

DOI: 10.12737/22353

Бестужева О.В., соискатель
Федоренко М.А., д-р техн. наук, проф.,
Бондаренко Ю.А., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

bestuzheva.o@yandex.ru

В различных отраслях промышленности для производства цемента, извести, гипса, керамических изделий для измельчения твердых материалов применяются вращающиеся сушильные и обжиговые печи, шаровые трубные мельницы и различное крупногабаритное вращающееся оборудование. Одним из главных факторов повышения производительности работы такого оборудования является его надежность, зависящая от качества монтажных работ, своевременного ремонта и технического обслуживания. Для изучения обработки крупногабаритных деталей промышленного оборудования разработана и изготовлена экспериментальная установка, которая позволит восстанавливать работоспособность агрегатов в условиях эксплуатации. С целью оценки эффективности использования предложенного способа восстановления поверхности вращения крупногабаритной детали промышленного оборудования требуется проведение экспериментальных исследований. В ходе проведения эксперимента необходимо исследовать влияние технологических параметров обработки ротационного резца для обработки поверхности вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования при различных параметрах. Решение этих вопросов позволит определить рациональные конструктивные и предпочтительные технологические параметры для получения максимальной эффективности обработки.

Ключевые слова: крупногабаритное вращающееся оборудование, восстановление работоспособности, экспериментальное исследование, влияние варьируемых параметров.

Введение. Важнейшим фактором повышения работоспособности и надежности крупногабаритного оборудования являются точность его монтажа, профилактические своевременные ремонты, замены изношенных узлов и агрегатов [1]. В процессе исследования на ряде предприятий производились обмеры загрузочных и разгрузочных цапф помольных агрегатов - запасных на складах или на мельницах, остановленных на ремонт.

В процессе изготовления и эксплуатации цапф валов из-за нарушений в технологических процессах изготовления формируются определённые наследственные дефекты, которые при эксплуатации вызывают повышенный износ цапф [2]. В результате появляется износ поверхности скольжения, вследствие чего цапфа теряет цилиндрическую форму и приобретает форму близкую к усеченному конусу [3].

Основная часть. В настоящее время, с целью восстановления поверхностей вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования применяют их обработку специальными переносными станками. Для проведения экспериментальных исследований по изучению обработки поверхности вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования требуется использование специального

станка, основного и вспомогательного инструмента и средств контроля, а именно:

- 1) Станок для обработки цапф помольных мельниц;
- 2) Ротационный резцедержатель, обеспечивающий изменение исследуемых параметров обработки в заданных постановкой задачи пределах;
- 3) Контрольно-измерительная аппаратура, соответствующая исследованию изучаемого процесса и обеспечивать необходимую точность измерения.

Для проведения экспериментальных исследований по определению влияния параметров режущего инструмента на точность и качество цилиндрической поверхности цапф, в качестве основного показателя, характеризующего исследуемый параметр, была принята величина диаметра обработанной заготовки [4]. В ходе реализации экспериментов проводились следующие измерения: величины углов установки и радиуса ротационного резца, контроль диаметра обработанного отверстия, величина шероховатости. В ходе проведения экспериментов необходимо исследовать влияние технологических параметров обработки ротационного резца для обработки поверхности вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования при раз-

личных параметрах.

Эффективность качества обрабатываемой поверхности оценивались по следующим параметрам: по величине площади среза S_{cp} и по шероховатости R_a , определяемой по ГОСТ 2789-73. В качестве функций отклика на воздействие факторов [5, 6], определяющих процесс обработки цапфы мельниц, выбраны: передний угол γ , угол установки ω , угол поворота φ , радиус

режущей чашки резца r , которые отвечают ряду предъявляемых к функциям отклика требованиям: универсальности и возможности выражения в количественном виде одним полученным значением.

