

6. Лобанов, В. И. Устройство для обрушивания семян подсолнечника с предварительным их ориентированием в направляющих коробах / В. И. Лобанов, С. Ю. Бузоверов, М. Г. Желтунов. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 3 (149). – С. 161-165.

7. Лобанов, В. И. Влияние влажности и размера семян подсолнечника на процесс обрушивания / В. И. Лобанов, С. Ю. Бузоверов, М. Г. Желтунов. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 12 (158). – С. 152-156.

### References

1. Mustafaev S.K., Mkhitalyants L.A., Kornera E.P. Tekhnologiya otrasli (priemka, obrabotka i khraneniye maslichnykh semyan) / pod red. E.P. Korneroy. – Sankt-Peterburg: GIORД, 2012. – 248 s.

2. Tekhnologiya pererabotki produktsii rasteniyevodstva / N.M. Lichko i dr.; pod red. N.M. Lichko. – Moskva: Kolos, 2000. – 552 s.

3. Koshevoy E.P. Tekhnologicheskoye oborudovaniye predpriyatiy proizvodstva rastitelnykh masel:

uchebnoye posobie. – Sankt-Peterburg: GIORД, 2001. – 368 s.

4. Lobanov V.I., Sentsova T.M. K voprosu razrabotki ustroystva dlya razrusheniya obolochki semyan podsolnechnika // Molodezh – Barnaulu: mater. XV gorodskoy nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh [Elektronnyy resurs].

5. Lobanov V.I., Minakov I.S., Sukhov A.A. Razrabotka ustroystva dlya obrushivaniya semyan podsolnechnika s predvaritelnoy orientatsiyey // Molodezh – Barnaulu: mater. XV gorodskoy nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh [Elektronnyy resurs].

6. Lobanov V.I., Buzoverov S.Yu., Zheltunov M.G. Ustroystvo dlya obrushivaniya semyan podsolnechnika s predvaritelnyim ikh orientirovaniem v napravlyayushchikh korobakh // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 3 (149). – S. 161-165.

7. Lobanov V.I., Buzoverov S.Yu., Zheltunov M.G. Vliyaniye vlazhnosti i razmera semyan podsolnechnika na protsess obrushivaniya // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 12 (158). – S. 152-156.



УДК 621.922.02

С.В. Иванов, Н.С. Алексеев, В.А. Капорин  
S.V. Ivanov, N.S. Alekseyev, V.A. Kaporin

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ МИКРОПОРИСТОГО ПОКРЫТИЯ ВОССТАНОВЛЕННОЙ ДЕТАЛИ

### THE INFLUENCE OF GRINDING MODES AND ABRASIVE TOOL CHARACTERISTICS ON THE CUTTING FORCE COMPONENTS OF THE MICROPOROUS COATING OF REPAIRED PART

**Ключевые слова:** микропористое покрытие, восстановленная деталь, абразивная обработка, шлифовальный круг, сила резания, система станок-приспособление-инструмент-деталь, режимы обработки, оптимизация, математическая модель.

**Keywords:** microporous coating, repaired part, abrasive treatment, grinding wheel, cutting force, machine-device-tool-part system, grinding modes, optimization, mathematical model.

Износостойкие микропористые покрытия на никелевой основе относятся к группе труднообрабатываемых материалов, абразивная обработка которых сопряжена со значительными трудностями. Основные причины плохой обрабатываемости этих покрытий шлифованием кроются в быстрой потере режущих свойств абразивных кругов вследствие их затупления и активного налипания частиц покрытия на рабочую поверхность инструмента. Предлагается путь повышения эффективности процесса чернового шлифования микропористых покрытий за счёт поиска оптимальных значений технологических факторов, обеспечивающих максимальную стойкость абразивного инструмента и низкие энергозатраты. Представлены результаты исследования режущей способности кругов из электрокорунда при круглом наружном врезном шлифовании микропористых покрытий. Исследована зависимость радиальной  $P_y$  и тангенциальной  $P_z$  составляющих силы резания от режимных факторов: скоростей резания, вращения детали и радиальной подачи, а также от элементов характеристики кругов: размера зернистости и степени твёрдости. Излагаются методика и результаты исследований процесса врезного шлифования микропористых покрытий с использованием активного планируемого эксперимента. В качестве плана эксперимента использовался дробно-факторный эксперимент, проведенный по схеме  $2^{5-2}$ . Приводятся уровни технологических факторов, значения уровней и интервалы их варьирования. Дано обоснование уровней факторов. В статье освещены условия проведения экспериментов: обоснован выбор типоразмера и характеристики шлифовальных кругов, приводится химический состав обрабатываемых плазменно-напылённых покрытий и размеры образцов. Выполнен статистический анализ и получены математические модели, отражающие влияние на поверхности отклика (составляющих  $P_y$  и  $P_z$  силы шлифования) режимов резания и элементов характеристики кругов. Приводятся анализ полученных математических моделей и технологическая интерпретация полученных результатов. Показано дальнейшее направление использования полученных моделей для решения задачи оптимизации режимов резания и элементов характеристики абразив-

