

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНОГО СВЕРЛА НА ОТКЛОНЕНИЕ ОТ ЦИЛИНДРИЧНОСТИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Приведен анализ влияния геометрии режущей части сверла на отклонение от цилиндричности при сверлении титанового сплава. Показано значительное влияние только некоторых конструктивных элементов инструмента на не цилиндричность отверстия.

Ключевые слова: сверление, сплавы титана, геометрия сверла.

Отверстия деталей для топливно-регулирующей аппаратуры из титанового сплава после сверления имеют отклонения от цилиндричности, превышающие допуск. Целью данной работы является, ранжирование по интенсивности влияния конструктивных элементов инструмента на не цилиндричность отверстия при сверлении титанового сплава ВtЗ — 1. Факторы не существенно влияющие на отклонение от цилиндричности можно отнести к незначительным и не рассматривать их в дальнейшем, что существенно упрощает процесс конструирования сверл для обработки титановых сплавов.

При сверлении на отклонение от цилиндричности влияет геометрия режущей части инструмента, а именно угол при вершине сверла, угол наклона винтовой канавки, осевой задний угол, ширина ленточки, длина поперечной режущей кромки, шероховатость поверхности подточки поперечной режущей кромки, толщина сердцевины и передний угол подточки поперечной режущей кромки.

Влияние угла при вершине сверла 2ϕ связано с изменением толщины a и ширины b среза при сверлении (рис. 1). С увеличением угла 2ϕ увеличивается толщина и уменьшается ширина среза. Отношение толщины к ширине среза изменяет степень деформации срезаемого слоя, меняя вид стружки, что влияет на отклонение от цилиндричности.

Фактором, оказывающим влияние на не цилиндричность отверстия, является угол наклона канавки ω . Угол ω влияет на величину передних углов γ на ре-

жущей части, особенно на периферии сверла. Угол наклона винтовой канавки ω также влияет на отвод стружки, от которого зависит качество получаемого отверстия.

Задний угол α является важным элементом конструкции сверла. Величина его в значительной степени влияет на работу сил трения, а, следовательно, и температуру в зоне резания. При повышении температуры в зоне резания титановые сплавы начинают активно поглощать атмосферные газы, что приводит к повышению характеристики прочности и снижению пластичности обработанного материала. Повышение температуры так же приводит к образованию неоднородности обработанной поверхности. Увеличение угла α приводит к уменьшению сил трения, но снижает жесткость, что приводит к появлению вибраций сверла. Изменение температуры обработанной поверхности также связано с работой сил трения между ленточками сверла и поверхностью отверстия. Увеличение ширины ленточки приводит к уменьшению отклонения от цилиндричности, в то же время увеличивается температура обработанной поверхности [1].

Сердцевина сверла оказывает влияние на жесткость и виброустойчивость, а следовательно, на отклонение от цилиндричности. Увеличение диаметра сердцевины уменьшает стружечные канавки, что ухудшает отвод стружки. Спиральное сверло имеет малую величину переднего угла γ в точках у поперечной режущей кромки, что ухудшает процесс врезания в деталь. Стандартная подточка (форма А) позволяет уменьшить длину поперечной режущей кромки (рис. 2), что уменьшает составляющую осевую силу на 25% по сравнению со сверлом без подточки. Шероховатость поверхности подточки поперечной режущей кромки определяет интенсивность налипания титанового сплава на режущий инструмент [2, 3].

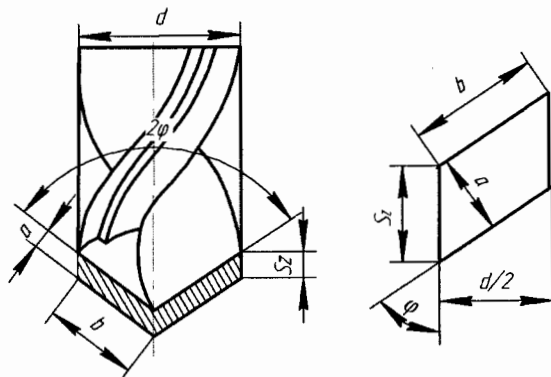


Рис. 1. Влияние угла при вершине сверла 2ϕ на изменение толщины a и ширины b среза при сверлении