Результаты экспериментальных исследований обработки цапфы, имеющей форму усеченного конуса, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

№ п/п	Варьируемые факторы				Значение функции отклика	
	$\gamma(x_1)$	$\omega(x_2)$	$\varphi(x_3)$	$r(x_4)$	$S_{cp}, \text{мм}^2$	$R_a, \text{мм}$
1	2	3	4	5	6	7
1	23	4	15	13	0,47	$3,02 \times 10^{-3}$
2	63	4	15	13	3,64	$3,03 \times 10^{-3}$
3	23	26	15	13	0,58	$3,11 \times 10^{-3}$
4	63	26	15	13	3,95	$3,12 \times 10^{-3}$
5	23	4	61	13	2,37	$4,64 \times 10^{-3}$
6	63	4	61	13	3,64	$4,67 \times 10^{-3}$
7	23	26	61	13	5,34	$4,72 \times 10^{-3}$
8	63	26	61	13	5,98	$4,78 \times 10^{-3}$
9	23	4	15	27	1,08	$0,95 \times 10^{-3}$
10	63	4	15	27	2,43	$0,98 \times 10^{-3}$
11	23	26	15	27	1,22	$1,02 \times 10^{-3}$
12	63	26	15	27	2,98	$1,05 \times 10^{-3}$
13	23	4	61	27	1,52	$2,50 \times 10^{-3}$
14	63	4	61	27	4,30	$2,53 \times 10^{-3}$
15	23	26	61	27	1,71	$2,58 \times 10^{-3}$
16	63	26	61	27	6,06	$2,63 \times 10^{-3}$
17	70	15	38	20	3,96	$2,35 \times 10^{-3}$
18	15	15	38	20	0,84	$1,86 \times 10^{-3}$
1	2	3	4	5	6	7
19	43	30	38	20	3,33	$2,14 \times 10^{-3}$
20	43	0	38	20	1,07	$2,03 \times 10^{-3}$
21	43	15	70	20	2,48	$3,72 \times 10^{-3}$
22	43	15	5	20	0,92	$1,91 \times 10^{-3}$
23	43	15	38	30	2,91	$1,32 \times 10^{-3}$
24	43	15	38	10	1,49	$4,71 \times 10^{-3}$
25	43	15	38	20	1,21	$2,23 \times 10^{-3}$

На основании полученных результатов были получены уравнения регрессии. Для величины площади среза:

$$S_{cp} = 0,088 + 0,05\gamma - 0,011\omega - 0,049\varphi - 0,032r + 0,00015\gamma^2 + 0,00041\omega^2 + 0,00015\varphi^2 + 0,00102r^2 - 0,000113\gamma\omega + 0,000115\gamma\varphi - 0,000286\gamma r - 0,00021\omega\varphi + 0,00058\omega r - 0,00012\varphi r.$$

Для шероховатости поверхности R_a :

$$R_a = 9,34 - 0,014\gamma - 0,019\omega - 0,176\varphi - 0,434r + 0,000525\gamma^2 + 0,00231\omega^2 + 0,00189\varphi^2 + 0,00878r^2 + 0,001727\gamma\omega + 0,000731\gamma\varphi - 0,002214\gamma r + 0,000769\omega\varphi - 0,004285\omega r + 0,001868\varphi r.$$

Произведем анализ влияния варьируемых параметров на площадь среза и шероховатость поверхности. Анализ двух уравнений регрессии S_{cp} и R_a с четырьмя независимыми факторами является непростой задачей статистики. Поэто-

му для упрощения восприятия информации нами было решено исследовать парные воздействия параметров – передний угол γ , град.; угол установки ω , град.; угол поворота φ , град.; радиус режущей чашки резца r , мм.; на функции

цели: площадь среза S_{cp} , мм²; шероховатость поверхности R_a , мкм [7, 8].

На рис. 1 представлены зависимости площади среза S_{cp} и шероховатости поверхности R_a от угла установки ω при переднем угле $\gamma=15^\circ, 23^\circ, 43^\circ, 63^\circ, 70^\circ$.

График площади среза $S_{cp} = f(\omega)$ показывает, что при увеличении угла установки ω по интервалу варьирования от 0° до 15° , площадь среза незначительно уменьшается, а от 15° до 30° площадь среза увеличивается до $5,6$ мм² (при $\gamma=70^\circ$), при фиксированных значениях $\phi=38^\circ$,

$r=20$ мм, что свидетельствует о необходимости тщательного подбора варьируемых факторов оптимизации.

