

УДК 621.951.45
DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-12-109-116

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ВЫБОРА ФАКТОРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Н.А. Рагрин, А.А. Айнабекова

Аннотация. Рассматриваются методы определения характера влияния технологических факторов на шероховатость поверхности просверленных отверстий с целью обоснования выбора условий обработки сверлением для разработки эмпирической модели повышения качества отверстий, обработанных быстрорежущими спиральными сверлами. Решены задачи обоснования методов по определению значимости зависимостей шероховатости от параметров режима резания и осевого биения режущих кромок сверл. Обосновано, что параметры режима резания при сверлении не оказывают значимого влияния на шероховатость поверхности просверленных отверстий и не могут быть использованы при разработке эмпирической модели. Показано, что основное влияние на шероховатость поверхности просверленных отверстий оказывает осевое биение режущих кромок.

Ключевые слова: сверло; скорость резания; подача; осевое биение; шероховатость; корреляция; модель.

ЭМПИРИКАЛЫК МОДЕЛДИ ИШТЕП ЧЫГУУ ҮЧҮН ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫК ФАКТОРЛОРДУ ТАНДОО ЫКМАСЫНЫН НЕГИЗДЕМЕСИ

Н.А. Рагрин, А.А. Айнабекова

Аннотация. Макалада жогорку ылдамдыктагы спираль түрүндөгү бургу менен иштетилген тешиктердин сапатын жогорулатуунун эмпирикалык моделин иштеп чыгуу үчүн бургулоо иштетүү шарттарын тандоону негиздөө максатында бургуланган тешиктердин бетинин тегиздигине технологиялык факторлордун таасиринин мүнөзүн аныктоо ыкмалары каралат. Кесүү режиминин параметрлерине жана бургулардын кесүүчү четтеринин октук соккусуна карата тегиз эместиктин көз карандылыгынын маанисин аныктоонун ыкмаларын негиздөө маселеси чечилген. Бургулоодо кесүү режиминин параметрлери бургуланган тешиктердин бетинин тегиздигине олуттуу таасир этпей тургандыгы жана эмпирикалык моделди иштеп чыгууда колдонууга болбой тургандыгы негизделди. Бургуланган тешиктердин бетинин тегиздигине негизги таасир кесүүчү четтердин октук согушу экени көрсөтүлгөн.

Түйүндүү сөздөр: бургу; кесүү ылдамдыгы; берүү; октук согуу; оройлук; корреляция; модель.

SUBSTANTIATION OF THE METHOD OF SELECTION OF EXPERIMENTAL FACTORS FOR THE DEVELOPMENT OF AN EMPIRICAL MODEL

N.A. Ragrin, A.A. Ainabekova

Abstract. The work is devoted to methods of determining the nature of the influence of technological factors on the surface roughness of drilled holes in order to justify the choice of drilling processing conditions for the development of an empirical model for improving the quality of holes treated with high-speed spiral drills. The paper solves the problems of substantiating methods for determining the significance of roughness dependences on the parameters of the cutting mode and axial runout of the cutting edges of drills. It is proved that the parameters of the cutting mode during drilling do not have a significant effect on the surface roughness of the drilled holes and cannot be taken into account when developing an empirical model. It is shown that the main influence on the roughness of the surface of drilled holes is the axial runout of the cutting edges.

Keywords: drill bit; cutting speed; feed; axial runout; roughness; correlation; model.

Введение. Сверление – единственный способ получения отверстий в сплошном материале резанием, и всегда является первым технологическим переходом при обработке отверстий высокого качества. Основным параметром качества поверхности отверстий является шероховатость. Шероховатость тесно связана с качеством допуска и глубиной дефектного поверхностного слоя, от нее, в основном, зависит износостойкость контактных поверхностей отверстия. Принятая технология обработки точных отверстий сравнительно небольшого диаметра предусматривает несколько переходов обработки осевыми инструментами от сверления до тонкого развертывания и является достаточно трудоемкой, что отрицательно сказывается на себестоимости деталей машиностроения, имеющих отверстия высокой точности. Одним из путей снижения трудоемкости таких деталей является повышение качества поверхности отверстий, обработанных спиральными сверлами, что позволит исключить несколько следующих за сверлением технологических переходов обработки отверстий осевыми инструментами.

Целью настоящих исследований является обоснование выбора условий обработки сверлением для разработки эмпирической модели снижения шероховатости просверленных отверстий.