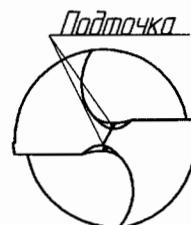


Рис. 2. Подточка формы А

Таблица 1

Уровни варьирования факторов эксперимента

Фактор	угол при вершине, °	угол наклона винтовой канавки, °	осевой задний угол, °	ширина ленточки, мм	длина поперечной режущей кромки, мм	шероховатость подточки поперечной режущей кромки, мкм	толщина сердцевины, мм	передний угол подточки поперечной режущей кромки, °
Кодовое обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
Верхний уровень (+1)	140	32	15	0,14d	0,18d	0,63	0,22d	12
Нижний уровень (-1)	115	12	7	0,04d	0,08d	0,32	0,16d	5

Таблица 2

№ опыта	Факторы								Отклонение от цилиндричности, мкм		
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	Y_1	Y_2	Y_3
1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	45	27	22
2	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	37	24	26
3	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	43	25	25
4	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	19	14	21
5	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	22	22	24
6	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	29	24	19
7	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	24	24	19
8	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	27	14	21
9	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	30	30	25
10	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	32	19	25
11	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	28	28	23

При подточке имеется возможность увеличить передний угол γ , улучшая процесс резания у поперечной режущей кромки [4]. С увеличением угла γ увеличивается зарезание поверхностью подточки передней поверхности сверла, при этом образуется лунка с радиусом R (рис. 3). Лунка препятствует сходу стружки титанового сплава и способствует ее налипанию на поверхность подточки, что приводит к увеличению отклонения от цилиндричности.

Выделенные факторы влияют на отклонение от цилиндричности с разной интенсивностью. Точный анализ каждого параметра малоэффективен, поскольку требует значительного увеличения количества проводимых экспериментов. Некоторые факторы могут слабо влиять на отклонения от цилиндричности, поэтому нет необходимости выводить уравнение регрессии для сверления титанового сплава.

Задача определения интенсивности влияния конструктивных элементов сверла на не цилиндричность отверстия решалась проведением отсеива-

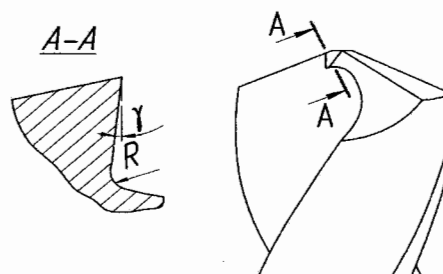


Рис. 3. Образование лунки при подточке острия сверла

ющего эксперимента при использовании сверхнасыщенных планов (метод случайного баланса), т.е. планов, в которых число опытов меньше числа эффектов. В методе случайного баланса постулируется, что если эффекты, определяющие протекание процесса, расположить в порядке убывания их доли, вносимой в дисперсию, то получим ранжированный ряд убывающей экспоненты [5, 6]. По результатам небольшого числа опытов можно оценить наиболее значимые конструктивные элементы сверла, выделившиеся на шумовом поле, создаваемом факторами, несущественно влияющими на отклонение от цилиндричности. Отнесение части эффектов к шумовому полю позволяет произвести расщепление математической модели.

Исходная линейная модель имеет вид:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{k-1} x_{k-1} x_k + \varepsilon \quad (1)$$

где β_0 – свободный член;

β_i ($i = 1, 2, \dots, k$) – коэффициенты при линейных членах;

β_{ig} ($i, g = 1, 2, \dots, k, i \neq g$) – коэффициенты при взаимодействии факторов;

ε – случайная ошибка.

Расщепленную модель можно записать в линейном виде (считая, что некоторые z_i обозначают взаимодействие):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_{k-1} x_{k-1} + \beta'_1 z_1 + \beta'_2 z_2 + \dots + \beta'_{k-1} z_{k-1} + \varepsilon \quad (2)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_{k-1} x_{k-1} + \varepsilon$$

Таблица 3

Фактор	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₁ X ₂	X ₂ X ₈
Медиана верхнего уровня варьирования, мкм	29,5	37	29	27	36	31	28	27	30	28
Медиана нижнего уровня варьирования, мкм	27	26	28,5	29,5	28	27	29,5	30,5	29	31
Разность медиан, мкм	2,5	11	0,5	2,5	8	4	1,5	3,5	1,5	3

Таблица 3

	x ₂	-x ₂
x ₅	45	29
	43	19
	$\bar{y}_1 = 44$	$\bar{y}_2 = 24$
-x ₅	37	30
	32	24
	27	28
	22	22
	$\bar{y}_3 = 32$	$\bar{y}_4 = 26$