График шероховатости обрабатываемой поверхности $R_a = f(\omega)$ показывает прямую зависимость от угла установки: при увеличении угла установки – растет шероховатость. Ее минимальная величина – $0,64$ мкм при $\gamma=15^\circ, \omega=0^\circ$, далее монотонно возрастает, достигая максимума в точке $5,08$ мкм, при $\gamma=70^\circ, \omega=30^\circ$, что отрицательно влияет на качество поверхности.

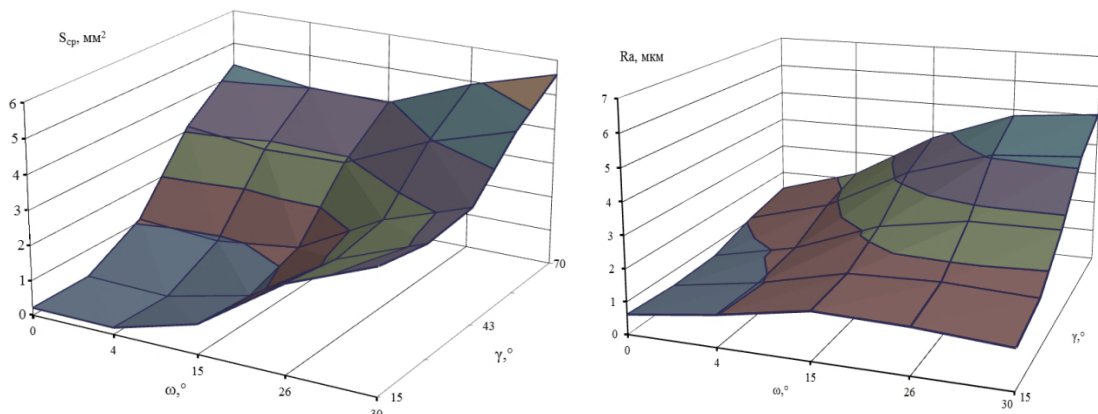


Рис. 1. Графики зависимости S_{cp} и R_a от угла установки ω при переднем угле $\gamma = 15^\circ, 23^\circ, 43^\circ, 63^\circ, 70^\circ$; $\phi = 38^\circ$; $r = 20$ мм

На рис. 2 представлены графики зависимости S_{cp} и R_a от угла поворота ϕ при радиусе режущей чашки $r=10; 13; 20; 27; 30$ мм. Из приведенных графиков следует, что при увеличении угла поворота ротационного резца с фиксированными значениями переднего угла резца

$\gamma=43^\circ$ и углом установки $\omega = 15^\circ$, площадь среза S_{cp} увеличивается с $1,06$ до $2,97$ мм². Следовательно, площадь среза прямолинейно зависит от угла поворота резца ϕ , что значительно влияет на точность обработки.

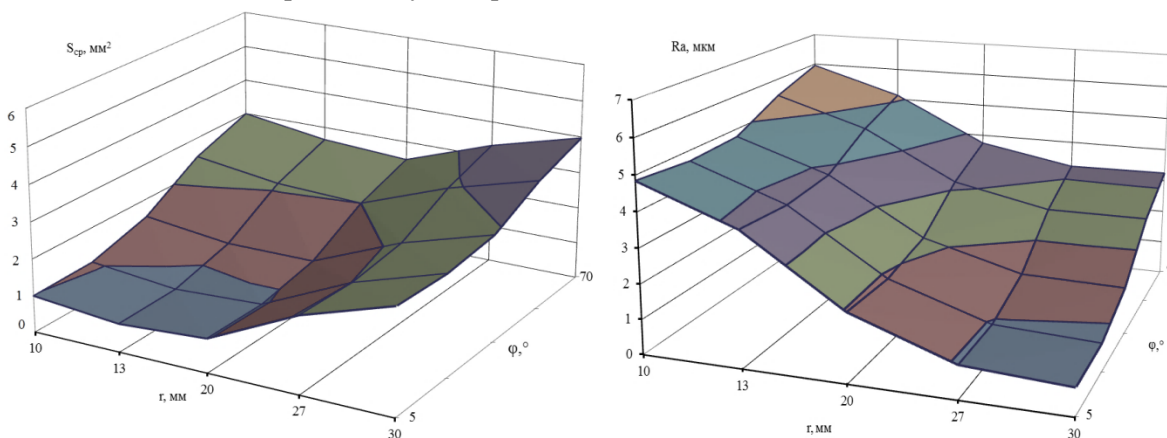


Рис. 2. Графики зависимости S_{cp} и R_a от угла поворота ϕ при радиусе режущей чашки $r = 10; 13; 20; 27; 30$ мм; $\gamma = 43^\circ, \omega = 15^\circ$