ного инструмента по критерию максимизации стойкости шлифовальных кругов.

Wear-resistant microporous nickel-based coatings belong to the group of hard-to-machine materials whose abrasive treatment is associated with considerable difficulties. The main reasons for poor machinability of these coatings by grinding lie in the rapid loss of the cutting properties of abrasive wheels due to their blunting and active sticking of coating particles onto the working surface of a tool. A way of improving the grinding performance of microporous coatings is proposed by finding optimal values of processing factors that ensure maximum durability of the abrasive tool and low energy costs. The paper presents the findings of a study of the cutting ability of wheels made of electrocorundum in case of a cylindrical infeed grinding of microporous coatings. The dependence of the radial  $P_y$  and tangential  $P_z$  components of the cutting force on the operational factors: cutting speeds, part rotation and radial feed, as well as on the elements of the performance of wheels: grain size and degree of hardness, was studied. The methodology and research findings of the process of cylindrical infeed grinding of microporous coatings using an active planned experiment are described. For design of the experiment, a fractional factorial design was used which was carried out according to the scheme  $2^{5-2}$ . The levels of processing factors, the values of the levels and the intervals of their variation are given. The substantiation of the factor levels is presented. The paper highlights the conditions for conducting experiments: the choice of size and performance of grinding wheels is justified, the chemical composition of the plasma sprayed coatings and sample sizes are given. A statistical analysis was carried out and mathematical models were obtained reflecting the effect on the surfaces of the response (components of  $P_y$  and  $P_z$  of the grinding force) of cutting conditions and performance of wheels. The analysis of the obtained mathematical models and the technological interpretation of the results are given. The further direction of using the obtained models for solving the problem of optimization of cutting modes performance of an abrasive tool according to the criterion of maximizing the durability of grinding wheels is shown.

**Иванов Сергей Владимирович**, инженер, Рубцовский индустриальный институт (филиал), Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Тел.: (38557) 5-98-76. E-mail: vitsal\_72@mail.ru.

**Алексеев Николай Сергеевич**, к.т.н., доцент, Рубцовский индустриальный институт (филиал), Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Тел.: (38557) 5-98-76. E-mail: tm@rubinst.ru.

**Капорин Владимир Анатольевич**, инженер, Рубцовский индустриальный институт (филиал), Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Тел.: (38557) 5-98-76. E-mail: kaporinvl@mail.ru.

**Ivanov Sergey Vladimirovich**, Engineer, Rubtsovsk Industrial Institute (Branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. Ph.: (38557) 5-98-76. E-mail: vitsal\_72@mail.ru.

**Alekseyev Nikolay Sergeevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Rubtsovsk Industrial Institute (Branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. Ph.: (38557) 5-98-76. E-mail: tm@rubinst.ru.

**Kaporin Vladimir Anatolyevich**, Engineer, Rubtsovsk Industrial Institute (Branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. Ph.: (38557) 5-98-76. E-mail: kaporinvl@mail.ru.

### Введение

В настоящее время агрегатный ремонт является основным методом восстановления работоспособности сельскохозяйственных машин на

предприятиях, в полевых условиях, дилерских центрах [1]. Однако для ряда металлоемких, ответственных и дорогих узлов и агрегатов машин (ДВС, ТНВД, трансмиссия, корпусные детали и

др.) по-прежнему используют традиционную, «классическую» технологию ремонта – с разборкой агрегата, дефектовкой, поиском и установлением изношенной детали (сопряжения) и ее восстановлением [2]. В современных автотракторных двигателях такими деталями являются коленчатые и распределительные валы, шейки которых работают в условиях граничной смазки, подвергаются абразивному износу, деформации, что приводит к изменению их сопрягаемых размеров, формы, шероховатости [3].

