

УДК 621.951.02:539.371:534.1

В.В.Бурмистров, А.В.Тарасов

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И КРУТИЛЬНЫХ
КОЛЕБАНИЙ СВЕРЛ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Процесс сверления отверстий малых диаметров в жаропрочных и титановых сплавах вызывает большие трудности. Эти трудности, в первую очередь, связаны с недостаточной прочностью и жесткостью малых сверл, что обуславливает их низкую стойкость и является причиной частых поломок. Однако, повышение прочности и жесткости сверл, в силу специфики процесса сверления, не может быть достигнуто за счет изменения габаритных размеров инструмента, а возможно лишь путем изменения момента инерции сечения сверла при нахождении оптимальных форм и размеров стружкоотводящих канавок.

В этом отношении заслуживает внимания четырехленточные сверла, изготавливаемые Оренбургским инструментальным заводом. В отличие от стандартных, эти сверла имеют четыре направляющие ленточки и увеличенный диаметр сердцевины.

Сопоставление моментов инерции и площади поперечных сечений четырехленточных и стандартных сверл (рис. I), произведенное на основе графического метода расчета [1], показало, что у четырехленточных сверл указанные параметры больше, чем у стандартных. Это определит более высокую жесткость и меньшие деформации четырехленточных сверл при сверлении жаропрочных и титановых сплавов.

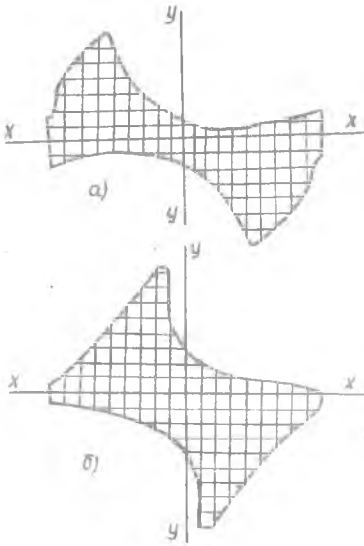


Рис. I. Сопоставление поперечных сечений стандартного и четырехленточного сверл \varnothing мм (увеличение примерно в 20 раз):
 а) стандартное сверло ($S = 2,44 \text{ мм}^2$; $J_p = 0,96 \text{ мм}^4$)
 б) четырехленточное сверло ($S = 2,94 \text{ мм}^2$; $J_p = 1,15 \text{ мм}^4$).

Под действием сил резания сверло, представляющее собой естественно закрученный стержень сложной формы и сечения, испытывает деформацию кручения, сжатия и продольный изгиб. Как известно, угол закручивания сверла может быть рассчитан по формуле

$$\varphi = \frac{M_{кр} \cdot l}{G \cdot J_k} \quad (1)$$

где, G - модуль упругости сдвига; l - длина вылета сверла; J_k - геометрическая характеристика жесткости сечения произвольной формы при кручении.

Как показали исследования А.А.Авакова [2] и Н.И.Резникова [3], значение J_k для стандартных сверл можно определить по формуле

$$J_k = 0,01 d^4$$

Эта формула получила подтверждение на основе метода электроанalogии в работах Н.В.Алексеева [4] и дает достаточную точность. В случае применения четырехленточных сверл в формулу (1) необходимо ввести поправочный коэффициент, который, на основе наших исследований, может быть принят равным $K = 1,2$.

Как показали расчеты, углы закручивания сверл $\varnothing 3,0$ мм при длине вылета $l = 30$ мм в процессе обработки титанового сплава ОТ4 (подача $S = 0,06$ мм/об; скорость резания $v = 3,8$ м/мин; $M_{кр.ср.} = 27$ кг мм) составляют: для сверл по ГОСТ $\varphi_{гост} = 7^\circ$, для четырехленточного $\varphi_{4лентч} = 5^\circ$.

Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными исследованиями углов закручивания сверл в процессе сверления с помощью скоростной киносъемки. Принципиальная схема установки приведена на рис. 2. На сверле $\varnothing 3$ мм на расстоянии 10 мм от вершины жестко закреплялся легкий диск $\varnothing 38$ мм, изготовленный из сплава В95 (1).

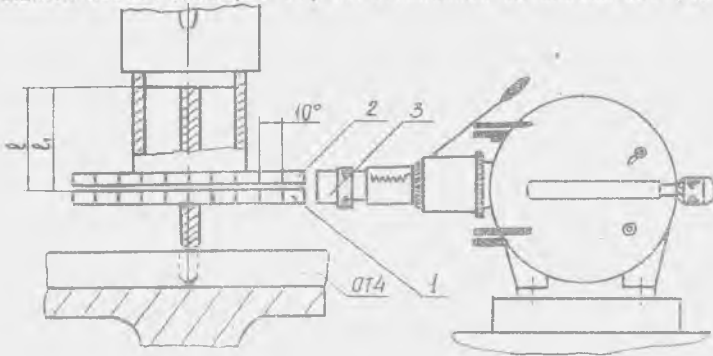


Рис. 2. Принципиальная схема установки для исследования углов закручивания сверл в процессе сверления

Станочник, жестко связанный с цанговым патроном, в котором закреплялось исследуемое сверло, имел буртик (2), такого же диаметра, что и диск, закрепленный на сверле. Зазор между диском и буртиком составлял 0,5-0,8 мм. На диске (1) и буртике (2) с помощью инструментального микроскопа наносились корундовой иглой риски по окружности через 10° , после чего приспособление вставлялось в шпиндель станка 2А135.