Анализ проблемы. Основными технологическими факторами, влияющими на качество обработанной поверхности резанием, являются: параметры режима резания, качество конструктивных и геометрических параметров инструмента и твердость обрабатываемого материала. Твердость углеродистых конструкционных сталей в поставке не превышает 190НВ, и существенного влияния на качество обработанной поверхности быстрорежущими спиральными сверлами не оказывает. При обработке отверстий сравнительно небольшого диаметра (св. 10 до 18 мм) скорость резания и подача являются основными параметрами режима резания, способными оказывать влияние на качество обработанной поверхности.

Результаты теоретических и практических исследований, представленные авторами в работах [1, 2], показывают возможность получения высокого качества поверхности, обработанной быстрорежущими спиральными сверлами на скоростях резания меньших 6 м/мин и подачах, рекомендуемых справочником [3]. При этом существенное влияние на качество поверхности просверленных отверстий оказывают погрешности изготовления и заточки сверл, т. е. качество их конструктивных и геометрических параметров, выраженное в осевом биении режущих кромок. Поэтому в соответствии с целью исследований необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать методы и определить характер влияния параметров режима резания на шероховатость поверхности просверленных отверстий.

2. Обосновать методы и определить характер влияния осевого биения режущих кромок сверл на шероховатость поверхности просверленных отверстий.

Методы исследований. Авторами работы проведен анализ результатов экспериментов при обработке отверстий в заготовках из стали 45 180НВ быстрорежущими спиральными сверлами диаметром 11 мм различных классов точности: нормальной точности классов В и В1 и повышенной точности класса А1. Сверла нормальной точности В имели осевое биение режущих кромок 0,3 мм. Сверла нормальной точности В1 имели осевое биение режущих кромок 0,2 мм. Сверла повышенной точности класса А1 имели двухплоскостную заточку задних поверхностей, обеспечивающую осевое биение режущих кромок 0,06 мм [1].

Для измерения шероховатости поверхности отверстий использовали прибор MarSurf М 400, показанный на рисунке 1.

Результаты исследований. В таблице 1 приведены результаты измерений шероховатости поверхности отверстий, просверленных сверлами с различным биением режущих кромок.

Данные таблицы 1 показывают, что шероховатость поверхности отверстий существенно зависит от качества изготовления и заточки сверл. Зависимость шероховатости поверхности от скорости резания и подачи при работе сверл всех классов точности явно не выражена.

Справочником [3] минимальные значения шероховатости при нормальном и точном развертывании регламентированы в пределах $Ra = 0,8-0,4$ мкм, соответственно, что имеет место при обработке

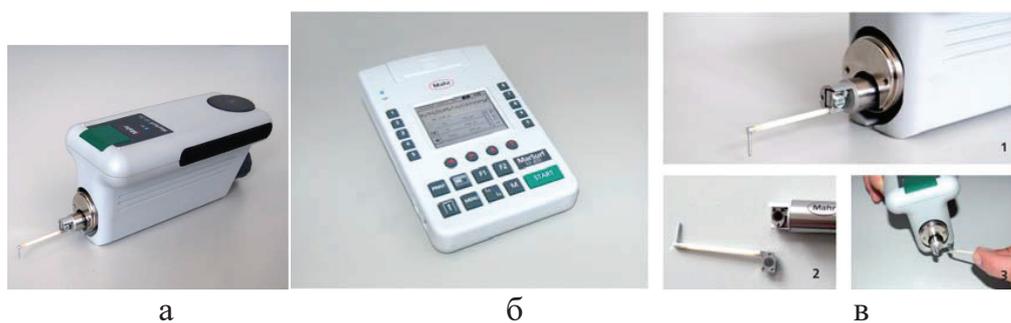


Рисунок 1 – Прибор для измерений шероховатости поверхности MarSurf M 400:
а – блок привода SD26; б – прибор MarSurf M 400; в – рычаг датчика с магнитным держателем

Таблица 1 – Шероховатость поверхности отверстий при сверлении сверлами нормальной точности классов В и В1 и повышенной точности класса А1

V, м/мин	δ_o , мм	S, мм/об						\overline{Ra} , мм
		0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25	
		Ra, мкм						
4,32	0,3		13,3	13,8	14,1	12,5	12,9	13,33
5,53		13,5	12,9	14,6	12,5	12,7	13,9	
4,32	0,2		6,3	5,0	7,2	4,5	5,5	5,59
5,53		4,3	6,2	6,0	5,1	6,2	5,2	
4,32	0,08		0,68	0,71	0,43	0,63	0,76	0,65
5,53		0,62	0,86	0,64	0,44	0,65	0,67	

