

*Ефремов В.В., канд. техн. наук, доц.,
Кутовой С.С., д-р техн. наук, проф.,
Агошков А.В., адъюнкт*

*Рязанское высшее воздушно – десантное командное училище
им. генерала армии В.Ф. Маргелова*

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

militantfish@yandex.ru

Оптимизация мероприятий капитального ремонта позволит значительно повысить ресурс как отдельных узлов и агрегатов, так и жизненный цикл автомобиля в целом. Коленчатый вал – одна из самых сложных и дорогостоящих деталей конструкции автомобиля. Как правило, его восстановление происходит путем перешлифовки под очередной ремонтный размер. Однако, существует перспективная технология восстановления (методом плазменного напыления), которая не получила распространения из-за отсутствия рекомендаций по механической обработке (а именно шлифованию) напыленных покрытий. В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования по управлению показателями качества восстановленной поверхности деталей при шлифовании с целью получения оптимальных значений показателей качества обрабатываемой поверхности.

***Ключевые слова:** экспериментальные данные, факторы, шлифование, поверхность, зависимость.*

На практике функциональный вид связи между какими-то величинами, когда любому изменению одного параметра соответствует строго определенное изменение другого, встречается достаточно редко. Чаще приходится иметь дело с наличием стохастической связи между переменными. Этот вид связей характеризуются тем, что переменная реагирует на изменение другой переменной изменением своего закона распределения. В результате зависимая переменная принимает не одно конкретное значение, а несколько из возможного множества значений. При повторении испытания будут получаться другие значения функции отклика. Причем влияние отдельных случайных факторов может быть достаточно мало, но в совокупности они могут существенно влиять на результаты эксперимента [2, 4, 5].

При поиске стохастической связи с помощью статистического анализа одной из основных задач исследования является выбор факторов (x_i), определяющих функцию отклика (y) (свойство объекта). В нашем случае откликом является шероховатость поверхности R_a , которая контролируется при варьировании величин факторов.

В ряде работ процесс формирования поверхности детали, имеющей покрытие, связывается с протеканием нескольких процессов. К ним авторы относят процессы резания, отделение частиц в зоне резания и отделение частиц с обработанной поверхности. В нашей работе речь пойдет о восстановленных поверхностях мето-

дом плазменного напыления. К вышеперечисленным процессам также можно добавить процессы разрушения зерен и местного разрушения пластичной основы шлифовального круга. Механизм формирования микрорельефа при шлифовании напыленных покрытий связывается с процессом образования и развития микротрещин вследствие реализации высоких напряжений в зонах контакта с инструментом. Поры и включения, имеющиеся в покрытии, являются концентраторами напряжений. Именно от них начинается развитие микротрещин, которые проходят от одной поры к другой на некоторую глубину в тело покрытия. Процесс микроскалывания формирует шероховатость поверхности, копируя профиль инструмента, а распространение трещин за инструментом приводит к выпадению отдельных кусков покрытия и ухудшает показатели шероховатости.

Ранее авторами при определении процессов формирования поверхности покрытия исследовались различные факторы. К ним были отнесены продольная и поперечные подачи, твердость материала покрытия, величина предварительного пластического обжатия покрытия и др. В рамках данной работы рассматривается этап финишной обработки деталей с применением выхаживания, то есть шлифование без поперечной подачи. Последнее обстоятельство значительно уменьшает уровни сил резания, реализующихся в зонах контакта инструмента с покрытием. Тем не менее, при контакте шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью про-

цессы выкрашивания покрытия вследствие распространения микротрещин будут иметь место. И чем больше таких контактов будет происходить, тем сильнее будет выкрашиваться поверхность покрытия. Кроме того с увеличением количества проходов ухудшается состояние шлифовального круга вследствие его засаливания продуктами износа детали и самого инструмента, что также сказывается на формировании профиля детали. Таким образом, одним из факторов, влияющих на формирование шероховатости покрытия в процессе обработки, выступает количество проходов при выхаживании.

Обычно величина усилия резания связывается с такими параметрами, как поперечная подача, скорость резания, температура. При таком подходе при нулевой поперечной подаче усилие резания будет равно нулю. При выхаживании, будет происходить случайный контакт отдельных зерен с неровностями поверхности. В контактных задачах максимальные уровни возникающих напряжений определяются величиной давления и реализуются в точке с амплитудным значением давления. В этом случае одним из факторов, влияющих на уровни реализующихся усилий, будет выступать площадь контакта инструмента и поверхности. Для иллюстрации на рисунке 1 показан контакт единичного зерна призматической формы квадратного сечения (характерный размер d – диаметр зерна). По высоте зерна (в той части, где оно заделано в шлифовальный круг – размер h) давление распределено линейно. Оно имеет максимальное значение q_0 на краю и равно нулю в глубине заделки, то есть $q = q_0 \times (1 - k \times z)$. Здесь коэффициент $k = 1/h$.