Для восстановления шеек коленчатых валов в современном сервисном и ремонтном производстве используют микропористые покрытия из порошков сплавов на никелевой основе (далее просто покрытия), которые обеспечивают им высокую износостойкость, долговечность и надежность. При их нанесении широко применяют технологии электроконтактной приварки металлических порошков (ленты) [4], газотермического напыления (плазменного, газопламенного, детонационного), ТВЧ-наплавки и ХТО [5] и др. В ряде случаев такие покрытия и технологии являются экономически, более эффективными по сравнению с другими материалами и способами восстановления. Это особенно ощутимо при ремонте деталей с малыми предельными износами и высокими требованиями к качеству сопрягаемых поверхностей.

Окончательная размерная обработка покрытий чаще всего производится круглым врезным шлифованием. При этом используют те же режимы и инструмент, что и при обработке компактных материалов – сталей и чугунов. Однако особенности строения и физико-механических свойств микропористых покрытий (высокая пористость, наличие оксидов и шлаков, повышенная адгезия и др.) создают трудности при их абразивной обработке, которые обусловлены интенсивным «засаливанием» шлифовальных кругов (ШК). Как следствие, это приводит к снижению стойкости абразивного инструмента (АИ), производительности операции и повышению затрат на восстановление детали.

Ранее, в работах [3, 6], было теоретически установлено, что доминирующее влияние на «засаливание» кругов оказывает радиальная  $P_y$  и тангенциальная  $P_z$  составляющие силы резания. Расчет величин этих составляющих для различных условий шлифования покрытий показал, что основными факторами, определяющими величину  $P_y$ ,  $P_z$ , являются режимы обработки и характеристики АИ. Следовательно, для получения минимальных значений составляющих силы резания,

обеспечения контролируемого съема материала, продления срока службы АИ и обеспечения высоких экономических характеристик восстановления необходимо установить соответствующие оптимальные режимы резания и характеристики АИ, математически описав (смоделировав) и оптимизировав исследуемый процесс.

В составе оптимальной математической модели шлифования, с учетом самоорганизующейся при этом системы станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД), должны присутствовать как целевая функция  $T$ -стойкость (долговечность) АИ, которую в нашем случае необходимо максимизировать, так и функции технологических (операционных) параметров – составляющих сил резания  $P_y$ ,  $P_z$ , а также ограничения по параметрам абразивной обработки, производительности, износу ШК, режимам резания, экономическим и др.).

В этом случае такая математическая модель будет иметь вид функционала [7]:

$$T = F(X_i) \rightarrow \max i = 1, \dots, k$$

$$\begin{cases} G_1(X_i) \leq (=, \geq) b_1 \\ \dots \\ G_m(X_i) \leq (=, \geq) b_m \end{cases}, \quad (1)$$

где  $T$  – стойкость (долговечность) ШК (критерий оптимизации или целевая функция);

$X_i$  – технологические факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на стойкость режущего инструмента, а также на составляющие  $P_y$  и  $P_z$  силы шлифования;

$G_j(X_i)$  – зависимости, отражающие влияние технологических факторов на различные показатели процесса шлифования;

$b_j$  – приемлемые значения параметров и их ограничения для достижения максимума функции  $T$ .

Корректное решение модели (1) возможно лишь в том случае, когда полностью идентифицирован вид как целевой функции –  $F(X_i)$ , так и функций ограничений  $G_j(X_i)$ .

В работах [8, 9] экспериментально исследовалось только отдельное влияние технологических факторов на различные характеристики системы СПИД (режимы резания, параметры АИ, параметры напыленного никелевого покрытия и др.), возникающей при круглом врезном шлифовании микропористых покрытий.

В работе решается задача идентификации двух функций ограничений модели (1): зависимости радиальной  $P_y$  и тангенциальной  $P_z$  составляющих силы резания от технологических факторов, когда их действие проявляется совместно.