Зависимость шероховатости обрабатываемой поверхности $R_a = f(\phi, r)$ также показывает существенное влияние угла поворота резца. Здесь шероховатость R_a достигает своего максимума в точке 6 мкм, при радиусе $r=10$ мм, и параметрах $\gamma=43^\circ, \omega = 15^\circ$. При минимальном значении угла поворота резца ($\phi = 5^\circ$) и максимальном значении радиуса режущей чашки

($r=30$ мм) шероховатость достигает наименьшего значения в $0,7$ мкм.

На рис. 3 представлены зависимости площади среза S_{cp} и шероховатости поверхности R_a от угла поворота резца ϕ при переднем угле $\gamma=15^\circ, 23^\circ, 43^\circ, 63^\circ, 70^\circ$; при фиксированных значениях $\omega = 15^\circ, r = 20$ мм.

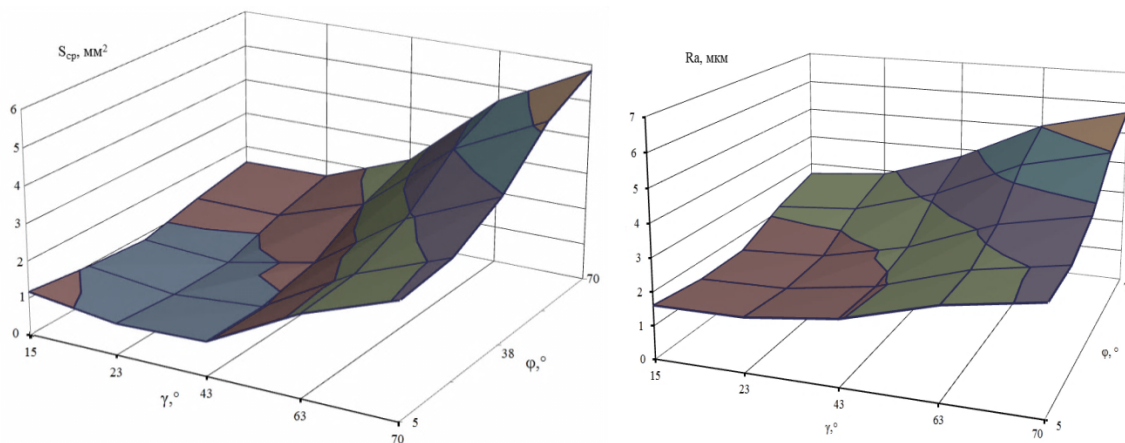


Рис. 3. Графики зависимости S_{cp} и R_a от угла поворота ϕ при переднем угле $\gamma = 15^\circ, 23^\circ, 43^\circ, 63^\circ, 70^\circ, \omega = 15^\circ, r = 20$ мм

Из приведенных графиков следует, что площадь среза $S_{cp} = f(\phi, \gamma)$ при увеличении переднего угла реза по всему интервалу варьирования от 15° до 70° , при увеличении угла поворота реза ϕ до 70° , возрастает от 1,2 до 5,8 mm^2 , при фиксированных значениях $\omega = 15^\circ, r = 10$ мм., что свидетельствует о существенном парном воздействии углов на изменение площади среза.

При этом наименьшее значение площадь среза принимает при минимально значении переднего угла $\gamma = 15^\circ$ и среднем значении угла поворота реза $\phi = 38^\circ$.

Зависимость шероховатости $R_a = f(\phi, \gamma)$ также показывает существенное влияние на ее значение величин угла поворота и переднего угла реза. Здесь минимальное значение шероховатости обработанной поверхности достигается при наименьших параметрах $\phi = 5^\circ, \gamma = 15^\circ$. Это объясняется тем, что при увеличении данных углов происходит рост высоты неровностей, что снижает качество поверхности.