При таком распределении усилие P и максимальное давление q_0 в зоне контакта связаны соотношением:

$$P = 0,5 \times q_0 \times d \times h.$$

То есть давление в зоне контакта тем меньше, чем больше размер зерна. Учитывая то, что оба размера зерна связаны между собой (кристалл правильной формы) можно предположить, что эта зависимость даже не линейная, а второго порядка.

К аналогичному выводу можно придти, рассматривая другие виды распределения давления, например, распределение по углу в случае не призматического поперечного сечения зерна, а круглого.

Из общетехнических соображений, которые изложены в различной справочной литературе по шлифованию, вытекает, что укрупнение зерна приведет к увеличению шероховатости. Та-

ким образом, видна зависимость параметра шероховатости R_a от размера зерна.

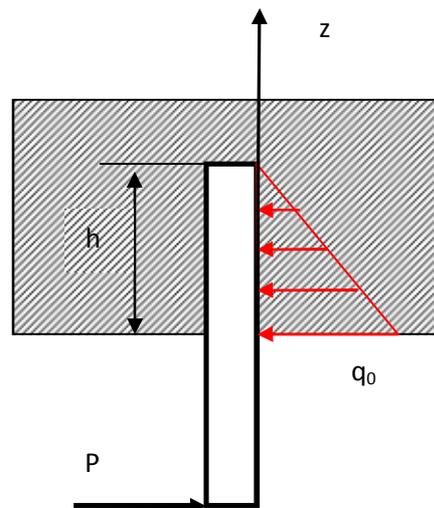


Рис. 1. Распределение давления в зоне контакта

С целью определения результатов исследования по управлению показателями качества восстановленной поверхности деталей при шлифовании была проведена серия экспериментов, в которых варьировались зернистость шлифовального круга и количество проходов.

Согласно ГОСТ 3647-80 [3] размер зерна шлифовальных материалов изменяется в достаточно широком диапазоне – от 3 мкм до 2000 мкм. Для анализа возможной связи размера зерна с шероховатостью поверхности покрытия в рамках данной диссертационной работы предлагается ограничиться диапазоном размера зерна от 82 мкм до 1470 мкм, который применялся при операции выхаживания. Также, исходя из опыта шлифовки пористых покрытий, для корреляционного анализа предлагается ограничить число проходов при выхаживании в пределах от 4 до 6.

Результаты экспериментальных исследований шероховатости и уровни варьирования зернистости для различного числа проходов представлены в таблице 1.

При статистическом анализе стохастических связей могут быть поставлены следующие задачи [2, 6, 7]:

- исследование наличия взаимосвязей между отдельными группами переменных (корреляционный анализ);
- установление аналитических зависимостей между переменными, носящими количественный характер (регрессионный анализ);
- установление степени влияния переменных, носящих качественный характер, на функцию отклика (дисперсионный анализ).

В нашем случае имеются ряды переменных, имеющих численное выражение. Поэтому статистическая обработка экспериментальных данных, представленных в таблице 1, будет проводиться с помощью регрессионного и корреляционного анализов. Математический аппарат, с помощью которого можно осуществить поиск

стохастических связей, в настоящее время заложен в различных программных пакетах. В рамках данной диссертационной работы используется программа Sigma Plot (версия 11). В ней реализован метод наименьших квадратов при подборе различного вида функциональных зависимостей.

Таблица 1

Результаты по определению шероховатости при операции выхаживания

Размер зерна, мкм	Шероховатость R_a , мкм		
	Опыт №1	Опыт №2	Опыт №3
Количество проходов $x_2 = 4$			
82	0,26	0,26	0,25
109	0,26	0,26	0,28
143	0,28	0,28	0,28
185	0,31	0,28	0,3
218	0,3	0,3	0,32
285	0,32	0,34	0,33
370	0,34	0,35	0,34
438	0,35	0,35	0,37
575	0,42	0,4	0,41
745	0,47	0,44	0,47
885	0,51	0,5	0,51
1135	0,58	0,61	0,61
1470	0,71	0,7	0,7
Количество проходов $x_2 = 5$			
82	0,24	0,25	0,24
109	0,24	0,26	0,25
143	0,28	0,25	0,26
185	0,28	0,29	0,28
218	0,29	0,29	0,28
285	0,31	0,31	0,3
370	0,32	0,34	0,33
438	0,34	0,35	0,35