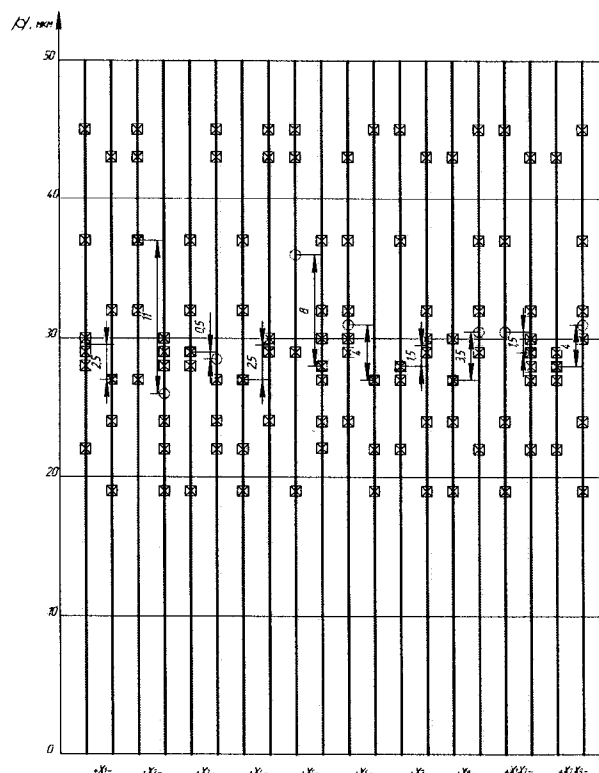


Рис. 4. Диаграмма рассеяния без корректировок y

$$\text{где } a = \beta'_1 z_1 + \beta'_2 z_2 + \dots + \beta'_{k-1} z_{k-1} + \varepsilon; \quad (3)$$

$$\sigma^2\{a\} = \beta'_1 \sigma^2\{z_1\} + \beta'_2 \sigma^2\{z_2\} + \dots + \beta'_1 \sigma^2\{z_1\} + \sigma^2\{\varepsilon\} \quad (4)$$

Здесь из общего числа k эффектов выделено $(k-1)$ значимых эффектов и 1 эффект отнесено к шумовому полю.

Остаточная дисперсия $\sigma^2\{a\}$ была больше дисперсии $\sigma^2\{\varepsilon\}$, характеризующей ошибку опыта, и коэффициенты были определены с большой ошибкой, т.к. чувствительность метода случайного баланса невелика, но он обладает большой разрешающей способностью, позволяя выделить доминирующие эффекты из большого числа эффектов, взятых на рассмотрение.

Матрица случайного баланса составлялась случайным смешиванием двух полуреплик полного факторного эксперимента. Перед построением матрицы отсеивающего эксперимента были назначены уровни варьирования факторов (табл. 1). Значения размаха варьирования фактора выбраны из соображения возможности получения при сверлении титанового сплава отклонения от цилиндричности близкого к допуску.

Матрица планирования строилась следующим образом. Все факторы разбивались на две половины. В первую объединялись факторы x_1, x_2, x_3, x_4 и образо-

вывали из нее полуреплику 2^{4-1} с определяющим контрастом $1 = x_1 x_2 x_3 x_4$. Так же образовывалась полуреплика и для второй половины факторов. Первая полуреплика записывалась систематической и к каждой строке добавлялась случайно выбранная строка полуреплики второй половины факторов. В развернутом виде матрица отсеивающего эксперимента представлена в табл. 2. Три последние строки добавлены в матрицу для более удобного смешивания и получены путем случайного смешивания из обеих полуреплик.

После построения матрицы она проверялась на пригодность. Матрица пригодна, если в ней нет двух столбцов с одинаковыми или противоположными знаками. В матрице также не должно быть столбцов, скалярное произведение которых на любой другой столбец дают столбцы из одинаковых знаков, т.е. их (+) или (-).

Сверление отверстий для исследования влияния отклонения от цилиндричности проводилось на станке «Mazak», режущая часть сверл изготовлена на станке «Walter Mini Power», контроль полученных отверстий производился на контрольно-измерительной машине «Torylond Hobson-365». Для сверления использовались сверла диаметром 5 мм и биением

Таблица 5

Результаты отсеивающего эксперимента

Этап определения	Выделенные эффекты	Численное значение эффектов, мкм	Расчетное значение t-критерия
По исходным данным	L_2	13	7,1
По исходным данным	L_5	5	2,76
После первой корректировки	L_1	5,2	2,41
После первой корректировки	L_4	-6,7	3,12
После второй корректировки	$L_1 L_2$	-0,9	0,31
После второй корректировки	L_8	-1,9	0,67