В связи с этим объектом исследования были выбраны указанные составляющие силы резания, возникающей при круглом врезном шлифовании микропористого покрытия. Предметом исследования стали зависимости указанных составляющих силы резания от различных факторов.

В качестве технологических факторов системы СПИД для круглого врезного шлифования были выбраны: скорость резания –  $V_p$ , скорость вращения детали –  $V_d$ , скорость радиальной подачи –  $S_{рад}$ , а также характеристики АИ: зернистость –  $N_z$  и твердость –  $N_m$ .

**Цель работы:** установление методами факторного эксперимента вида функциональных зависимостей основных составляющих силы резания  $P_y$ ,  $P_z$  при шлифовании микропористого покрытия от технологических факторов, когда режимы шлифования и характеристики абразивного инструмента воздействуют на объект одновременно.

#### Методика экспериментальных исследований

Эксперименты проводили на круглошлифовальном станке-полуавтомате 3М152МВФ2 при обработке образцов с плазменно-напыленными покрытиями из порошкового материала марки ПН85Ю15 в трехкратной повторности ( $n = 3$ ).

Характеристики исследуемого микропористого покрытия: химический состав, мас. %: Ni – 55,7; Al – 15,3; O – 16,0; C – 13,0; твердость – 25-30 HRCэ; пористость – 8-10%; толщина – 1-3 мм.

Образцы представляли собой втулки из стали 45 диаметром  $60 \pm 0,1$  мм, высотой  $32 \pm 0,1$  мм, имитирующие шатунные шейки коленчатого вала двигателя 3М3-53.

В качестве АИ использовали ШК из электрокорунда белого марки 24А, 6-го типа структуры на керамической связке (V) двух типов зернистости (F90) и (F36) и двух степеней твердости: средней (L) и твердой (R). Степень твердости переводили в количественный параметр по глубине абразивной лунки, полученной на специальном пескоструйном приборе, где степени твердости R отвечает измеренная глубина лунки в 1,75 мм, а L – глубина лунки в 4,55 мм.

На основе предварительных экспериментов, с учётом рекомендаций [9] и возможностей станка,

исследуемые параметры (факторы) задавали на следующих уровнях значений: скорость резания  $V_p$  – 10 и 50 м/с, скорость вращения детали  $V_d$  – 10 и 40 м/мин., скорость радиальной подачи  $S_{рад}$  – 0,24 и 0,48 мм/мин., зернистость ШК – 160 и 500 мкм, твердость – 1,75 и 4,55 мм.

Для измерения радиальной  $P_y$  и тангенциальной  $P_z$  составляющих силы резания на специальную оправку-приспособление станка монтировались центры с калиброванными тензодатчиками SBA-100 электронных весов CAS. В качестве измеренного значения силы принимали ее максимальное значение, усредненное в серии параллельных опытов. Максимальная длительность каждого динамометрического опыта равнялась периоду стойкости круга  $T$ , который определялся по его «засаливанию» и появлению на обрабатываемой поверхности шлифовочных дефектов (прижогов, огранки). Финишную обработку образцов осуществляли выхаживанием по стандартной программе станка.

В качестве СОЖ использовали 3%-ный водный раствор эмульсола ЭПМ-1шп [10], подаваемый свободным поливом в зону шлифования струей с расходом  $Q$  – 12-15 л/мин. Правка рабочей поверхности ШК (периферии) между опытами осуществлялась, как и в предыдущих работах [11], алмазным карандашом С2 (типоразмер 3308-0054, ГОСТ 607-80) методом обтачивания.

#### Результаты экспериментов и их обсуждение

Выбор белого электрокорунда марки 24А для изготовления ШК и абразивной обработки микропористых покрытий был основан на результатах экспериментов, приведенных в [12], в которых показаны более высокие эксплуатационные возможности по сравнению другими материалами, например, зеленым карбидом кремния.

Нижний предел зернистости ШК F90 (160 мкм) обусловлен тем, что инструмент с такой зернистостью обладает более высокой стойкостью и обеспечивает значительную производительность при низкой шероховатости поверхности. Дальнейшее снижение размера зернистости кругов приводит к росту интенсивности их износа. Верхний предел зернистости F36 (500 мкм) продиктован тем, что дальнейшее повышение размера абразивных зерен вызывает интенсивное засаливание кругов, вследствие чего снижаются стойкость инструмента и производительность обработки, усиливаются вибрации в технологической системе [3].



