

УДК 303.723

ТЕХНИКАЛЫК СЫНАКТАРДЫН НАТЫЙЖАЛАРЫНЫН КОРРЕЛЯЦИЯЛЫК ТАЛДООСУ

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

CORRELATION ANALYSIS OF THE RESULTS OF TECHNICAL TESTS

Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева

N. A. Ragrin, U. M. Dyikanbaeva

Корреляциялык талдоонун негизги маселеси кокус өзгөрүлмө чоңдуктардын байланышынын болушун жана маанисин аныктоо. Техникалык сыноону пландаштыруу кесүү шарттамын кокустук эмес кириш өлчөм мүнөздөгүчтөрү жана кокустук чыгуу өлчөм мүнөздөгүчтөрү - өлчөөлөрдүн натыйжалары менен иштейт. Ошондуктан кесүү шарттамынын кокустук эмес кириш өлчөм мүнөздөгүчтөрү менен техникалык сыноолордун кокустук өлчөө натыйжаларынын ортосундагы байланыштын болушун жана маанисин корреляциялык талдоо ыкмаларын иштеп чыгуу актуалдуу маселе болуп саналат. Иште Гаусс мыйзамы боюнча катуулукту өлчөө натыйжаларынын бөлүштүрүлүшүнүн нормалдуулугунун назарияттык өбөлгөлөрү ырасталган. Кесүү шарттамынын кокустук эмес кириш өлчөм мүнөздөгүчтөрү менен кокустук чыгаша өлчөө натыйжаларынын ортосундагы байланыштын болушун жана маанисин корреляциялык талдоо ыкмаларын колдонуу мүмкүнчүлүгү негизделген жана алардын сызыктуу корреляциясынын коэффициенттерин эсептөө үчүн көз карандылык сунушталган. Корреляция коэффициенттеринин чоңдуктары жана мааниси ар кандай тактык класстарындагы бургучтар менен иштетүүдө аныкталат.

Основная задача корреляционного анализа заключается в определении наличия и значимости связи случайных переменных. Планирование технических испытаний оперирует неслучайными входными параметрами режима резания и случайными выходными – результатами измерений. Поэтому разработка методов корреляционного анализа наличия и значимости связи неслучайных входных параметров режима резания и случайных результатов измерений технических испытаний является актуальной проблемой. В работе подтверждены теоретические предпосылки нормальности распределения результатов измерений твердости по закону Гаусса. Обоснована возможность применения методов корреляционного анализа

наличия и значимости связи неслучайных входных параметров режима резания и случайных выходных результатов измерений и предложена зависимость для расчета коэффициентов их линейной корреляции. Определены величины и значимость коэффициентов корреляции при обработке сверлами различных классов точности.

The main task of correlation analysis is to determine the presence and significance of the relationship of random variables. Technical test planning operates with non-random input parameters of the cutting mode and random output parameters – the results of measurements. Therefore, the development of methods for correlation analysis of the presence and significance of the relationship between non-random input parameters of the cutting mode and random measurement results of technical tests is an urgent problem. The paper confirms the theoretical prerequisites for the normality of the distribution of the results of measurements of hardness according to the Gauss law. The possibility of applying the methods of correlation analysis of the presence and significance of the relationship between non-random input parameters of the cutting mode and random output measurement results is substantiated, and a dependence is proposed for calculating the coefficients of their linear correlation. The magnitudes and significance of the correlation coefficients are determined when machining with drills of various accuracy classes.

Түйүн сөздөр: техникалык сынактар, корреляциялык талдоо, көзөнөк, ылдамдык, берүү, катуулук.

Ключевые слова: технические испытания, корреляционный анализ, отверстие, скорость, подача, твердость.

Key words: technical tests, correlation analysis, hole, speed, feed, hardness.

Введение. Корреляционный анализ является одним из статистических методов обработки результатов технических испытаний. Основная задача корреляционного анализа заключается в определении наличия и значимости связи случайных переменных. Технические испытания отличаются сравнительно небольшими объемами выборок по причине их значительной трудоемкости. Например, объемы выборок испытаний по определению твердости заготовок, обработанных резанием, ограничены количеством методов обработки резанием, режущих инструментов, обрабатываемых материалов, техническими возможностями технологического оборудования и приспособлений, средств контроля результатов. Поэтому статистические методы обработки результатов технических испытаний должны учитывать относительно небольшое число измерений.

Вместе с тем планирование технических испытаний оперирует такими понятиями, как входные, независимые технологические параметры и выходные зависимые – результаты измерений. Воздействию случайных факторов подвержены результаты измерений, к которым в полной мере приемлемы все методы корреляционного анализа. Входными, независимыми технологическими параметрами, как правило, являются параметры режима резания: скорость резания, подача, глубина резания, которые не являются случайными величинами и имеют строго фиксированные значения. Поэтому разработка методов корреляционного анализа наличия и значимости связи неслучайных входных параметров режима резания и случайных результатов измерений технических испытаний является актуальной проблемой.

Цель исследований. Определение методов корреляционного анализа наличия и значимости связи входных параметров режима резания и выходных результатов измерений технических испытаний в условиях неслучайных входных параметров и случайных выходных результатов измерений.

Задачи исследований. На основе технических испытаний по определению влияния параметров режима резания на твердость поверхности отверстий, обработанных быстрорежущими спиральными сверлами различного класса точности, обосновать возможность применения методов корреляционного анализа наличия и значимости связи неслучайных входных параметров режима резания и случайных выходных результатов измерений.

Методы исследований. Для решения представленных задач и в соответствии с целью работы использовались результаты технических испытаний по определению влияния параметров режима резания на твердость поверхности просверленных отверстий [1]. Сверлились сквозные отверстия диаметром 11 мм и глубиной 33 мм в заготовках из стали 45 180НВ спиральными сверлами по ГОСТ [2] из быстрорежущей стали Р6М5 класса точности В1 с осевым биением режущих кромок 0,3 мм и класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм. Использовалась СОЖ – 5%-й водный раствор эмульсола Укринол 1. Для сверл класса точности А1 применялась двухплоскостная заточка задних поверхностей с доводкой алмазным инструментом.

С целью обеспечения измерительных и установочных баз заготовки фрезеровались и шлифовались с шести сторон.

Твердость поверхности просверленных отверстий измерялась по методу Роквелла в единицах HRC с применением индентора с алмазным конусом. Для обеспечения возможности измерений заготовки фрезеровались в плоскостях параллельных продольным осям каждого ряда отверстий.

Корреляционный анализ включает два метода статистической обработки результатов измерений: выбор и обоснование закона распределения случайных величин и расчет коэффициента корреляции, определяющего наличие и значимость связи взаимодействующих переменных величин.

Правильный выбор и обоснование закона распределения результатов измерений играет важную роль в последующем определении коэффициента корреляции для анализа наличия и значимости связи взаимодействующих переменных величин.

Технические испытания проводятся в условиях воздействия большого количества взаимонезависимых случайных факторов. Известно, в условиях влияния большого количества взаимонезависимых случайных факторов следует ожидать нормальное распределение результатов измерений по закону Гаусса.

Методы проверки гипотезы о нормальности распределения при числе результатов измерений от 15 до 50 регламентированы ГОСТом [3]. Нормальность их распределения проверяют при помощи составного критерия.

Критерий 1

Вычисляют отношение \bar{d}

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |HRC_i - \overline{HRC}|}{nS^*}, \quad (1)$$

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

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{HRC}_i - \overline{\text{HRC}})^2}{n}} \quad (2)$$

Результаты наблюдений группы можно считать распределенными нормально, если

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

где $d_{1 - \frac{q_1}{2}}$ и $d_{\frac{q_1}{2}}$ – квантили распределения, получаемые из таблицы 1 по числу результатов наблюдений n , и при заранее выбранном уровне значимости (1 %, 5 % или 95 %, 99 %).

Таблица 1 – Статистика d

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

Критерий 2

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

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{HRC}_i - \overline{\text{HRC}})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

$Z_{p/2}$ – верхний квантиль распределения нормальной функции Лапласа, отвечающей вероятности $P/2$. Значение P определяется по

таблице 1 по выбранному уровню значимости и числу результатов наблюдений n .

При уровне значимости, отличном от предусмотренных в таблице 1, значение P находят путем линейной интерполяции.

Зависимость $Z_{p/2}$ от P приведена в таблице 3.

Таблица 2 – Значения P для вычисления $Z_{p/2}$ при заранее выбранном уровне значимости (1 %, 2%, 5 %)

n	m	P		
		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 3 – Значения $Z_{p/2}$

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

При несоблюдении хотя бы одного из критериев считают, что распределение результатов измерений группы не соответствует нормальному.

При подтверждении соответствия распределения результатов измерений нормальному распределению по закону Гауса для оценки величины и значимости связи параметров режима резания и результатов измерений можно использовать коэффициент линейной корреляции Пирсона, определяемый по формуле [4]

$$r = \frac{\sum (x_i - M_x)(y_i - M_y)}{(N-1)\sigma_x \sigma_y}, \quad (4)$$

где X_i и Y_i – случайные величины, M_x и M_y – математические ожидания случайных величин, N – объем выборки, σ_x и σ_y – средние

квадратичные отклонения случайных величин. После подстановки выражений среднеквадратичных отклонений формула (4) примет вид:

$$r = \frac{\sum (x_i - M_x)(y_i - M_y)}{\sqrt{\sum (x_i - M_x)^2 \sum (y_i - M_y)^2}}. \quad (5)$$

Если в формуле (5) математические ожидания представить в виде средних значений X_i и Y_i , то формула для расчета коэффициента корреляции примет вид:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (6)$$

Формулу (6) можно использовать для расчета коэффициента корреляции Пирсона между неслучайными параметрами режима резания X_i и случайными результатами измерений твердости Y_i .

Результаты исследований

В таблице 4 приведены результаты измерений твердости поверхности отверстий, просверленных спиральными сверлами класса точности В1 с осевым биением режущих кромок 0,3 мм [1].

Таблица 4 – Результаты измерения твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности В1

V, м/мин	S, мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	HRC					
2,18					11,5	11,7
2,76				12	12,3	10,6
3,45			14,8	11,4	12,7	13,0
4,32		19,3	20,3	17,3	19,2	16,6
5,53	12,6	12,5	12,0	16,0	13,4	12,8

\overline{HRC} определяется по формуле

$$\overline{HRC} = \frac{\sum HRC_i}{n}. \tag{7}$$

$$\overline{HRC} = 14,1$$

В таблице 5 приведены значения разностей $|HRC_i - \overline{HRC}|$ измерений твердости поверхности отверстий, просверленных спиральными сверлами класса точности В1 с осевым биением режущих кромок 0,3 мм

Таблица 5 – Результаты расчета разностей $|HRC_i - \overline{HRC}|$ поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности В1

V, м/мин	S, мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	$ HRC_i - \overline{HRC} $					
2,18					2,6	2,4
2,76				2,1	1,8	3,5
3,45			0,7	2,7	1,4	1,1
4,32		5,2	6,2	3,2	5,1	2,5
5,53	1,5	1,6	2,1	1,9	0,7	1,3

Смещенная оценка среднего квадратического отклонения, вычисленная по формуле (2) $S^* = 2,8841$. Вычисленное по формуле (1) отношение $\bar{d} = 0,8599$. Квантили распределения, полученные из таблицы 1 по числу результатов наблюдений $n=21$, при заранее выбранном уровне значимости 5% и 95 % равны $d_{1-\frac{q_1}{2}} = 0,7304$ и $d_{\frac{q_1}{2}} = 0,8768$, т.е. $0,7304 \leq 0,8599 \leq 0,8768$. Критерий 1 подтверждает соответствие распределения результатов измерений твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности В1 нормальному распределению по закону Гаусса.

Оценка среднего квадратического отклонения, вычисленного по формуле (3) $S = 2,9590$. Значения P для вычисления верхнего квантиля распределения нормальной функции Лапласа $Z_{p/2}$ при заранее выбранном уровне значимости (1 %, 2 %, 5 %) равны соответственно 0,99, 0,99, 0,98 (табл.2). Значения $Z_{p/2}$ (табл.3) равны 2,58 и 2,33 соответственно. Т.е. $2,58 \cdot 2,9590 = 7,63432$ и $2,33 \cdot 2,9590 = 6,89447$. Критерий 2 показывает, что не одного значения разностей $|HRC_i - \overline{HRC}|$ не превышает значения $Sz_{p/2}$ и подтверждает соответствие распределения результатов измерений твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности В1 нормальному распределению по закону Гаусса.

В таблице 6 приведены результаты измерений твердости поверхности отверстий, просверленных спиральными сверлами класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм [1].

Таблица 6 – Результаты измерения твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности А1

V, м/мин	S, мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	HRC					
2,18					11,0	12,2
2,76				9,7	10,8	12,6
3,45			9,4	11,1	11,7	12,3
4,32		8,3	9,5	10,7	11,5	12,8
5,53	10,7	11,4	11,0	11,6	12,5	14,3

Вычисленное по формуле (7) значение $\overline{HRC} = 11,255$

В таблице 7 приведены значения разностей $|HRC_i - \overline{HRC}|$ измерений твердости поверхности отверстий, просверленных спиральными сверлами класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм.

Таблица 7 – Результаты расчета разностей $|HRC_i - \overline{HRC}|$ поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности В1

V, м/мин	S, мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	$ HRC_i - \overline{HRC} $					
2,18					0,255	0,945
2,76				1,555	0,455	1,345
3,45			1,855	0,155	0,455	1,045
4,32		2,955	1,755	0,555	0,245	1,545
5,53	0,555	0,145	0,255	0,345	1,245	3,045

Смещенная оценка среднего квадратического отклонения, вычисленная по формуле (2) $S^* = 1,3427$. Вычисленное по формуле (1) отношение $\bar{d} = 0,7712$. Квантили распределения, полученные из таблицы 1 по числу результатов наблюдений $n=21$, при заранее выбранном уровне значимости 5% и 95 % равны $d_{1-\frac{q_1}{2}} = 0,7304$ и $d_{\frac{q_1}{2}} = 0,8768$, т.е. $0,7304 \leq 0,7712 \leq 0,8768$. Критерий 1 подтверждает соответствие распределения результатов измерений твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности А1 нормальному распределению по закону Гаусса.

Оценка среднего квадратического отклонения, вычисленная по формуле (3) $S = 1,3776$. Значения Р для вычисления верхнего квантиля распределения нормальной функции Лапласа $z_{P/2}$ при заранее выбранном уровне значимости (1 %, 2%, 5 %) равны соответственно 0,99, 0,99, 0,98 (табл.2). Значения $z_{P/2}$ (табл.3) равны 2,58 и 2,33 соответственно. Т.е. $2,58 \cdot 1,3776 = 3,5542$ и $2,33 \cdot 1,3776 = 3,2098$. Критерий 2 показывает, что ни одного значения разностей $|HRC_i - \overline{HRC}|$ не превышает значения $Sz_{P/2}$ и подтверждает соответствие распределения результатов измерений твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности А1 нормальному распределению по закону Гаусса.

Это позволяет использовать коэффициент линейной корреляции Пирсона (6) для оценки наличия и значимости связи параметров режима резания с результатами измерений, представленных в таблице 4 и таблице 6.

В таблице 8 показаны рассчитанные по формуле (6) коэффициенты корреляции параметров режима резания с результатами измерений твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности В1, и результаты проверки их значимости по таблице приложения 6 [4].

Таблица 8 – Коэффициенты корреляции сверла класса точности В1

S, мм/об	связь V -HRC		V, м/мин	связь S -HRC	
	r			r	
0,2	-0,479	не значим	4,32	-0,682	не значим
0,25	0,5095	не значим	5,53	0,216	не значим

В таблице 8 видно, что все коэффициенты корреляции меньше критических значений (приложение 6 [4]).

В таблице 8 показаны рассчитанные по формуле (3) коэффициенты корреляции наличия и значимости связи параметров режима резания с результатами измерений твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности А1 и результаты проверки их значимости по таблице приложения 6 [4].

Таблица 9 – Коэффициенты корреляции сверла класса точности А1

S, мм/об	связь V-HRC		V, м/мин	связь S- HRC	
	r			r	
0,2	0,9075	значим	4,32	0,99	значим
0,25	0,887	значим	5,53	0,934	значим

В таблице 9 видно, все коэффициенты корреляции значимые, т.е. превышают критические значения, представленные в приложении 6 [4], при этом корреляция между подачей и твердостью поверхности отверстий более значимая.

На рисунках 1 и 2 показаны графики зависимостей степени наклепа от параметров режима резания, построенные по результатам исследований, представленных в таблице 3.

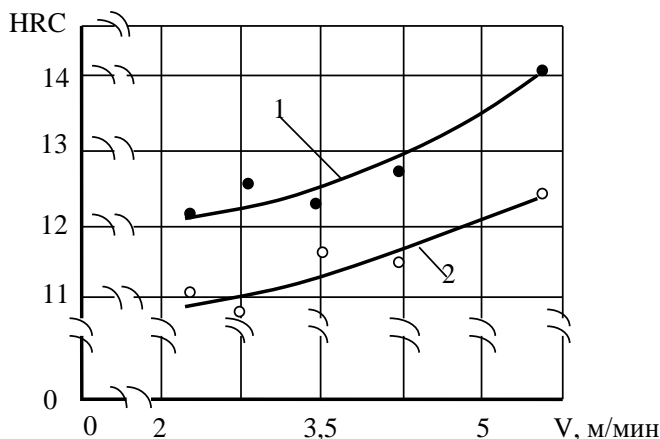


Рисунок 1 – Зависимость твердости обработанной поверхности от скорости резания: 1 – $S = 0,25$ мм/об, 2 – $S = 0,2$ мм/об

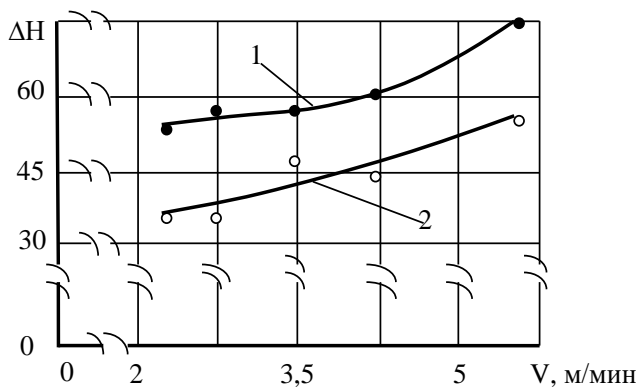


Рисунок 2 – Зависимость твердости обработанной поверхности от подачи: 1 – $V = 5,53$ м/мин, 2 – $V = 4,32$ м/мин

Графики зависимостей (рис. 1 и рис. 2) подтверждают результаты корреляционного анализа, представленного в таблице 9, зависимость твердости поверхности просверленных отверстий от параметров режима резания на обоих графиках явно выражена, при этом подача

влияет на твердость поверхности просверленных отверстий в большей степени (рис. 2) по сравнению со скоростью резания (рис. 1).

Подтверждены теоретические предпосылки нормальности распределения результатов измерений твердости по закону Гаусса. Обоснована возможность применения методов корреляционного анализа наличия и значимости связи неслучайных входных параметров режима резания и случайных выходных результатов измерений, и предложена зависимость для расчета коэффициентов их линейной корреляции. Определены величина и значимость коэффициентов корреляции, подтвержденных графическими зависимостями для сверл класса точности А1 с двухплоскостной заточкой режущей части и осевым биением режущих кромок 0,06 мм.

Выводы

1. Корреляционный анализ результатов технических испытаний по определению твердости поверхности просверленных отверстий сверлами различных классов точности подтвердил теоретические предпосылки нормальности распределения результатов измерений твердости по закону Гаусса.
2. При нормальном распределении результатов измерений обоснована возможность применения методов корреляционного анализа наличия и значимости связи неслучайных входных параметров режима резания и случайных выходных результатов измерений и предложена зависимость для расчета коэффициентов их линейной корреляции Пирсона.
3. Определены значимые коэффициенты линейной корреляции Пирсона неслучайных входных параметров режима резания и случайных выходных результатов измерения твердости отверстий, просверленных сверлами класса точности А1 с двухплоскостной заточкой режущей части и осевым биением режущих кромок 0,06 мм.
4. Графики зависимостей твердости поверхности просверленных отверстий от параметров режима резания подтверждают результаты корреляционного анализа.

Литература

1. Рагрин Н. А., Дыйканбаева У. Д., Айнабекова А. А., Курганова Д. М. Повышение качества поверхностного слоя отверстий при обработке сверлением // *Машиноведение*. – Бишкек: ИМАНАН КР, 2021. – № 2 (14) – С. 76 – 82.
2. ГОСТ 10903-77 Сверла спиральные с коническим хвостовиком. Основные размеры. Дата введения 01.01.79.
3. ГОСТР 8.736-2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. – М.: Стандартиформ, 2013. – 19 с.
4. Наследов А. Д. Математические методы психологического исследования. Анализ и интерпретация данных / Учебное пособие. – СПб.: Речь, 2004. – 392 с.