При сверлении, за счет деформации сверла, происходило смещение рисок, которое фиксировалось скоростной кинокамерой СКСИМ с частотой съемки 4000 - 4500 кадров в секунду. Величина угла закручивания определялась по смещению рисок, измеряемому на кадрах киноплёнки с помощью прибора "Миксфот" при масштабе 1 мм = 3 μ . Погрешность, связанная с изменением угла зрения в пределах $\pm 1^\circ$, составляла $\pm 0,25$ мм, что в пересчете на угол поворота не превышает $\pm 2'$.

Для расчета максимальных угловых деформаций в режущей части сверла были использованы данные по изменению углов закручивания по длине сверла. Эти данные были получены путем проведения специальных исследований, при которых сверло в статическом состоянии нагружалось крутящим моментом и осевой силой.

Некоторые из полученных значений углов закручивания на режущей части сверла приведены в таблице I.

Таблица I

Изменение угла закручивания стандартного и четырехленточного сверла в процессе сверления титанового сплава ОТ4.

Угол поворота сверла в град.	Сверло	Угол закручивания сверла в мин.									
		Номера кадров в пределах поворота сверления угол 10°									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0 - 10	Стандартное	473	420	450	480	503	495	488	473	435	405
		247	240	217	180	135	112	105	120	157	195
I40-I50		345	322	307	277	300	315	330	345	351	360
340-350		277	270	262	247	232	232	240	255	270	285
0-10	четырёхленточное	165	172	165	150	135	127	120	135	150	172
		180	172	157	135	120	112	127	150	172	187
I40-I50	ное	195	202	187	165	150	135	142	165	187	202
340-350		90	105	120	142	157	150	142	120	105	97

Найденные экспериментально средние значения углов закручивания сверла удовлетворительно совпадают с расчетными данными. При этом максимальные углы закручивания четырехленточных сверл примерно в 1,5 - 2,5 раза меньше, чем стандартных.

Характер изменения угла закручивания сверла по углу поворота свидетельствует о том, что сверло в процессе резания совершает периодические крутильные колебания (рис. 3). Эти колебания подчиняются гармоническому закону, правда с некоторыми искажениями, и происходят с частотами: $f_1 = 310-320$ гц; $f_2 = 20$ гц (стандартные сверла) и $f_1' = 470$ гц; $f_2' = 20-30$ гц (четырёхленточные сверла). При этом двойная амплитуда в среднем колеблется в пределах $2 W_{ст} = 1,5^0 - 3^0$ и $2 W_{4л.} = 1^0 - 1,5^0$.

Крутильные колебания при сверлении оказывают неблагоприятное влияние на стойкость и прочность сверл.

Прежде всего, в связи с крутильными колебаниями, имеет место периодическое изменение скорости резания. Так, в нашем случае, при

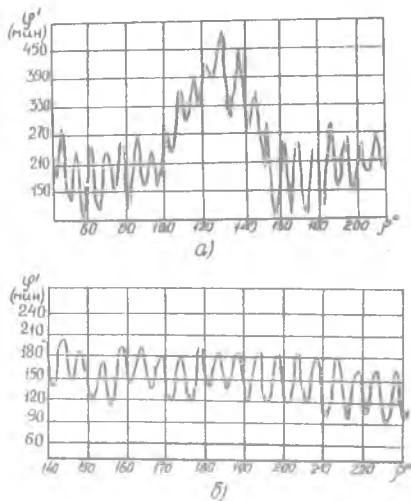


Рис.3. Виброграммы крутильных колебаний стандартного (а) и четырехленточного (б) сверл $\varnothing 3$ мм (обрабатываемый материал ОТ4, $V = 3,8$ м/мин; $S = 0,06$ мм/об/.

номинальном значении $V_0 = 3,8$ м/мин действительная скорость резания при работе стандартными сверлами изменялась в пределах $V = 2,3 - 5,3$ м/мин.

Предполагая, что изменение угла закручивания сверла, вызванное крутильными колебаниями, подчиняется гармоническому закону, можно записать выражение мгновенного значения скорости:

$$V_x = V_0 + A_v \cos \omega \tau,$$

где V_0 - номинальное значение скорости резания, $V_0 = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000}$ м/мин

A_v - амплитуда колебаний скорости, м/мин; ω - круговая частота, $\omega = 2\pi f$; f - частота колебаний; τ - время.

Тогда, согласно работе Д.Т.Васильева [5], дифференциальное уравнение износа сверла, в предположении постоянства подачи, может быть записано следующим образом:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{h_0 \cdot S_n}{C_T} (V_0 + A_v \cos \omega \tau)^n,$$

где h_0 - критерий притупления.

