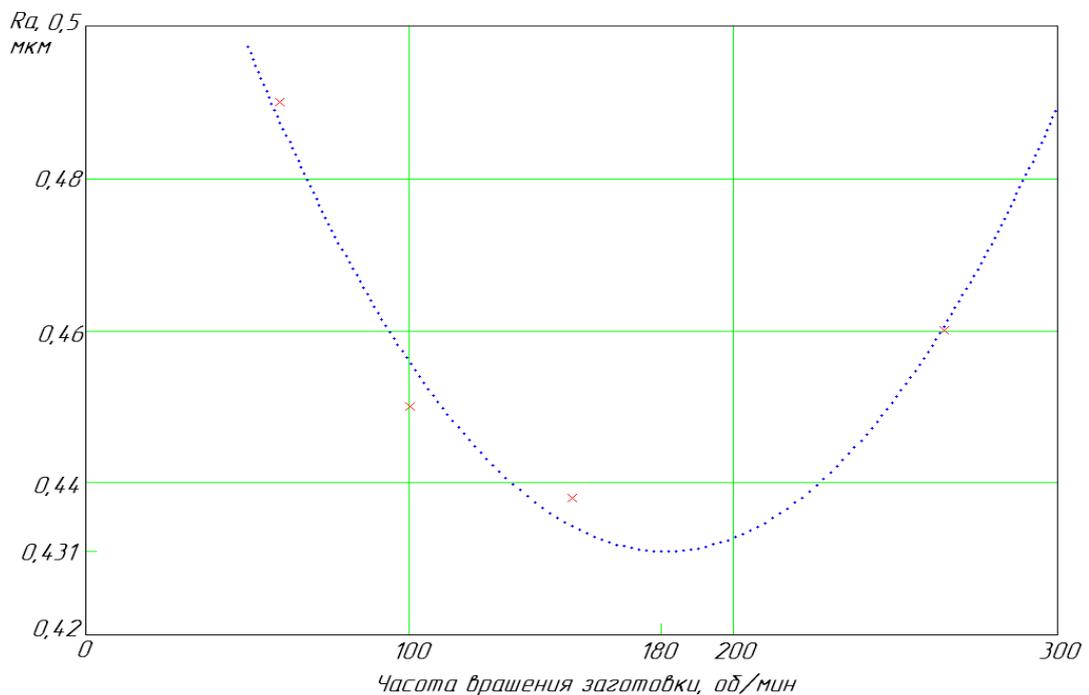


Рис.4. Влияние частоты вращения заготовки  $n$  на установившееся значение параметра  $Ra$  после МАО, исходное значение  $Ra = 0,56$  мкм. Режим резания:  $\delta=1$  мм,  $V_p=4$  м/с

На основании результатов проведенных исследований было спроектировано устройство для обработки волокна и выбраны режимы ее МАО (исходное значение  $Ra = 0,27$  мкм;  $\delta = 1$  мм;  $V_p = 4$  м/с;  $n = 160$  об/мин).

На рис. 5 показаны круглограммы отверстия волокна до и после МАО. Отклонение от некруглости детали после МАО уменьшилась примерно в два раза. Исходное значение  $Ra$  ( $R\bar{a} = 0,27$  мкм;  $S = 0,04$  мкм) рис. 5 а уменьшилось более чем в 2,5 раза до значения ( $R\bar{a} = 0,1$  мкм;  $S = 0,013$  мкм) (рис. 5. б), что меньше значений требований ( $Ra=0,12$  мкм), предъявляемым к детали.

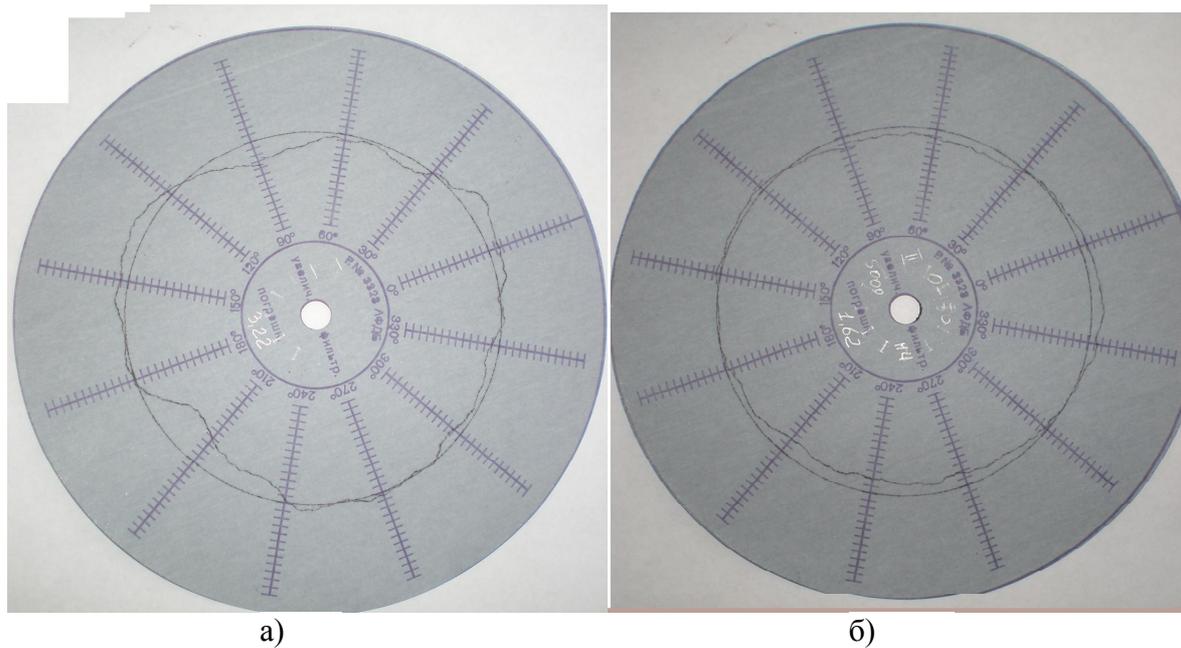


Рис. 5. Круглограммы волоки: а) - после алмазного шлифования и б) - после МАО

### Выводы

При внутреннем магнитно-абразивном обработке с зазорами и постоянными магнитами в течение времени 5 мин устанавливается шероховатость, значение которой определяется исходным значением микронеровностей и величиной магнитного поля.

При магнитно-абразивном полировании существуют рациональные условия обработки, определяемые режимами резания (скоростью инструмента, частотой вращения заготовки) и величиной зазора 1...1,5 мм между магнитом и обрабатываемой заготовкой.

В дальнейшем предполагается исследовать обрабатываемость технической керамики при МАО, влияние скорости резания на формирование параметра  $Ra$ .

### Список литературы

1. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин/ А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
2. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов/ Ю. М. Барон.— Л.: Машиностроение. Ленингр. 1986. - 176 с.
3. Скворчевский Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки/ Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. — Минск.: Наука і техника, 1991.- 215 с.
4. Кучеренко С. В. Моделирование процесса магнитно-абразивного полирования / С. В. Кучеренко, В. В. Гусев// Инженер. Студентський науково-технічний журнал. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. - №11. - С.65-67.

Рецензент: Калафатова Л. П.

Надійшла до редколегії: 17.04.2011р.

**В.В. ГУСЄВ  
С.В. КУЧЕРЕНКО,  
К.С. СУХОРУЧКО**

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна  
**МАГНІТНО-АБРАЗИВНА ОБРОБКА ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ІЗ  
ВИКОРИСТАННЯМ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ**

У статті представлені результати експериментальних досліджень магнітно-абразивної обробки внутрішніх отворів деталей із твердого сплаву. Дослідження дозволили визначити наявність раціональних значень зазору між інструментом і заготовкою, швидкостей інструмента й заготовки при магнітно-абразивній обробці. Результати знайшли застосування при фінішній обробці волок.

**Магнітно-абразивна обробка, волока, твердий сплав, режими обробки**

**V.V.GUSEV  
S.V. KUCHERENKO  
K.S. SUKHORUCHKO**

Donetsk national technical university, Donetsk, Ukraine  
**MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF INTERNAL SURFACES  
WITH USE OF PERMANENT MAGNETS**

In the paper the results of experimental researches of magnetic-abrasive machining of internal surfaces of details of hard alloys are presented. Researches have allowed to determine the presence of rational values of a backlash between the tool and workpiece, tool speed and workpiece speed at magnetic-abrasive machining. Results have found use at finishing machining of draws.

**Magnetic-abrasive machining, draw, hard alloy, machining conditions**

## Дослідження проблем кінематики, динаміки, міцності та надійності машин і їх вузлів

УДК 519.64

**В.П. ДОЛГИН** (канд. техн. наук, доц., [root@sevgtu.sebastopol.ua](mailto:root@sevgtu.sebastopol.ua))

Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь, Украина

### СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ШЛИФОВАНИЯ

Предлагается метод выбора параметров динамической коррекции системы управления глубиной резания круглошлифовального станка, обеспечивающих заданные режимы технологического процесса.

**Ключевые слова:** Шлифование, коррекция, система управления, технологический процесс, моделирование

#### Введение

Синтез системы автоматического управления (САУ) процессом шлифования представляет собой достаточно сложную задачу [1-5] из-за необходимости описания и учета ряда факторов, среди которых наиболее существенным является учет динамики технологического процесса. В ряде случаев для уточнения параметров модели управления процессом прибегают к синтезу системы на основе обработки наблюдений, введению адаптации в контур управления по физическим [1], либо формальным [4] параметрам. При описании системы управления процесс круглого шлифования может быть представлен звеном задержки [1,3], либо его упрощенной моделью – аperiodическим звеном [2], что является в ряде случаев допустимым приближением.

По известным параметрам звеньев технологической системы требуется найти параметры коррекции, обеспечивающие устойчивость системы автоматического управления глубиной резания операции круглого шлифования, отсутствие перерегулирования при изменении ее режимов и требуемую точность динамической модели.

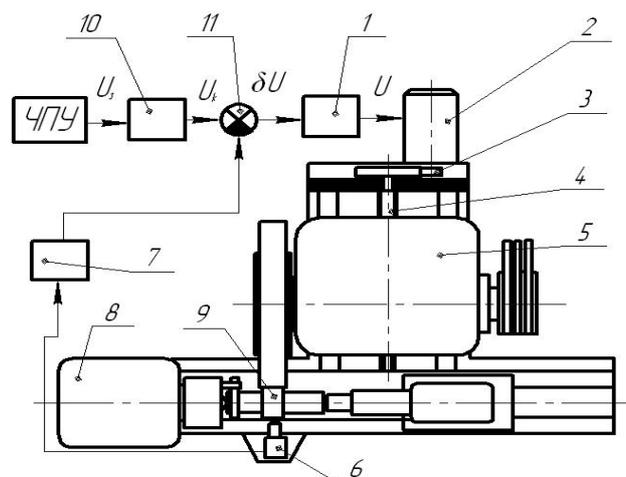


Рис. 1. Схема управления процессом

Рассмотрим систему управления подачей шлифовального станка, изображенную на рисунке 1, которая состоит из двигателя 2 постоянного тока, кинематически

связанного через редуктор 3 с ходовым винтом 4 шлифовальной бабки 5. Для измерения величины удаленного припуска используется индуктивный измерительный датчик активного контроля непрерывного действия 6, подключенный к усилителю 7. Питание двигателя 2 осуществляется преобразователем 1. Деталь 9 устанавливается в центрах шлифовального станка и приводится во вращение приводом передней бабки 8. Для обеспечения заданного статического коэффициента передачи введен корректирующий усилитель 10. Компараторы 11 и 12 необходимы для введения обратных связей, контролирующих качество процесса управления. Введение звена динамической коррекции 13 устраняет перерегулирование при изменениях режимов обработки.

Целью статьи является изложение методики выбора параметров звеньев коррекции, обеспечивающих заданную точность реализации технологического процесса обработки детали.

### Основное содержание работы

От приспособления ЧПУ врезной подачей шлифовального станка через цифро-аналоговый преобразователь напряжение  $U_3$ , которое представляет в определенном масштабе значение нужной величины снятия припуска, поступает на сравнивающее устройство 11 (СУ). На второй вход СУ подан выходной сигнал  $U_0$  усилителя 7, пропорциональный величине удаленного припуска, поступающий от датчика 6. Далее сигнал ошибки  $\delta U$  через преобразователь 1 воздействует на двигатель 2. В результате двигатель 2 перемещает шлифовальную бабку 5 на требуемую величину, обеспечивая заданную глубину резания. Для устранения колебательной составляющей процесса управления режимом обработки введена обратная связь с выхода прибора активного контроля 6 через звено динамической коррекции 13 на вход двигателя. Регулируемым параметром является величина снятия припуска  $H$ .

Для анализа САУ необходимо иметь ее математическое описание. Описание системы управления, изображенной на рисунке 1, может быть представлено описанием соединения ее звеньев в операторной форме [1-4], представленного таблицей 1.

Таблица 1 – Описание звеньев системы

Номер звена	Передаточная функция	Диапазон параметров звеньев	Принятые значения
1	$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1 p + 1}$ ;	$k_1 = 10 \dots 100$ ; $T_1 \leq 0,1$ с;	$k_1 = 0,9$ ; $T_1 = 0,03$ с;
2	$W_2(p) = \frac{k_2}{T_e T_m p^2 + T_m p + 1}$ ;	$k_2 = 1 \dots 3,5$ ; $T_e \leq 0,1$ с; $T_m = 0,1 \dots 0,7$ с;	$k_2 = 2,5$ ; $T_e = 0,08$ с; $T_m = 0,03$ с;
3	$W_3(p) = k_3$ ;	$k_3 = 0,01 \dots 0,1$ ;	$k_3 = 0,04$ с;
4	$W_4(p) = k_4$ ;	$k_4 = (4 \cdot 8) / 2\pi$ мм/об;	$k_4 = 2/\pi$ ;
5	$W_5(p) = k_5 \exp(-\tau p)$ ;	$\tau$ – время одного оборота детали с; $k_5 \leq 1$ ;	$k_5 = 0,9$ ; $T_5 = 0,01$ с;
6	$W_6 = k_6$ ;	$k_6 = 0,01 \dots 0,12$ ;	$k_6 = 0,05$ ;
7	$W_7(p) = \frac{k_7}{T_7 p + 1}$ ;	$k_7 \leq 0,15$ ; $T_7 \leq 0,05$ с.	$k_7 = 0,05$ ; $T_7 = 0,02$ с.

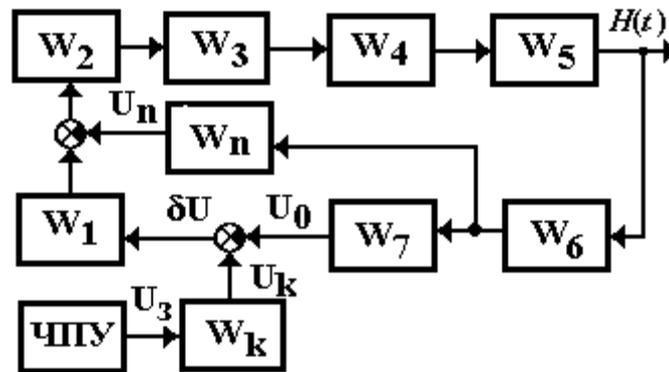


Рис. 2. Блок-схема системы автоматического управления

На рисунке 2 изображена блок-схема системы автоматического управления процессом шлифования, изображенной на рисунке 1 в соответствии с ее описанием и обозначениями, приведенными в таблице 1.

Операторную передаточную функцию системы управления в соответствии с рисунком 2 можно представить в виде

$$W(p) = W_k(p)W_0(p), \quad (1)$$

где  $W_0(p) = \frac{W_{15}(p)}{1 + (W_n(p) + W_1(p)W_7(p))W_{26}(p)}$ ;  $W_{15}(p) = W_1(p)W_2(p)W_3(p)W_4(p)W_5(p)$ ;

$$W_{26}(p) = W_2(p)W_3(p)W_4(p)W_5(p)W_6(p).$$

Для настройки станка на требуемый режим необходимо ввести корректирующее звено  $W_k(p)$  (корректирующий усилитель 10), задающее положение рабочих органов системы в установившемся режиме. На основании предельной теоремы Лапласа найдем передаточную функцию корректирующего звена

$$W_k(p) = \frac{k_s}{\lim_{p \rightarrow 0} (W_0(p))},$$

где  $k_s$  – требуемое значение статического коэффициента передачи системы.

Для моделирования поведения системы необходимо преобразовать выражение звена задержки  $\exp(-\tau p)$  передаточной функции  $W_5(p)$ . Среди возможных выберем наиболее общий подход [4], позволяющий уточнять модель по мере необходимости.

Представим звено задержки  $\exp(-\tau p)$  приближенным выражением

$$e^{-\tau p} \approx (1 - p \tau \alpha / n)^n / (1 + p \tau (1 - \alpha) / n)^n,$$

где  $\alpha$  может выбираться в пределах  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Положив  $\alpha = 0$ , получим

$$e^{-\tau p} \approx \frac{1}{(1 + \tau p/n)^n}.$$

Применив разложение по формуле бинома, перейдем к тождественной форме

$$e^{-\tau p} \approx \frac{1}{\sum_{i=0}^n a_i p^i},$$

где  $a_i = C_n^i (\tau/n)^i$ ,  $C_n^i$  – биномиальный коэффициент.

Реакцию звена, представленного в той или иной форме, можно получить на основе обратного преобразования Лапласа

$$Y(t) = L^{-1}\{X(p) \exp(-\tau p)\}; \quad y(t) = L^{-1}\{X(p)W_e(p)\},$$

где  $X(p)$  – изображение входа, описание которой в MAPLE– интерпретации (ZAD.mws) для входного воздействия  $x=1$  имеет вид

```
X(p) := laplace(x, t, p);
y(t) := invlaplace(X(p) * We(p), p, t);
Y(t) := invlaplace(X(p) * exp(-tau*p), p, t);
```

где  $W_e(p) = \left(1 + \frac{p\tau}{n}\right)^{-n}$  – результат аппроксимации звена задержки  $\exp(-\tau p)$  звеном  $n$ -го порядка,  $X(p)$  – изображение входного сигнала  $x(t)$ ,  $y(t)$  – оригинал реакции аппроксимации звена задержки,  $Y(t)$  – оригинал реакции звена задержки.

На рисунке 3 изображены графики переходной характеристики при входном воздействии  $x(t) = 1(t)$ ;  $\tau = 0,01$  с и разных значениях  $n$ .

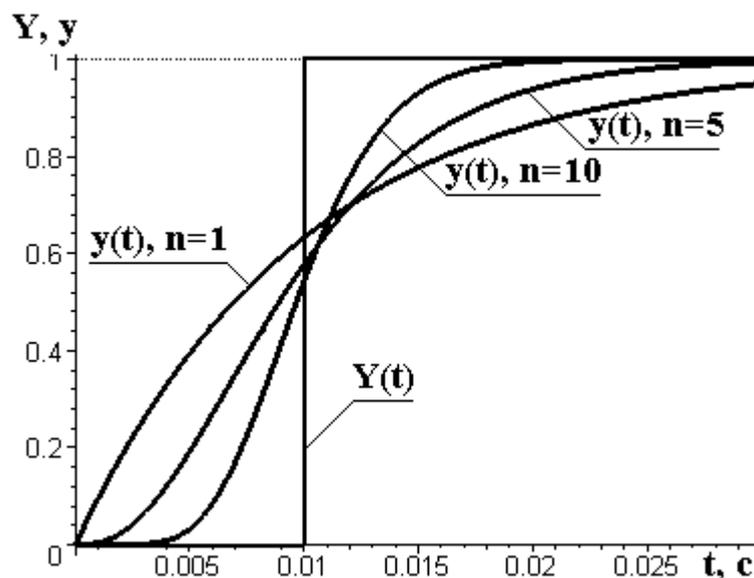


Рис. 3. Аппроксимация характеристики звена задержки

Таким образом, технологический процесс шлифования может быть описан линейным выражением, учитывающим процесс задержки врезной подачи

$$W_5(p) = k_5 \left(1 + \frac{Tp}{n}\right)^{-n}.$$

Звено динамической коррекции  $W_n(p)$  является форсирующим с операторной передаточной функцией  $W_n(p) = T_n p + 1$ . Оно необходимо для устранения эффекта перерегулирования при изменении режимов в процессе обработки детали. Для выбора постоянной времени  $T_n$  можно предложить критерий обеспечивающий монотонность амплитудно-частотной характеристики операторной передаточной функции (1). С этой целью необходимо перейти к показательной форме частотной передаточной функции

$$W(j\omega) = A(\omega) \exp(j\varphi(\omega)),$$

где  $A(\omega) = \sqrt{\operatorname{Re}^2(\omega) + \operatorname{Im}^2(\omega)}$ ;  $\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}(\omega)}{\operatorname{Re}(\omega)}\right)$ , а  $\operatorname{Re}(\omega)$  – вещественная и

$\operatorname{Im}(\omega)$  – мнимая составляющие алгебраической формы операторной передаточной функции (1). В этом случае критерий монотонности амплитудно-частотной характеристики  $A(\omega)$  можно сформулировать в форме требования: найти такое значение  $T_n$ , при котором

$$A(\omega)|_{\omega=0} \leq A(\omega)|_{\omega=\omega_r},$$

где  $\omega_r$  – резонансная частота.

На рисунке 4 изображено семейство амплитудно-частотных характеристик  $A(\omega)$  при изменениях постоянной времени  $T_n$ .

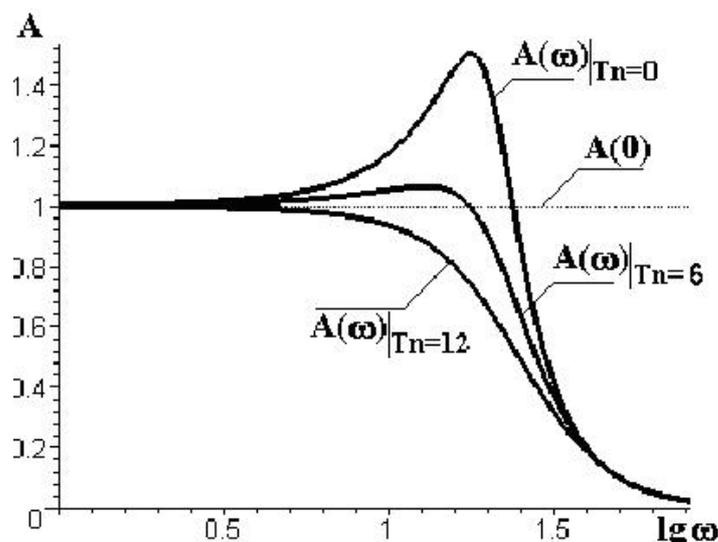


Рис. 4. Семейство амплитудно-частотных характеристик

Одной из основных является задача проверки устойчивости системы при

заданном качестве переходного процесса. На устойчивость САУ оказывают влияние изменения технологического процесса для деталей различного типа, настройки ЧПУ, параметров инструмента, заготовки, материала и другие факторы, вызывающие отклонение режима ее работы.

Проверка устойчивости линейной системы с сосредоточенными параметрами может быть произведена по критерию положения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости.

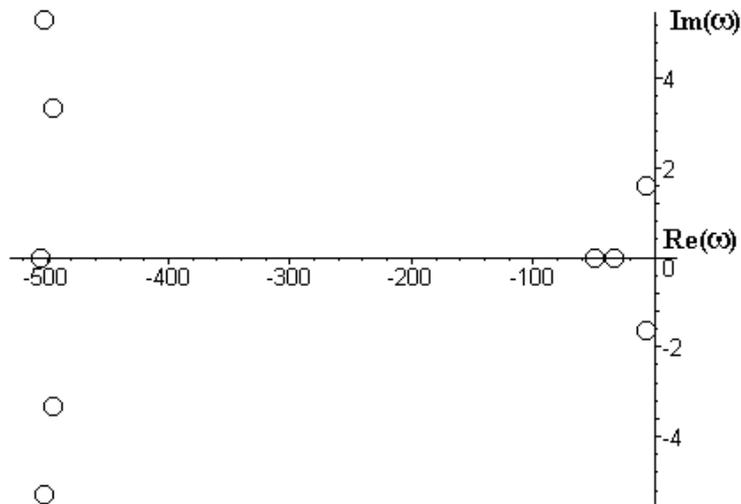


Рис. 5. Расположение корней характеристического уравнения

При аппроксимации звена задержки инерционным звеном  $n$ -го порядка порядок характеристического уравнения системы при  $n = 5$  будет  $n = 9$ , так как порядок линейной части системы равен 4. Все его корни лежат в левой комплексной полуплоскости, так как максимальное значение вещественной составляющей корней характеристического уравнения системы отрицательно. Следовательно, система устойчива.

На рисунке 5 изображено расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости, вычисленное с помощью MAPLE – подпрограммы (SHLIF\_PA.mws)

```
Zn:= denom(W); # Характеристическое уравнение
R:= [solve(Zn)]; # Корни характеристического уравнения
m:=degree(Zn,p); # Порядок характеристического уравнения m
Rm:=max(seq(Re(R[j]), j=1..m)); # Максимальное значение,
```

где  $R$  – множество корней характеристического уравнения,  $R_m$  – максимальное значение вещественной составляющей множества  $R$ .