Таблица 2 – Шероховатость поверхности отверстий при сверлении сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей

V, м/мин	S, мм/об	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	Ra, мкм						
2,18						0,62	0,74
2,76					0,66	0,43	0,21
3,45				0,2	0,61	0,69	0,23
4,32			0,68	0,71	0,43	0,63	0,76
5,53		0,62	0,86	0,64	0,44	0,65	0,67

Таблица 3 – Статистика d

n	$\frac{q_1}{2}$		$1 - \frac{q_1}{2}$	
	1%	5%	95%	99%
16	0,9137	0,8884	0,7236	0,6829
21	0,9001	0,8768	0,7304	0,6950

деталей сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей на скоростях резания 4,32 и 5,53 м/мин (таблица 1). Поэтому для оценки наличия значимой связи между параметрами режима резания и шероховатостью поверхности просверленных отверстий, использовали значения шероховатости при обработке сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей, представленные в таблице 2.

Корреляционный анализ влияния параметров режима резания на шероховатость поверхности просверленных отверстий. По данным таблицы 2 видно, что зависимость шероховатости от параметров режима резания явно не выражена. В этом случае для определения наличия и тесноты связи между ними можно использовать коэффициент линейной корреляции Пирсона, для правомочности использования которого необходимо подтвердить, что распределение случайных величин соответствует нормальному распределению. Для этого проводится проверка соответствия распределения закону Гаусса по методике ГОСТ [3] для выборок малого объема ($15 < n < 50$). При числе результатов наблюдений $n < 50$ нормальность их распределения проверяют при помощи составного критерия – критерия 1 и критерия 2.

Критерий 1

Вычисляют отношение:

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |Ra_i - \overline{Ra}|}{nS^*},$$

где S^* – смещенная оценка среднего квадратического отклонения, вычисляемая по формуле:

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})^2}{n}}.$$

Результаты наблюдений группы можно считать распределенными нормально, если

$$d_{1-\frac{q_1}{2}} \leq \bar{d} \leq d_{\frac{q_1}{2}},$$

где $d_{1-\frac{q_1}{2}}$ и $d_{\frac{q_1}{2}}$ – квантили распределения, получаемые из таблицы 3 по числу результатов наблюдений n , причем $1 - \frac{q_1}{2}$ и $\frac{q_1}{2}$ – заранее выбранный уровень значимости критерия.

$$\overline{Ra} = 0,574 \text{ (таблица 2), отсюда } \sum_{i=1}^n |Ra_i - \overline{Ra}| = 3,512, \quad \bar{d} = 0,7921.$$

$$\sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})^2 = 0,984134, \quad S^* = 0,2217. \text{ С помощью таблицы 3 определим значения квантилей}$$

и получим неравенство в виде: $0,7304 \leq 0,7921 \leq 0,8768$, на основании которого можно считать распределение шероховатостей нормальным.

Критерий 2

Можно считать, что результаты наблюдений принадлежат нормальному распределению, если не более m разностей $|Ra_i - \overline{Ra}|$ превосходили значение $z_{p/2}S$, где S – оценка среднего квадратического отклонения, вычисляемая по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})^2}{n-1}},$$

$Z_{p/2}$ – верхний квантиль распределения нормальной функции Лапласа, отвечающей вероятности $P/2$. Значение P определяется по таблице 4 по выбранному уровню значимости q_2 и числу результатов наблюдений n .

Зависимость $Z_{p/2}$ от P приведена в таблице 5. При несоблюдении хотя бы одного из критериев считают, что распределение результатов измерений группы не соответствует нормальному.

$S = 0,2245$, минимальное значение верхнего квантиля $Z_{p/2}$ по таблице 5 при $P = 0,98$ равно $Z_{p/2} = 2,33$. $SZ_{p/2} = 0,2245 \times 2,33 = 0,523$. Ни одно значение $|Ra_i - \overline{Ra}|$ не превысило значение $SZ_{p/2} = 0,523$.

$\overline{Ra} = 0,574$. Максимальное значение $Ra = 0,86$ (таблица 2), $0,86 - 0,574 = 0,286$, минимальное значение $Ra = 0,2$, (таблица 2), $0,574 - 0,2 = 0,374$.

Оба критерия соблюдены, распределение шероховатостей поверхности отверстий можно считать нормальным. Это позволяет использовать коэффициент линейной корреляции Пирсона для оценки наличия и значимости связи между параметрами режима резания и шероховатостью поверхности проточенных отверстий (таблица 2).