Износ сверла за время одного периода колебаний будет равен

$$h_k = \frac{h_0 \cdot v_0}{C_T} \int_{\tau=0}^{\tau=1/f} (v_0 + A_v \cos \omega \tau)^n d\tau \quad (2)$$

а стойкость сверла при наличии крутильных колебаний .

$$T_k = \frac{h_0}{h_k \cdot 60 \cdot f} \quad [\text{мин.}]$$

Снижение стойкости, вызванное крутильными колебаниями сверл, в первом приближении, может быть охарактеризовано коэффициентом 5, величина которого равна

$$\lambda = \frac{60 \cdot f}{v_0^n} \int_{\tau=0}^{\tau=1/f} (v_0 + A_v \cdot \cos \omega \tau)^n d\tau$$

Переменная составляющая скорости резания может быть записана в виде

$$\Delta v = \frac{60 \cdot A \cdot \omega \cdot \cos \omega \tau}{1000}$$

где A - амплитуда крутильных колебаний в линейных перемещениях по наружному диаметру сверла, мм.

Принимая на основании стойкостных исследований по сплаву OT4 [6] показатель относительной стойкости $m = \frac{1}{5} (n=5)$, после интегрирования получим

$$\lambda = 1 + 0,71 \xi^2 + 0,037 \xi^4,$$

где

$$\xi = \frac{A \cdot f}{v_0}$$

Как видно из этой формулы, чем больше амплитуда и частота крутильных колебаний сверла, тем ниже его стойкость.

Так, на основании выше изложенного, для стандартного сверла

$$A = W_{cm} \frac{\pi d}{360} = \frac{1,5 \cdot \pi \cdot 3}{360} = 0,02 \text{ мм};$$

$f = 320$ кц и $v_0 = 3,8$ м/мин, получим $\xi = 1,68$ и коэффициент снижения стойкости $\lambda = 3,3$. Если же расчет произвести, исходя из максимальных амплитуд колебаний $2 W_{от.} = 3^0$, то коэффициент снижения стойкости составит уже $\lambda = 13,9$. Поскольку снижение амплитуды колебаний при использовании четырехленточных сверл происходит более интенсивно, чем увеличение частоты, то коэффициент снижения стойкости в этом случае оказывается меньше: при максимальных для четырехленточных сверл амплитудах $\eta = 6,7$. В результате стойкость четырехленточных сверл в два раза превышает стойкость стандартных, что подтверждается данными стойкостных исследований [6].

Несколько большая эффективность четырехленточных сверл, по данным стойкостных исследований, (повышение стойкости в 2,5-3 раза по сравнению со стандартными сверлами) обуславливается дополнительно снижением температуры за счет лучшего проникновения смазочно-охлаждающей среды в зону резания через дополнительные канавки четырехленточного сверла [6].

Крутильные колебания, помимо изложенного, приводят также к тому, что сверло работает в условиях знакопеременных нагрузок. Это, в конечном счете, может привести к усталостному разрушению.

Так, при сверлении только одного отверстия на глубину 15 мм (при $V = 3,8$ м/мин; $S = 0,06$ мм/об) - сверло $\varnothing 3$ мм совершает 12-18 тыс. колебаний. За время обработки 200 отверстий, что соответствует периоду резания количество колебаний достигает $2,4 \cdot 10^6 - 3,6 \cdot 10^6$, то есть сверло испытывает от 2,4 до 3,6 миллиона циклов нагружения при напряжениях, близких к пределу текучести на кручение.

В настоящее время, в связи с отсутствием данных, не представляется возможным указать, какое предельное число циклов нагружения и при каких напряжениях может выдержать сверло до поломки. Решение этих вопросов требует постановки специальных исследований.

Из изложенного видно, какое огромное влияние на стойкость и прочность сверла оказывает его крутильные колебания при обработке жаропрочных и титановых сплавов. В связи с этим, выбор конструкции, геометрических параметров сверла и режимов резания при обработке труднообрабатываемых материалов необходимо производить с учетом виброустойчивости инструмента и всей системы СПИД.

Литература

1. Кириллов К.Н. Сверла повышенной жесткости для обработки труднообрабатываемых материалов. Сборник "Спиральные сверла". НИИМАШ, М., 1966.
2. Аваков А.А. Изв. Грузинского индустриального института, 1938.
3. Резников Н.И. Учение о резании металлов. Машгиз, М., 1947.
4. Алексеев Н.В. К решению задачи кручения спиральных сверл. Изд РИНТИП, Вильнюс, 1967.
5. Васильев Д.Т. Теоретические основы сверления спиральными сверлами и оптимальные условия для сверления и оптимальные условия для сверления жаропрочных материалов. Сб. "Спиральное сверло", М, 1966.
6. Бурмистров Е.В., Тарасов А.В. Сверление отверстий малых диаметров в титановом сплаве ОТ4 и хромистой бронзы БРХ08. Труды КуАИ, вып. 43, Куйбышев, 1970.