На рис. 4 представлены зависимости площади среза S_{cp} и шероховатости поверхности R_a от переднего угла γ при радиусе режущей чашки $r = 10, 13, 20, 27, 30$ мм, при фиксированных значениях $\phi = 38^\circ, \omega = 15^\circ$.

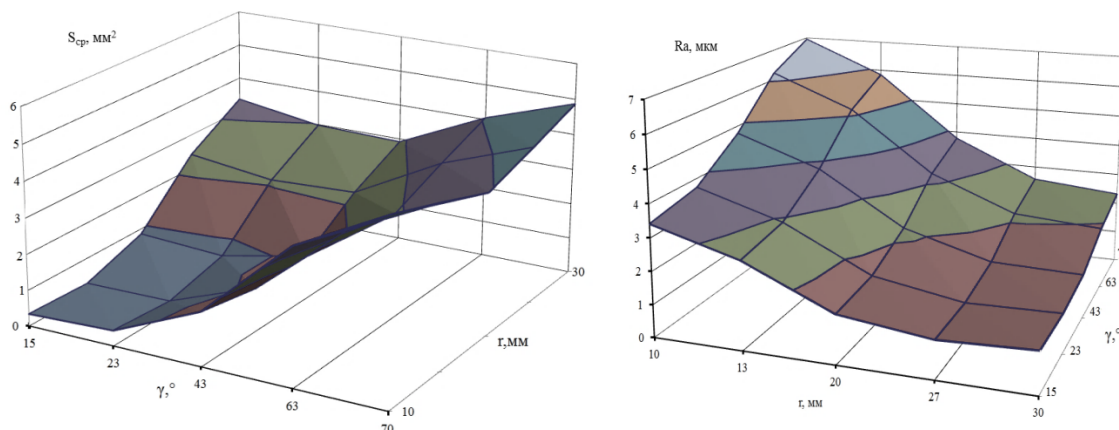


Рис. 4. Графики зависимости S_{cp} и R_a от переднего угла γ при радиусе режущей чашки $r = 10, 13, 20, 27, 30$ мм, $\phi = 38^\circ, \omega = 15^\circ$

Из приведенных графиков следует, что площадь среза S_{cp} при увеличении радиуса режущей чашки достигает значения 3,4 mm^2 , при $r = 30$ мм, а при увеличении переднего угла реза γ до 70° , площадь среза возрастает до 4,8 mm^2 . Уменьшение углов приводит к уменьшению площади среза. Точность обработки при этом не страдает.

Функция $R_a = f(\gamma, r)$ показывает практически обратно пропорциональную зависимость от предыдущей. Здесь при увеличении радиуса режущей чашки, шероховатость уменьшается до

1,2 μm , при $r = 30$ мм, а при увеличении переднего угла γ возрастает до 2,3 μm . Наилучшее качество поверхности в данном случае будет достигаться при наибольшем значении радиуса режущей чашки и при минимальных значениях переднего угла реза.

Так как между двумя функциями существует обратная зависимость, оптимальные значения площади среза и шероховатости будут находиться в том диапазоне, где точность не повлияет на качество поверхности.

На рис. 5 представлены зависимости площади среза S_{cp} и шероховатости поверхности R_a от угла установки ω при изменении угла поворота $\varphi = 5^\circ, 15^\circ, 38^\circ, 61^\circ, 70^\circ$. Из графика зависимости видно, что при увеличении углов уста-

новки ω и поворота φ , площадь среза S_{cp} растет, максимальной точки она достигает при максимальных значениях углов: $\omega = 30^\circ$ и $\varphi = 70^\circ$, где $S_{cp} = 4,1 \text{ мм}^2$.

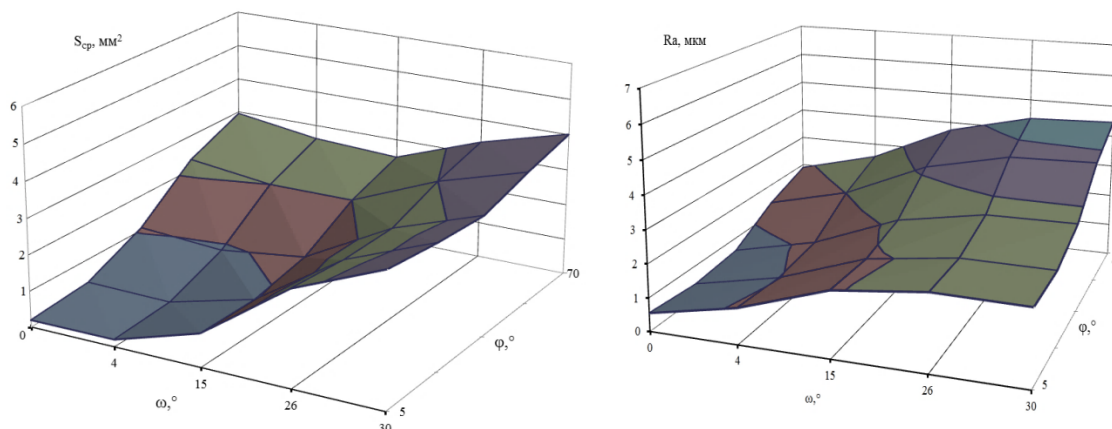


Рис. 5. Графики зависимости S_{cp} и R_a от угла установки ω при изменении угла поворота $\varphi = 5^\circ, 15^\circ, 38^\circ, 61^\circ, 70^\circ, \gamma = 43^\circ, r = 20 \text{ мм}$

Как видно из графика, угол поворота φ значительно влияет на площадь среза при незначительном изменении угла установки ω , что подтверждает значимость этого фактора регрессионной модели.

Зависимость шероховатости R_a показывает существенное влияние на ее значение величин угла поворота и угла установки резца. При увеличении углов поворота и установки резца – качество поверхности ухудшается, т.к. увеличива-

ется шероховатость. Минимальное значение $R_a = 0,6 \text{ мкм}$ достигается при $\omega = 0^\circ$ и $\varphi = 5^\circ$.

Здесь функции $S_{cp} = f(\omega, \varphi)$ и $R_a = f(\omega, \varphi)$ прямолинейно зависят друг от друга, так как при наименьших величинах угла установки и угла поворота, площадь среза и шероховатость минимальны.

На рис. 6 представлены зависимости S_{cp} и R_a от угла установки ω при изменении радиуса режущей чаши $r = 10, 13, 20, 27, 30 \text{ мм}$, при постоянных значениях $\varphi = 38^\circ, \gamma = 43^\circ$.

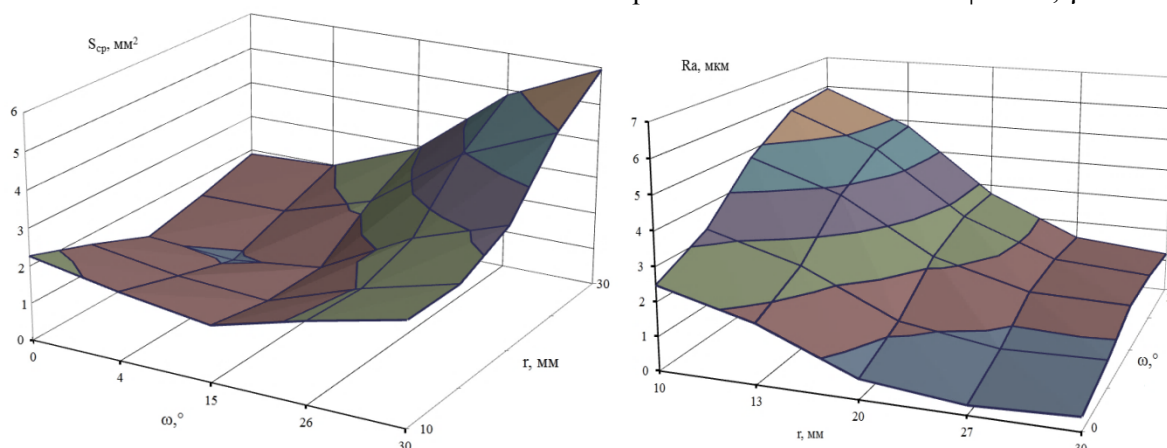


Рис. 6. Графики зависимости S_{cp} и R_a от угла установки ω при изменении радиуса режущей чаши $r = 10, 13, 20, 27, 30 \text{ мм}, \varphi = 38^\circ, \gamma = 43^\circ$

Из приведенных графиков следует, что площадь среза при увеличении угла установки ω возрастает и достигает максимума, составляющего $5,9 \text{ мм}^2$ при радиусе режущей чаши $r = 30 \text{ мм}$. При этом площадь среза $S_{cp} = f(\omega)$ ведет себя неоднозначно при увеличении радиуса режущей чаши. Зависимость имеет нелинейный

характер, экстремум которого находится в точке $r = 20 \text{ мм}$, где площадь среза равна $1,2 \text{ мм}^2$.

Зависимость шероховатости R_a от радиуса режущей чаши обратная – при увеличении радиуса режущей чаши, шероховатость уменьшается с $2,48 \text{ мкм}$ до $0,4 \text{ мкм}$, а при увеличении

угла установки ω от 0° до 30° шероховатость увеличивается с 0,4 до 1,2 мкм.

Как видно из графиков, зависимость функций здесь обратная - шероховатость уменьшается при увеличении радиуса режущей чаши, а площадь среза наоборот увеличивается.

Выводы. Планирование экспериментов позволяет, используя минимальное число опытов, выбрать именно те условия, которые оптимизируют выходные параметры. При этом исследование влияния на обработку цапфы помольной мельницы, в первую очередь, наиболее существенных факторов, не усложняя и без того трудоемкий процесс постановки экспериментов и обработки экспериментальных данных. Проанализировав экспериментальные данные и все сказанное выше о парном влиянии исследуемых факторов на функции отклика, можно сделать вывод о существовании наиболее рационального сочетания варьируемых параметров, позволяющих получить более качественную поверхность с наименьшей шероховатостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Банит Ф.Г. Механическое оборудование цементных заводов: учебник для технику-

мов промышленности строительных материалов. М.: Машиностроение, 1975. 318 с.

2. Маркова О.В. Математическая модель оптимизации обработки цилиндрических поверхностей крупногабаритного вращающегося оборудования // «Труды Госнिति». 2015. Т. 119. С. 219–224.

3. Бестужева О.В., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Дуганов В.Я. Искажения поверхности резания обрабатываемой детали в форме усеченного конуса при ротационной обработке // Технология Машиностроения. 2016. № 4. С. 9–11.

4. Горский В.Г. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики). М.: Металлургия. 1978. 112 с.

5. Асатурян В.И. Теория планирования эксперимента. М.: Радио и связь, 1983. 248 с.

6. Ерицков С.М., Жиглявский А. А. Математическая теория оптимального эксперимента: учебное пособие. М.: Наука, 1987. 320 с.

7. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Статистика, 1974. 192 с.

8. Зедгинидзе И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976. 330 с.

Bestuzheva O. V., Fedorenko M. A., Bondarenko Yu. A.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RECOVERY OF A SURFACE OF REVOLUTION OF LARGE PARTS OF INDUSTRIAL EQUIPMENT

In various industries for production of cement, lime, gypsum, ceramic products for grinding hard materials and are used rotary dryer kiln, ball tube mills and a variety of large rotating equipment. One of the main factor enhancing the performance of this equipment is its reliability depends on the quality installation work, timely repair and maintenance. To study the processing of large parts of industrial equipment designed and manufactured experimental setup that will allow you to restore the performance of units in operation. With the aim of assessing the efficiency of the proposed method of recovery of a surface of revolution large parts of the industrial equipment requires experimental investigations. In the course of the experiment it is necessary to investigate the influence of the machining parameters of rotary cutter for processing a surface of rotation of large parts of industrial equipment for various parameters. The solution to these questions will determine the proper design and preferred process parameters for maximum processing efficiency.

Key words: large rotating equipment, restoring health, a pilot study, the influence of the varied parameters.

Бестужева Ольга Васильевна, соискатель кафедры технологии машиностроения.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: bestuzheva.o@yandex.ru

Федоренко Михаил Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бондаренко Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.