В работе [3] также было показано, что влияние твердости АИ на его износ и затупление состоит в том, что она во многом определяет режимы его работы: равномерное самозатачивание, комбинированный режим (частичное самозатачивание) и преимущественное затупление. Там же установлено, что при шлифовании исследуемых покрытий наиболее благоприятным режимом работы кругов является комбинированный режим, который наиболее легко может быть обеспечен при использовании ШК с твердостью от среднемягкой L до твердой R.

При шлифовании микропористых слоев наибольшей режущей способностью обладают круги средних (5-я, 6-я и 7-я) номеров структур [3]. Поэтому для настоящих исследований были специально изготовлены круги 6-й структуры.

В качестве связующего предпочтение было отдано керамической связке в связи с тем, что ранее нами в [13] при шлифовании микропористых покрытий ШК на этой связке были отмечены более высокие технико-экономические показатели по сравнению с кругами на обычно применяемой бакелитовой связке.

Учитывая большое количество выбранных факторов, влияющих на составляющие  $P_y$  и  $P_z$  силы резания, для сокращения времени и уменьшения числа экспериментов использовали метод ДФЭ, реализованный по плану одной из реплик плана ПФЭ  $2^5$ . Теоретически использование, например, четверть-реплик плана  $2^{5-2}$  (в предположении линейности искомой функции), позволяет проводить не 32 (!), а только 8 опытов [14].

Действительные и кодированные значения, а также уровни факторов для реализованного в работе ДФЭ по плану  $2^{5-2}$  приведены в таблице 1.

Искомые функциональные зависимости составляющих силы резания от исследованных факторов можно описывать (моделировать) линейными регрессионными уравнениями вида [14]:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5. \quad (2)$$

Коэффициенты при переменных в формуле (2) указывают на силу влияния факторов: чем они больше, тем большее влияние оказывает исследуемый фактор на величину целевой функции  $Y$ .

Матрица планирования опытов для реализованного в работе ДФЭ  $2^{5-2}$ , приведенная в таблице 2, хотя и не оптимальна, но сгенерирована исходя из общих технологических соображений, а также на основе принципа ортогональности [9].

Проведенные эксперименты показали, что в установленном диапазоне изменения технологических факторов, при обработке микропористого покрытия образцов в 8 опытах, развиваются следующие максимальные радиальная  $P_y$  и тангенциальная  $P_z$  составляющие силы резания:  $(80 \dots 90) \pm 10$  и  $(40 \dots 50) \pm 5$  Н соответственно.

Полученные экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики [15]. Так, на первом этапе для проверки однородности выборочных дисперсий использовали G-критерий Кохрена, который показал, что дисперсии однородны. Это свидетельствует о 95%-ной гарантии повторяемости полученных результатов в серии параллельных опытов.

Таблица 1

Факторы их значения и уровни для реализованного ДФЭ  $2^{5-2}$

Фактор	Код	Уровень факторов			Интервал варьирования
		нижний (-)	основной (0)	верхний (+)	
Режимы шлифования					
$V_p$ – скорость резания, м/с	$X_1$	10	30	50	25
$V_d$ – скорость вращения детали, м/мин.	$X_2$	10	25	40	15
$S_{рад}$ – скорость радиальной подачи, мм/мин.	$X_3$	0,12	0,18	0,24	0,06
Характеристики абразивного инструмента					
$N_3$ – зернистость, мкм	$X_4$	160	330	500	170
$N_m$ – твердость, мм	$X_5$	1,75	3,15	4,55	1,4

Примечание. Твердость шлифовальных кругов определялась пескоструйным прибором по глубине лунки. Глубина лунки 1,75 мм соответствует степени твердости R (Т1); глубине лунки 3,15 мм – степени твердости O (СТ1); глубине лунки 4,55 мм – степени твердости L (СМ2).

Таблица 2

**Матрица планирования  
для реализованного ДФЭ 2<sup>5-2</sup>**

Опыт	Факторы, уровни				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	-	-	-	+	+
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	+
4	+	+	-	+	-
5	-	-	+	+	-
6	+	-	+	-	+
7	-	+	+	-	-
8	+	+	+	+	+

Примечание. (-) – нижний уровень значения фактора; (+) – верхний уровень.

На втором этапе были вычислены коэффициенты регрессии уравнения (2) для каждой составляющей силы резания и дана оценка их значимости по  $t$ -критерию Стьюдента. Незначимые коэффициенты были затем отброшены.

Окончательно проверку адекватности полученных регрессионных математических моделей выполняли по  $F$ -критерию Фишера. Оказалось, что все математические модели являются адекватными при  $P = 0,95$  и  $n = 3$ .

В итоге для радиальной составляющей силы шлифования  $P_y$  была получена следующая линейная математическая модель:

$$P_y = 126,7 - 11,3X_2 + 45,8X_3 - 7,3X_4. \quad (3)$$

Предварительный анализ модели (3) показывает, что:

- на радиальную составляющую силы резания  $P_y$  наибольшее влияние оказывает скорость радиальной подачи (фактор  $X_3$ ), действие скорости вращения детали (фактор  $X_2$ ) и зернистости (фактор  $X_4$ ) значительно слабее;

- снижение величины  $P_y$  наблюдается при уменьшении фактора  $X_3$  и при увеличении факторов  $X_2$  и  $X_4$ .

Таким образом, для снижения радиальной составляющей силы резания  $P_y$  при круглом наружном врезном шлифовании микропористых покрытий с меньшей скоростью радиальной подачи и большей скоростью вращения детали следует выбирать АИ с большей зернистостью.

Математическая модель для тангенциальной составляющей силы шлифования  $P_z$  также линейна и имеет вид:

$$P_z = 79,6 - 17,6X_1 + 26,6X_3 - 8,6X_5. \quad (4)$$

Рассматривая уравнение (4), следует отметить:

- наибольшее влияние на параметр выхода оказывают скорость резания (фактор  $X_1$ ) и скорость радиальной подачи (фактор  $X_3$ ), действие твердости (фактор  $X_5$ ) значительно слабее;

- факторы  $X_2$  и  $X_4$  не оказывают существенного влияния на величину  $P_z$ ;

- тангенциальная составляющая силы шлифования  $P_z$  уменьшается с ростом факторов  $X_1$  и  $X_5$  (твердость снижается) и снижением фактора  $X_3$ .

То есть, для снижения тангенциальной составляющей силы шлифования  $P_z$  при круглом наружном врезном шлифовании микропористых покрытий с большей скоростью резания и меньшей скоростью радиальной подачи нужно использовать АИ с меньшей твердостью.

Установленные закономерности теоретически можно объяснить следующим образом. Так, при шлифовании покрытий на повышенных скоростях резания толщина стружки, приходящаяся на отдельное зерно, уменьшается [16], значит, и снижается тангенциальная составляющая силы резания  $P_z$  (4). С ростом же скорости радиальной подачи толщина стружки возрастает, значит, и увеличиваются обе (радиальная и тангенциальная) составляющие силы резания (3), (4).

Повышение зернистости ШК, как было показано в [16], также способствует увеличению силы резания, вследствие чего абразивные зерна быстрее затупляются, круги теряют режущую способность и объем снятого металла снижается (3). При уменьшении твердости ШК абразивные зерна слабее удерживаются связкой и при сколь угодно значительном увеличении сил резания вырываются с его поверхности – происходит самозатачивание АИ и повышение его режущей способности (4).

Таким образом, полученные регрессионные модели подтвердили известные из литературы теоретические зависимости [16], а также полученные ранее авторами экспериментальные результаты [8, 12], в которых исследованные факторы действовали на систему СПИД, возникающую при круглом врезном шлифовании микропористых покрытий, отдельно.

Уравнения (3, 4) позволяют по допустимым (оптимальным) значениям составляющих силы

резания выбрать оптимальные значения режимов шлифования и характеристику АИ. Для удобства применения в технологических расчетах указанные уравнения в натуральных (декодированных) факторах примут следующий вид:  
 $P_y = 3,44 - 0,75V_d + 763,02 S_{рад} - 0,04N_3$ ;  
 $P_z = 45,71 - 0,88V_p + 442,55 S_{рад} - 6,12N_m$ .

### Выводы

1. Проведенный по плану  $2^{5-2}$  ДФЭ показал, что целевые функции зависимостей радиальной  $P_y$  и тангенциальной  $P_z$  составляющих силы резания от основных технологических факторов (скорость резания, скорость вращения детали, скорость радиальной подачи, зернистость и твердость ШК) системы СПИД для круглого врезного шлифования микропористого покрытия могут быть достоверно описаны линейными регрессионными уравнениями, без парных, тройных и более сложных взаимодействий факторов.

2. Математические модели составляющих силы шлифования имеют вид ( $P = 0,95$ ;  $n = 3$ ):  
 $P_y = 3,44 - 0,75V_d + 763,02 S_{рад} - 0,04N_3$ ;  
 $P_z = 45,71 - 0,88V_p + 442,55 S_{рад} - 6,12N_m$ .

3. Полученные уравнения учитывают совместное действие факторов и позволяют по допустимым (заданным) значениям составляющих силы резания выбирать оптимальные значения режимов шлифования и характеристики инструмента.

В дальнейшем их предполагается использовать в качестве ограничений, при оптимизации процесса шлифования микропористых покрытий из материала ПН85Ю15, для обеспечения максимальной долговечности шлифовальных кругов.

### Библиографический список

1. Гаврилов, К. Л. Тракторы и сельскохозяйственные машины иностранного и отечественного производства: устройство, диагностика и ремонт / К. Л. Гаврилов. – Пермь: Звезда, 2017. – 544 с. – Текст: непосредственный.

2. Карагодин, В. И. Ремонт автомобилей и двигателей / В. И. Карагодин, Н. Н. Митрохин. – Москва: Академия, 2017. – 496 с. – Текст: непосредственный.

3. Алексеев, Н. С. Абразивная черновая обработка микропористых покрытий восстановленных деталей: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук:

05.20.03 / Алексеев Н. С. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1987. – 20 с. – Текст: непосредственный.

4. Черноиванов, В. И. Особенности изнашивания деталей сельхозмашин, упрочненных композиционными боридными покрытиями  $Fe_nB-Fe-B$  / В. И. Черноиванов, В. П. Лялякин, В. Ф. Аулов [и др.]. – Текст: непосредственный // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 2. – С. 174-180.

5. Черноиванов, В. И. Организация и технология восстановления деталей машин / В. И. Черноиванов, В. П. Лялякин. – Москва: ГОСНИТИ, 2003. – 488 с. – Текст: непосредственный.

6. Алексеев, Н. С. Расчет силы резания при шлифовании микропористых покрытий / Н. С. Алексеев. – Текст: непосредственный // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвузовский сборник научных трудов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2001. – С. 165-170.

7. Гришин, Р. Г. Оптимизация режимов врезного шлифования колец прецизионных подшипников из закаленных коррозионностойких высокоуглеродистых сталей / Р. Г. Гришин. – Текст: непосредственный // Высокие технологии в машиностроении: материалы Всероссийской научно-технической интернет-конференции с международным участием. – Самара: СамГТУ, 2011. – С. 85-91.

8. Алексеев, Н. С. Влияние режимов резания на свойства шлифовальных кругов при обработке микропористых покрытий / Н. С. Алексеев, В. А. Капорин, С. В. Иванов. – Текст: непосредственный // Сельский механизатор. – 2018. – № 3. – С. 36-38.

9. Неклюдов, В. И. Выбор режущего инструмента и режимов при точении и шлифовании покрытия ПН85Ю15 / В. И. Неклюдов. – Текст: непосредственный // Трение износ смазка. – 2003. – Т. 5, № 4. – С. 65-69.

10. Yamaguchi, K., Horaguchi, I., Sato, Y. (1998). Grinding with directionally aligned SiC whisker wheel – Loading-free grinding. *Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology - PRECIS ENG.* 22: 59-65. 10.1016/S0141-6359(97)00087-1.

11. Friemuth Th., Lierse T. (1998). Electrocontact discharge dressing (ECDD) of diamond wheels. *Int. Diamond Rev.* 58 (2): 57-61.

12. Алексеев, Н. С. Выбор материала круга при шлифовании плазменных покрытий /

Н. С. Алексеев, В. А. Капорин, С. В. Иванов. – Текст: непосредственный // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 117. – С. 211-219.

13. Алексеев, Н. С. Сравнительный анализ работоспособности кругов на керамической и бакелитовой связках / Н. С. Алексеев, В. А. Капорин, С. В. Иванов. – Текст: непосредственный // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 2 (71). – С. 21-27.

14. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 280 с. – Текст: непосредственный.

15. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – Москва: Высшая школа, 2000. – 480 с. – Текст: непосредственный.

16. Маслов, Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – Москва: Машиностроение, 1974. – 319 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. Gavrilov K.L. Traktory i selskokhozyaystvennye mashiny inostrannogo i otechestvennogo proizvodstva: ustroystvo, diagnostika i remont. – Perm: Zvezda, 2017. – 544 s.

2. Karagodin V.I., Mitrokhin N.N. Remont avtomobiley i dvigateley. – Moskva: Akademiya, 2017. – 496 s.

3. Alekseev N.S. Abrazivnaya chernovaya obrabotka mikroporistykh pokrytiy vosstanovlennykh detaley: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk (05.20.03). – Chelyabinsk: ChIMESKh, 1987. – 20 s.

4. Chernoiyanov V.I., Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V. i dr. Osobennosti iznashivaniya detaley selkhoz mashin, uprochnennykh kompozitsionnymi boridnymi pokrytiyami FenB-Fe-B // Trenie i iznos. – 2015. – Т. 36. – No. 2. – С. 174-180.

5. Chernoiyanov V.I., Lyalyakin V.P. Organizatsiya i tekhnologiya vosstanovleniya detaley mashin. – Moskva: GOSNITI, 2003. – 488 s.

6. Alekseev N.S. Raschet sily rezaniya pri shlifovanii mikroporistykh pokrytiy // Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov. Mezhvuz. sbornik nauchn. tr-

dov. – Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 2001. – S. 165-170.

7. Grishin R.G. Optimizatsiya rezhimov vreznogo shlifovaniya kolets pretsionnykh podshipnikov iz zakalennykh korroziionnostoykikh vysokouglerodistykh staley // Vysokie tekhnologii v mashinostroenii. Mater. Vseross. nauch.-tekhn. internet-konferentsii s mezhdunar. uchastiem. – Samara: SamGTU, 2011. – С. 85-91.

8. Alekseev N.S., Kaparin V.A., Ivanov S.V. Vliyanie rezhimov rezaniya na svoystva shlifovalnykh krugov pri obrabotke mikroporistykh pokrytiy // Selskiy mekhanizator. – 2018. – No. 3. – С. 36-38.

9. Neklyudov V.I. Vybor rezhushchego instrumenta i rezhimov pri tochenii i shlifovanii pokrytiya PN85Yu15 // Trenie iznos smazka. – 2003. – Т. 5. – No. 4. – С. 65-69.

10. Yamaguchi, K., Horaguchi, I., Sato, Y. (1998). Grinding with directionally aligned SiC whisker wheel – Loading-free grinding. *Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology - PRECIS ENG.* 22: 59-65. 10.1016/S0141-6359(97)00087-1.

11. Friemuth Th., Lierse T. (1998). Electrocontact discharge dressing (ECDD) of diamond wheels. *Int. Diamond Rev.* 58 (2): 57-61.

12. Alekseev N.S., Kaparin V.A., Ivanov S.V. Vybor materiala kruga pri shlifovanii plazmennyykh pokrytiy // Trudy GOSNITI. – 2014. – Т. 117. – С. 211-219.

13. Alekseev N.S., Kaparin V.A., Ivanov S.V. Sravnitelnyy analiz rabotosposobnosti krugov na keramicheskoy i bakelitovoy svyazkakh // Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty). – 2016. – No. 2 (71). – С. 21-27.

14. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy. – Moskva: Nauka, 1976. – 280 s.

15. Venttsel E.S., Ovcharov L.A. Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya. – Moskva: Vysshaya shkola, 2000. – 480 s.

16. Maslov E.N. Teoriya shlifovaniya materialov. – Moskva: Mashinostroenie, 1974. – 319 s.