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле [4]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})(V_i - \overline{V})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})^2 \sum_{i=1}^n (V_i - \overline{V})^2}}. \quad (1)$$

В таблице 6 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и шероховатостью поверхности на подаче $S = 0,25$ мм/об.

Используя данные таблицы 6 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (1), получим $r = 0,66$, который не является значимым [5, табл. XII, с. 285].

В таблице 7 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и шероховатостью поверхности на подаче $S = 0,2$ мм/об.

Используя данные таблицы 7 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (1), получим $r = 0,41$, который не является значимым [5, табл. XII, с. 285].

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле [4]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})(S_i - \overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Ra_i - \overline{Ra})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \overline{S})^2}}. \quad (2)$$

В таблице 8 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и шероховатостью поверхности на скорости резания $V = 5,53$ м/мин.

Используя данные таблицы 8 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (2), получим $r = -0,175$, который не является значимым [5, табл. XII, с. 285].

В таблице 9 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и шероховатостью поверхности на скорости резания $V = 4,32$ м/мин.

Таблица 4 – Значения P для вычисления $Z_{p/2}$

n	m	$q_2 \times 100 \%$		
		1 %	2 %	5 %
10	1	0,98	0,98	0,96
11–14	1	0,99	0,98	0,97
15–20	1	0,99	0,99	0,98

Таблица 5 – Зависимость $Z_{p/2}$ от P

P	$Z_{p/2}$	P	$Z_{p/2}$
0,96	2,06	0,98	2,33
0,97	2,17	0,99	2,58

Таблица 6 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и шероховатостью поверхности на подаче $S = 0,25$ мм/об

№	Ra_i	V_i	$Ra_i - \overline{Ra}$	$V_i - \overline{V}$	$(Ra_i - \overline{Ra})^2$	$(V_i - \overline{V})^2$	$(Ra_i - \overline{Ra})(V_i - \overline{V})$
1	0,74	2,18	0,218	-1,468	0,047574	2,1550	-0,320024
2	0,21	2,76	-0,312	-0,888	0,097344	0,7885	0,277056
3	0,23	3,45	-0,292	-0,198	0,085264	0,0392	0,57816
4	0,76	4,32	0,238	0,672	0,056644	0,4516	0,159936
5	0,67	5,53	0,148	1,882	0,021904	3,5419	0,278536
	\overline{Ra} 0,522	\overline{V} 3,648		Σ	0,30873	6,97628	0,973664

Таблица 7 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и шероховатостью поверхности на подаче $S = 0,2$ мм/об

№	Ra_i	V_i	$Ra_i - \overline{Ra}$	$V_i - \overline{V}$	$(Ra_i - \overline{Ra})^2$	$(V_i - \overline{V})^2$	$(Ra_i - \overline{Ra})(V_i - \overline{V})$
1	0,62	2,18	0,016	-1,468	0,000256	2,1550	-0,023488
2	0,43	2,76	-0,174	-0,888	0,030276	0,7885	0,154512
3	0,69	3,45	0,086	-0,198	0,007396	0,0392	-0,017028
4	0,63	4,32	0,026	0,672	0,000676	0,4516	0,017472
5	0,65	5,53	0,046	1,882	0,002116	3,5419	0,086572
	\overline{Ra} 0,604	\overline{V} 3,648		Σ	0,04072	6,97628	0,21804

Таблица 8 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и шероховатостью поверхности на скорости резания $V = 5,53$ м/мин

№	Ra_i	S_i	$Ra_i - \overline{Ra}$	$S_i - \overline{S}$	$(Ra_i - \overline{Ra})^2$	$(S_i - \overline{S})^2$	$(Ra_i - \overline{Ra})(S_i - \overline{S})$
1	0,62	0,078	-0,027	-0,075	0,000729	0,005625	0,002025
2	0,86	0,1	0,213	-0,053	0,045369	0,002809	-0,011289
3	0,64	0,13	-0,007	-0,023	0,000049	0,000529	0,000161
4	0,44	0,16	-0,207	0,007	0,042849	0,000049	-0,001449
5	0,65	0,20	0,003	0,047	0,000009	0,002209	0,000141
6	0,67	0,25	0,023	0,097	0,000529	0,009409	0,00291
	\overline{Ra} 0,604	\overline{S} 0,153		Σ	0,089534	0,02063	-0,007501

Таблица 9 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и шероховатостью поверхности на скорости резания $V = 4,32$ м/мин

№	Ra_i	S_i	$Ra_i - \overline{Ra}$	$S_i - \overline{S}$	$(Ra_i - \overline{Ra})^2$	$(S_i - \overline{S})^2$	$(Ra_i - \overline{Ra})(S_i - \overline{S})$
1	0,68	0,1	0,038	-0,068	0,001444	0,004624	-0,002584
2	0,71	0,13	0,068	-0,038	0,004624	0,001444	-0,002584
3	0,43	0,16	-0,212	-0,008	0,044944	0,000064	0,001696
4	0,63	0,20	-0,012	0,032	0,000144	0,001024	-0,000384
5	0,76	0,25	0,118	0,082	0,013924	0,006724	0,009676
	\overline{Ra} 0,642	\overline{S} 0,168		Σ	0,06508	0,01388	0,00582

Таблица 10 – Результаты корреляционного анализа

S , мм/об	Связь $V-Ra$		V , м/мин	Связь $S-Ra$	
	r			r	
0,2	0,41	Не значим	4,32	0,19	Не значим
0,25	0,66	Не значим	5,53	-0,175	Не значим

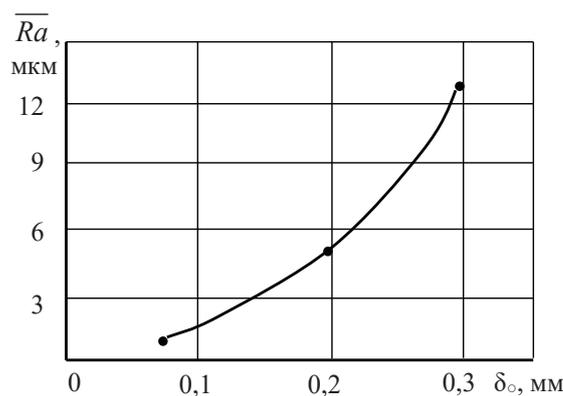


Рисунок 2 – Зависимость шероховатости поверхности обработанных отверстий от осевого биения режущих кромок

Используя данные таблицы 9 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (2), получим $r = 0,19$, который не является значимым [4, табл. XII, с. 285] $Ra S \sum$.

В таблице 10 представлены результаты корреляционного анализа влияния параметров режима резания на шероховатость поверхности отверстий, обработанных сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части, у которых осевое биение режущих кромок не превышало 0,06 мм.

Данные таблицы 10 показывают, что при работе сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей, у которых осевое биение режущих кромок не превышало 0,06 мм, имеет место незначимая связь между скоростью резания и шероховатостью поверхности отверстий на подачах 0,2 и 0,25 мм/об, и незначимая связь между подачей и шероховатостью поверхности отверстий на скоростях резания 4,32 и 5,53 м/мин.

Коэффициент корреляции является одной из статистических мер наличия и значимости связи между двумя случайными переменными. Он показывает, насколько явно выражена тенденция к изменению одной случайной переменной при изменении другой, т. е. указывает на наличие зависимости случайных переменных величин, но не вид этой зависимости.

На рисунке 2 представлен характер влияния осевого биения режущих кромок на шероховатость поверхности просверленных отверстий.

Из рисунка видно, что шероховатость поверхности просверленных отверстий имеет явно выраженную функциональную зависимость от осевого биения режущих кромок и корреляционной оценки не требует.

Заключение. Параметры режима резания при сверлении не оказывают значимого влияния на шероховатость поверхности просверленных отверстий, и не могут быть приняты при разработке эмпирической модели, отражающей зависимость условий обработки сверлением на шероховатость поверхности просверленных отверстий.

Основанием для использования зависимости шероховатости поверхности просверленных отверстий от осевого биения режущих кромок для разработки эмпирической модели является наличие функциональной зависимости между ними.

Поступила: 25.09.2023; рецензирована: 09.10.2023; принята: 11.10.2023.

Литература

1. Рагрин Н.А. Разработка основ повышения качества отверстий, обработанных стандартными спиральными сверлами / Н.А. Рагрин, А.А. Айнабекова, У.М. Дыйканбаева // Технология машиностроения. 2023. № 1 (247). С. 2–12.
2. Рагрин Н.А. Разработка путей и методов повышения качества отверстий при сверлении / Н.А. Рагрин, А.А. Айнабекова, А.О. Озгонбеков // Технология машиностроения. 2018. № 6. С. 10–15.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т. 1 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.
4. ГОСТ Р 8.736–2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. М.: Стандартинформ, 2013. 19 с.
5. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е.И. Пустыльник. М., 1968. 288 с.