575	0,36	0,36	0,38
745	0,41	0,4	0,43
885	0,44	0,46	0,45
1135	0,55	0,58	0,57
1470	0,67	0,66	0,66
Количество проходов $x_2 = 6$			
82	0,22	0,23	0,23
109	0,24	0,21	0,23
143	0,23	0,24	0,24
185	0,26	0,26	0,26
218	0,26	0,27	0,27
285	0,27	0,29	0,28
370	0,31	0,3	0,31
438	0,33	0,32	0,32
575	0,36	0,37	0,35
745	0,41	0,39	0,41
885	0,43	0,45	0,45
1135	0,53	0,54	0,54
1470	0,63	0,61	0,62

Таблица 2

Результаты статистической обработки экспериментов

Значения фактора x_2	Вид зависимости	a, мкм	$b \times 10^4$	$c \times 10^8, \text{мкм}^{-1}$	ρ_{xy}	$S_{y \text{ ост}}^2 \times 10^3$
4	$R_a = a + b \times x_1$	0,231	3,18	–	0,993	4,884
	$R_a = a + b \times R + c \times x_1^2$	0,238	2,84	2,34	0,994	4,309
5	$R_a = a + b \times x_1$	0,218	2,92	–	0,984	9,658
	$R_a = a + b \times R + c \times x_1^2$	0,234	2,13	5,53	0,989	6,435
6	$R_a = a + b \times x_1$	0,199	2,86	–	0,994	3,421
	$R_a = a + b \times R + c \times x_1^2$	0,203	2,68	1,26	0,994	3,253

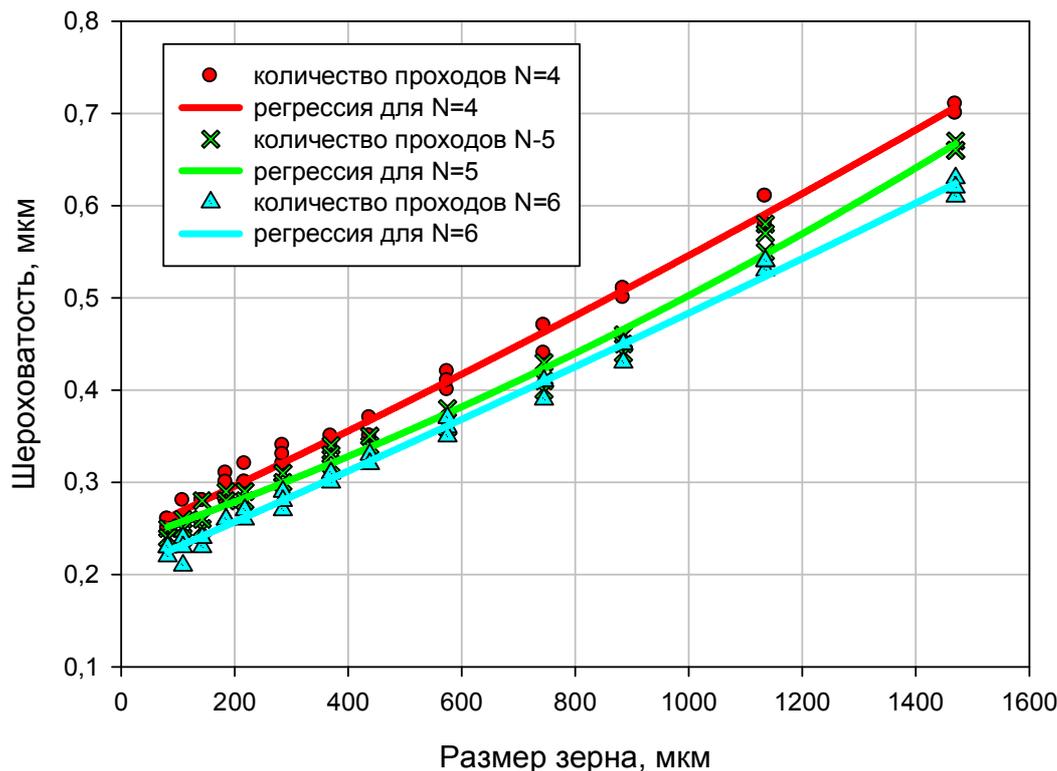


Рис. 2. Результаты корреляционно-регрессионного анализа

Теснота связи между случайными величинами характеризуется коэффициентом корреляции ρ_{xy} . Чем ближе значения коэффициента корреляции к 1, тем теснее связь между исследуемыми параметрами. По величине коэффициента корреляции также проводится выбор вида зависимости – линейная или нелинейная, квадратичная или кубическая и т.д. Предпочтение отдается той зависимости, для которой значение ρ_{xy} выше.