Вычисление реакции системы выполнено с помощью преобразования Лапласа для ступенчатого сигнала, соответствующего технологическому режиму обработки, состоящему из трех итераций с переменной глубиной резания  $H_1 = 5 \text{ мкм}$ ;  $H_2 = 2,5 \text{ мкм}$ ;  $H_3 = 1,25 \text{ мкм}$ ; и участком выхаживания, распределенных по времени

$T_1 = 5\text{ c}$ ;  $T_2 = 10\text{ c}$ ;  $T_3 = 15\text{ c}$  и  $T_4 = 20\text{ c}$ , как показано на рисунке 6 при заданном значении статического коэффициента передачи системы  $k_s = 1$ .

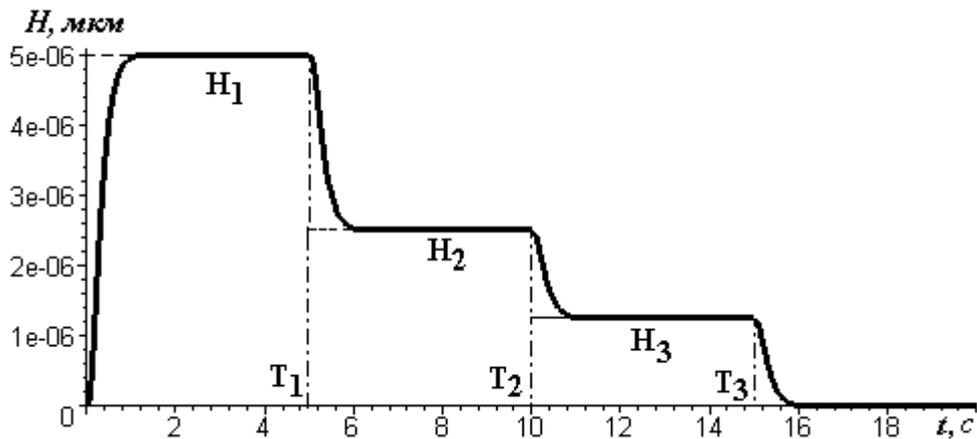


Рис. 6 – Реакция системы управления

Изображение управляющего сигнала, имеющего описание

$$H = \begin{cases} H_1 & t < T_1; \\ H_2 & t < T_2; \\ H_3 & t < T_3; \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases},$$

в этом случае можно представить выражением

$$H(p) = \frac{H_1 + (H_2 - H_1)e^{-T_1 p} + (H_3 - H_2)e^{-T_2 p} - H_3 e^{-T_3 p}}{p}.$$

Результат вычисления реакции системы изображен на рисунке 6, где штриховой линией показан управляющий сигнал при коэффициенте статической коррекции  $k_s = 1$ .

Таким образом, введение звеньев статической  $W_k(p)$  и динамической  $W_n(p)$  коррекции позволяют обеспечить необходимую точность и качество реализации технологического процесса.

Изложенный подход может быть применен при анализе динамических систем механической обработки аналогичной структуры, содержащих звенья запаздывания.

### Список литературы

1. Новоселов Ю.К. Обеспечение стабильности точности деталей при шлифовании / Ю.К. Новоселов, Е.Ю. Татаркин; Под ред. А.В. Королева. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1988. – 128 с.
2. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М.М. Тверской. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.
3. Петраков Ю.В. Теорія автоматичного управління в металообробці: Навч. посібник / Ю.В. Петраков. – К.: Изд-во ІЗМН, 1999. – 212 с.

4. Долгин В.П. Автоматическое управление техническими и технологическими системами и объектами. Численные методы анализа и синтеза систем и объектов / В.П. Долгин.– Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2003. – 320с.

5. Долгин В.П. Оптимальное управление технологическими объектами в условиях неопределенности. Подход адаптивной комбинаторной фильтрации: Монография / В.П. Долгин.– К.: Ин-т систем. исслед., 1995. – 248 с.

*Рецензент: Братан С.М.*

*Надійшла до редакції: 18.04.2011р.*

#### **В.П. ДОЛГІН**

Севастопольський національний технічний університет

#### **СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ШЛІФУВАННЯ**

Запропоновано метод вибору параметрів динамічної корекції системи управління глибиною різання круглошліфувального верстата, що забезпечують задані режими технологічного процесу.

**Шліфування, корекція, система управління, технологічний процес, моделювання**

#### **V.P. DOLGIN**

Sevastopol national technical university

#### **SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEM OF GRINDING PROCESS**

Method of choice of dynamic correction parameters of the control system of cutting depth of cylindrical grinding machine, providing the preset conditions of technological process, is proposed.

**Grinding, correction, control system, technological process, modeling**

УДК 662.73

**О.С. ПАРФЕНЮК** (д-р. техн. наук, проф.)  
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна  
**С.П. ВЕРЕТЕЛЬНИК** (канд. техн. наук, доц.)  
**ІЛЬЧЕНКО Д.В.** (інженер, idv197@mail.ru)

## ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ КОКСОВИХ МАШИН І АГРЕГАТІВ

Запропоновано деякі рішення для підвищення надійності коксових машин та агрегатів, які зумовлюють ефективність, безпечність роботи та мінімальне забруднення навколишнього середовища.

**Ключові слова:** Коксові машини та агрегати, виробництво коксу, надійність, довговічність

### Вступ

Традиційні конструкції коксових машин, агрегатів та обладнання існують десятиліття без суттєвих змін. Це можна пояснити з одного боку досить вдалим рішеннями, що підтверджують свою життєздатність, а з іншого – консервативністю розробників та відсутністю зацікавленості власників коксохімічних підприємств у впровадженні у виробництво більш прогресивних розробок та інновацій.

Деякі з цих розробок мають безперечні переваги перед існуючими конструкціями та їх впровадження не потребує додаткових витрат. Для підтвердження цього наводимо деякі приклади рішень, що отримані на основі досліджень та розрахунків надійності та міцності, які виконані співробітниками кафедри «Машини та апарати хімічних виробництв» Донецького національного технічного університету.

Наведені нижче технічні рішення обґрунтовані розрахунками, експериментальними дослідженнями та їх обговорення було здійснено на технічних нарадах підприємств «Укркокса», коксохімічних заводах та ВАТ «Славтяжмаш», науково-дослідницьких інститутах та конференціях та були зарекомендовані до впровадження у використання.

Аналіз сучасного стану проблеми свідчить про майже 20-тирічний період дуже низького рівня використання інноваційних технічних рішень у коксохімічній галузі. Тому наведені принципи технічні рішення дуже актуальні на сьогоднішній день.

### Основний зміст роботи

Одне з таких рішень, що буде сприяти надійності виконання операції проштовхування робочої маси у камері агрегату безперервної дії відносять до конструкції поду. Надійне просування пирога в камері агрегату повинне здійснюватися без контакту з обігрівальними простінками при мінімальному опорі руху [1]. У зв'язку із цим запропоновано на поду камери агрегату виконати спеціальні виступи й впадини, що є своєрідними напрямними для пирога, що рухається, від гріючих простінок до центра камери (патент України 12606 ) [2] (рис. 1).

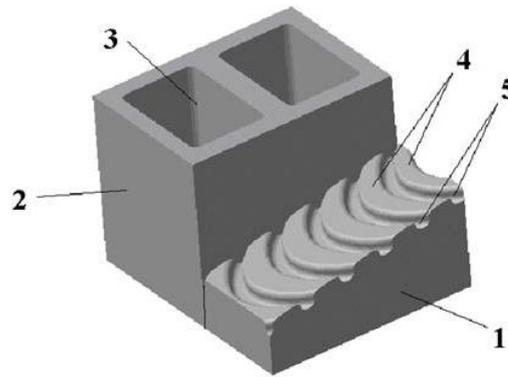


Рис. 1. Фрагмент кладки пічного агрегату камерного типу з виконанням самоцентруючого поду (патент України 12606):  
1 – нахилений под; 2 – простінок; 3 – вертикал; 4 – виступи; 5 – впадини.

Таке виконання поду сприяє осьовому центруванню пирога при його відхиленні від осі камери, оскільки збільшується поперечна складова сили опору просуванню, спрямована до осі камери. Аналогічне виконання поду можна використати й у традиційних конструкціях горизонтальних камерних печей періодичної дії для самоцентрування коксового пирога при його видачі. Таким чином у конструкції передбачене формування проміжного шару між робочою масою й подом, що знижує адгезійну взаємодію між ними.

На основі дослідження закономірностей зміни тиску на штовхальнику агрегату безперервної дії й розподілу тиску на стінки камери пресування визначені параметри й запропонована конструкція камери пресування (патент України № 13893) [3] (рис. 2), що забезпечує твердість системи з декількох рядом розташованих камер пресування.

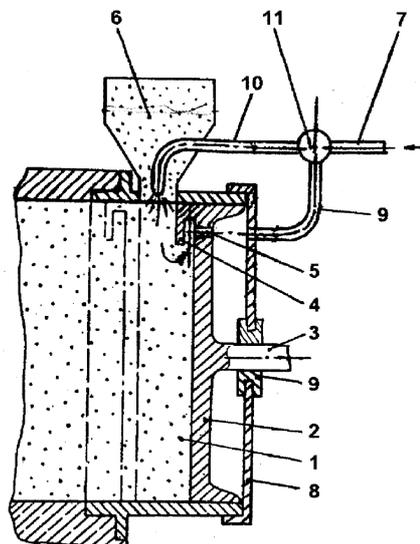


Рис. 2. Завантажувальний пристрій (патент України 13893):  
1 – камера пресування; 2 – штовхальник; 3 – привод; 4 – відбійник; 5 – канал;  
6 – бункер; 7 – патрубок стиснутого повітря; 8 – кришка; 9 – відвідний патрубок;  
10 – збірний патрубок; 11 – регулятор.

У традиційних конструкціях дверез'юмних пристроїв коксовиштовхувачів і дверез'юмних машин при зніманні дверей граничним навантаженням піддається

велика кількість елементів коксових машин і коксової батареї. На основі досліджень для підвищення надійності підсистеми "кокова піч – двері коксової печі – дверез'йомний пристрій" розроблені рішення, що змінюють характер силової взаємодії її елементів (а.с. 1174458 й 1447833) [4,5] і "замикання" зусиль по найкоротшому контуру. Ці рішення представлені на рис. 3 та 4.

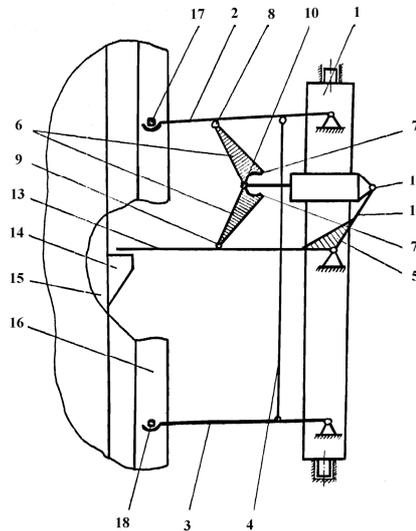


Рис. 3. Кінематична схема механізму з'йому дверей коксової печі

1 – поворотна рама; 2 – важіль верхній; 3 – важіль нижній; 4 – тяга; 5 – двоплечій важіль; 6 – розпірні ланки; 7 – упори; 8 – шарніри; 12 – коротке плече; 13 – довге плече; 14 – опорний кронштейн; 15 – рама; 16 – двері; 17 – верхній карман; 18 – нижній карман.

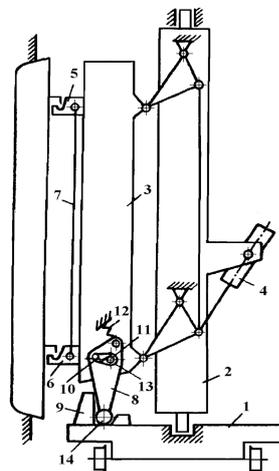


Рис. 4. Дверез'йомний пристрій

1 – платформа; 2 – поворотна рама; 3 – штанга; 4 – привод; 5 – верхній захват; 6 – нижній захват; 7 – тяга; 8 – опорна стійка; 9 – упор; 10 – пружинний вузол; 11 – паз горизонтальний; 12 – пружина; 13 – вісь нижнього захвата; 14 – ролик.

Двері великоємної коксової печі в традиційному виконанні мають низьку ремонтпридатність і недостатню герметичність, що веде до тривалих простоїв, значних матеріальних втрат й екологічного збитку. Нові технічні рішення конструкції дверей коксової печі (а.с. 1202253 й 1464459) [6,67] забезпечують кращу герметичність.

Зниження навантаження на елементи системи «двері-бронерама» досягається завдяки конструкції затвора дверей коксової печі (а.с. 1286609) [8], у якій використовується аналогічний принцип замикання сил по найкоротшому контуру (рис. 5).

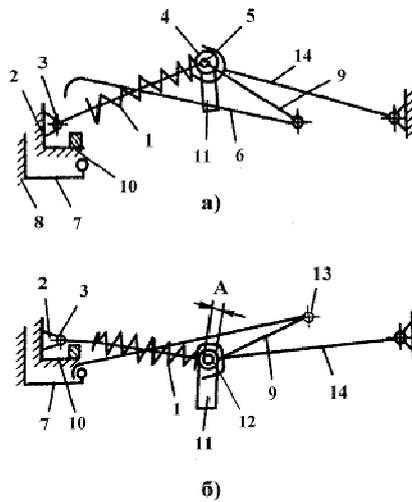


Рис. 5. Кінематична схема затвора дверей коксової печі (а.с. 1286609):

а – у відкритому стані; б – у закритому стані:

1 – підпружинений важіль; 2 – корпус двері; 3 – горизонтальна вісь; 4 – ригельний вал; 5 – хвостовик ригельного валу; 6 – скоба; 7 – упори; 8 – рама; 9 – кривошип; 10 – упор; 11 – серга; 12, 13 – шарніри; 14 – вилка механізму запирання дверей коксової машини.

Нестабільність щільнісних характеристик вугільної шихти створює передумови нерівномірної щільності й міцності коксового пирога, що підвищує ймовірність його обвалів і самозаклинювання. Використовувані нині планірні пристрої лише частково вирішують проблему підвищення рівномірності й щільності завантаження. Надійність типових конструкцій низка через руйнування насамперед поперечних перегородок планірних штанг при циклічних механічних і температурних впливах [9,10]. Підвищення щільності вугільного завантаження й надійності планірного пристрою забезпечують рішення (а.с. 1237697 й 1682378) [11,12], представлені на рис. 6, 7.

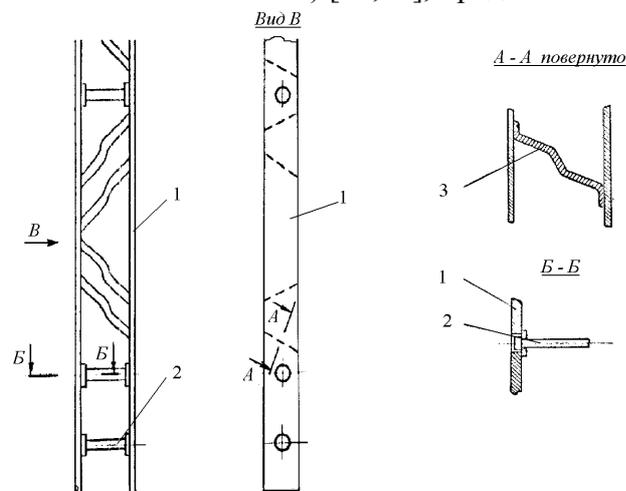


Рис. 6. - Планірна штанга (а.с. 1237697):

1 – боковина; 2 – стрижень; 3 – планірна перегородка.

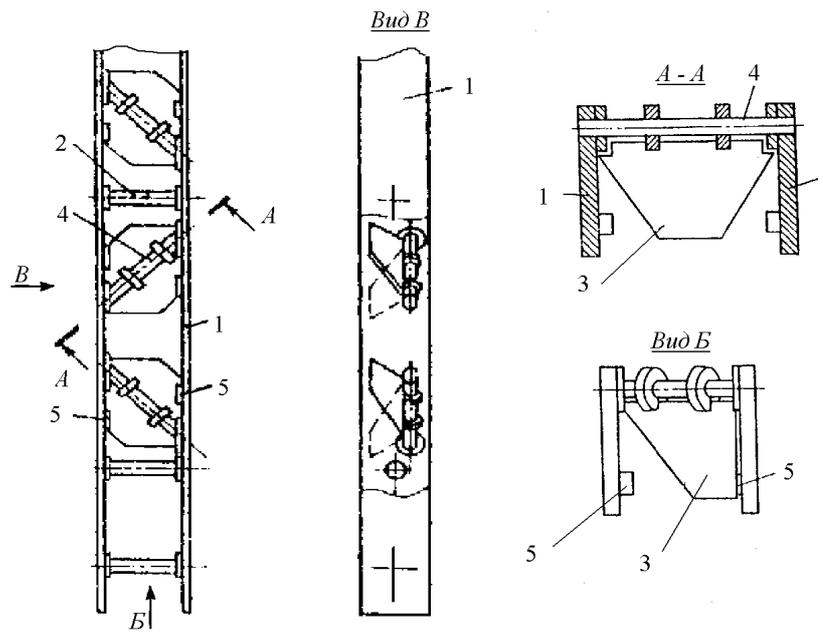


Рис. 7. Планірна штанга (а.с. №1682378)

1 – боковина; 2 – стрижень; 3 – планірна перегородка; 4 – вісь; 5 – упор.

Нове технічне рішення по компенсації нерівномірності накладення тиску штанги, що виштовхує, на коксовий пиріг (а.с. 1511268) [13] ураховує підвищену ймовірність обвалення головки коксового пирога й опір виштовхуванню поблизу поду печі й забезпечує підвищення надійності процесу видачі коксового пирога. Схема штанги представлена на рис. 8.

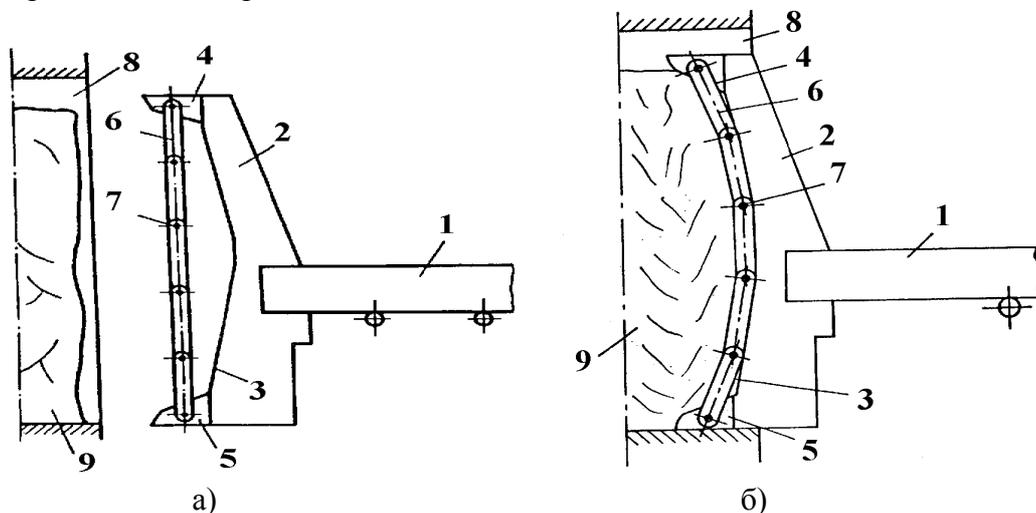


Рис. 8. Простовхувальний пристрій горизонтальної коксової печі (а.с. 1511268):

а – у вихідному положенні; б – під час контакту з простовхуємою масою;  
1 – штанга; 2 – головка; 3 – вогнута торцева поверхня; 4 – верхній виступ;  
5 – нижній виступ; 6 – плити; 7 – шарніри; 8 – камера коксової печі; 9 – простовхуєма маса.

Характерною причиною відмов, пов'язаних з роботою корзини коксонаправляючої і механізму її пересування, є неточна установка коксонаправляючої

відносно камери коксування і її відхід від перерізу пічної камери під час видачі коксу. Із цим зв'язана підвищена небезпека заклинювання пирога й, як наслідок, відмова процесу видачі. Ліквідація причин таких відмов досягається шляхом підвищення точності й твердості кріплення коксонаправляючої за раму печі (а.с. 1528783) [14].

Важливі для розвитку коксохімії результати отримані на Стахановському КХЗ, де були доведені переваги крупноблочної бетонної кладки при спорудженні коксових батарей: поліпшені умови й змінено характер праці під час спорудження, досягнута економія енергоресурсів і зменшені викиди в навколишнє середовище [16,17]. Продуктивність блочних батарей (рис. 9, 10) у порівнянні із традиційними батареями із шамотних виробів підвищилася на 33 %, досягнуть ріст продуктивності, поліпшені показники якості ливарного коксу: вихід класу 60 мм і більше виріс на 18,64 %, якість коксу по показнику "механічна міцність" підвищена з 82,3 до 86,6 %. Нова технологія дозволила скоротити працевтрати й тривалість монтажу кладки (в 8...10 разів) за рахунок застосування індустріальних методів виготовлення блоків і спорудження батарей.

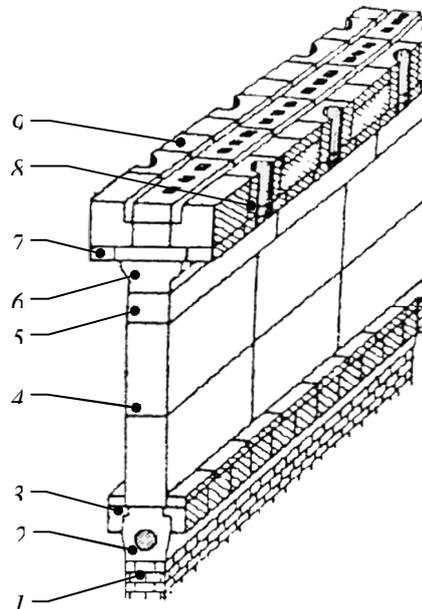


Рис. 9 - Крупноблочний простінок:

1 – регенератори; 2 – корнюрний блок; 3 – подовий блок; 4 – стенівий блок; 5 – блок зборного каналу; 6 – блок перекриття газозборного каналу; 7 – блок перекриття камери коксування; 8 – люковий блок; 9 – плити вистилки верху батареї.

Міцність і довговічність кладки агрегатів істотно підвищується за рахунок нових матеріалів, технології ремонтів, конструктивних рішень і скорочення довжини матеріальних швів [18]. Крупноблочні коксові батареї з вогнетривкого бетону (а.с. 744021) [19], спосіб сушіння й розігріву крупноблочних конструкцій з вогнетривкого бетону (а.с. 925041) [20] і технологія ремонту (а.с. 1481227) [21] дають можливість досягти цієї мети. Підвищення ресурсу й поліпшення ремонтпридатності крупноблочної кладки досягається застосуванням знімних термостійких блоків і їхнім захистом від руйнування (а.с. 1723095) [22], а також компенсацією термічних тріщин (рис. 11 та 12) (патент 1806163) [23].

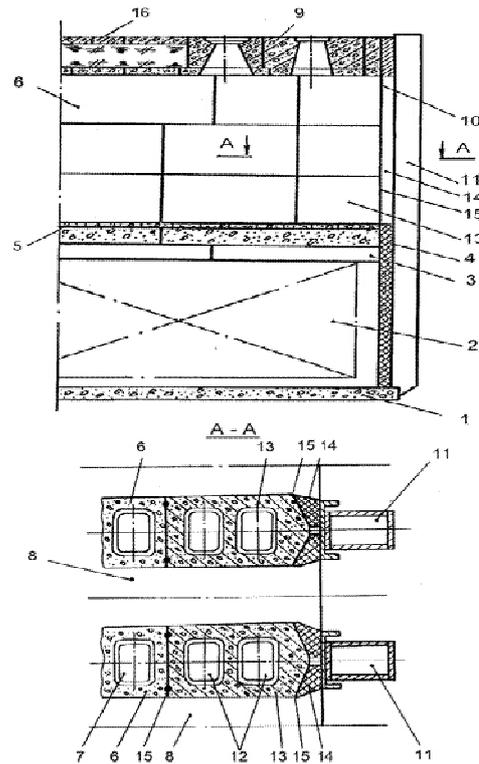


Рис. 10. Конструкція комбінованої цегляно-бетонної кладки коксової батареї (а.с. 1723095):

1 – подова плита; 2 – регенератори; 3 – корнюрна зона; 4 – подовий блок; 5 – вистилка поду; 6 – стінові блоки; 7 – опалювальний канал; 8 – камера коксування; 9 – газовідводячий блок; 10 – шов ковзання; 11 – анкераж; 12 – головочний блок; 13 – фасадна частина; 14 – клиновий блок; 15 – матеріальні шви.