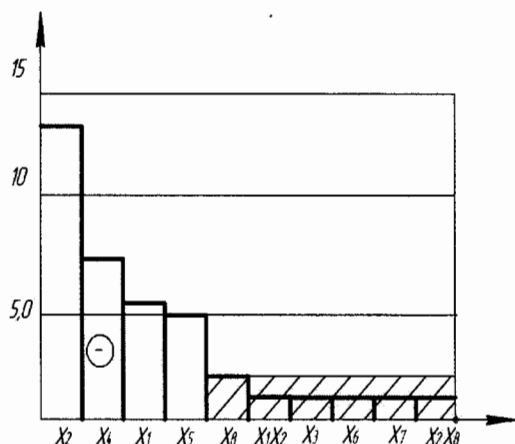


Рис. 5. Диаграмма влияния геометрических параметров инструмента на отклонение от цилиндричности

режущей части относительно хвостовика 0,01 мм. Сверла цельные, изготовлены из твердого сплава 7075 фирмы Guhring. Материал обрабатываемой детали — титановый сплав ВтЗ-1. Все эксперименты проводились с охлаждением СОЖ методом полива. Сверление производилось на глубину L , равную $1,5d$ сверла, без цикла сверления с подачей 30 мм/мин и скоростью резания 4,71 м/мин.

На процесс первого и последующего врезания влияние оказывает вид подточки поперечной режущей кромки. Вид подточки — качественная характеристика, которую нельзя проанализировать методом случайно баланса с двумя уровнями значения фактора. Величина L выбрана максимальной, при которой можно исключить цикл сверления и минимизировать процесс врезания для сверла с геометрией из табл. 1. В столбец y_i матрицы отсеивающего эксперимента вписывались значения полученного отклонения от цилиндричности в мкм (табл. 2).

Для анализа результатов экспериментов строилась диаграмма влияния факторов (рис. 4). Для этого по оси абсцисс наносились все параметры с их уровнями, а по оси ординат — значения критерия оптимизации y , полученные в результате эксперимента. Значимые факторы выделялись, сравнивая между собой разности медиан, нанесенных на диаграмму влияния факторов в виде кругов (табл. 3). При определении значимого эффекта учитывалось, что при большом значении некоторого взаимодействия влияния факторов, должны появляться выделяющиеся точки, как на верхнем, так и на нижнем уровне варьирования фактора, поэтому были выявлены дополнительные факторы X_1X_2 и X_2X_8 , которые являются эффектами взаимодействия геометрических параметров инструмента.

На первом этапе исследования значимыми были признаны факторы X_2 и X_5 со значениями медиан соответственно 11 и 5 мкм. Эффекты факторов можно количественно оценить с помощью таблиц с несколькими входами, для этого строилась табл. 4 с двумя входами.

Величина эффекта подсчитывалась по формуле

$$L_i = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_3 + \bar{y}_5 \dots \bar{y}_n - \bar{y}_2 - \bar{y}_4 - \bar{y}_6 + \bar{y}_{n-1})}{m}, \quad (5)$$

где m — число значений y в табл. 4 для данного фактора одного знака (+) или (—).

Результаты заносились в табл. 5. После оценки влияния факторов проверялась их значимость по t -критерию. Влияние фактора будет значимо при $t > t_{кр}$ с числом степеней свободы

$$f = \Sigma n_i - k, \quad (6)$$

где k — число клеток в табл. 4. Критическое значение $t_{кр} = 2,365$ при значимости влияния фактора с вероятностью 95%.

После оценки нескольких факторов результаты экспериментов корректировались с целью четкого определения менее сильных факторов и парных взаимодействий. Для корректировки прибавлялись с обратным знаком эффекты выделенных факторов к результатам отсеивающих экспериментов. Корректированные значения отклонения от цилиндричности в мкм приведены в табл. 2. Оценка влияния и корректировка результатов производилась до тех пор, пока влияние факторов оказалось незначимым для 10% уровня значимости, при $t_{0,1} = 1,895$. Выделив факторы X_1X_2 и X_8 и оценив их по критерию Стьюдента, было выявлено, что оба критерия не значимы. По результатам отсеивающего эксперимента построилась диаграмма влияния факторов на отклонение от цилиндричности рис. 5.