Для определения вида корреляционной зависимости с помощью программы Sigma Plot были проведены расчеты для случаев линейной ($R_a = a + b \times x_1$) и квадратичной ($R_a = a + b \times R + c \times x_1^2$) зависимостей шероховатости поверхности покрытия R_a от размера зерна x_2 для различного числа проходов при выхаживании. Вычисленные значения коэффициентов, входящих в корреляционные зависимости (a, b, c), и соответствующие значения коэффициентов корреляции, приведены в таблице 2. Отсюда видно, что значения коэффициентов корреляции для вариантов линейной и квадратичной зависимостей близки между собой. Это говорит о том, что характер зависимости шероховатости от зернистости в рассматриваемом диапазоне близок к линейному. Тем не менее, предпочтение отдается квадратичной зависимости, поскольку для нее коэффициенты корреляции имеют большие значения. За этот выбор говорит и значение суммы квад-

ратов отклонений экспериментальных данных от регрессионной зависимости $S_{y \text{ ост.}}^2$. Для всех рассмотренных вариантов квадратичная зависимость имеет меньшие значения $S_{y \text{ ост.}}^2$.

На рисунке 2 в графическом виде представлены полученные регрессионные квадратичные зависимости. Там же показаны зафиксированные экспериментальные результаты для разного количества проходов.

Более корректная проверка адекватности полученных соотношений, проводится с использованием критерия Фишера. При этом принимаются предположения, что случайные ошибки наблюдений являются независимыми, нормально распределенными случайными величинами с нулевыми средними значениями и одинаковыми дисперсиями [1, 2]. Критерий Фишера (F-критерий) показывает, во сколько раз уравнение регрессии предсказывает результаты опытов лучше, чем средние значения. При данной проверке общую дисперсию S_y^2 сравнивают с остаточной дисперсией $S_{y \text{ ост.}}^2$.

По приведенным экспериментальным данным были рассчитаны экспериментальные значения критерия Фишера для различного числа проходов, которые равны 1,1; 1,09; 1,41 для количества проходов 4, 5, 6 соответственно. То есть полученные регрессионные соотношения, приведенные в таблице 2, адекватны.

Из полученного уравнения регрессии, а также графиков, изображенных на рисунке 3.2 видно, что необходимые значения среднего отклонения профиля шероховатости Ra можно получить при нескольких сочетаниях факторов: $x_1=225, x_2=4$; $x_1=330, x_2=5$; $x_1=420, x_2=6$.

Согласно ГОСТ 3647-80 [3] значение среднего размера абразивного зерна в инструменте, которое обозначает x_1 , соответствует: 225 – зернистости 20; 330 – зернистости 32; 420 – зернистости 40. Значит, поверхность с необходимым значением шероховатости поверхностного слоя можно получить несколькими способами: кругом зернистостью 20 и четырьмя выхаживающими ходами инструмента; кругом зернистостью 32 и пятью выхаживающими ходами инструмента; кругом зернистостью 40 и шестью выхаживающими ходами инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
2. Бойко Н.Г., Устименко Т.А. Теория и методы инженерного эксперимента: Курс лекций. Донецк, ДонНТУ, 2009. 158с.
3. ГОСТ 3647-80. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. М.: Издательство стандартов, 2004. 18 с.
4. Основы научных исследований / Под ред. В.И. Крутова. В.В. Попова. М.: Высшая школа, 1989. 400 с.
5. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
6. Спирин Н.А., Лавров В.В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента. Изд-во ВПО УГТУ-УПИ. Екатеринбург, 2001. 257 с.
7. Статистические методы в инженерных исследованиях. Учеб. Пособие. // Под. Ред. Круга Г.К. М.: Высшая школа, 1983. 216 с.

Efremov V.V., Kutovoi S.S., Agoshkov A.V.

RESULTS OF A PILOT STUDY ON MANAGEMENT INDICATORS OF QUALITY OF THE RESTORED SURFACE WHEN GRINDING

Increase of efficiency of capital repair will allow increasing life cycle of the car. The crankshaft – one of the most difficult and expensive car parts. As a rule, its restoration happens by regrinding under the next repair size. However, there is a perspective technology which hasn't gained distribution due to the lack of recommendations about grinding. In this article results of a pilot study are described on management of indicators of quality of the restored surface, when grinding.

Key words: *Experimental data, factors, grinding, surface, dependences.*

Ефремов Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент, кафедра автотехнического обеспечения

Рязанское высшее воздушно – десантное командное училище им. генерала армии В.Ф. Маргелова
Адрес: Россия, 390031, Рязань, площадь генерала армии В.Ф. Маргелова, дом 1.

Кутовой Сергей Степанович, доктор технических наук, профессор.

Рязанское высшее воздушно – десантное командное училище им. генерала армии В.Ф. Маргелова
Адрес: Россия, 390031, Рязань, площадь генерала армии В.Ф. Маргелова, дом 1.

Агошков Андрей Владимирович, адъюнкт очной адъюнктуры

Рязанское высшее воздушно – десантное командное училище им. генерала армии В.Ф. Маргелова
Адрес: Россия, 390031, Рязань, площадь генерала армии В.Ф. Маргелова, дом 1.
E-mail: militantfish@yandex.ru