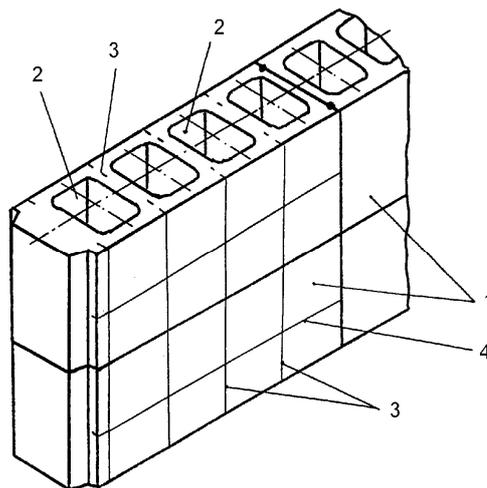


Рис. 11. Обігрівальний простінок камери коксування з компенсаторами тріщин на головочних блоках (а.с. 1806163):

1 – стінові блоки; 2 – опалювальний канал; 3 – вертикальний компенсатор; 4 – горизонтальний компенсатор.

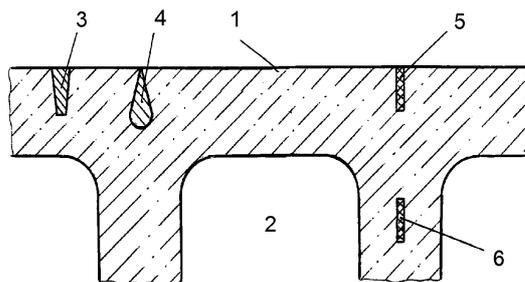


Рис. 12. Форми компенсуючих закладних елементів:

1 – блок; 2 – опалювальний канал; 3 – трапецеїдальний елемент; 4 – каплевидний елемент; 5 – нетерmostійкий елемент; 6 – внутрішній нетерmostійкий елемент.

Обґрунтована концепція створення ефективних агрегатів для переробки вуглецевих спікливих матеріалів. У цьому напрямку створені конструкції нахилених коксових печей із крупнорозмірних вогнетривких блоків (а.с. 1455716) [24] і пресуюче-проштовхувального пристрою (а.с. 1111483) [25].

Внаслідок того, що в конструкції камерних печей нараховується велика кількість елементів, які мають різноманітні фізико-механічні якості та по різному приймають навантаження в процесі експлуатації, а також в зв'язку зі старінням основних фондів коксохімічних підприємств представляється важливим подальше поліпшення конструкцій герметизуючих та компенсуючих ущільнюючих елементів коксових печей (рис 13). Для збільшення компенсуючих здібностей ущільнюючих пристроїв та забезпечення самоцентрування дверей, люків запропоновано декілька пристроїв [26,27], які створюють ефект лабиринтного ущільнення, яке призводить до збільшення герметичності вузлів камерних коксових печей. Використовування цих конструкцій дозволяє збільшити період герметичної роботи агрегату з 0,5 до 5 років.

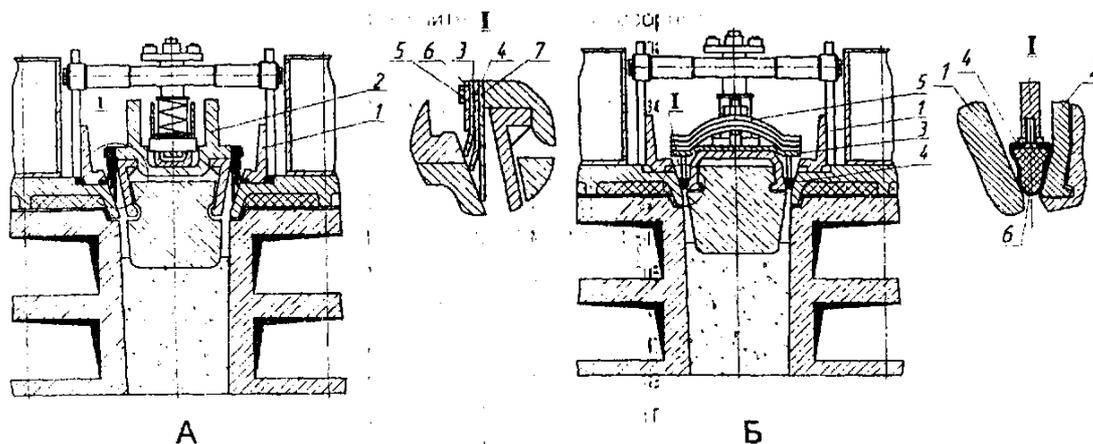


Рисунок 12 – Пристрої ущільнення дверей коксових печей

А - 1 — рама; 2—двері, 3 — основна планка; 4 — допоміжна планка;

5 — болт; 6 — ресорний прижим; 7 — теплозахисний елемент

Б - 1 —рама; 2—двері, 3 — пружна пластина; 4 клінообразний елемент;

5 — ресорний прижим; 6 — еластична прокладка

Дослідження процесу пресування-проштовхування робочої маси дозволили розробити технічні рішення, що виключають газопилові викиди в атмосферу з камери коксування.

Результати досліджень показали, що ці технічні рішення можуть бути застосовні при створенні агрегатів для термічної переробки спікливих вуглецевих мас із сумішею промпобутвідходів.

### Висновки

Наведені технічні рішення можуть бути втілені майже на кожному коксохімічному підприємстві. Перспективи даної роботи можуть бути значно підвищені при зацікавленості спеціалістів-проектувальників, машинобудівельників експлуатаційних відділів на коксохімічних підприємствах і полягає в можливості створення подальшого розвитку та модернізації перспективних технічних рішень.

Наведені технічні рішення пройшли апробацію на моделях, пілотних установках, а також у промислових умовах на коксохімічних підприємствах.

Конструкції крупноблочних коксових батарей виявили свої переваги в порівнянні з традиційними конструкціями коксових батарей з дрібноштучних динасових та шамотних матеріалів.

Ряд авторських посвідчень на винаходи в результаті впровадження у виробництво забезпечили значний економічний ефект.

В цілому можна впевнено стверджувати, що наведені технічні рішення забезпечать підвищення ефективності виробництва коксу при їх розширеному використанні на коксохімічних підприємствах.

### Список літератури

1. Парфенюк А.С., Топоров А.А., Алексеева О.Е. Система безопасности и экологичности основных производств промышленных предприятий / Международный сб. научных трудов «Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века», в 3-х томах. – Донецк: ДонГТУ, 1999. – Т.2 – с. 227-229.

2. Патент 12606 А України. МКВ С10В 29/00. Заявка 94097048. Заявл. 26.09.94; Опубл. 28.02.97, Бюл. № 1. Батарея коксовых печей. Кутняшенко І.В., Зборщик М.П., Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Трубніков Л.І., Комбаров О.П., Лукашенко А.Д., Котенко М.С.

3. Патент 13893 А України. МКВ С10В 31/00. Заявка N94096939. Заявл. 13.09.94; Опубл. 25.04.97, Бюл. № 2. Завантажувальний пристрій печі безперервного коксування. Веретельник С.П., Топоров А.А., Парфенюк А.С., Кутняшенко І.В., Поролов В.В., Колесников О.Г.

4. А.С. N 1174458 СССР, МКИ С10В 25/12. Заявка N 3654919. Заявл. 20.10.83. Опубл. 23.08.85, Бюл. N 31. Устройство для съема и установки двери коксовой печи. Веретельник С.П., Парфенюк А.С., Власов Г.А., Хромов Н.А., Ильинков В.В., Булатов А.А.

5. А.С. N 1447833 СССР, МКИ С10В 25/12. Заявка N 4117473. Заявл. 10.09.86; Опубл. 30.12.88, Бюл. N 48. Двересъемное устройство. Веретельник С.П., Парфенюк А.С., Булатов А.А., Хромов Н.А., Власов Г.А., Романенко Е.П.

6. А. С. N 1202253 СССР, МКИ С01В 25/06. Заявка N 3548427. Заявл. 04.02.83; Не подлежит опубликованию в открытой печати. Дверь коксовой печи. Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Хромов Н.А., Власов Г.А., Хохолач М.

7. А.С. N 1464459 СССР, МКИ С10В 25/06. Заявка N 4080331. Заявл. 03.07.86; Не подлежит опубликованию в открытой печати. Дверь коксовой печи. Веретельник С.П., Булатов А.А., Ильинков В.В., Парфенюк А.С., Хромов Н.А., Власов Г.А., Романенко Е.П.

8. А.С. N 1286609 СССР, МКИ С10В 37/02. Заявка N3900287. Заявл. 22.05.85. Оpubл. 30.01.87, Бюл. N 4. Затвор двери коксовой печи. Ильинков В.В., Булатов А.А., Хромов Н.А., Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Комолов В.Г., Власов Г.А., Романенко Е.П., Новикова Н.В.

9. Парфенюк А.С., Топоров А.А., Власов Г.А. Продление ресурса и повышение техногенной безопасности основных конструкций на коксохимических предприятиях // Кокс и химия, 2001. – № 1. – с. 36-38.

10. Третьяков П.В., Топоров А.А., Алексеева О.Е. Обеспечение техногенной безопасности тепловых агрегатов. / Сб. трудов IX международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», в 3- томах. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – Т.3 – с.73-75.

11. А.С. N 1237697 СССР, МКИ С10В 37/02. Заявка N 3815626. Заявл. 26.11.84; Оpubл. 15.06.86, Бюл. N 22. Планирная штанга. Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Хромов Н.А., Булатов А.А., Шубин В.С., Власов Г.А., Романенко Е.П.

12. А.С. N 1682378 СССР, МКИ С10В 37/02. Заявка N 4700652. Заявл. 02.06.89; Оpubл. 07.10.91, Бюл. N 37. Планирная штанга. Москалец Ф.И., Веретельник С.П., Парфенюк А.С., Булатов А.А., Сербин Д.Ю., Хромов Н.А.

13. А.С. N 1511268 СССР, МКИ С10В 7/00. Заявка N 4342563. Заявл. 14.12.87; Оpubл. 30.09.89, Бюл. N 36. Проталкивающее устройство горизонтальной коксовой печи. Хромов Н.А., Веретельник С.П., Парфенюк А.С., Булатов А.А., Самарская С.В.

14. А.С. N 1528783 СССР, МКИ С10В 33/14. Заявка N 4343595. Заявл. 05.12.87; Оpubл. 15.12.89, Бюл. N 46. Коксонаправляющее устройство. Хромов Н.А., Булатов А.А., Веретельник С.П., Парфенюк А.С., Власов Г.А., Романенко Е.П.

15. Парфенюк А.С. Анализ повреждений элементов конструкций коксовых батарей в зависимости от технологических условий эксплуатации. Наукові праці ДонНТУ, серія Хімія і хімічна технологія, випуск 137(11). – Донецьк, 2008. – с.178-182.

16. Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Власов Г.А. Повышение надежности и экологичности коксового оборудования путем создания новых конструкций. / Материалы международной научно-практической конференции «Экологические проблемы промышленных мегаполисов» в 2-х томах. – Донецк, 2004. – т.1. – с.250-252.

17. Парфенюк А.С., Костина Е.Д., Алексеева О.Е. Расчет безотказности крупноблочной бетонной кладки коксовых батарей // Кокс и химия, 2001. - № 5. – с. 21-25.

18. Парфенюк А.С., Власов Г.А., Топоров А.А. К разработке критериев техногенной безопасности объектов химических производств / Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки». – Дніпропетровськ, 2001.- с. 238-240.

19. А.С. N 744021 СССР, МКИ С10В 29/00. Заявка N 2409753. Заявл. 27.09.76; Оpubл. 30.06.80, Бюл. N 24. Батарея горизонтальных коксовых печей. Зборщик М.П., Чамов А.В., Фришман И.М., Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Сибилев А.И., Некрасов К.Д., Федоров А.Е., Криштопа А.П., Борт П.И.

20. А.С. N 925041 СССР, МКИ С04В 35/68. Заявка N 2820600. Заявл. 17.09.79; Способ сушки и разогрева конструкций из жаропрочного бетона. Сибилев А.И., Зборщик М.П., Сагалевич Ю.Д., Некрасов К.Д., Федоров А.Е., Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Титов А.Г., Криштопа А.П., Борт П.И., Копылов М.В. Не подлежит опубликованию в открытой печати.

21. А.С. N 1481227 СССР, МКИ С04В 28/34. Заявка № 4210185. Заявл. 15.12.86; Торкет–масса для горячего ремонта бетонной футеровки. Гудиница Э.Н., Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Терещенко В.Н., Борт П.И.,

22. А.С. N 1723095 СССР, МКИ С10В 37/02. Заявка N4849265. Заявл. 26.07.90; Оpubл. 30.03.92, Бюл. N 12. Батарея горизонтальных коксовых печей. Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Зборщик М.П., Сибилев А.И., Котова Е.Д., Трубников А.И., Дорофеев А.Х., Борт П.И., Котенко Н.С., Лукашенко А.Д., Терещенко В.Н., Апаликов Н.Г.

23. Патент 1806163 СССР, МКИ С10В 29/00. Заявка N 4931946/04. Заявл. 29.04.91; Оpubл. 30.03.93, Бюл. № 12. Отопительный простенок камеры коксования. Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Зборщик М.П., Сибилев А.И., Трубников Л.И., Дорофеев А.Х., Борт П.И., Котенко Н.С., Котова Е.Д.

24. А.С. N 1455716 СССР, МКИ С10В 7/00. Заявка N4255720. Заявл. 02.06.87; Не подл. опубликованию в открытой печати. Коксовая печь. Зборщик М.П., Веретельник С.П., Парфенюк А.С., Гребенюк А.Ф., Хромов Н.А.

25. А.С. N 1111483 СССР, МКИ С10В 7/00. Заявка N 3510450. Заявл. 05.11.82; Печь непрерывного коксования. Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Агеев В.Н., Комолов В.Г. Не подлежит опубликованию в открытой печати.

26. Патент № 52037 Украины. МПК6 С10В/16. Устройство уплотнения двери коксовой печи / Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Власов Г.А., Алексеева О.Е. Заявлено 18.01.02; решение о выдаче патента 16.12.02.

27. Патент № 54132 Украины. МПК6 С10В/16. Устройство уплотнения двери коксовой печи / Парфенюк А.С., Веретельник С.П., Власов Г.А., Алексеева О.Е. Заявлено 22.05.02; решение о выдаче патента 17.02.03.

*Рецензент: Татьяначенко О.Г.*

*Надійшла до редколегії: 23.04.2011р.*

**А.С. ПАРФЕНЮК** (д-р. техн. наук, проф.)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

**С.П. ВЕРЕТЕЛЬНИК** (канд. техн. наук, доц.)

**Д.В. ИЛЬЧЕНКО** (инженер)

### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ КОКСОВЫХ МАШИН И АГРЕГАТОВ**

Предложены некоторые решения для повышения надежности коксовых машин и агрегатов, которые обуславливают эффективность, безопасность работы и минимальное загрязнение окружающей среды.

**Коксовые машины, агрегаты, надёжность, производство кокса, долговечность**

**A.S. PARFENYUK**

Donetsk National Technical University

**S.P. VERETELNIK**

**D.V. ILCHENKO**

### **PERSPECTIVE TECHNICAL SOLUTIONS FOR INCREASE OF RELIABILITY AND EFFICIENCY OF COKE MACHINES AND AGGREGATES**

Some decisions for the increase of reliability of coke machines and aggregates, which cause the efficiency, safety of work and minimum contamination of environment, are offered.

**Coke machines, aggregates, coke production, reliability, longevity**

УДК 621.833

**В.А. СИДОРОВ** (канд. техн. наук, доц., sidorov\_va@ukr.net)

Донецкий национальный технический университет, г.Донецк, Украина

**ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Сформулирована последовательность решения задач диагностирования механических систем, определены категории технического состояния, разработаны факторы, определяющие работоспособное состояние механизма.

**Ключевые слова:** Задачи диагностирования, категории технического состояния, модели отказов, факторы работоспособного состояния

**Введение**

Техническое состояние механических систем промышленных предприятий обеспечивает качество выпускаемой продукции и определяет затраты на проводимые ремонты и операции по техническому обслуживанию. Это значительно влияет на эффективность и долговечность эксплуатации оборудования. В данном аспекте актуальным является определение задач диагностирования применительно к определению рациональных сроков и объемов ремонтных работ.

Вопросы диагностирования механических систем не имеют своего окончательного решения [1], часто являясь объектом изучения относительно широкого внедрения станков с ЧПУ [2]. Традиционно задачи диагностирования рассматриваются относительно классических работ по технической диагностике [3, 4], используя индивидуальные решения применительно к конкретным конструкторским решениям.

Целью работы является формулировка последовательности решения задач диагностирования механических систем, различение категорий технического состояния на основе матрицы факторов определяющих работоспособное состояние механизма.

**Основное содержание работы**

Главная задача технической диагностики – определение фактического состояния технической системы. Для этого используются диагностические параметры и решающие правила, ограничивающие категории технического состояния. Относительно механических систем для постановки диагноза следует учитывать:

- входные параметры или управляющие воздействия (задающие параметры: частота вращения, глубина резания, скорость подачи инструмента, размеры детали);
- внутренние параметры - характеристики состояния системы (шероховатость контактирующих деталей, значения зазоров, взаимное расположение деталей);
- выходные параметры технологического процесса (качество обработанной поверхности) и параметры физических полей – акустических, вибрационных, тепловых.

Обычно под методами диагностирования подразумевают, возможность контроля физических полей, являющихся косвенными параметрами состояния механического оборудования. Для механических систем, в частности металлургических машин, металлорежущих станков наиболее информативными являются параметры вибрации [5], что определяется аксиомами работоспособного состояния механизма [6].

Эффективное решение задач диагностирования требует выполнения определенной последовательности, включающей следующие основные этапы.

**1. Анализ условий эксплуатации и возможных отказов** позволяет оценить периодичность и характер возможных повреждений, определив используемый уровень решения диагностических задач и применяемые приборные решения.

Классификация систем технической диагностики проведена с учетом главных выполняемых функций в работе [7] и включает следующие основные поколения:

**Первое поколение** - обнаружение не соответствия нормальному режиму работы оборудования и технологического процесса во время эксплуатации является появлением косвенных признаков, которые определяются органами чувств человека. Этими признаками являются повышенная температура, стук, шум и вибрация механизмов и машин. В случае обнаружения этих явлений оборудование просто выключают, производят техническое обслуживание или ремонт и, при устранении отклонений снова включают. При таком способе технического диагностирования опыт накапливается очень медленно, десятилетиями и не всегда передается в полной мере другим поколениям.

**Второе поколение** – защитное управление за счет регистрирования и контролирования количественных изменений диагностируемых параметров оборудования и технологического процесса. Выполняется измерение контролируемого параметра, сравнение с заданным значением и при достижении этого значения проводится защитное отключение оборудования.

**Третье поколение** - управление по фактическим характеристикам контролируемых параметров оборудования и технологического процесса во времени. Результатом диагностирования является информация о состоянии объекта или детали (диагноз), на основании которой принимается решение о продолжении, регулировке или остановке процесса. Информация о техническом состоянии должна постоянно использоваться при управлении ходом технологического процесса. Периодический контроль позволяет получить единичную оценку, а процессы резания необходимо рассматривать в длительном временном промежутке, фиксируя стабилизацию или определяя тенденции в изменении контролируемых параметров.

Среди средств технического диагностирования, используемых для диагностирования механического оборудования, по уровню решаемых задач и приборной реализации можно выделить: портативные, анализаторы и встроенные системы контроля.

Портативные средства технического диагностирования реализуют процесс измерения одного или нескольких диагностических параметров, характеризуются малыми габаритами и отсутствием обмена данными с компьютерными системами. К их преимуществам относятся: быстрота процесса измерения, простое обслуживание и управление, оперативное и наглядное получение информации в виде одиночного результата, низкая стоимость. Область применения – оперативный контроль технического состояния оборудования работниками ремонтных служб.

Анализаторы вибрации позволяют провести распознавание неисправностей при использовании аппарата спектрального анализа и использовании компьютерных технологий и экспертных систем. Переносной прибор выступает в роли мобильного устройства для сбора и предварительного анализа данных, а компьютер и программное обеспечение позволяет проводить более глубокие исследования на основе анализа трендов и экспертных систем. Применение анализаторов оправдано при специализации процессов контроля, высокой квалификации специалистов, обеспечения качества проводимых измерений. Область применения – специализированные подразделения промышленных предприятий по экспертизе технического состояния.

Встроенные системы используются при необходимости постоянного контроля технического состояния оборудования. Высокая стоимость, один из недостатков встро-

енных систем, определяется не только стоимостью аппаратной части, но и затратами на поддержание системы в работоспособном состоянии. Это ограничивают объём использования встроенных систем.

**2. Анализ конструкции механизма и выбор контрольных точек** - для выбора контрольных точек установки датчиков необходимо определить сектора действия сил и запасы прочности по основным элементам – валам, зубчатым передачам, подшипникам. Направление установки датчиков требует проведения исследований по определению информативности различных направлений для условий конкретного механизма.

Традиционные рекомендации к выбору точек измерения вибрации предлагают устанавливать вибрационный датчик в зоне эмиссионного окна распространения вибрационного сигнала (рисунок 1) или проводить измерения в трех взаимно перпендикулярных направлениях. В производственных условиях эти рекомендации часто невыполнимы. Увеличение числа контрольных точек связано с увеличением и необходимостью обработки больших массивов данных, что может снизить точность диагноза. В самом общем виде диагноз должен содержать заключение о техническом состоянии, перечень возможных повреждений и конкретные рекомендации по их устранению.

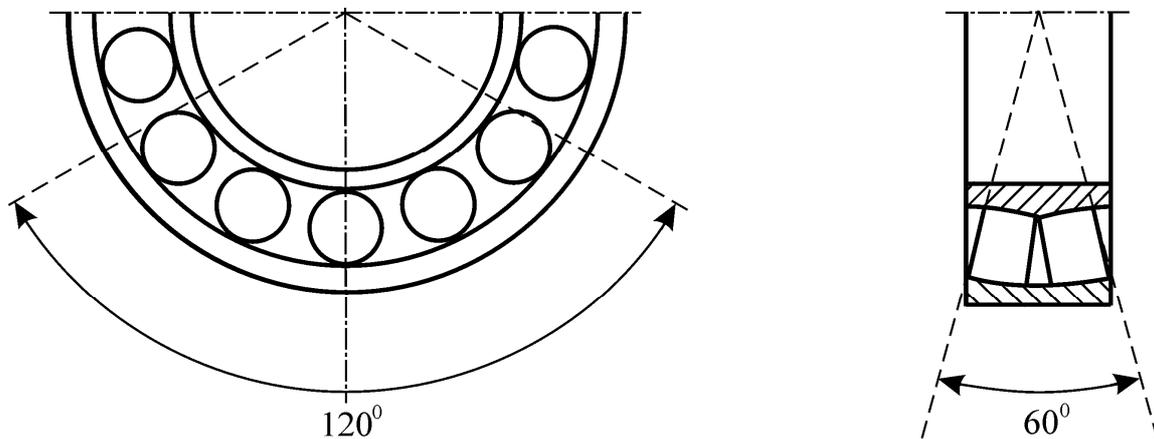


Рис. 1. Расположение эмиссионного окна распространения вибрационного сигнала

Неопределенность существующих рекомендаций подтвердилась при проведении исследований по информативности точек контроля подшипникового узла механизма. Данный узел испытывает местное нагружение, что определяет неизменность действующих сил. Измерения параметров вибрации проводились в радиальном направлении в шести точках, расположенных под углом  $60^\circ$  (рисунок 2). Использовался анализатор вибрации 795М и пьезоэлектрический датчик. Крепление датчика осуществлялось при помощи магнита. Выполнены измерения общих параметров и частотной формы вибрационного сигнала. Контролируемый частотный диапазон 2...400 Гц и 10...4000 Гц.

Анализ результатов измерений параметров общего уровня вибрации показывает стабильность значений виброперемещения и виброскорости в данных точках контроля. Для параметра виброускорение проведены измерения среднеквадратичного и пикового значений. Значения виброускорения по точкам измерения отличаются до 1,8 раз, при этом значение пик-фактора постоянно и составляет 3,4...3,7. Следует отметить, что параметр виброускорения наиболее применим для раннего диагностирования технического состояния. Спектрограммы виброускорения для контрольных точек измерения вибрации приведены на рисунке 3. Различие спектральной картины, наиболее значимое для рядом расположенных точек 3, 4, 5, объясняется случайными изменениями вибрацион-

ного сигнала или анизотропией упругих свойств подшипниковой опоры. Однако, значительные различия спектральной картины вибрационного сигнала позволяют предположить более сложный характер распространения механических колебаний в ограниченном объеме деталей подшипникового узла.

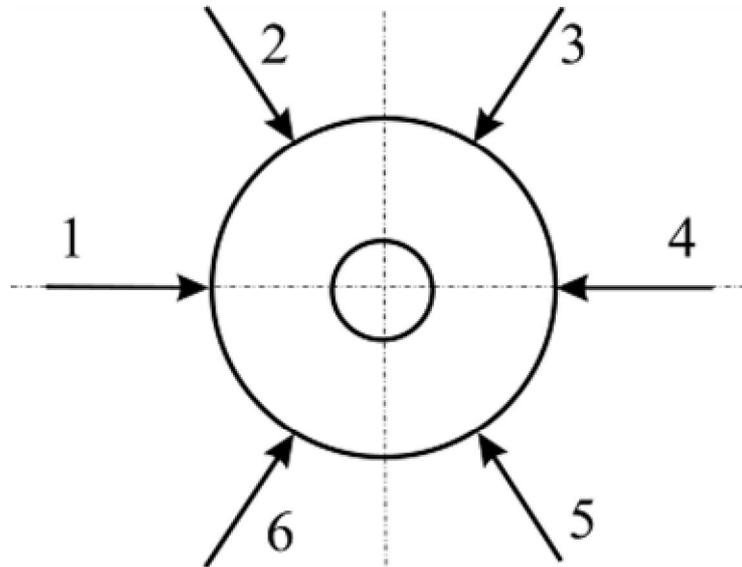


Рис. 2. Расположение точек измерения вибрации во время эксперимента

Проведенный эксперимент позволяет предположить более сложные закономерности при распространении механических колебаний в корпусных деталях редукторов привода. Следует учитывать не только амплитуду и частоту вибрационного сигнала, но и фазовые характеристики. Для выяснения закономерностей распространения вибрационного сигнала в корпусных деталях редукторов предполагается провести ряд исследований на действующем оборудовании и при использовании лабораторного стенда. Основные учитываемые факторы: амплитуда и преобладающая частота колебаний; фаза вибрационного сигнала; путь прохождения сигнала; количество разделов сред; характеристика изменения направления распространения; материал деталей; упругие и демпфирующие свойства. Полученные закономерности позволят определить правила выбора контрольных точек для редукторов: места и направления установки, достаточное количество для получения достоверных данных, возможность повышения точности диагноза о техническом состоянии.

Расчет информативных частот возможных повреждений позволяет минимизировать число контрольных точек для диагностирования элементов редуктора. Для чего следует выполнить контурную диаграмму вибраций и поиск расположения информативных точек контроля по внешним подшипникам.

**3. Выбор диагностических параметров** – должен обеспечивать контроль внешних воздействия и реакций системы: частота вращения и токовая нагрузка двигателя; параметры вибрации – виброскорость и виброускорение; параметры температуры. Параметры температуры, подлежащие контролю: температура в локальных контрольных точках; скорость изменения температуры в контрольных точках; изменение разности температуры на входе и выходе системы смазывания.

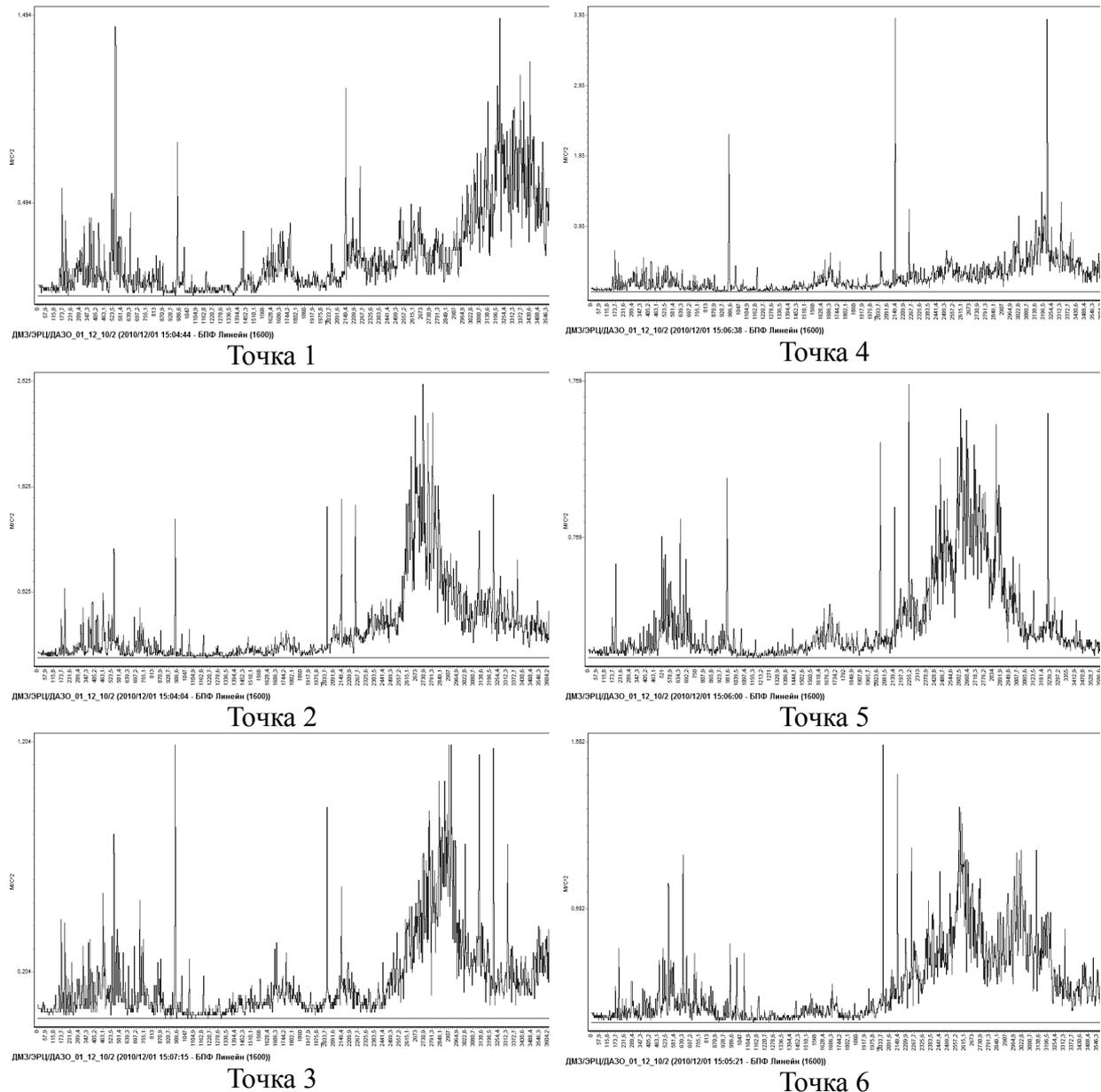


Рис. 3. Спектрограммы виброускорения для точек измерения вибрации

Параметры вибрации, подлежащие контролю: виброскорость, среднеквадратичное значение в частотном диапазоне  $2 \dots 500$  ( $10 \dots 1000$ ) Гц – для контроля энергии вибрации; виброускорение, пиковое и среднеквадратичные значения в частотном диапазоне  $10 \dots 5000$  Гц – для контроля развития повреждений; спектральная и временная форма вибрационных сигналов – для распознавания неисправностей. Частотные диапазоны должны быть согласованы с информативными частотами возможных повреждений.

#### 4. Анализ возможностей и задач системы диагностирования.

Основные задачи: контроль текущего состояния, диагностирование состояния, определение времени и объема ремонтных воздействий. Применительно к восстанавливаемым механическим системам знание технического состояния необходимо для принятия обоснованного решения о проведении операций по техническому обслуживанию и ремонту. Следовательно, информация о техническом состоянии должна определять степень необходимости восстановления работоспособности системы. Категории техни-

ческого состояния, в этом случае, будут иметь следующую интерпретацию. Хорошее состояние – ремонт и дополнительное техническое обслуживание не требуется. Удовлетворительное состояние – ремонт и техническое обслуживание выполняются по графику или проводится осмотр оборудования с меньшей периодичностью. Плохое состояние наступает при необходимости проведения работ по поддержанию или восстановлению показателей работоспособности путем выполнения внепланового ремонта или технического обслуживания. Аварийное состояние требует принятия незамедлительных мер - необходим срочный ремонт, возможен непредсказуемый переход в неработоспособное состояние. В целом аварийное состояние следует рассматривать как невозможность управления процессами износа в механизме.

Можно предложить следующее прочтение термина «техническое состояние». Техническое состояние – результат взаимодействия внешних нагрузок и внутренних свойств механизма, проявляющийся в изменении выходных параметров и определяющий необходимость проведения работ по поддержанию или восстановлению работоспособного состояния изделия.

Практически, для воздействия на работоспособность механизма могут быть использованы следующие виды ремонтных воздействий: затяжка резьбовых соединений; смазывание узлов и деталей; регулировка и настройка механизма; замена быстроизнашиваемых деталей; восстановление или замена корпусных деталей. Правильный выбор вида ремонтного воздействия и своевременность проведения обеспечивают не только надежность оборудования, но и влияют на экономические показатели работы ремонтной службы и предприятия в целом.

Затраты на выполнение ремонтных воздействий имеют примерно равные значения для регулировки механизма, затяжки, смазки; увеличиваются при замене быстроизнашиваемых деталей; значительно возрастают при восстановлении или замене корпусных деталей. Износ посадочных мест приводит к снижению эффективности ремонтных воздействий. Ликвидация последствий изнашивания одновременно с заменой изношенных деталей, имеют наиболее реальную возможность продлить срок эксплуатации оборудования. При этом наблюдается следующая закономерность: чем раньше обнаружено повреждение, тем меньше средств требуется для ликвидации.

Каждому из этапов износа соответствуют рациональные виды ремонтных воздействий с позиции их влияния на техническое состояние. Трудность в практическом применении этого заключения состоит в том, что индивидуальность характеристик элементов приводит к тому, что одновременно установленные детали находятся на различных стадиях жизненного цикла.

Обоснование необходимости применения определенного ремонтного воздействия определяется несколькими решающими правилами, используя взаимодополняющие диагностические параметры. Требуется предусмотреть подготовку специалистов использующих полученную информацию и специалистов по обслуживанию системы.

##### **5. Определение алгоритма диагностирования и решающих правил.**

Решающие правила могут быть определены исходя из соотношения рабочих - холостой ход, стационарность сигнала, размаха колебаний. Дополнительно, необходимо анализировать абсолютные значения, изменение спектральной картины и временного сигнала. Основанием для разработки алгоритма диагностирования и решающих правил является использование моделей отказов элементов механического оборудования [8].

##### **Первая модель отказа – мгновенные повреждения.**

Внешняя нагрузка, превышающая допустимые значения, может служить причиной отказа механизма безотносительно к существующему техническому состоянию

объекта. Основные методы предупреждения связаны с ограничением действующих сил: токовая или механическая защита. Наиболее часто используется установка «слабого звена» - разрушающегося элемента.

### Вторая модель отказа – постепенное накопление повреждений.

Общепринятая модель отказа – постепенное накопление повреждений, согласно типовой кривой износа (рисунок 4) для механического оборудования имеет ограниченное применение. Типовая кривая износа характерна для длительного режима работы контактирующих элементов. Весьма эффективно воздействует на работоспособное состояние технического обслуживание и ремонт. Кроме того взаимодействие элементов приводит к скачкообразному изменению состояния подобного приведенному на рисунке 5. Возможно улучшение технического состояния после ремонта, это позволяет продлить срок службы механизма. Модель линейного накопления повреждений при переменном нагружении не работает.

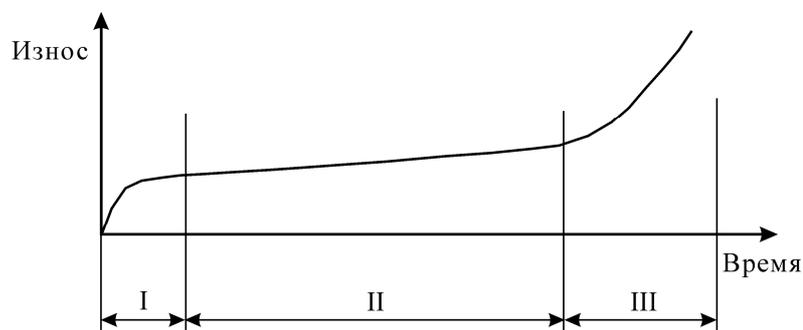


Рис. 4. Типовая кривая износа

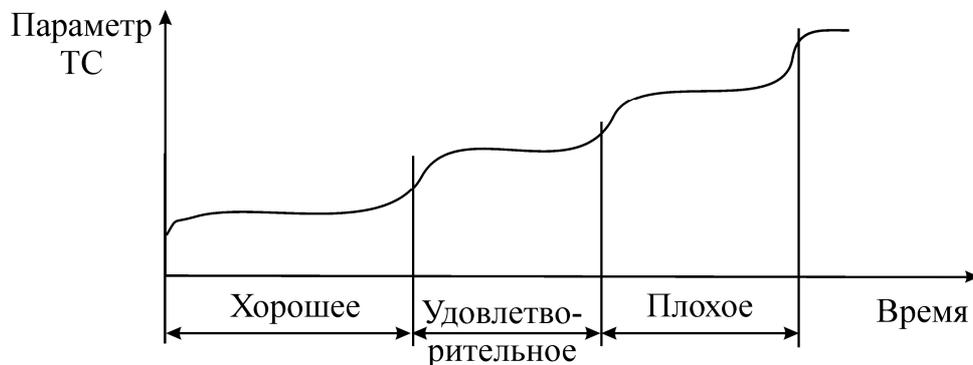


Рис. 5. Предлагаемый характер изменения технического состояния

Любая из известных категорий технического состояния должна приводить к стабилизации выходных параметров, так как механизм имеет нестабильное состояние лишь во время быстропротекающих переходных процессов. Это предположение обосновано тем, что категории технического состояния определяются физическими процессами, происходящими в механизме. Данные процессы, приводя к большей интенсивности износа сокращают длительность стабильной работы при ухудшении состояния.

### Третья модель отказов – взаимное влияние элементов.

Исходя из основных положений теории катастроф, процесс отказа следует представить в следующей последовательности - малые отклонения, происходящие в механизме, приводят к увеличению скорости износа отдельных элементов. При достижении определенных значений износа, инициирующее событие (часто не связанное с процессами износа) приводит к отказу – разрушению детали (см. рисунок 6). Существующие

методы повышения безотказности и проводимые ремонта в основном ориентируются на уменьшение скорости износа отдельных элементов. Фактически происходит ликвидация последствий, а не причины явления.

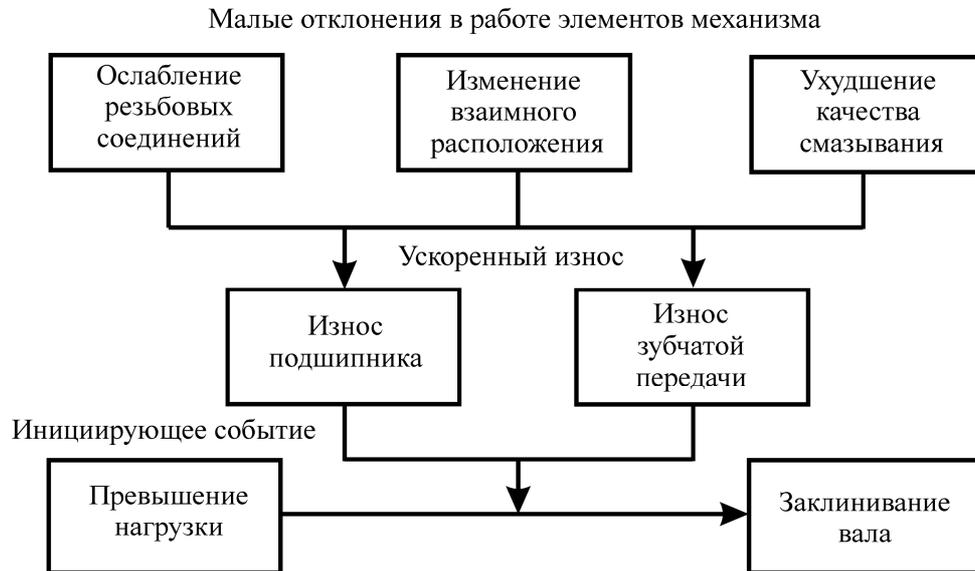


Рис. 6. Процесс развития отказа

Влияние внутренних параметров предполагается рассмотреть исходя из факторов работоспособности и уровней отклонения для соответствующих категорий технического состояния. Факторы, обеспечивающие работоспособность элементов и механизма в целом: состояние неподвижных соединений; состояние узлов трения; взаимное расположение деталей; равномерное распределение сил; накопление усталостных повреждений. Каждый из факторов имеет четыре уровня: исправного состояния, малых отклонений, проведения ремонтных воздействий и предотказный. Уровни факторов определены по изменениям физических процессов износа или взаимодействия элементов. Соответствующие уровни факторов работоспособности элементов определяют техническое состояние механизма: хорошее, удовлетворительное, плохое и аварийное.

Основные предпосылки при определении уровней факторов определены изменением физики процесса износа, например, характера взаимодействия контактирующих либо сопрягаемых деталей.

**Состояние неподвижных соединений** можно оценить как удовлетворяющее проектным требованиям, в том случае, если сопрягаемые детали неподвижны при приложении нагрузки. Если данное требование не выполняется, это приводит к появлению малых перемещений сопрягаемых деталей - фреттинг-коррозии, что создает условия для развития повреждений сопрягаемых деталей.

Увеличение диаметральных размеров посадочных мест, например в случае подшипников качения приводит к проворачиванию колец подшипников в корпусе и на валу. Это увеличивает скорость развития процессов износа, создавая предпосылки для возникновения ударов. При неподвижном соединении элементы нагружаются одновременно, что соответствует параллельному соединению жесткостей. Появление зазора в неподвижном соединении приводит к последовательному нагружению элементов. Жесткость узла изменяется, приводя к раскрытию стыка и возникновению динамических ударов - к изменению характера приложения нагрузки.

Практически мгновенно, при раскрытии стыка, жесткость соединения уменьшается. Возникают динамические явления (удары) в узлах механизма, увеличивающих напряжения в деталях. Увеличиваются контактные напряжения, происходит наклеп и разрушение материалов сопрягаемых деталей.

**Состояние узлов трения** соответствует проектным условиям в случае обеспечения минимального коэффициента трения. Взаимодействие на поверхностях трения при их относительном движении, имеет достаточно сложный характер и рассматривается трибологией охватывающей весь комплекс вопросов трения, изнашивания и смазки машин. Предлагается гипотеза о том, что переход от одного уровня технического состояния к другому должен осуществляться ступенчато. Так коэффициент трения в подшипнике качения при жидкостном трении – 0,003; при граничном трении – 0,01; при сухом трении – 0,1. Это сопровождается изменением выходных параметров – в первую очередь виброускорения.

Для исправного состояния характерен окислительный износ и полное разделение контактирующих поверхностей слоем смазочного материала. Возникновение граничного контакта приводит к преобладанию абразивного износа, увеличению зазоров. Проведение ремонтных воздействий целесообразно при начальном уровне осповидного выкрашивания. Предотказные явления узлов трения обычно предваряются заеданиями, схватыванием материалов контактирующих деталей.

**Равномерность распределения сил** между элементами механизма предполагает рассмотрение степени уравновешенности роторов, различия в распределении сил между однотипными элементами (стопорящими деталями, пальцами, болтами и т.д.) или дорожками качения в многорядных подшипниках качения.

Исправное состояние, в данном случае, характеризуется одинаковыми значениями силовых параметров в элементах механизма. Увеличение нагрузки на подшипниковые опоры из-за неравномерности приложения нагрузки более чем на 30% следует рассматривать как уровень малых отклонений. Срок службы подшипников качения в этом случае снижается в 2,5 раза.

Уровень проведения ремонтных воздействий ограничивается увеличением нагрузки на подшипниковые опоры более чем на 65%. Двукратное увеличение является признаком предотказного состояния.

**Взаимное расположение деталей** соответствующее требованиям нормативно-технической документации принимается как уровень исправного состояния. Наиболее характерный пример – контроль пятна контакта зубчатой передачи. Изменение положения пятна контакта (смещение от делительной окружности, перекос) - ограничивает уровень малых отклонений. Уменьшение площади пятна контакта более, чем на 30% требует проведения ремонтных воздействий. предотказный уровень – снижение размеров пятна контакта до 10...20% нормативного значения.

**Накопление усталостных повреждений** включает следующие уровни факторов: отсутствие усталостных трещин; зарождение усталостных трещин; развитие и ускоренное развитие усталостных трещин. Этот фактор является труднореализуемым, но необходимым диагностическим параметром в процессе эксплуатации. С позиций виброметрии проводится контроль изменения частот собственных колебаний детали, изменение формы тестовых низкочастотных сигналов при прохождении через поврежденные участки. Ступенчатая форма развития некоторых усталостных трещин в валах механизмов указывает, что источником развития трещин является энергия резонансных механических колебаний. Следовательно, развитие трещины можно замедлить, изме-

нив характер механических колебаний, тем самым влияя на техническое состояние механизма.

На основании предложенной классификации появляется возможность формировать матрицу технических состояний конкретного механизма, имея ограниченное пространство конечных подмножеств состояний и учитывая взаимодействие элементов. Рассмотренные факторы работоспособного состояния механизма требуют изменения традиционных подходов к диагностированию методами виброметрии, определяя приоритетные направления контроля.

### Выводы

1. Рассмотренная последовательность решения диагностических задач относительно механических систем позволяет разрабатывать конкретные реализации систем диагностирования на единой методологической основе.

2. Предложенная матрица технических состояний позволяет изучать изменение фактического состояния и определять информативные диагностические параметры, определяя приоритетные направления контроля отдельных узлов и процессов.

3. Направление дальнейших исследований может быть связано с определением закономерностей взаимного влияния узлов и деталей на общий уровень работоспособности эксплуатируемого механизма.

### Список литературы

1. Металлорежущие станки: Учебник для машиностроительных вузов / Под ред. В.Э.Пуша. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
2. Обработка деталей на станках с ЧПУ : учеб. пособие / Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. — 3-е изд., доп. — Минск : Новое знание, 2007. — 299 с.
3. Биргер И.А. Техническая диагностика. - М.: Машиностроения, 1978. - 240 с.
4. Пархоменко П.П., Сагомоян Е.С. Основы технической диагностики. - М.: Энергия, 1984. - 320 с.
5. Подураев В.Н., Барзов А.А., Горелов В.А. Техническая диагностика резания методом виброакустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
6. Сидоров В.А. Аксиомы работоспособного состояния металлургического оборудования / Проблемы механики горно-металлургического комплекса: Тезисы докладов международной научно-технической конференции, 25 – 28 мая 2004 год. – Днепропетровск, НГУ, 2004. с. 103 – 104.
7. Ницета В.В. Классификация систем технической диагностики // Научно-технический и производственный журнал «Вибрация машин: измерение, снижение, защита», № 1 (10) март 2010. - С. 11 – 17.
8. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. Под ред. Б.В.Гнеденко, М.: «Советское радио», 1966. – 166 с.

*Рецензент: Неченаев В.Г..*

*Надійшла до редколегії: 12.04.2011р.*

### В.А. СИДОРОВ

Донецький національний технічний університет

### ПОСЛІДОВНІСТЬ РІШЕННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Сформульована послідовність рішення задач діагностування механічної частини металорізальних верстатів, визначені категорії технічного стану, розроблені фактори що визначають працездатний стан механізму.

**Задачі діагностування, категорії технічного стану, моделі відмов,  
фактори працездатного стану**

**V.A. SIDOROV**

Donetsk National Technical University

**SEQUENCE OF THE DECISION OF PROBLEM OF DIAGNOSING  
OF MECHANICAL SYSTEMS**

The sequence of the decision of problems of diagnosing of mechanical systems is formulated, categories of technical state are determined, the factors determining an efficient state of mechanism are developed.

**Problems of diagnosing, technical state categories, model of refusals,  
factors of an efficient state**

УДК 621.951

**А.Г. ТАТЬЯНЧЕНКО** (докт. техн. наук, проф., [sopromat@donntu.edu.ua](mailto:sopromat@donntu.edu.ua))

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

**Т.М. БРИЖАН** (инж., [tmbrizhan@ukr.net](mailto:tmbrizhan@ukr.net))

Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь, Украина

## УРАВНЕНИЕ ИЗОГНУТОЙ ОСИ ПРИ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ СЖАТО-ЗАКРУЧЕННОГО СТЕРЖНЯ

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние осевого инструмента как одноосного элемента, испытывающего одновременно изгиб, сжатие и кручение. Получено универсальное уравнение изогнутой оси такого элемента в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в форме начальных параметров с использованием тригонометрических функций влияния.

**Ключевые слова:** Осевой инструмент, продольно-поперечный изгиб сжато-закрученного стержня, поперечные смещения, точность обработки, начальные параметры, функции влияния

### Введение

Одноосные элементы, испытывающие одновременно изгиб, сжатие и кручение, находят широкое применение в технике. Примером могут служить борштанги, длинные гибкие валы, осевой режущий инструмент и другие. Основной проблемой эксплуатации таких элементов считается потеря устойчивости. Известно, что наличие скручивающих моментов уменьшает критическое значение продольных усилий [1]. Однако, большая часть исследований сжато-закрученных стержней посвящена решению проблемы их устойчивости без учета крутящих моментов [2]. В этом случае решение задачи осуществляется на основе универсального уравнения изогнутой оси балки при продольно-поперечном изгибе в форме начальных параметров [3]:

$$y(x) = y_0 + \frac{\Theta_0}{s} \sin sx + \frac{M_z}{N} (1 - \cos sx) + \frac{P_y}{sN} (sx - \sin sx), \quad (1)$$

где  $y_0$ ,  $\Theta_0$ ,  $M_0$ ,  $P_0$  – начальные параметры, соответственно прогиб, угол поворота, изгибающий момент и поперечная сила в начале координат.

Влияние крутящего момента особенно важно учитывать для осевого лезвийного инструмента, режущие зубья которого испытывают значительные тангенциальные усилия в процессе резания. При этом крутящий момент может оказывать влияние не только на устойчивость инструмента, но и на его поперечные смещения, что приводит к снижению точности обработки отверстия.

Наиболее удобно определять поперечные смещения одноосных элементов можно при помощи уравнений изогнутой оси в универсальной форме начальных параметров аналогично (1). Сложность создания такого уравнения для изогнутого сжато-закрученного элемента заключается в том, что поперечные смещения в этом случае будут происходить одновременно в двух главных центральных плоскостях.

Поэтому развитие теории напряженно-деформированного состояния одноосных элементов, испытывающих изгиб, сжатие и кручение является сложной и актуальной научной задачей, решение которой позволит более точно прогнозировать поперечные смещения осевого инструмента в процессе обработки и повысить точность отверстия.

В данной работе решается задача вывода универсального уравнения изогнутой оси одноосного элемента в условиях нагружения, соответствующих условиям работы осевого инструмента для чистовой обработки отверстий.

### Основное содержание статьи

Осевой лезвийный инструмент, предназначенный для чистовой обработки отверстий (зенкеры, развертки) имеет три и более режущих зуба. Поэтому все центральные оси в поперечном сечении таких инструментов являются главными. Это позволяет рассматривать математическую модель такого инструмента как одноосного элемента с равными главными изгибными жесткостями  $EJ_y = EJ_z$  в постоянном по длине поперечном сечении.

Внешнее силовое воздействие на осевой многолезвийный инструмент является результатом комплексного воздействия тангенциальной, осевой и радиальной силы резания на каждый зуб инструмента. Не касаясь нагружения отдельных зубьев, будем рассматривать только результирующее воздействие на инструмент в виде полного комплекса внешних изгибных (поперечная сила и изгибающий момент), закручивающих (крутящий момент) и сжимающих (продольная сила) нагрузок.

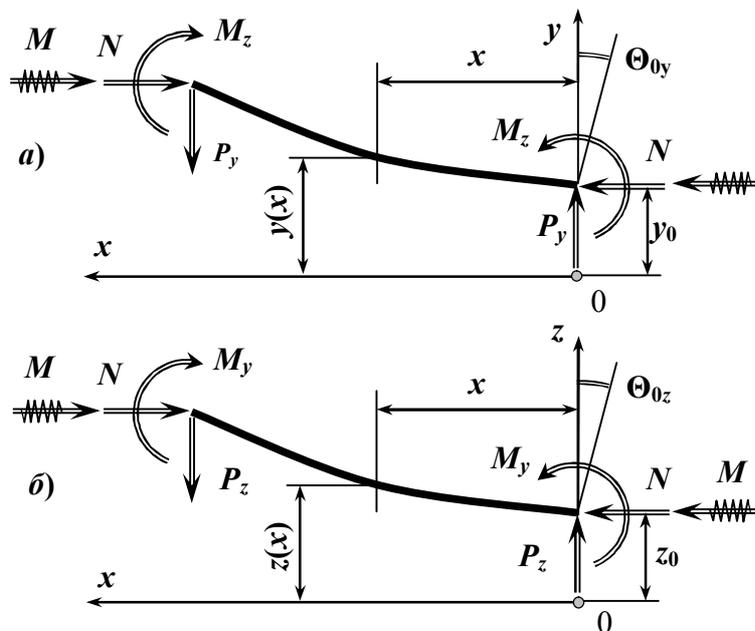


Рис.1. Расчетная схема изогнутого сжато-закрученного стержня :  
а) плоскость  $xoy$ , б) плоскость  $xoz$

Предположим, что в результате комплексного внешнего воздействия осевой инструмент, представляющий собой прямолинейный стержень, нагружен по торцам крутящими моментами  $M$  и продольными сжимающими усилиями  $N$ . В двух взаимно перпендикулярных плоскостях стержень изгибается поперечными силами  $P_y$  и  $P_z$  и изгибающими моментами  $M_z$  и  $M_y$  (рис.1).

После приложения внешней нагрузки, прямолинейный до нагружения стержень деформируется, его торцы смещаются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и поворачиваются на некоторый угол (рис.1). Приняв начало координат на правом торце,

из условия равновесия правой части в сечении с координатой  $x$  можно получить дифференциальные уравнения изогнутой оси стержня в двух взаимно перпендикулярных плоскостях

$$M_z(x) = EJ_z \frac{d^2 y(x)}{dx^2} = -M \cdot \frac{dz(x)}{dx} + N \cdot (y_0 - y(x)) + M_z + P_y x,$$

$$M_y(x) = EJ_y \frac{d^2 z(x)}{dx^2} = M \cdot \frac{dy(x)}{dx} + N \cdot (z_0 - z(x)) + M_y + P_z x,$$

где  $M_z(x)$  и  $M_y(x)$  – изгибающие моменты в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в сечении с координатой  $x$ .

Учитывая, что  $EJ_y = EJ_z = EJ$ , получаем:

$$\frac{d^2 y(x)}{dx^2} + \frac{M}{EJ} \cdot \frac{dz(x)}{dx} + \frac{N}{EJ} y(x) = \frac{N}{EJ} y_0 + \frac{M_z}{EJ} + \frac{P_y x}{EJ}, \quad (1)$$

$$\frac{d^2 z(x)}{dx^2} - \frac{M}{EJ} \cdot \frac{dy(x)}{dx} + \frac{N}{EJ} z(x) = \frac{N}{EJ} z_0 + \frac{M_y}{EJ} + \frac{P_z x}{EJ}, \quad (2)$$

Вводя обозначения  $y(x) = y$ ,  $z(x) = z$  и коэффициенты

$$k = \frac{M}{EJ}, \quad (3)$$

$$s^2 = \frac{N}{EJ}, \quad (4)$$

уравнения (1) и (2) представим в виде системы неоднородных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} y'' + k \cdot z' + s^2 y = \frac{N}{EJ} y_0 + \frac{M_z}{EJ} + \frac{P_y x}{EJ}, \\ z'' - k \cdot y' + s^2 z = \frac{N}{EJ} z_0 + \frac{M_y}{EJ} + \frac{P_z x}{EJ}. \end{cases} \quad (5)$$

Ее решение ищем в виде:

$$y = \bar{y} + y^*, \quad z = \bar{z} + z^*, \quad (6)$$

где  $\bar{y}$  и  $\bar{z}$  – общие решения системы однородных уравнений

$$\begin{cases} y'' + k \cdot z' + s^2 y = 0, \\ z'' - k \cdot y' + s^2 z = 0, \end{cases} \quad (7)$$

$y^*$  и  $z^*$  – частные решения системы уравнений (5).

Общее решение  $\bar{y}(x)$  и  $\bar{z}(x)$  ищем в виде

$$\bar{y}(x) = C_1 e^{\lambda x}, \quad \bar{z}(x) = C_2 e^{\lambda x}. \quad (8)$$

С учетом (8) характеристическое уравнение системы уравнений (7) имеет вид:

$$\lambda^4 + (2s^2 + k^2)\lambda^2 + s^4 = 0. \quad (9)$$

Корнями уравнения (9) будут  $\lambda_i = n_i \sqrt{-1}$ , где:

$$n_{1,4} = \mp \frac{k}{2} \pm \sqrt{\frac{k^2}{4} + s^2} = \pm n, \quad n_{2,3} = \mp \frac{k}{2} \mp \sqrt{\frac{k^2}{4} + s^2} = \pm m.$$

Тогда, уравнения (8) принимают вид:

$$\bar{y}(x) = C_{11}e^{\lambda_1 x} + C_{12}e^{\lambda_2 x} + C_{13}e^{\lambda_3 x} + C_{14}e^{\lambda_4 x},$$

$$\bar{z}(x) = C_{21}e^{\lambda_1 x} + C_{22}e^{\lambda_2 x} + C_{23}e^{\lambda_3 x} + C_{24}e^{\lambda_4 x},$$

или, с учетом разложения  $e^{\pm inx} = \cos nx \pm i \sin nx$  и  $e^{\pm imx} = \cos mx \pm i \sin mx$ :

$$\bar{y}(x) = A \cdot \sin mx + B \cdot \cos mx + C \cdot \sin nx + D \cdot \cos nx, \quad (10)$$

$$\bar{z}(x) = -A \cdot \cos mx + B \cdot \sin mx - C \cdot \cos nx + D \cdot \sin nx. \quad (11)$$

Частное решение  $y^*$  и  $z^*$  ищем в форме правой части уравнений (5):

$$y^* = a + b \cdot x, \quad z^* = c + d \cdot x. \quad (12)$$

С учетом выражений (12) и их производных система уравнений (5) имеет вид:

$$\begin{cases} k \cdot d + s^2 a + s^2 b \cdot x = \frac{M_z + P_y x}{EJ} + \frac{N \cdot y_0}{EJ}, \\ -k \cdot b + s^2 c + s^2 d \cdot x = \frac{M_y + P_z x}{EJ} + \frac{N \cdot z_0}{EJ}, \end{cases}$$

откуда, используя метод неопределенных коэффициентов, находим

$$a = y_0 + \frac{M_z}{N} - \frac{M \cdot P_z}{N^2}, \quad b = \frac{P_y}{N}, \quad c = z_0 + \frac{M_y}{N} + \frac{M \cdot P_y}{N^2}, \quad d = \frac{P_z}{N}. \quad (13)$$

С учетом (13), частное решение (12) получаем в виде

$$y^* = y_0 + \frac{M_z}{N} - \frac{M \cdot P_z}{N^2} + \frac{P_y}{N} \cdot x,$$

$$z^* = z_0 + \frac{M_y}{N} + \frac{M \cdot P_y}{N^2} + \frac{P_z}{N} \cdot x.$$

Таким образом, решение системы уравнений (5) в форме (6) имеет вид:

$$y(x) = A \cdot \sin mx + B \cdot \cos mx + C \cdot \sin nx + D \cdot \cos nx + y_0 + \frac{M_z}{N} - \frac{P_z M}{N^2} + \frac{P_y}{N} \cdot x, \quad (14)$$

$$z(x) = -A \cdot \cos mx + B \cdot \sin mx - C \cdot \cos nx + D \cdot \sin nx + z_0 + \frac{M_y}{N} + \frac{P_y M}{N^2} + \frac{P_z}{N} \cdot x. \quad (15)$$

Постоянные  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  определяются из граничных условий  $y(0) = y_0$ ,  $z(0) = z_0$ ,  $\Theta_y(0) = \Theta_{0y}$ ,  $\Theta_z(0) = \Theta_{0z}$ :

$$A = -\frac{1}{(n-m)} \left( \Theta_{0y} - n \cdot \frac{M_y}{N} - n \cdot \frac{P_y M}{N^2} - \frac{P_y}{N} \right), \quad B = -\frac{1}{(n-m)} \left( \Theta_{0z} + n \cdot \frac{M_z}{N} - n \cdot \frac{P_z M}{N^2} - \frac{P_z}{N} \right),$$

$$C = \frac{1}{(n-m)} \left( \Theta_{0y} - m \cdot \frac{M_y}{N} - m \cdot \frac{P_y M}{N^2} - \frac{P_y}{N} \right), \quad D = \frac{1}{(n-m)} \left( \Theta_{0z} + m \cdot \frac{M_z}{N} - m \cdot \frac{P_z M}{N^2} - \frac{P_z}{N} \right).$$

Подставляя  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  в (14) и (15), получим уравнения поперечных смещений сжато-закрученного стержня и их производные (уравнения углов поворота, изгибающих моментов и поперечных сил) в двух главных центральных плоскостях при продольно-поперечном изгибе в форме начальных параметров:

$$y(x) = y_0 + \frac{\Theta_{0y}}{s} \varepsilon_2 + \frac{\Theta_{0z}}{s} \mu_2 + \frac{M_z}{N} \varepsilon_1 - \frac{M_y}{N} \mu_1 + \frac{P_y}{sN} \left( sx - \varepsilon_2 + \frac{Ms}{N} \mu_1 \right) - \frac{P_z}{sN} \left( \mu_2 + \frac{Ms}{N} \varepsilon_1 \right), \quad (16)$$

$$z(x) = z_0 + \frac{\Theta_{0z}}{s} \varepsilon_2 - \frac{\Theta_{0y}}{s} \mu_2 + \frac{M_y}{N} \varepsilon_1 + \frac{M_z}{N} \mu_1 + \frac{P_z}{sN} \left( sx - \varepsilon_2 + \frac{Ms}{N} \mu_1 \right) + \frac{P_y}{sN} \left( \mu_2 + \frac{Ms}{N} \varepsilon_1 \right), \quad (17)$$

$$\Theta_y(x) = \frac{dy(x)}{dx} = \Theta_{0y} \varepsilon_3 + \Theta_{0z} \mu_3 + \frac{sM_z}{N} \varepsilon_2 - \frac{sM_y}{N} \mu_2 + \frac{P_y}{N} \left( 1 - \varepsilon_3 + \frac{Ms}{n} \mu_2 \right) - \frac{P_z}{N} \left( \mu_3 + \frac{Ms}{n} \varepsilon_2 \right), \quad (18)$$

$$\Theta_z(x) = \frac{dz(x)}{dx} = \Theta_{0z} \varepsilon_3 - \Theta_{0y} \mu_3 + \frac{sM_y}{N} \varepsilon_2 + \frac{sM_z}{N} \mu_2 + \frac{P_z}{N} \left( 1 - \varepsilon_3 + \frac{Ms}{n} \mu_2 \right) + \frac{P_y}{N} \left( \mu_3 + \frac{Ms}{n} \varepsilon_2 \right), \quad (19)$$

$$M_z(x) = EJ \frac{d^2 y(x)}{dx^2} = sEJ \Theta_{0y} \varepsilon_4 + sEJ \Theta_{0z} \mu_4 + M_z \varepsilon_3 - M_y \mu_3 + \frac{P_y}{s} \left( -\varepsilon_4 + \frac{Ms}{n} \mu_3 \right) - \frac{P_z}{s} \left( \mu_4 + \frac{Ms}{n} \varepsilon_3 \right), \quad (20)$$

$$M_y(x) = EJ \frac{d^2 z(x)}{dx^2} = sEJ \Theta_{0z} \varepsilon_4 - sEJ \Theta_{0y} \mu_4 + M_y \varepsilon_3 + M_z \mu_3 + \frac{P_z}{s} \left( -\varepsilon_4 + \frac{Ms}{n} \mu_3 \right) + \frac{P_y}{s} \left( \mu_4 + \frac{Ms}{n} \varepsilon_3 \right), \quad (21)$$

$$Q_y(x) = EJ \frac{d^3 y(x)}{dx^3} = s^2 EJ \Theta_{0y} \varepsilon_5 + s^2 EJ \Theta_{0z} \mu_5 + sM_y \varepsilon_4 - sM_z \mu_4 + P_y \left( -\varepsilon_5 + \frac{Ms}{n} \mu_4 \right) - P_z \left( \mu_5 + \frac{Ms}{n} \varepsilon_4 \right), \quad (22)$$

$$Q_z(x) = EJ \frac{d^3 z(x)}{dx^3} = s^2 EJ \Theta_{0z} \varepsilon_5 + s^2 EJ \Theta_{0y} \mu_5 + sM_z \varepsilon_4 - sM_y \mu_4 + \\ + P_z \left( -\varepsilon_5 + \frac{Ms}{n} \mu_4 \right) - P_y \left( \mu_5 + \frac{Ms}{n} \varepsilon_4 \right), \quad (23)$$

где  $\varepsilon_i(x)$  и  $\mu_i(x)$  – функции влияния:

$$\varepsilon_1(x) = 1 + \frac{m \cos nx - n \cos mx}{n - m}, \quad \varepsilon_2(x) = s \frac{\sin nx - \sin mx}{n - m}, \quad \varepsilon_3(x) = \frac{n \cos nx - m \cos mx}{n - m}, \\ \varepsilon_4(x) = \frac{n^2 \sin nx - m^2 \sin mx}{s(n - m)}, \quad \varepsilon_5(x) = -\frac{n^3 \cos nx - m^3 \cos mx}{s^2(n - m)}, \quad (24)$$

$$\mu_1(x) = -\frac{m \sin nx - n \sin mx}{n - m}, \quad \mu_2(x) = s \frac{\cos nx - \cos mx}{n - m}, \quad \mu_3(x) = -\frac{n \sin nx - m \sin mx}{n - m}, \\ \mu_4(x) = \frac{n^2 \cos nx - m^2 \cos mx}{s(n - m)}, \quad \mu_5(x) = \frac{n^3 \sin nx - m^3 \sin mx}{s^2(n - m)}. \quad (25)$$

Уравнения (16)-(23) можно представить в виде компактном табличном виде (табл.1).

Таблица 1. Соотношения между расчетными и начальными параметрами

Уравнение	Множитель	Коэффициенты перед начальными параметрами							
		$y_0$	$z_0$	$\frac{\Theta_{0y}}{s}$	$\frac{\Theta_{0z}}{s}$	$\frac{M_z}{N}$	$\frac{M_y}{N}$	$\frac{P_y}{sN}$	$\frac{P_z}{sN}$
$y(x)$	1	1	0	$\varepsilon_2$	$\mu_2$	$\varepsilon_1$	$-\mu_1$	$sx - \varepsilon_2 + \frac{Ns}{N} \mu_1$	$-\left( \mu_2 + \frac{Ns}{N} \varepsilon_1 \right)$
$z(x)$	1	0	1	$-\mu_2$	$\varepsilon_2$	$\mu_1$	$\varepsilon_1$	$\mu_2 + \frac{Ns}{N} \varepsilon_1$	$sx - \varepsilon_2 + \frac{Ns}{N} \mu_1$
$\Theta_y(x)$	$s$	0	0	$\varepsilon_3$	$\mu_3$	$\varepsilon_2$	$-\mu_2$	$1 - \varepsilon_3 + \frac{Ns}{N} \mu_2$	$-\left( \mu_3 + \frac{Ns}{N} \varepsilon_2 \right)$
$\Theta_z(x)$	$s$	0	0	$-\mu_3$	$\varepsilon_3$	$\mu_2$	$\varepsilon_2$	$\mu_3 + \frac{Ns}{N} \varepsilon_2$	$1 - \varepsilon_3 + \frac{Ns}{N} \mu_2$
$M_z(x)$	$N$	0	0	$\varepsilon_4$	$\mu_4$	$\varepsilon_3$	$-\mu_3$	$-\varepsilon_4 + \frac{Ns}{N} \mu_3$	$\mu_4 + \frac{Ns}{N} \varepsilon_3$
$M_y(x)$	$N$	0	0	$-\mu_4$	$\varepsilon_4$	$\mu_3$	$\varepsilon_3$	$\mu_4 + \frac{Ns}{N} \varepsilon_3$	$-\varepsilon_4 + \frac{Ns}{N} \mu_3$
$Q_y(x)$	$sN$	0	0	$\varepsilon_5$	$\mu_5$	$\varepsilon_4$	$-\mu_4$	$-\varepsilon_5 + \frac{Ns}{N} \mu_4$	$\mu_5 + \frac{Ns}{N} \varepsilon_4$
$Q_z(x)$	$sN$	0	0	$-\mu_5$	$\varepsilon_5$	$\mu_4$	$\varepsilon_4$	$\mu_5 + \frac{Ns}{N} \varepsilon_4$	$-\varepsilon_5 + \frac{Ns}{N} \mu_4$

Функции влияния (24) и (25) являются более общим случаем тригонометрических соотношений в выражении (1). В этом легко убедиться, положив  $M = 0$ . Тогда согласно (3)  $k = 0$ , а  $n = -m = s$  и функции влияния (24) и (25) приводятся к виду (1).

Функции (24) и (25) связаны между собой соотношениями кругового дифференцирования  $\frac{d\varepsilon_i(x)}{dx} = s\varepsilon_{i+1}(x)$  и  $\frac{d\mu_i(x)}{dx} = s\mu_{i+1}(x)$ . Так:

$$\frac{1}{s} \frac{d\varepsilon_1(x)}{dx} = \frac{1}{s} \left( -mn \frac{\sin nx - \sin mx}{n-m} \right) = s \frac{\sin nx - \sin mx}{n-m} = \varepsilon_2(x),$$

$$\frac{1}{s} \frac{d\mu_1(x)}{dx} = \frac{1}{s} \left( -mn \frac{\cos nx - \cos mx}{n-m} \right) = s \frac{\cos nx - \cos mx}{n-m} = \mu_2(x).$$

Влияние различных типов внешних воздействий в уравнениях (16)-(23) и функций влияния (24), (25) учитывается посредством коэффициентов

$$n = -\frac{k}{2} + \sqrt{\frac{k^2}{4} + s^2}, \quad m = -\frac{k}{2} - \sqrt{\frac{k^2}{4} + s^2},$$

которые при отсутствии отдельных компонентов внешней нагрузки существенно упрощаются. Так, при отсутствии крутящего момента  $n = -m = s$ , а при отсутствии продольной силы  $n = 0$ , а  $m = -k$ . Размерность параметров  $m$  и  $n$  составляет  $m^{-1}$ , их произведение  $n \cdot m = s^2$ . Все эти свойства можно учитывать для упрощения анализа напряженно-деформированного состояния.

### Выводы

1. В работе получены универсальные уравнения изогнутой оси сжато-закрученного стержня при продольно-поперечном изгибе в форме начальных параметров в двух главных центральных для условий нагружения, соответствующих условиям работы осевого инструмента для чистовой обработки отверстий.

2. Использование этих уравнений для оценки напряженно-деформированного состояния осевого инструмента позволяет определять поперечные смещения инструмента в зоне резания и прогнозировать их влияние на точность обработки отверстий.

### Список литературы

1. Пономарев Д.С. Расчеты на прочность в машиностроении. В 3-х томах. Т.3. – М.: Гостехиздат, 1959. – 1118с.

2. Холмогорцев Ю.П. Оптимизация процессов обработки отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 184с.

3. Шевченко Ф.Л. Механика упругих деформируемых систем. Часть 1. Напряженно-деформированное состояние стержней. – Донецк: ДонНТУ, 2006. 293с.

Рецензент: Шевченко Ф.Л.

Надійшла до редколегії: 11.04.2011р.

**О.Г. ТАТЬЯНЧЕНКО**

Донецький національний технічний університет

**Т.М. БРИЖАН**

Приазовський державний технічний університет

**РІВНЯННЯ ЗІГНУТОЇ ОСІ ПРИ ПОЗДОВЖНЬО-ПОПЕРЕЧНОМУ ЗГИНІ  
СТИСНУТО-ЗАКРУЧЕНОГО СТЕРЖНЯ**

Розглянутий напружений-деформований стан осевого інструменту як одноосного елемента, що сприймає одночасно згин, стиск і кручення. Отримано універсальне рівняння зігнутої осі такого елемента в двох взаємно перпендикулярних площинах у формі початкових параметрів з використанням тригонометричних функцій впливу.

**Осьовий інструмент, поздовжньо-поперечний згин стиснуто-закрученого стержня, поперечні переміщення, точність обробки, початкові параметри, функції впливу**

**A.G. TATYANCHENKO**

Donetsk national technical university

**T.M. BRIZHAN**

Priazovskiy state technical university

**EQUATION OF THE BENDING AXIS AT LONGITUDINAL-TRANSVERSAL BEND  
OF BRIEFLY-INVOLUTE BAR**

The tense-deformed state of axial tool as an axis element, which testing a bend, compression and twisting simultaneously, is considered. Universal equation of the bent axis of such element is got in two mutually perpendicular planes in form of initial parameters with use of trigonometric functions of influence is got.

**Axial tool, longitudinal-transversal bend of briefly-involute bar,  
transversal displacements, machining accuracy, initial parameters,  
functions of influence**

УДК 621.9.06

**Е.А. ЧЕРНЫШЕВ** (канд. техн. наук)  
**В.И. ДВОРНИКОВ** (д-р. техн. наук, проф.)  
**А.В. ПАШИНИН** (студент)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

## **ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ КОНСЕРВАТИВНОГО ОСЦИЛЛЯТОРА С КВАДРАТИЧНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ (НА ПРИМЕРЕ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ)**

В статье получено точное решение уравнения колебаний консервативного осциллятора с квадратичной нелинейностью на примере уравнения радиальных колебаний при резании. Решением этого уравнения является эллиптическая функция, близкая к гармонической при слабом влиянии квадратичного члена и начальном положении изображающей точки внутри сепаратрисы, но вдали от нее. Показано, что вблизи сепаратрисы колебания имеют сильно нелинейный характер.

**Ключевые слова:** Нелинейные колебания, квадратичный член, эллиптический интеграл, эллиптический синус, энергия, сепаратриса

### **Введение**

При анализе динамических процессов приходится решать нелинейные дифференциальные уравнения. Поскольку общих методов интегрирования нелинейных уравнений не существует, обычно прибегают к их численному решению. Однако точность того или иного численного метода для конкретного уравнения можно оценить, лишь зная его точное решение. Разумеется, получить точное решение удастся только для сравнительно простых нелинейных уравнений, но полученные аналитические решения позволяют, во-первых, выявить закономерности в общем виде, незаметные при численном интегрировании, во-вторых, установить погрешность численных методов, и, наконец, в-третьих, дают возможность для дальнейшего развития теоретической базы.

В настоящей работе рассматривается нелинейная система со степенной нелинейностью, описываемой квадратичным членом. Это уравнение возникает при разложении степенной функции для восстанавливающей силы в ряд с сохранением первого нелинейного члена, который в общем случае является квадратичным. Чаще всего в качестве простейшей нелинейной системы рассматривают уравнение Дуффинга с кубической нелинейностью [1, 2], когда по физическому смыслу восстанавливающая сила является нечетной функцией и в окрестности нуля подчиняется закону Гука, т.е. содержит только нечетные степени перемещений. Наличие квадратичного члена является сравнительно редким и не имеет такого ясного физического смысла, как кубический член в уравнении Дуффинга. Поэтому уравнение с квадратичным членом привлекает меньше внимания, и зачастую его рассматривают при изложении асимптотических методов [3, 4] только как первый нелинейный член в разложении для упругой силы, записанном в общем виде. В данной работе поставлена **цель** - получить точное аналитическое решение уравнения движения консервативного осциллятора, содержащего только квадратичный член. К этому уравнению авторы пришли при рассмотрении простейшей одно-массовой колебательной системы при резании, возбуждаемой силой, которая описывается степенной эмпирической зависимостью и может быть сведена к уравнению с квадратичным членом.

Отметим, что по завершении нижеизложенного теоретического анализа в работе [5] было обнаружено аналитическое решение данного уравнения, сведенного еще одной, не использованной нами подстановкой к безразмерной форме, не содержащей вообще никаких произвольных постоянных. Полученное в эллиптических функциях решение практически совпадает с излагаемым ниже, что свидетельствует об их корректности. Публикуемый авторами параллельный и независимый результат, как можно убедиться из работы [5], является более подробным, хотя и не претендует на первенство.

### Основное содержание и результаты работы

Рассмотрим одномассовую колебательную консервативную систему, в которой резец считается жестко закрепленным, а заготовка представляется приведенной массой  $m$ , вращающейся вокруг своей оси и совершающей радиальные колебания на пружине с коэффициентом  $c$  статической жесткости под действием радиальной составляющей  $P_y$  силы резания, которой противодействует упругая восстанавливающая сила.

Радиальную силу резания  $P_y$  будем определять с использованием эмпирической зависимости [6] вида

$$P_y = K h^n, \text{ Н}, \quad (1)$$

где  $h$  - фактическая глубина резания, м, а коэффициент  $K$  считается постоянной величиной определяется условиями обработки:

$$K = 10 C_p K_p V^l s^m 1000^n,$$

учитывая скорость резания  $V$ , м/мин, подачу  $s$ , мм/об, а также свойства материалов и схему обработки безразмерными коэффициентами  $C_p, K_p$ .

Запишем уравнение радиальных колебаний в предположении о линейности упругой силы и той гипотезы, что в каждый момент времени сила резания определяется зависимостью (1), где глубина резания корректируется радиальными перемещениями  $y$  заготовки в колебательном движении, т.е. представляется в виде

$$h = h_0 - y, \quad (2)$$

где  $h_0$  - номинальная глубина резания без учета колебаний, направив ось  $y$  таким образом, что перемещение в направлении действия силы резания уменьшает фактическую глубину резания.

Подставив (2) в (1), будем иметь уравнение

$$m\ddot{y} + cy = K(h_0 - y)^n. \quad (3)$$

Разлагая правую часть (3) в ряд Маклорена, получим уравнение

$$m\ddot{y} + cy = Kh_0^n - Knh_0^{n-1}y + \frac{1}{2}Kn(n-1)h_0^{n-2}y^2 - \dots, \quad (4)$$

которое, ограничившись первым нелинейным членом, перепишем в виде

$$m\ddot{y} + [c + Knh_0^{n-1}]y + \frac{1}{2}Kn(1-n)h_0^{n-2}y^2 = Kh_0^n \quad (5)$$

и исключим константу  $Kh_0^n$  в правой части. Обозначив

$$c_1 = c + Knh_0^{n-1}, \quad (6)$$

$$c_2 = \frac{1}{2}Kn(1-n)h_0^{n-2} \quad (7)$$

уравнение (5) примет вид

$$m\ddot{y} + c_1y + c_2y^2 = Kh_0^n, \quad (8)$$

где коэффициент  $c_1$  является по смыслу коэффициентом обобщенной жесткости, включая в себя статическую  $c$  и динамическую  $Knh_0^{n-1}$  составляющие, а коэффициент  $c_2$ , имея размерность давления, показывает влияние нелинейной составляющей. Постоянная величина  $Kh_0^n$  - это сила резания при отсутствии колебаний, когда  $h = h_0$ .

Подразумевая здесь под  $y$  суперпозицию центрированной функции  $y_1$  и вибрационного увода  $\bar{y}$ , перепишем уравнение (8) следующим образом (опуская индекс):

$$m\ddot{y} + c_1(y + \bar{y}) + c_2(y + \bar{y})^2 = Kh_0^n, \quad (9)$$

причем увод определяется корнями квадратного уравнения

$$c_1\bar{y} + c_2\bar{y}^2 - Kh_0^n = 0,$$

то есть

$$\bar{y} = \frac{-c_1 \pm \sqrt{c_1^2 + 4c_2Kh_0^n}}{2c_2}.$$

Для однозначности  $\bar{y}$  учтем то обстоятельство, что правая часть (9) положительна. Следовательно,

$$\bar{y} = \frac{\sqrt{c_1^2 + 4c_2Kh_0^n} - c_1}{2c_2}. \quad (10)$$

Радикал в (10) представляет собой уточненный коэффициент обобщенной жесткости, корректирующий выражение (6). Это следует из уравнения (9), если приравнять коэффициенты при  $y$ , переписав его в виде

$$m\ddot{y} + (c_1 + 2c_2\bar{y})y + c_2y^2 = 0$$

и подставить сюда выражение (10).

В результате получим

$$m\ddot{y} + Cy + c_2y^2 = 0, \quad (11)$$

где содержащуюся в (10) величину

$$C = \sqrt{c_1^2 + 4c_2Kh_0^n} \quad (12)$$

можно назвать коэффициентом обобщенной жесткости во втором приближении, имея в виду под первым приближением выражение (6), а под нулевым – коэффициент  $c$  статической жесткости. Примечательно, что увод, согласно (10) и (12), определяется раз-

ностью второго и первого приближений для обобщенной жесткости, отнесенной к удвоенному коэффициенту при квадратичном члене. Под порядковым номером приближения подразумевается степень многочлена при разложении в ряд силы резания. Очевидно, что третье приближение получить уже гораздо сложнее, т.к. для определения увода необходимо решать кубическое уравнение.

Заметим, что полученное выражение (10) для вибрационного увода несколько снижает точность разложения (4), подразумевающего под равновесным положением нулевое. С физической же точки зрения выражение (4) означает, что величина увода мала и ею можно пренебречь при разложении силы в ряд Тейлора. Иными словами, раскладывать силу резания в ряд Маклорена, считая, что в силу малости  $\bar{y}$  погрешность такого представления будет мала в сравнении с разложением в окрестности «истинного» положения равновесия.

Приведем уравнение (11) к безразмерному виду. Обозначим

$$\omega = \sqrt{C/m} \quad (13)$$

и введем безразмерное «время»  $\tau = \omega t$  (являющееся по смыслу фазовым углом), а также представим функцию  $y$  в виде  $y = Ay'$ , где  $A$  - масштабный коэффициент, имеющий смысл начального отклонения,  $y'$  - безразмерная динамическая переменная порядка 1. Тогда, опуская штрих при  $y$  и используя обозначение (13), уравнение (11) приводится к безразмерной форме

$$\ddot{y} + y + \varepsilon y^2 = 0, \quad (14)$$

где обозначено

$$\varepsilon = \frac{c_2}{m\omega^2} A = \frac{c_2}{C} A. \quad (15)$$

Перейдем к решению уравнения (14), преследуя цель получить его точное аналитическое решение при начальных условиях  $y(\tau_0) = y_0, \dot{y}(\tau_0) = \dot{y}_0$ .

Уравнение (14) интегрируется в квадратурах

$$\frac{\dot{y}^2}{2} + \frac{y^2}{2} + \frac{\varepsilon y^3}{3} = E, \quad (16)$$

где полная энергия

$$E = \frac{\dot{y}_0^2}{2} + \frac{y_0^2}{2} + \frac{\varepsilon y_0^3}{3} \quad (17)$$

определяется начальными условиями.

Из (16) следует, что

$$\tau = \int_{y_0}^y \frac{dy}{\sqrt{2E - y^2 - \frac{2\varepsilon y^3}{3}}}, \quad (18)$$

показывая время, в течение которого система перемещается из  $y_0$  в  $y$  при движении в соответствии с уравнением (16) и запасом полной энергии (17).

Перепишем (18) в виде

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2\varepsilon}} \int_{y_0}^y \frac{dy}{\sqrt{\frac{3E}{\varepsilon} - \frac{3}{2\varepsilon} y^2 - y^3}}$$

и представим подкоренное выражение в форме разложения на множители:

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2\varepsilon}} \int_{y_0}^y \frac{dy}{\sqrt{(y_1 - y)(y - y_2)(y - y_3)}} \quad (19)$$

при условии  $y_1 > y_2 > y_3$ .

Интеграл (19) запишем в виде суммы

$$\tau = \sqrt{\frac{3}{2\varepsilon}} \left( \int_{y_0}^{y_1} \frac{dy}{\sqrt{(y_1 - y)(y - y_2)(y - y_3)}} - \int_y^{y_1} \frac{dy}{\sqrt{(y_1 - y)(y - y_2)(y - y_3)}} \right), \quad (20)$$

изменив знак перед вторым интегралом и поменяв в нем пределы интегрирования местами.

Теперь (20) можно переписать в виде

$$\tau = \tau_0 - \sqrt{\frac{3}{2\varepsilon}} \int_y^{y_1} \frac{dy}{\sqrt{(y_1 - y)(y - y_2)(y - y_3)}}, \quad (21)$$

введя начальную фазу

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{3}{2\varepsilon}} \int_{y_0}^{y_1} \frac{dy}{\sqrt{(y_1 - y)(y - y_2)(y - y_3)}}.$$

Выразим из (21) интеграл

$$\int_y^{y_1} \frac{dy}{\sqrt{(y_1 - y)(y - y_2)(y - y_3)}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{3}} (\tau_0 - \tau), \quad (22)$$

который при условии  $y_1 > y \geq y_2 > y_3$  имеет решение [7]

$$\int_y^{y_1} \frac{dy}{\sqrt{(y_1 - y)(y - y_2)(y - y_3)}} = \frac{2}{\sqrt{y_1 - y_3}} F(\lambda, k), \quad (23)$$

где  $F(\lambda, k)$  - нормальный эллиптический интеграл Лежандра I рода

$$F(\lambda, k) = \int_0^\lambda \frac{dx}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 x}},$$

причем  $k$  называется модулем эллиптического интеграла.

Для выражения (23)

$$k = \sqrt{\frac{y_1 - y_2}{y_1 - y_3}}, \quad (24)$$

$$\lambda = \arcsin \sqrt{\frac{y_1 - y}{y_1 - y_2}}.$$

Приравняв правые части (22) и (23), получим

$$F(\lambda, k) = \sqrt{\frac{\varepsilon(y_1 - y_3)}{6}} (\tau_0 - \tau). \quad (25)$$

Обозначив здесь для краткости фазу

$$\phi = \sqrt{\frac{\varepsilon(y_1 - y_3)}{6}} (\tau_0 - \tau), \quad (26)$$

выполним обращение эллиптического интеграла с помощью эллиптического синуса Якоби по правилу

$$\operatorname{sn}(F(\lambda, k)) = \sin \lambda = \sqrt{\frac{y_1 - y}{y_1 - y_2}}. \quad (27)$$

С учетом обозначений (25), (26) выражение (27) преобразуется к виду

$$\operatorname{sn}^2 \phi = \frac{y_1 - y}{y_1 - y_2},$$

откуда искомая функция

$$y = y_1 - (y_1 - y_2) \operatorname{sn}^2 \phi. \quad (28)$$

Это и есть точное решение уравнения (14), отличающееся от полученного в работе [5] тем, что выражено через эллиптический синус, а не косинус.

Таким образом, для точного решения дифференциального уравнения с квадратичной нелинейностью необходимо знать координаты точек, в которых кинетическая энергия

$$2E - y^2 - \frac{2\varepsilon y^3}{3} = 0,$$

т.е. решить кубическое уравнение, что аналитически довольно громоздко, но можно сделать численно с любой наперед заданной точностью.

Поскольку эллиптический синус  $-1 \leq \operatorname{sn} \phi \leq 1$  и, следовательно,  $0 \leq \operatorname{sn}^2 \phi \leq 1$ , то очевидно, что функция  $y$  изменяется в пределах  $y_2 \leq y \leq y_1$ . Мы снова получили условие равенства (23), выражающее, как можно заметить, условие положительности кинетической энергии и существования действительных решений.

Проанализируем полученное решение (28). Оно является периодическим, т.к.  $\operatorname{sn} \phi$  имеет по фазе  $\phi$  период  $4\mathbf{K}$ , где  $\mathbf{K}$  - полный нормальный эллиптический интеграл Лежандра I рода, определяемый формулой

$$\mathbf{K} = F\left(\frac{\pi}{2}, k\right) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\lambda}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \lambda}},$$

причем для действительных  $k^2 < 1$

$$\mathbf{K} = \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k^4 + \dots \right] = \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{(2n-1)!!}{2^n n!} \right)^2 k^{2n} \right].$$

Так как период  $\operatorname{sn} \phi$  по фазе равен  $4\mathbf{K}$ , то период  $\operatorname{sn}^2 \phi$  равен  $2\mathbf{K}$ , и в силу обозначения (26) период по  $\tau$  искомой функции (28)

$$T = 2\mathbf{K} \sqrt{\frac{6}{\varepsilon(y_1 - y_3)}}, \quad (29)$$

а частота

$$\omega' = \pi / \mathbf{K} \sqrt{\frac{\varepsilon(y_1 - y_3)}{6}},$$

или, в размерных величинах,

$$\omega' = \omega \pi / \mathbf{K} \sqrt{\frac{\varepsilon(y_1 - y_3)}{6}}.$$

Итак, точным решением уравнения (14) при начальных условиях  $y(\tau_0) = y_0, \dot{y}(\tau_0) = \dot{y}_0$  является функция (28).

Покажем, что в предельном случае  $\varepsilon \rightarrow 0$  она описывает колебания линейного осциллятора  $\ddot{y} + y = 0$ . Зададимся для простоты следующими начальными условиями:  $\dot{y}_0 = 0$ , а начальное отклонение  $y_0$  таково, что полная энергия  $E = 1/2$ . Тогда кинетическая энергия обращается в нуль в точках, являющихся корнями кубического уравнения

$$1 - y^2 - \frac{2\varepsilon y^3}{3} = 0. \quad (30)$$

Воспользуемся тем обстоятельством, что при  $\varepsilon \rightarrow 0$  корни уравнения (30)  $y_1 \rightarrow 1, y_2 \rightarrow -1$ , а корень  $y_3$  можно вычислить на основании свойства корней

$$y_1 y_2 y_3 = -\frac{d}{a} \quad (31)$$

кубического уравнения

$$ay^3 + by^2 + cy + d = 0.$$

Применяя (31) к (30), получим

$$y_3 \rightarrow -\frac{3}{2\varepsilon}. \quad (32)$$

Подставим теперь предельные значения корней  $y_1, y_2, y_3$  в выражение фазы (26) и перепишем (28), учитывая, что при  $\varepsilon \rightarrow 0$ , согласно (32) и (24), модуль эллиптического интеграла  $k \rightarrow 0$  и в этом случае эллиптический синус вырождается в синус тригонометрический. Тогда

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} y(\tau) = 1 - 2 \sin^2 \left[ \sqrt{\frac{\varepsilon(1+3/2\varepsilon)}{6}} (\tau_0 - \tau) \right] = 1 - 2 \sin^2 \left( \frac{\tau_0 - \tau}{2} \right) = \cos(\tau_0 - \tau),$$

что описывает гармонические колебания линейного осциллятора.

Следовательно, решение уравнения колебаний линейного осциллятора является частным случаем решения (28) для уравнения (14), что полностью соответствует физическим представлениям.

Этот же результат,  $2\pi$ -периодичность при  $\varepsilon \rightarrow 0$ , следует из выражения (29): период становится равным

$$T = 4\mathbf{K} \Big|_{k=0} = 2\pi.$$

Очевидно, что для систем со слабой квадратичной нелинейностью, т.е. при малом  $\varepsilon$ , их движения будут мало отличаться от обычных гармонических колебаний. Однако с увеличением нелинейности период может существенно отличаться от  $2\pi$ . В частности, с увеличением  $\varepsilon$  модуль эллиптического интеграла  $k \rightarrow 1$ , а решение стремится к прямоугольным импульсам амплитуды  $+1$  или  $-1$ , длящимся «время»  $\mathbf{K}$  каждый.

Действительные решения уравнения (14) возможны, когда полная энергия больше потенциальной, т.е. кинетическая энергия положительна. Эта область на фазовой плоскости ограничена сепаратрисой, пересекающей ось  $y$  в точках с координатами

$$y_1 = -\frac{1}{\varepsilon}, \quad y_2 = \frac{1}{2\varepsilon},$$

являющихся корнями уравнения

$$\Pi(y) = E_0,$$

где  $\Pi(y)$  - функция потенциальной энергии,  $E_0$  - полная энергия, равная потенциальной в точке  $y_1$  ее локального максимума.

Колебания будут близки к гармоническим не только при малом  $\varepsilon$ , но и в том случае, когда начальное положение изображающей точки внутри сепаратрисы будет располагаться вдали от нее.

Прежде чем привести пример, остановимся коротко на технической стороне построения полученного решения (28). В связи с тем, что в инженерных расчетах эллиптические функции Якоби используются сравнительно редко, они не являются встроенными в расчетные программы и языки программирования и их вычисление необходимо программировать самостоятельно.

Так как решение (28) содержит только эллиптический синус, то рассмотрим его вычисление, не останавливаясь на вычислении других эллиптических функций, которое можно найти в справочной литературе [7]. Для этого используются тэта-функции Якоби

$$\mathcal{G}_1(\tau) = 2\sqrt[4]{\tau} \sin \tau \prod_{n=1}^{\infty} (1 - 2q^{2n} \cos 2\tau + q^{4n})(1 - q^{2n}),$$

$$\mathcal{G}_4(\tau) = \prod_{n=1}^{\infty} (1 - 2q^{2n-1} \cos 2\tau + q^{2(2n-1)})(1 - q^{2n}),$$

которые не являются эллиптическими, но обладают очень хорошей сходимостью и позволяют при небольшом числе членов ряда вычислять эллиптический синус из соотношения

$$\operatorname{sn} \tau = \frac{\mathcal{G}_4(\tau)}{\mathcal{G}_1(\tau)},$$

причем величина  $q$  определяется формулой

$$q = \exp(-\pi \mathbf{K}'/\mathbf{K}),$$

где  $\mathbf{K}'$  – связанный полный эллиптический интеграл I рода

$$\mathbf{K}' = \mathbf{K}(k') = F\left(\frac{\pi}{2}, k'\right),$$

а  $k'$  – дополнительный модуль эллиптического интеграла

$$k' = \sqrt{1 - k^2}.$$

Приведем теперь для сравнения два решения (28) при одном и том же  $\varepsilon = 0,1$ , но для разных начальных условий: когда изображающая точка в начальный момент времени находится «далеко» и «близко» от сепаратрисы. На рис. 1 и 2 показаны эти графики, из которых можно видеть, что во втором случае существенно отличается не только форма, но и период колебаний.

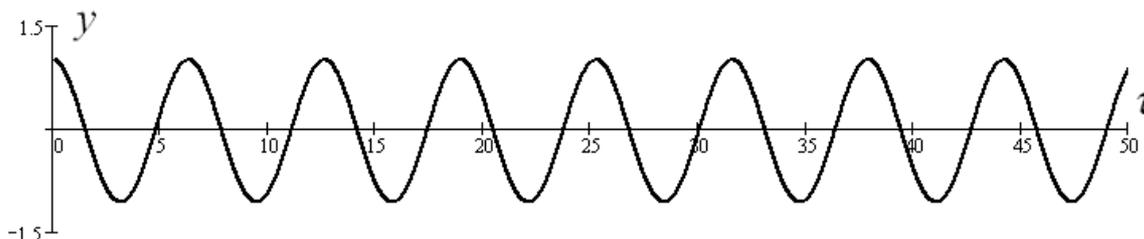


Рис. 1. Развертка колебаний системы (14) при  $\varepsilon = 0,1$   
и начальных условиях  $y_0 = 0,2/2\varepsilon, \dot{y}_0 = 0$

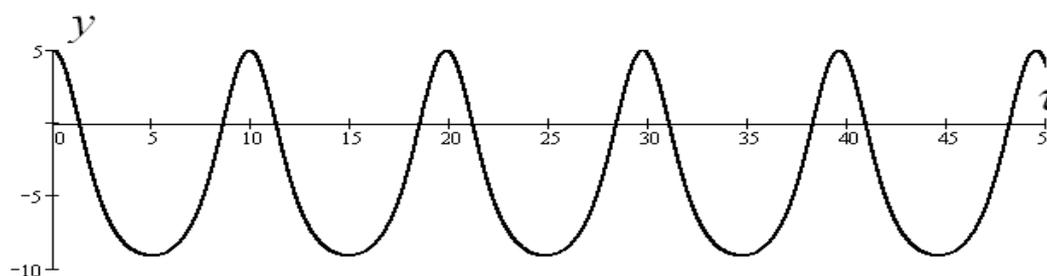


Рис. 2. Развертка колебаний системы (14) при  $\varepsilon = 0,1$   
и начальных условиях  $y_0 = 0,99/2\varepsilon, \dot{y}_0 = 0$

### Выводы

1. Уравнение колебаний при резании можно представить уравнением с квадратичным членом, учитывающим в первом приближении нелинейность силы резания.

2. Решением этого уравнения является эллиптическая функция (28), близкая к гармонической при малом  $\varepsilon$  и начальном положении изображающей точки вдали от сепаратрисы. Вблизи сепаратрисы колебания носят сильно нелинейный характер.

### Список литературы

1. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Дрофа, 2004. – 591 с.
2. Мартынов Б.А. Теория колебаний. Математические модели динамических систем: Учеб. пособие / Б.А. Мартынов. - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. - 56 с.
3. Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н.Н. Боголюбов, Ю.А. Митропольский. – М.: Физматгиз, 1963. – 412 с.
4. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. В 9-ти т. Т.1. Механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1965. – 204 с.
5. Кузнецов А.П. Нелинейные колебания: Учеб. пособие для вузов / А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, Н.М. Рыскин. - М.: Издательство физико-математической литературы, 2002. - 292 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
7. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 1108 с.

*Рецензент: Шевченко Ф.Л.*

*Надійшла до редколегії: 08.01.2011р.*

**Є.О. ЧЕРНИШЕВ  
В.І. ДВОРНИКОВ  
А.В. ПАШИНІН**

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна

### **ТОЧНЕ РІШЕННЯ РІВНЯННЯ КОЛИВАНЬ КОНСЕРВАТИВНОГО ОСЦИЛЯТОРА З КВАДРАТИЧНОЮ НЕЛІНІЙНІСТЮ (НА ПРИКЛАДІ ОБРОБКИ РІЗАННЯМ)**

В статті отримане точне рішення рівняння коливань консервативного осцилятора з квадратичною нелінійністю на прикладі рівняння радіальних коливань при різанні. Рішенням цього рівняння є еліптична функція, близька до гармонійної при слабкому впливі квадратичного члена і початковому положенні зображуючої точки всередині сепаратрисі, але вдалені від неї. Показано, що поблизу сепаратрисі коливання мають сильно нелінійний характер.

**Нелінійні коливання, квадратичний член, еліптичний синус, енергія, сепаратриса**

**E.A. CHERNYSHEV  
V.I. DVORNIKOV  
A.V. PASHININ**

Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

### **THE ACCURATE SOLUTION OF CONSERVATIVE OSCILLATOR EQUATION WITH QUADRATIC NONLINEARITY (AS AN EXAMPLE OF MACHINING)**

In the paper the accurate solution of oscillator equation with quadratic nonlinearity as an example of radial vibrations in machining is derived. The solution is elliptic function that is close to harmonic one at weak influence of quadratic nonlinearity and affix initial position within separatrix curve but far from it. It is shown that near separatrix oscillations have strongly nonlinear properties.

**Nonlinear oscillations, quadratic part, elliptic integral, elliptic sine, energy, separatrix**

УДК 621.95.02

**Ю.А. ГРИНЁВ** (канд. техн. наук, mc@mech.dgtu.donetsk.ua)**Т.А. ВОЕВОДИНА** (студент)**Е.Н. ЦАРЕНКО** (студент)

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СБОРНЫХ СВЕРЛ

Получены зависимости для расчета статических геометрических параметров сборных сверл со сменными режущими пластинами. Приведены графики изменения статических геометрических параметров периферийной и центральной режущих пластин сверла вдоль режущих кромок.

**Ключевые слова:** Сборные сверла, статические геометрические параметры, расчет, графики

### Введение

Основной бюджетобразующей отраслью Украины является металлургическая промышленность. В свою очередь, одними из основных видов продукции крупнейшего металлургического комбината «Азовсталь» являются железнодорожные рельсы и рельсовые скрепления. В процессе их производства для образования отверстий применяются сборные сверла с механическим креплением многогранных неперетачиваемых пластин (МНП). Опыт эксплуатации стандартных сверл по ГОСТ 27724 - 88 с механическим креплением показывает их относительно невысокую работоспособность. Основной причиной преждевременной потери работоспособности являются выкрашивание режущих кромок и сколы вершин пластин, что вызвано неблагоприятными условиями работы сверла, неравномерной загрузкой режущих кромок, наличием радиальной неуравновешенной составляющей силы резания. Перечисленные недостатки характерны как для отечественных, так и зарубежных стандартных конструкций сборных сверл оснащенных МНП (рис. 1). Обработка отверстий в рельсах на комбинате «Азовсталь» ведется на специальных станках в условиях характерных для массового производства. В таких условиях рациональным является использование специального режущего инструмента, в котором существующие недостатки стандартных конструкций сверл были бы сведены к минимуму за счет обеспечения оптимальных конструктивных и геометрических параметров рабочей части.

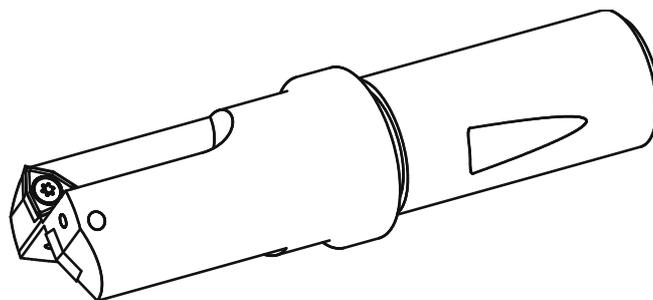


Рис. 1. Общий вид сборного сверла с механическим креплением МНП

Особенностью сборных сверл с МНП является то, что геометрические параметры на главных и вспомогательных режущих кромках зависят от расположения пластин в корпусе. Для решения задачи оптимизации геометрических параметров рабочей части сверла, необходимо знать каким образом они изменяются при различном расположении периферийной и центральной МНП в корпусе сверла.

Решению задачи определения геометрических параметров рабочей части инструмента посвящено большое количество работ, последние из которых связаны с методикой их аналитического определения [1], определением параметров геометрии задней поверхности цельного сверла [2], определением статических геометрических параметров на главных режущих кромках центральной и периферийной режущих пластин сборных сверл [3 - 5]. Однако для поиска оптимальных геометрических параметров рабочей части сборных сверл с МНП недостаточно знать геометрические параметры лишь на главных режущих кромках, необходимо также иметь информацию о параметрах на вспомогательных режущих кромках. В этой связи целью работы является получение зависимостей для определения статических геометрических параметров на главной и вспомогательной режущих кромках центральной и периферийной МНП сборного сверла.

### Основная часть

Статические геометрические параметры сверла определяются как:

- передний угол  $\gamma_c$  – угол в статической главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и статической основной плоскостью;
- задний угол  $\alpha_c$  – угол в статической главной секущей плоскости лезвия между задней поверхностью и статической плоскостью резания;
- угол наклона режущей кромки  $\lambda_c$  – угол в статической плоскости резания между режущей кромкой и статической основной плоскостью.

При этом:

- статическая плоскость резания – координатная плоскость, касательная к режущей кромке в рассматриваемой точке и перпендикулярная статической основной плоскости;
- статическая главная секущая плоскость – координатная плоскость, перпендикулярная линии пересечения статических основной плоскости и плоскости резания;
- статическая основная плоскость – координатная плоскость, проведенная через рассматриваемую точку режущей кромки перпендикулярно направлению скорости главного движения в этой точке.

Исходя из этих положений, определим статические геометрические параметры на главной и вспомогательной режущих кромках МНП сборного сверла с помощью методики предложенной в работе [6]. Рассмотрим схему установки МНП в корпусе сверла (рис. 2). В начальном положении свяжем с режущей кромкой пластины систему координат  $X_0Y_0Z_0$  с центром  $O$ , совпадающим с вершиной пластины и осью корпуса сверла. Далее переместим пластину относительно осей координат  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно на величины  $a$ ,  $b$  и  $c$ . В этом положении режущей пластины ее система координат совпадет с системой  $X_1Y_1Z_1$ . Для обеспечения заданной величины главного угла в плане развернем МНП относительно центра системы координат  $O_1$  на угол  $\chi$ , совместив систему координат пластины с системой  $X_2Y_2Z_2$ . Разворачивая МНП вокруг оси  $X_2$  на угол  $\lambda$ , совместим систему координат пластины с системой  $X_3Y_3Z_3$ . При установке нормального заднего угла  $\alpha$  развернем МНП на данный угол вокруг оси  $Y_3$ , а

система координат совместится с системой  $X_4Y_4Z_4$ . Данное положение режущей пластины соответствует окончательному ее расположению в корпусе сверла.

Опишем аналитически рассмотренный процесс установки МНП в корпусе сверла с помощью матричных преобразований.

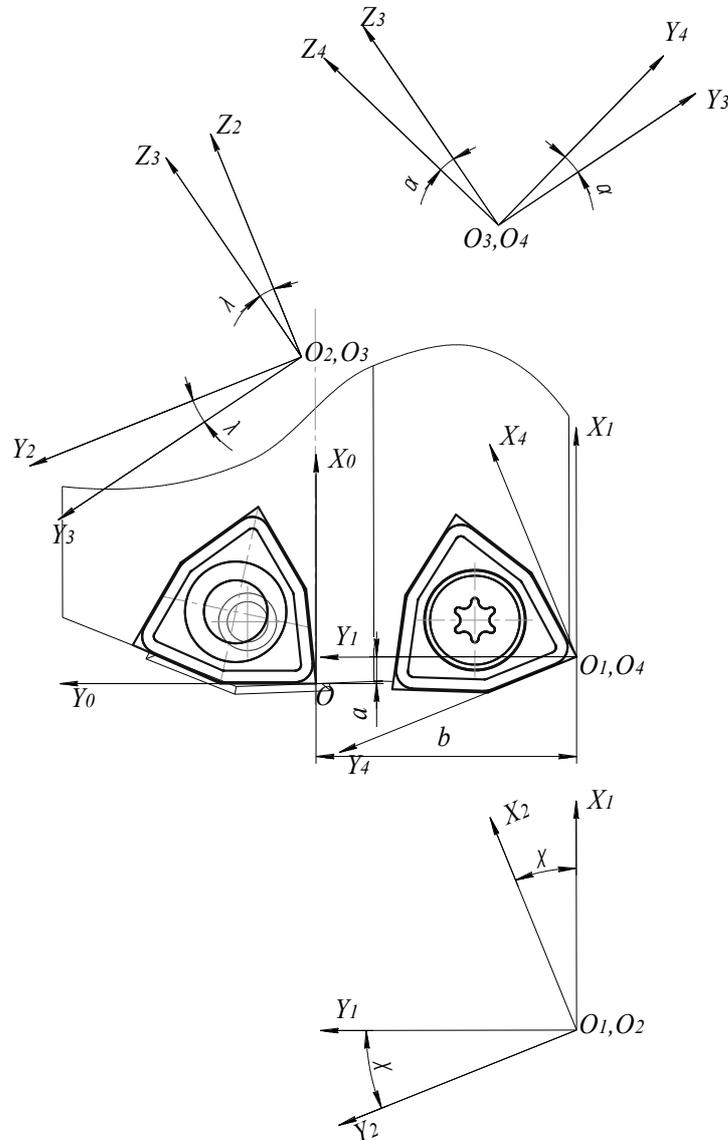


Рис. 2. Схема установки пластины в корпусе сверла

Матрица перехода от системы координат  $X_1Y_1Z_1$  к системе  $X_0Y_0Z_0$  выглядит следующим образом

$$M_{01} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & -b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

матрица перехода от системы  $X_2Y_2Z_2$  к системе  $X_1Y_1Z_1$

$$M_{12} = \begin{vmatrix} \cos \chi & -\sin \chi & 0 & 0 \\ \sin \chi & \cos \chi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

где  $\chi$  - угол поворота пластины относительно начального положения для установок заданного угла в плане;

матрица перехода от системы  $X_3Y_3Z_3$  к системе  $X_2Y_2Z_2$

$$M_{23} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & -\sin \lambda & 0 \\ 0 & \sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

матрица перехода от системы  $X_4Y_4Z_4$  к системе  $X_3Y_3Z_3$

$$M_{34} = \begin{vmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Тогда координаты произвольной точки режущей кромки в системе координат  $X_4Y_4Z_4$  можно пересчитать для системы  $X_0Y_0Z_0$  с помощью зависимости

$$r_0 = M_{01}M_{12}M_{23}M_{34}r_4, \quad (1)$$

где  $r_0, r_4$  - радиус векторы произвольной точки режущей кромки в соответствующих системах координат.

Формулы преобразования координат при переходе от системы  $X_4Y_4Z_4$  к системе  $X_0Y_0Z_0$  согласно (1)

$$\begin{aligned} x_0 &= (\cos \chi \cos \alpha + \sin \chi \sin \lambda \sin \alpha)x_4 - (\sin \chi \cos \lambda)y_4 + (\sin \chi \sin \lambda \cos \alpha - \cos \chi \sin \alpha)z_4 + a; \\ y_0 &= (\sin \chi \cos \alpha - \cos \chi \sin \lambda \sin \alpha)x_4 + (\cos \chi \cos \lambda)y_4 - (\sin \chi \sin \alpha + \cos \chi \sin \lambda \cos \alpha)z_4 - b; \\ z_0 &= (\cos \lambda \sin \alpha)x_4 + (\sin \lambda)y_4 + (\cos \lambda \cos \alpha)z_4 + c. \end{aligned} \quad (2)$$

С помощью формул преобразования координат (2) мы можем рассчитать геометрические параметры рабочей части в инструментальной системе координат. Для определения статических геометрических параметров нам необходимо знать положение статической основной плоскости, которое определяется углом  $\zeta$  (рис. 3).

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{c_i}{r_i},$$

где  $r_i$  - радиус-вектор в плоскости  $Y_0OZ_0$  произвольной  $i$ -й точки режущей кромки;  $c_i$  - координата по оси  $Z_0$  произвольной  $i$ -й точки.

Осуществим мнимый поворот пластины относительно ее вершины на угол  $\zeta$ . Матрица поворота от системы координат  $X_5Y_5Z_5$  к системе  $X_4Y_4Z_4$  будет иметь вид

$$M_{45} = \begin{vmatrix} \cos \zeta + c1 \cdot e1 & -e3 \sin \zeta + c1 \cdot e2 & e2 \sin \zeta + c1 \cdot e3 & 0 \\ e3 \sin \zeta + c2 \cdot e1 & \cos \zeta + c2 \cdot e2 & -e1 \cdot \sin \zeta + c2 \cdot e3 & 0 \\ -e2 \sin \zeta + c3 \cdot e1 & e1 \sin \zeta + c3 \cdot e2 & \cos \zeta + c3 \cdot e3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix},$$

где  $c1, c2, c3$  - коэффициенты;  $e1, e2, e3$  - направляющие косинусы вектора  $\bar{e}$  (рис. 4).

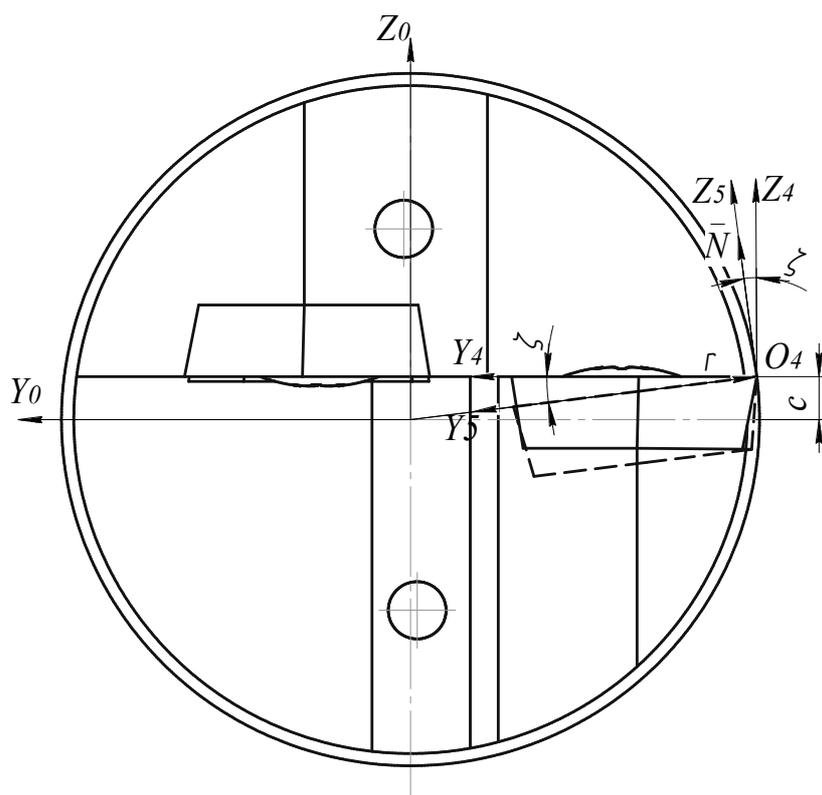


Рис. 3. Схема к определению положения статической основной плоскости

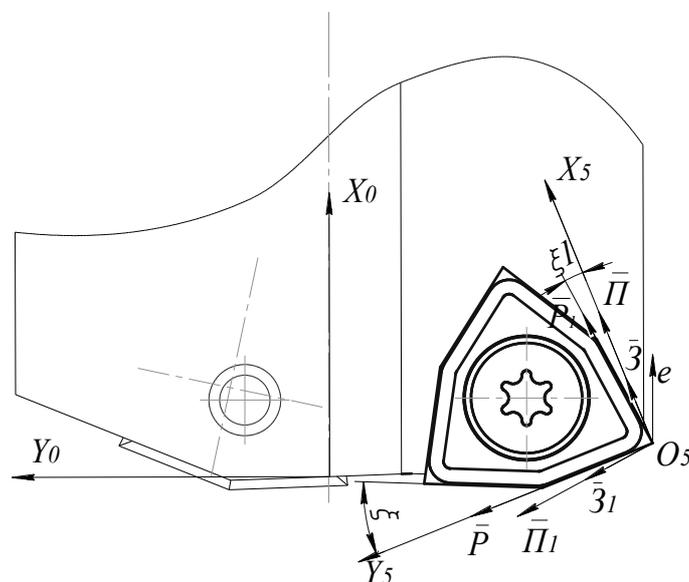


Рис. 4. Схема к определению статических геометрических параметров рабочей части

Направляющие косинусы  $e_1, e_2, e_3$  являются элементами первой строки матрицы перехода от системы  $X_4Y_4Z_4$  к системе  $X_0Y_0Z_0$ , что согласно формулам (2) можно представить в следующем виде

$$e_1 = \cos \chi \cos \alpha + \sin \chi \sin \lambda \sin \alpha ;$$

$$e_2 = -\sin \chi \cos \lambda ;$$

$$e_3 = \sin \chi \sin \lambda \cos \alpha - \cos \chi \sin \alpha .$$

Коэффициенты  $c_1, c_2, c_3$  определяются по формулам

$$c_1 = e_1(1 - \cos \zeta); c_2 = e_2(1 - \cos \zeta); c_3 = e_3(1 - \cos \zeta).$$

Формулы преобразования координат при переходе от системы координат  $X_5Y_5Z_5$  к системе  $X_0Y_0Z_0$  будут иметь вид

$$x_0 = \left[ \begin{aligned} &(\cos \chi \cos \alpha + \sin \chi \sin \lambda \sin \alpha)(\cos \zeta + c_1 \cdot e_1) - (\sin \chi \cos \lambda)(e_3 \sin \zeta + c_2 \cdot e_1) + \\ &+ (\sin \chi \sin \lambda \cos \alpha - \cos \chi \sin \alpha)(-e_2 \sin \zeta + c_3 \cdot e_1) \end{aligned} \right] x_5 +$$

$$+ \left[ \begin{aligned} &(\cos \chi \cos \alpha + \sin \chi \sin \lambda \sin \alpha)(-e_3 \sin \zeta + c_1 \cdot e_2) - (\sin \chi \cos \lambda)(\cos \zeta + c_2 \cdot e_2) + \\ &+ (\sin \chi \sin \lambda \cos \alpha - \cos \chi \sin \alpha)(e_1 \sin \zeta + c_3 \cdot e_2) \end{aligned} \right] y_5 +$$

$$+ \left[ \begin{aligned} &(\cos \chi \cos \alpha + \sin \chi \sin \lambda \sin \alpha)(e_2 \sin \zeta + c_1 \cdot e_3) - (\sin \chi \cos \lambda)(-e_1 \sin \zeta + c_2 \cdot e_3) + \\ &+ (\sin \chi \sin \lambda \cos \alpha - \cos \chi \sin \alpha)(\cos \zeta + c_3 \cdot e_3) \end{aligned} \right] z_5 + a;$$

$$y_0 = \left[ \begin{aligned} &(\sin \chi \cos \alpha - \cos \chi \sin \lambda \sin \alpha)(\cos \zeta + c_1 \cdot e_1) + (\cos \chi \cos \lambda)(e_3 \sin \zeta + c_2 \cdot e_1) + \\ &- (\sin \chi \sin \alpha + \cos \chi \sin \lambda \cos \alpha)(-e_2 \sin \zeta + c_3 \cdot e_1) \end{aligned} \right] x_5 +$$

$$+ \left[ \begin{aligned} &(\sin \chi \cos \alpha - \cos \chi \sin \lambda \sin \alpha)(-e_3 \sin \zeta + c_1 \cdot e_2) + (\cos \chi \cos \lambda)(\cos \zeta + c_2 \cdot e_2) + \\ &- (\sin \chi \sin \alpha + \cos \chi \sin \lambda \cos \alpha)(e_1 \sin \zeta + c_3 \cdot e_2) \end{aligned} \right] y_5 + \quad (3)$$

$$\left[ \begin{aligned} &(\sin \chi \cos \alpha - \cos \chi \sin \lambda \sin \alpha)(e_2 \sin \zeta + c_1 \cdot e_3) + (\cos \chi \cos \lambda)(-e_1 \sin \zeta + c_2 \cdot e_3) + \\ &- (\sin \chi \sin \alpha + \cos \chi \sin \lambda \cos \alpha)(\cos \zeta + c_3 \cdot e_3) \end{aligned} \right] z_5 - b;$$

$$z_0 = [(\cos \lambda \sin \alpha)(\cos \zeta + c_1 \cdot e_1) + \sin \lambda(e_3 \sin \zeta + c_2 \cdot e_1) + (\cos \lambda \cos \alpha)(-e_2 \sin \zeta + c_3 \cdot e_1)]x_5 +$$

$$+ [(\cos \lambda \sin \alpha)(-e_3 \sin \zeta + c_1 \cdot e_2) + \sin \lambda(\cos \zeta + c_2 \cdot e_2) + (\cos \lambda \cos \alpha)(e_1 \sin \zeta + c_3 \cdot e_2)]y_5 +$$

$$+ [(\cos \lambda \sin \alpha)(e_2 \sin \zeta + c_1 \cdot e_3) + \sin \lambda(-e_1 \sin \zeta + c_2 \cdot e_3) + (\cos \lambda \cos \alpha)(\cos \zeta + c_3 \cdot e_3)]z_5 + c.$$

Для упрощения и удобства дальнейшего изложения упростим формулы преобразования (3), выразив коэффициенты перед координатами  $x_5, y_5, z_5$  следующим образом

$$x_0 = m_{11}x_5 + m_{12}y_5 + m_{13}z_5 + a;$$

$$y_0 = m_{21}x_5 + m_{22}y_5 + m_{23}z_5 - b;$$

$$z_0 = m_{31}x_5 + m_{32}y_5 + m_{33}z_5 + c. \quad (4)$$

Вектор нормали к передней поверхности пластины в системе координат  $X_5Y_5Z_5$   $\bar{N}(0,0,1)$  (см.рис. 3). Тогда этот вектор в системе координат  $X_0Y_0Z_0$  с помощью формул преобразования координат (4) можно представить следующим образом

$$\bar{N} = \bar{i}_0 m_{13} + \bar{j}_0 m_{23} + \bar{k}_0 m_{33},$$

где  $\bar{i}_0, \bar{j}_0, \bar{k}_0$  - единичные векторы по осям  $X_0, Y_0, Z_0$  соответственно.

Положение главной режущей кромки в системе координат  $X_5Y_5Z_5$  определяет вектор  $\bar{P} = \bar{i}_5 \text{tg} \xi + \bar{j}_5$ . В системе  $X_0Y_0Z_0$  этот вектор можно представить как

$$\bar{P} = \bar{i}_0(m_{11} \text{tg} \xi + m_{12}) + \bar{j}_0(m_{21} \text{tg} \xi + m_{22}) + \bar{k}_0(m_{31} \text{tg} \xi + m_{32}).$$

Определим величину вспомогательного угла  $\nu$  между проекцией главной режущей кромки на плоскость  $X_0OY_0$  и осью  $Y_0$ .

$$\text{tg} \nu = \frac{m_{11} \text{tg} \xi + m_{12}}{m_{21} \text{tg} \xi + m_{22}}.$$

Запишем координаты вектора  $\bar{P}$  в системе  $X_0Y_0Z_0$  с помощью вспомогательного угла  $\nu$   $\bar{P}(-\sin \nu; \cos \nu; \text{tg} \lambda_c)$ .

Так как вектор  $\bar{P}$  перпендикулярен вектору  $\bar{N}$ , справедливо равенство

$$-m_{13} \sin \nu + m_{23} \cos \nu + m_{33} \text{tg} \lambda_c = 0;$$

откуда статический угол наклона главной режущей кромки

$$\text{tg} \lambda_c = \frac{m_{13} \sin \nu - m_{23} \cos \nu}{m_{33}}. \quad (5)$$

Для определения статического главного заднего угла проведем по задней поверхности вектор  $\bar{Z}$ . Длину его проекции на плоскость  $X_0OY_0$  примем равной единице, тогда вектор  $\bar{Z}$  в системе координат  $X_0Y_0Z_0$  можно представить в следующем виде

$$\bar{Z}(\cos \nu; \sin \nu; -\text{ctg} \alpha_c).$$

Исходя из того, что вектора  $\bar{Z}, \bar{P}$  и  $\bar{N}$  лежат в одной главной задней плоскости (при установке негативной МНП) запишем их смешанное произведение равное нулю

$$\begin{vmatrix} m_{13} & m_{23} & m_{33} \\ \cos \nu & \sin \nu & -\text{ctg} \alpha_c \\ -\sin \nu & \cos \nu & \text{tg} \lambda_c \end{vmatrix} = 0.$$

Раскрыв определитель и выразив статический главный задний угол, получим

$$\text{tg} \alpha_c = \frac{m_{23} \sin \nu + m_{13} \cos \nu}{\text{tg} \lambda_c (m_{23} \cos \nu - m_{13} \sin \nu) - m_{33}}. \quad (6)$$

Для определения статического главного переднего угла проведем в главной секущей плоскости по передней поверхности вектор  $\bar{\Pi}$ . При условии, что его проекция на плоскость  $X_0OY_0$  равна единице, запишем координаты вектора в системе  $X_0Y_0Z_0$

$$\bar{\Pi}(\cos \nu; \sin \nu; -\text{tg} \gamma_c).$$

Из условия перпендикулярности векторов  $\bar{\Pi}$  и  $\bar{N}$  получим равенство

$$m_{13} \cos \nu + m_{23} \sin \nu - m_{33} \text{tg} \gamma_c = 0;$$

откуда

$$\text{tg} \gamma_c = \frac{m_{13} \cos \nu + m_{23} \sin \nu}{m_{33}}. \quad (7)$$

Статический главный угол в плане  $\varphi_c$  определяется следующим образом

$$\varphi_c = 90^\circ + \nu. \quad (8)$$

Аналогичным образом, определив вспомогательный угол  $\nu_1$  между проекцией вспомогательной режущей кромки на плоскость  $X_0Y_0Z_0$  и осью  $X_0$ , найдем статические геометрические параметры на вспомогательной режущей кромке.

Вспомогательный угол  $\nu_1$  определим с помощью координат вектора  $\bar{P}_1$  в системе  $X_0Y_0Z_0$ , который совпадает со вспомогательной режущей кромкой

$$\bar{P}_1 = \bar{i}_0(m_{11} + m_{12}tg\xi_1) + \bar{j}_0(m_{21} + m_{22}tg\xi_1) + \bar{k}_0(m_{31} + m_{32}tg\xi_1);$$

откуда

$$tg\nu_1 = \frac{m_{21} + m_{22}tg\xi_1}{m_{11} + m_{12}tg\xi_1}.$$

Выразим с помощью вспомогательного угла  $\nu_1$  векторы, идущие по вспомогательной режущей кромке  $\bar{P}_1$ , вспомогательной задней поверхности  $\bar{Z}_1$  и вспомогательной передней поверхности  $\bar{\Pi}_1$ :

$$\begin{aligned} \bar{P}_1 & (\cos\nu_1; \sin\nu_1; tg\lambda_{1c}); \\ \bar{Z}_1 & (-\sin\nu_1; \cos\nu_1; -ctg\alpha_{1c}); \\ \bar{\Pi}_1 & (-\sin\nu_1; \cos\nu_1; -tg\gamma_{1c}). \end{aligned}$$

Исходя из этого представления, выразим статические геометрические параметры на вспомогательной режущей кромке:

$$tg\lambda_{1c} = -\frac{m_{13}\cos\nu_1 + m_{23}\sin\nu_1}{m_{33}}; \quad (9)$$

$$tg\alpha_{1c} = \frac{m_{13}\sin\nu_1 - m_{23}\cos\nu_1}{m_{33} - tg\lambda_{1c}(m_{23}\sin\nu_1 + m_{13}\cos\nu_1)}; \quad (10)$$

$$tg\gamma_{1c} = \frac{m_{13}\sin\nu_1 - m_{23}\cos\nu_1}{m_{33}}; \quad (11)$$

$$\varphi_{1c} = \nu_1. \quad (12)$$

В случае установки режущей пластины со сформированными передними и задними углами  $\gamma_n$  и  $\alpha_n$  необходимо сложить их значения с соответствующими значениями статических углов.

С помощью зависимостей (5) – (7) и (9) – (11) нами были рассчитаны статические геометрические параметры вдоль главной и вспомогательной режущих кромок периферийной и центральной режущих пластин сборного сверла. Расчет проводили при следующих исходных данных: диаметр отверстия, получаемого обработкой  $d = 36$  мм; форма пластины – шестигранная с углом при вершине  $\varepsilon = 84^\circ$ ; длина режущей кромки пластины  $l = 6,62$  мм; устанавливаемый главный угол в плане  $\varphi = 78^\circ$ ; смещение вершины МНП относительно оси корпуса сверла по оси  $Z_0$   $c = 0,25$  мм; угол наклона главной режущей кромки  $\lambda = 0$ ; нормальный задний угол  $\alpha = 0$ ; передний угол пластины  $\gamma_n = 20^\circ$ ; задний угол пластины  $\alpha_n = 8^\circ$ .

Результаты расчетов представлены на рисунках 5 и 6.

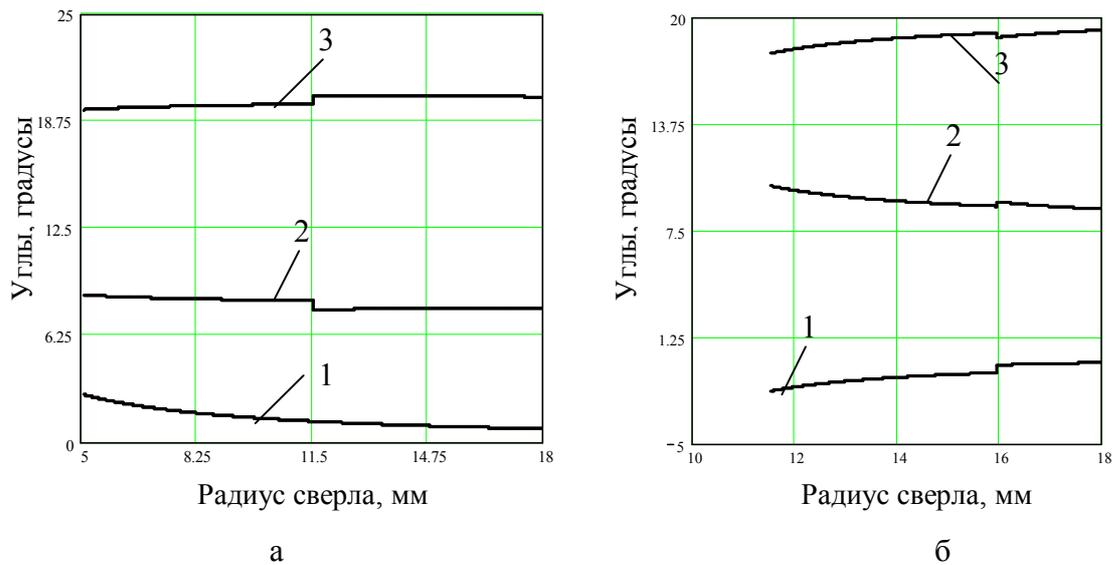


Рис. 5. Статические геометрические параметры вдоль главной (а) и вспомогательной (б) режущих кромок периферийной пластины: 1 -  $\lambda_c$ ; 2 -  $\alpha_c$ ; 3 -  $\gamma_c$

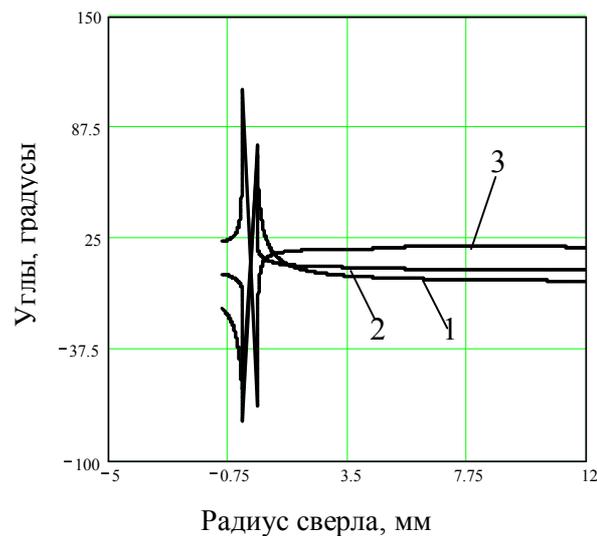


Рис. 6. Статические геометрические параметры вдоль главной режущей кромки центральной пластины: 1 -  $\lambda_c$ ; 2 -  $\alpha_c$ ; 3 -  $\gamma_c$

Для центральной пластины проводили расчет геометрических параметров только на главной режущей кромке, так как вспомогательная режущая кромка не участвует в процессе резания.

Как видно из графиков, статические геометрические параметры изменяются вдоль режущих кромок. Наибольшие изменения характерны для центральной пластины в районе близкой к оси корпуса сверла.

### Выводы

В результате проведенной работы получены зависимости для расчета статических геометрических параметров сборных сверл, оснащенных МНП. Предложенные зависимости позволят в дальнейшем провести анализ влияния

параметров установки пластины в корпусе сверла на геометрические параметры рабочей части, а также провести оптимизацию геометрических параметров с целью минимизации вредных воздействий, возникающих в процессе обработки.

### Список литературы

1. Равська Н.С. Методика аналітичного визначення геометричних параметрів різальної частини інструменту /Н.С. Равська, Т.П. Ніколаєноко, Д.О. Сільчин //Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 6 (154). – Донецьк: ДонНТУ, 2009. – С. 118 – 129.
2. Равська Н.С. Геометрія задньої поверхні різального інструменту /Н.С. Равська, В.А. Коваль, Т.П. Ніколаєнко //Вісник СевНТУ зб. наук. пр. Вип. 117/2011. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2011. – С. 132 – 137.
3. Петрушин С.И. Геометрический и силовой анализ сверл со сменными многогранными пластинами /С.И. Петрушин, А.А. Баканов, А.В. Махов //Технология машиностроения. – 2007. - №10. – С. 27 – 30.
4. Баканов А.А. Статические геометрические параметры сверла с СМП //Современные наукоемкие технологии. – 2006. - № 6. – С. 43.
5. Баканов А.А. Геометрический анализ сборных сверл со сменными многогранными пластинами //Обработка металлов. – 2009. – № 1 (42). – С. 31 – 33.
6. Родин П.Р. Проектирование резцов с механическим креплением многогранных неперетачиваемых пластин / П.Р. Родин, Н.С. Равская, Д.В. Ляпин //Резание и инструмент. – Харьков: Вища школа, 1988. – С. 3-7.

*Рецензент: Гусев В.В.*

*Надійшла до редколегії 15.04.2011р.*

**Ю.О. ГРИНЬОВ,  
Т.А. ВОЄВОДИНА,  
О.М. ЦАРЕНКО**

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна  
**ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗБІРНИХ  
СВЕРДЕЛ**

Отримані залежності для розрахунку статичних геометричних параметрів збірних свердел зі змінними різальними пластинами. Наведено графіки зміни статичних геометричних параметрів периферійної та центральної різальних пластин свердла вздовж різальних кромок.

**Збірні свердла, статичні геометричні параметри, розрахунок, графіки**

**Y. GRINYOV,  
T. VOYEVODINA,  
E. TSARENKO**

Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine  
**DEFINITION OF STATIC GEOMETRICAL PARAMETERS OF MODULAR  
DRILLS**

Dependences for calculation of static geometrical parameters of modular drills with indexable inserts are received. Schedules of change of static geometrical parameters of peripheral and central cutting inserts of a drill along cutting edges are resulted.

**Modular drills, static geometrical parameters, calculation, schedules**

**ПРАВИЛА**  
**представления рукописей статей в сборник научных трудов**  
**Донецкого национального технического университета**  
**серия: «Машиностроение и машиноведение»**

Для публикации в сборнике подаются статьи, отражающие новые теоретические и практические результаты исследований в области машиностроения и машиноведения. Содержание статей должно соответствовать тематической направленности сборника.

**ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА СБОРНИКА**

1. Исследование процессов механической обработки материалов и разработка прогрессивных способов их реализации.
2. Проектирование прогрессивных конструкций режущих инструментов и технологической оснастки.
3. Проектирование современных технологических систем и комплексов механической обработки материалов и сборки узлов.
4. Создание и применение прогрессивных технологий в машиностроении.
5. Механизация и автоматизация производственных процессов механической обработки и сборки.
6. Перспективные компьютерные технологии в машиностроении (CAD/CAM/CAE-системы).
7. Разработка и создание перспективных конструкций машин и механизмов на базе мехатронных технологий.
8. Исследование проблем кинематики, динамики, прочности и надежности машин и их узлов.

В рамках сборника можно представлять рекламу продукции, которая будет помещена в отдельном разделе сборника.

Структура сборника соответствует приведенной выше тематике.

**ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ СТАТЬИ**

Согласно постановлению Президиума Высшей аттестационной комиссии Украины от 15.01.2003 г. № 7-05/1 «О повышении требований к специальным изданиям, внесенным в перечень ВАК Украины», к публикации принимаются только научные статьи, содержащие следующие необходимые элементы:

- 1) постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными и практическими заданиями;
- 2) анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор;
- 3) выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- 4) формулировка целей статьи (постановка задания);
- 5) изложение основного материала исследований с полным обоснованием полученных научных результатов;
- 6) выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

В соответствии с указанными требованиями статья должна иметь следующую структуру (названия структурных разделов указываются в тексте **полужирным шрифтом**, но **не нумеруются**):

**1. Введение.**

Во введении приводятся:

- постановка проблемы или вопроса, которые рассматриваются в статье, их связь с актуальными научными и практическими задачами;
- краткие сведения по истории решения данной проблемы или исследования данного вопроса с обязательным указанием последних полученных результатов;
- формулировка цели выполненного исследования и частных или конкретных задач, которые решались автором.

**2. Основное содержание статьи.**

В данном разделе излагаются и подробно разъясняются полученные автором теоретические положения и практические результаты. Приводятся принятые гипотезы и использованные допущения, разъясняются малоизвестные термины, аббревиатуры и условные обозначения. Для теоретических положений приводятся их доказательства и необходимые математические преобразования. Для экспериментальных исследований кратко описываются методики их проведения, способы обработки данных и результаты проверок адекватности и достоверности результатов.

### 3. Заключение.

В заключении излагаются выводы по полученным автором результатам, описываются примеры их практического применения, предлагаются рекомендации относительно их использования, а также указываются перспективы дальнейших исследований по данной проблематике.

После заключения приводится список использованных автором в статье литературных источников. Список источников должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. **В списке литературы должно быть указано не менее 3 публикаций, вышедших за последние 10 лет.**

После списка литературы должны быть приведены аннотации (summary) статьи на трёх языках: украинском, русском и английском. В аннотации сжато излагается формулировка задачи, которая решалась автором, и приводятся основные полученные результаты.

**Тексты аннотаций на всех языках должны быть полностью идентичными.**

#### Примечания:

1. **Ответственность за нарушение авторских прав и несоблюдение действующих стандартов в подаваемых материалах возлагается на авторов статьи.**
2. **Ответственность за достоверность приведенных в статье фактов и данных, обоснованность сделанных выводов и научный уровень статьи несут авторы и рецензенты.**

### **ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ**

1. Язык статьи – украинский, русский или английский (по выбору авторов).
2. Текст рукописи статьи от 5 до 10 **полных** страниц на белой бумаге формата А4 (210x297 мм). Ориентация бумаги – **книжная**. Поля: верхнее и нижнее – 30 мм, левое и правое – 25 мм. Расстояния от края бумаги до колонтитулов – 15 мм. Страницы не нумеровать (нумерацию выполнить карандашом **на распечатанном экземпляре статьи** в нижнем правом углу). Рукопись статьи оформить с применением текстового редактора Microsoft Word (не ниже версии 7.0) шрифтом Times New Roman Cyr. Тип файла со статьей – документ Microsoft Word в формате DOC. Статьи в формате DOCX (текстовый редактор Microsoft Word 2007 и выше) представлять в редакцию **нежелательно**. Размер шрифта в статье – 12 пт. Межстрочный интервал по всей статье – **одинарный**. Текст статьи распечатать для передачи в редакцию **в одном экземпляре** с высоким качеством печати.
3. Материалы статьи должны отвечать следующей структурной схеме: УДК; название; фамилии и инициалы авторов; сокращенное название организации, название города, страны; основной текст; список литературы; аннотации.
4. **УДК** печатать с первой строки. Размер шрифта – 12 пт. Без отступа, выравнивание по левому краю.
5. **Название** печатать прописными буквами **на следующей строке** после УДК. Шрифт – 12 пт, полужирный. Без переносов, выравнивание по центру.
6. **Фамилии и инициалы** авторов печатать строчными буквами через одну пустую строку после названия. Шрифт – 12 пт, полужирный. Выравнивание по центру. **На следующей строке** строчными буквами, в круглых скобках, курсивом – сокращенное название **организаций**, название **городов, стран** (через запятую, выравнивание по центру).
7. **Основной текст** статьи печатать через одну пустую строку после названия организаций, городов, стран. Размер шрифта – 12 пт, межстрочный интервал – **одинарный**, красная строка (абзацный отступ) – **1,25 см**. Выравнивание по ширине. Расстановка переносов – автоматическая. Основной текст статьи **обязательно структурировать**, названия структурных разделов печатать **через одну пустую строку** от предыдущего раздела. Названия разделов указываются в тексте статьи **полужирным шрифтом**, но не нумеруются.
8. **Графический материал** (рисунки, графики, схемы) следует выполнять в одном из следующих форматов: \*.bmp, \*.gif, \*.jpg, \*.psx, \*.png, размерами не менее 60x60 мм внедренными в текст объектами. Рисунки должны располагаться по ходу излагаемого материала после упоминания о них. Позиции на рисунке должны располагаться по часовой стрелке и быть объяснены в тексте статьи. Под каждым рисунком указывается его номер и название, например: Рис. 3. Схема устройства. Размер шрифта в названии – 12 пт. Каждый рисунок должен быть отделен от текста одним интервалом (пустой строкой) сверху и снизу. Название должно быть **центрировано** относительно рисунка, использование переносов, отступов и выступов в названии не допускается. После названия допускается приводить объяснение позиций на рисунке, список позиций с объяснениями *рекомендуется* центрировать относительно рисунка. Название отделяется от рисунка одним интервалом и от последующего текста (за исключением объяснения позиций) тоже одним интервалом (**пустой строкой**).

9. **Формулы, математические знаки, показатели степени и индексы преимущественно** выполняются *курсивом*. **Формулы** набирать в редакторе формул Microsoft Equation не ниже версии 3.0, только, если их нельзя набрать курсивом. Математические знаки, показатели степени и индексы в редакторе формул Microsoft Equation должны выполняться в соответствии с приведенными ниже требованиями. Все величины, входящие в формулу, должны быть объяснены сразу после неё или в тексте статьи. Если после формулы приводится объяснение входящих в неё величин, то сразу после формулы (в той же строке) ставится запятая, а перечисление величин начинается с новой строки с союза «где» *без отступа*. После строки с союзом «где» последующие строки объяснения набираются с равномерным отступом (для русского языка – 0,8 см, для украинского – 0,6 см), выравнивание по ширине. После указания величины в объяснении ставится *короткое тире*, а не дефис. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля) **только в том случае**, если на них в тексте имеются ссылки. Формула отделяется от текста одним интервалом (*пустой строкой*) сверху и снизу, выравнивание *строго по центру*, независимо от наличия номера. Если для расположения формулы по центру используется табуляция, отступление от выравнивания формул *строго по центру* также не допускается. Настройки редактора формул Microsoft Equation приведены ниже.

#### Стиль и размеры формул для Microsoft Equation

Full (обычный)	12 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс)	10 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс)	7 pt
Symbol (крупный символ)	14 pt
Sub-Symbol (мелкий символ)	7 pt
Функция	Шрифт Times New Roman Cyr
Переменная клонный)	Шрифт Times New Roman Cyr (на-
Строчные греческие	Шрифт Symbol (наклонный)
Прописные греческие	Шрифт Symbol
Символы	Шрифт Symbol

10. **Таблицы** располагаются по ходу излагаемого материала после ссылки на них. Над таблицей помещается её название и порядковый номер (слева, без отступа). Слово «Таблица» в названии приводится полностью, например: Таблица 2. Экспериментальные данные. В названии таблицы не используются абзацные отступы и выступы, переносов слов в названии также следует избегать. Таблица отделяется от основного текста одним интервалом (пустой строкой) сверху и снизу. Если таблица занимает более одной страницы, то на второй и последующих страницах на месте названия указывается «Продолжение табл...», приводится номер таблицы, название не повторяется. При необходимости сразу после таблицы допускается указывать примечания к ней, начав их со слова (слов) «Примечание (примечания)», без абзацного отступа.
11. **Список литературы** печатать через одну пустую строку от основного текста статьи в соответствии с образцом оформления материалов. Размер шрифта – 12 пт, межстрочный интервал – *одинарный*. Выравнивание по ширине, без отступов, без красной строки. Список литературы начинается со слов «Список литературы», набранных полужирным шрифтом, за которыми ставится двоеточие. Далее приводятся библиографические описания источников в соответствии с ДСТУ ГОСТ 7.1: 2006. Номера позиций в списке выделяются полужирным шрифтом. Не допускается отрыв номера позиции в списке от начала библиографического описания и отрыв инициалов от фамилии автора.
12. **Аннотации** печатать через одну пустую строку после списка литературы. Каждая аннотация должна включать: название статьи на соответствующем языке прописными буквами; фамилии и инициалы авторов строчными буквами; текст аннотации (не более 5-7 строк). Название статьи и фамилии авторов выравнивать *по центру*; текст аннотации – *по ширине*, с красной строкой (абзацным отступом) **1,25 см**. Размер шрифта – 12 пт, межстрочный интервал – *одинарный*. Аннотации на разных языках отделяются друг от друга одной пустой строкой или двумя пустыми строками (если позволяет место). Тексты аннотаций на всех языках должны быть полностью *идентичными*.

#### ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В РЕДАКЦИЮ

Для принятия решения о включении Вашей статьи в очередной выпуск сборника необходимо до 18 декабря 2011 года подать в редакцию следующие документы:

1. Заявку на публикацию в материалах сборника (в произвольной форме).
2. Сведения об авторах статьи и пожелания авторов о включении статьи в конкретный раздел сборника в соответствии с приведенной ранее тематикой.

В приведенных выше документах обязательно указываются контактные телефоны авторов и электронный адрес для переписки с редакцией.

Редакционная коллегия обращается к авторам статей с просьбой не забывать приводить контактную информацию!

3. Текст рукописи статьи, оформленный по приведенным выше требованиям и распечатанный **в одном экземпляре** с высоким качеством печати. Печатный экземпляр статьи должен быть подписан всеми авторами (на последней странице). Вместо подписи авторов на печатном экземпляре статьи допускается представлять в редакцию **копию авторской справки**.
4. Документ, подтверждающий возможность публикации статьи в открытых источниках информации (**в одном экземпляре**).

Основанием для принятия статьи в редакцию может быть один из следующих документов:

1. Выписка из протокола заседания ученого совета факультета или учебного заведения, содержащая решение о рекомендации статьи (с указанием авторов и полного названия) к публикации. Выписку из протокола заседания ученого совета факультета или учебного заведения *рекомендуется* представлять авторам, представляющим учебные заведения.

2. Письмо на бланке организации с ходатайством о публикации статьи (с указанием авторов и полного названия) в сборнике трудов ДонНТУ серия: «Машиностроение и машиноведение», подписанное руководителем организации.

3. Акт экспертизы, подтверждающий отсутствие в материалах статьи (с указанием авторов и полного названия) сведений, запрещенных к публикации в открытых источниках, подписанный председателем экспертной комиссии и утвержденный руководителем организации.

**Иные документы могут быть приняты в качестве основания для возможности публикации статьи только после их рассмотрения на заседании редакционной коллегии.**

5. Файл с текстом статьи в формате текстового редактора Microsoft Word (\*.DOC) на дискете размером 3,5 дюйма, которую нужно подписать следующим образом: фамилии и инициалы авторов, название статьи. Желательно поместить на дискету две копии файла.

**Подаваемые в редакцию документы, включая рукопись статьи, желательно представлять без изгибов.**

**Допускается представление указанных выше материалов в электронном виде по электронной почте. В теме электронного письма необходимо указать «Статья в сборник трудов ДонНТУ».**

#### **Примечания:**

1. Материалы, не отвечающие перечисленным выше требованиям, не соответствующие тематике данного сборника, а также поступившие в редакцию с опозданием, опубликованы не будут.
2. Присланные в редакцию рукописи статей подвергаются **обязательному** рецензированию. Рукописи статей авторам не возвращаются. Рецензия с замечаниями, требующими согласования с авторами или внесения исправлений в статью, высылается авторам электронной почтой.
3. Уведомление о том, что статья принята или не принята к публикации, дается по телефону или высылается авторам электронной почтой. Рецензия на статью, не принятую к публикации по причинам, указанным в примечании 1, может быть выслана авторам по их просьбе.
4. Если статья полностью отвечает перечисленным выше требованиям по содержанию, оформлению, и соответствует тематике данного сборника, но поступила в редакцию с опозданием, редакция переносит публикацию статьи на следующий выпуск сборника и уведомляет об этом авторов по телефону или по электронной почте.
5. Редакция не несет ответственности за неверно указанные авторами статей телефонные номера и электронные адреса.
6. Редакционная коллегия оставляет за собой право вносить в текст статьи изменения редакционного характера, не затрагивающие сути основных положений статьи, без согласия авторов.
7. Редакционная коллегия оставляет за собой право приводить оформление статьи в соответствие с указанными выше требованиями (при незначительных их нарушениях) без участия авторов статьи.

#### **КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ**

**Адрес редакции:** Украина, 83000, г. Донецк, ул. Артема. 58.

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»  
Кафедра «Металлорежущие станки и инструменты»

Ред. коллегия сборника научных трудов ДонНТУ серия: «Машиностроение и машиноведение»

**Тел.:** (0622) 301-07-31, **Факс:** (0622) 92-12-78, **E-mail:** mc@mech.dgtu.donetsk.ua

*НАУКОВЕ ВИДАННЯ*

**Наукові праці**  
**Донецького національного**  
**технічного університету**  
***Серія: “Машинобудування і машинознавство”***

*(мовою оригіналу)*

Випуск 8(190)

Засновник та видавець – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Адреса видавця: 83000, Україна, м. Донецьк, вул. Артема, 58, ДонНТУ.

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації: Серія КВ № 7444 від 17.06.2003 р.

Редакційно-технічне оформлення, коректура та комп'ютерна верстка *Семенюк Д.Ю.*

Підписано до друку 27.07.2011. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>  
Ум. друк. арк. 26. Обл.- вид. арк. 20,2  
Тираж 100 прим.

Надруковано в типографії ДВНЗ «ДонНТУ», 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 9-й учбовий корпус, тел.: (062) 301-09-67