При ранжировании факторов по интенсивности влияния на отклонение от цилиндричности было выявлено, что доминирующим конструктивным элементом инструмента является угол наклона канавки ω . Уменьшение ω до 12° , позволяет существенно уменьшить отклонение от цилиндричности отверстия после сверления титанового сплава ВтЗ-1 диаметром 5 мм. На не цилиндричность отверстия также влияет ширина ленточки сверла, при ее увеличении до 0,14d мм уменьшается отклонение от цилиндричности приблизительно на 7 мкм. Результаты опытов показали, что, уменьшая угол при вершине сверла до 115° и длину поперечной режущей кромки до 0,08d мм, можно получить меньшее отклонение от цилиндричности приблизительно на 5 мкм. Передний

угол подточки поперечной режущей кромки, осевой задний угол, шероховатость поверхности подточки поперечной режущей кромки, толщины сердцевины влияют слабее, чем другие выделенные геометрические параметры спирального сверла, на не цилиндричность отверстия при сверлении титанового сплава в своем диапазоне варьирования, что позволяет исключить их из дальнейшего исследования.

Библиографический список

1. Виноградов, А. А. Физические основы процесса сверления труднообрабатываемых металлов твердосплавными сверлами / А. А. Виноградов. — Киев : Наукова думка, 1985. — 264 с.
2. Родин, П. Р. Геометрия режущей части спирального сверла / П. Р. Родин. — Киев : Техника, 1971. — 136 с.
3. Аршинов, В. А. Резание металлов и режущий инструмент / В. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. — М. : Машиностроение, 1976. — 410 с.

4. Жигалко, Н. И. Проектирование и производство режущих инструментов / Н. И. Жигалко, В. В. Киселев. — Минск : Высшая школа, 1975. — 400 с.

5. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер — М. : Металлургия, 1969. — 155 с.

6. Нахимов, В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Нахимов — М. : Наука, 1965. — 340 с.

МАКАШИН Дмитрий Сергеевич, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» машиностроительного института.

Адрес для переписки: e-mail: dima.makashin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 09.03.2011 г.

© Д. С. Макашин

УДК 622.324 : 621.9.06

О. С. ЛОМОВА

Омский государственный
технический университет

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ

В статье представлено моделирование процесса формообразования наружной цилиндрической поверхности детали при ее обработке в центрах круглошлифовального станка. Изучены виды контактирования детали с центром и предложена методика расчета величины погрешности формы для различных случаев перемещения оси вращения детали при круглом врезном шлифовании.

Ключевые слова: смещение оси вращения детали, формообразование поверхности детали, влияние сил резания, центра круглошлифовальных станков, установочные базы, отклонение от соосности центров станков.

Широкий ряд цилиндрических деталей обрабатывается в центрах круглошлифовальных станков. Основной составляющей погрешности обработки является погрешность геометрической формы детали, которая обусловлена различными факторами, в том числе и геометрической точностью станка.

Как правило, центровые отверстия на конической поверхности имеют волны, по выступам которых происходит контакт с центром станка. Отклонения формы центрального отверстия наследуются обработанной наружной поверхностью детали и вызывают радиальное биение, что приводит к смещению оси детали (прецессии) в процессе вращения при обработке или к смещению центров станка. Исследования [1, 2] показывали, что прецессия оси детали определяется условиями контактирования центра станка с центровыми отверстиями, то есть зависит от перекаса центров, центровых отверстий, и неперпендикулярности торцов детали относительно осей центровых отверстий [3, 4].

Существуют два вида контакта конусных поверхностей центра и центрального отверстия — по постоянным и переменным точкам контакта. Если контактирование детали с центром происходит по постоянным точкам на центровом отверстии, то перемещение по поверхности конуса центра (неподвижного, жесткого)

происходит по траектории, отличной от окружности. При контактировании детали с центром по переменным точкам след точек контакта на центре станка находится в плоскости перекаса центров [5].

На практике смещение происходит в плоскости действия суммарной силы резания, но для упрощения расчетов погрешности формы для двух случаев перемещения оси вращения детали принимаем смещение в горизонтальной плоскости (рис. 1). При обработке детали на каждый ее оборот осуществляется подача шлифовального круга на величину Δ . В это время центр вращения детали перемещается из исходной точки 1 к точке 7 влево и возвращается в точку 13 вправо (рис. 1).

Для упрощения расчетов примем равномерное смещение оси детали. В исходном положении центр вращения детали отстоит от поверхности режущей кромки шлифовального круга на расстоянии R . Выберем шаг разбиения угла поворота — φ . Тогда количество исследуемых точек можно найти как:

$$n = \frac{2\pi}{\varphi} + 1. \quad (1)$$

Определим отклонение исследуемой i -й точки от режущей кромки шлифовального круга: