

А.С. Дударев

ОАО «Пермский завод «Машиностроитель»

В.И. Сvirщев

Пермский государственный технический университет

СТАБИЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЗА СЧЕТ ЗАДАНИЯ ВЫНУЖДЕННЫХ КОМПЕНСИРУЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Приводится методика назначения параметров компенсирующих колебаний при сверлении отверстий в полимерных композиционных материалах типа углепластик. Экспериментально показана эффективность сверления с наложением осевых колебаний на инструмент, обеспечивающих стабильность процесса обработки и повышение стойкости инструмента.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) получили широкое распространение в авиационной промышленности благодаря исключительному сочетанию механических, физических и химических свойств. Процесс механической лезвийной обработки ПКМ, в том числе процесс сверления ПКМ, в настоящее время в полной мере не изучен [1].

Особенностью сверления анизотропных материалов является периодический характер изменения осевой силы и крутящего момента в течение времени одного оборота сверла, так как прочность наполнителя (армирующих волокон) на порядок больше прочности связующего (матрицы). Первопричиной непостоянства силовых характеристик при сверлении ПКМ является анизотропия свойств ПКМ. Это вызывает появление собственных колебаний, обусловленных строением обрабатываемого материала. В связи с этим возникает необходимость создать такие условия резания, при которых силовые характеристики процесса сверления будут стабильными во времени.

Авторами выдвигается гипотеза, что с целью задания стабильности процесса сверления и повышения качества обработанной поверхности при сверлении заготовок из ПКМ следует накладывать на инструмент вынужденные компенсирующие колебания в противофазе колебаний, обусловленных строением ПКМ.

Сущность предлагаемого метода [2] заключается в установлении амплитуд и частот колебаний силовых характеристик, обусловленных строением

ем ПКМ и назначением вынужденных колебаний в противофазе. В этом случае динамика процесса сверления стабилизируется за счет сглаживания характеристик силовых параметров сверления (суммарного крутящего момента, осевой силы). В результате снижается образование сколов на выходе сверла из отверстий, повышается стойкость инструмента. Частота накладываемых компенсирующих колебаний ω_k подбирается таким образом, чтобы она соответствовала частоте колебаний, обусловленных строением материала.

При сверлении отверстий в заготовке из ПКМ, например углепластика марки КМУ-11э, с ортотропной схемой армирования, колебания силовых факторов будут происходить по периодическому закону, так как в многослойной конструкции ПКМ каждый слой чередуется взаимно перпендикулярным изменением направления основы смежных слоев. В пределах каждого оборота сверла будет происходить два полных периода колебаний силовых параметров.

Для углепластика КМУ-11э зависимость осевой силы P и крутящего момента M от угла поворота θ° сверла приведены на рис. 1. Анализ зависимости $P, M = f(\theta)$ показывает, что в течение времени одного оборота сверла при сверлении углепластика КМУ-11э происходит периодическое изменение P и M с частотой, в два раза превышающей циклическую частоту вращения сверла $\omega_{св}$, т.е. $\omega_k = 2\omega_{св}$.

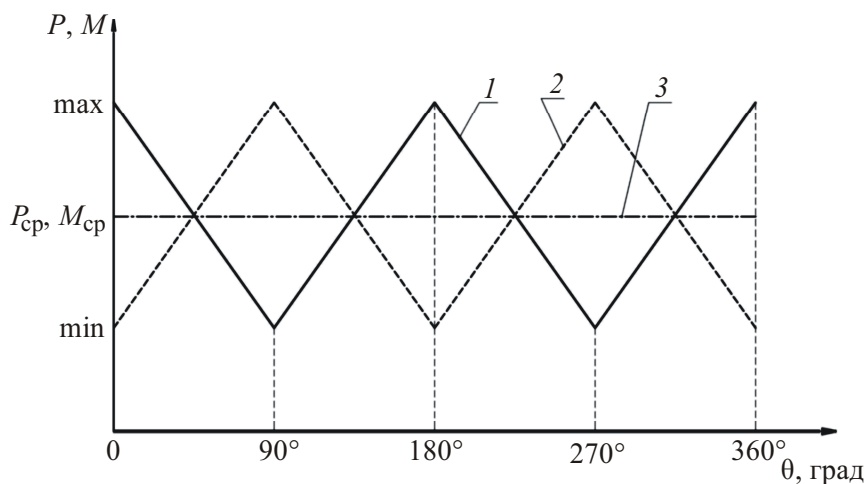


Рис. 1. Характер изменения силовых показателей в зависимости от угла поворота сверла с наложением компенсирующих колебаний: 1 – колебания, обусловленные строением ПКМ; 2 – компенсирующие колебания; 3 – суммарная характеристика силовых показателей

Примем α за угол армирования (или угол укладки волокон) ПКМ. В общем случае, при возможном изменении α в диапазоне $0 < \alpha < 180^\circ$,

коэффициент превышения циклической частоты вращения сверла $\omega_{\text{св}}$ будет равен $180/\alpha$.

Частоту накладываемых на сверло в противофазе компенсирующих колебаний определим по формуле

$$\omega_k = \frac{180}{\alpha} \omega_{\text{св}},$$

где ω_k – циклическая частота компенсирующих колебаний, с^{-1} ;

$\omega_{\text{св}}$ – циклическая частота вращения сверла, с^{-1} ;

α – угол армирования волокон ПКМ, град.

Закон изменения осевой силы P при сверлении в первом приближении можно аппроксимировать гармонической функцией

$$P = \frac{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}}{2} + \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{2} \cos(4\pi f_{\text{св}} \tau),$$

где $f_{\text{св}}$ – частота вращения сверла, Гц;

$P_{\text{max}}, P_{\text{min}}$ – максимальные и минимальные величины осевой силы;

τ – время, с.

Аналогично закон изменения крутящего момента при сверлении

$$M = \frac{M_{\text{max}} + M_{\text{min}}}{2} + \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{min}}}{2} \cos(4\pi f_{\text{св}} \tau),$$

где $M_{\text{max}}, M_{\text{min}}$ – максимальные и минимальные величины крутящего момента.

Круговая (циклическая) частота вращения сверла, при рекомендованных в работе [4] оборотах инструмента $n = 1000$ об/мин, определяется как

$$\omega_{\text{св}} = \frac{\pi n}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,66 \text{ с}^{-1}.$$

Для стабилизации процесса сверления ПКМ по силовым характеристикам (P, M) необходимо на сверло в противофазе наложить осевые или крутильные компенсирующие колебания (см. рис. 1). При этом в течение времени одного оборота сверла сумма двух колебаний даст стабильное среднее значение силовых характеристик: средней осевой силы ($P_{\text{ср}}$) и крутящего момента ($M_{\text{ср}}$).

Выразим закон изменения компенсирующей силы $P_{\text{комп}}$ в математическом виде:

$$P_{\text{комп}} = \frac{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}}{2} + \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{2} \cos \left[4\pi f_{\text{св}} \left(\tau - \frac{T}{2} \right) \right],$$

где T – период компенсирующих колебаний, $T = \frac{1}{2f_{\text{св}}} = \frac{\pi}{\omega_{\text{св}}}$, с.

Так же, как и для осевой силы, возможно представить выражения для крутящего момента.

Амплитуда колебаний, выраженная в единицах силовых параметров, при наложении осевых колебаний

$$A_p = (P_{\text{max}} - P_{\text{min}}) / 2.$$

Амплитуда при наложении крутильных колебаний

$$A_M = (M_{\text{max}} - M_{\text{min}}) / 2.$$

Компенсирующие колебания сдвинуты по фазе относительно колебаний силовых характеристик процесса сверления на величину $\omega_k T / 2$. Для осуществления стабильного сверления с помощью динамометра измеряют параметры колебаний силовых характеристик в течение одного оборота сверла, фиксируют их амплитудные значения.

Затем по амплитудным значениям силовых характеристик ($P_{\text{max}}, P_{\text{min}}$) и при принятых режимах сверления ($\omega_{\text{св}}$) рассчитывают параметры компенсационных колебаний (ω_k, A_p) и накладывают их в противофазе на сверло или шпиндель.

При сверлении отверстий $\varnothing 6,5$ мм в углепластике КМУ-11э, при циклической частоте вращения сверла $\omega_{\text{св}} = 104,66 \text{ с}^{-1}$ и осевой подаче $S_0 = 0,12$ мм/об, динамометром были зафиксированы следующие пороговые значения осевой силы: $P_{\text{max}} = 90,3$ Н; $P_{\text{min}} = 81,7$ Н.

Расчетные значения параметров компенсирующих колебаний составили:

$$\omega_k = (180 / \alpha) \omega_{\text{св}} = 209,32 \text{ с}^{-1};$$

$$A_p = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{2} = \frac{90,3 - 81,7}{2} = 4,3 \text{ Н}.$$

Для проверки и подтверждения гипотезы о положительном влиянии компенсирующих колебаний на стабильность сверления изделий из ПКМ были проведены эксперименты. Исследовалось влияние осциллирующих осевых колебаний инструмента на показатели стойкости инструмента, качество обработанных отверстий при сверлении во фрагментах звукопоглощающих панелей (ЗПК) авиационных двигателей ПС90А2.

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях проводились на широкоуниверсальном фрезерном станке 6А75 ВФ 1 с цифровой инди-

кацией подач. В качестве технологического оснащения для задания осевых вибраций использовался вибрационный электродинамический стенд ВЭДС-10.

При проведении исследований использовались сверла \varnothing 6,5 мм, изготовленные ОАО «Пермский завод «Машиностроитель». Сверла имеют стандартную конструкцию, за исключением режущей части. Режущая часть выполнена из твердосплавной пластины ВК-8 по ГОСТ 253–99. Особенностью геометрии сверла является наличие двух подрезающих режущих кромок (ПРК), выполненных по радиусу $R = 1,94$ мм (рис. 2). С целью исключения увода сверла от расположения отверстия центр сверла выступает относительно краев ПРК на величину 0,78 мм. Величина переднего угла у сверла $\gamma = 15^\circ$, заднего $\alpha = 20^\circ$. Основная особенность работы сверл с ПРК заключается в том, что их режущие кромки обеспечивают надежное перерезание слоев (нитей) наполнителя и смолистых веществ ПКМ с наименьшим нарушением сцепления наполнителя с основной массой обрабатываемого материала.

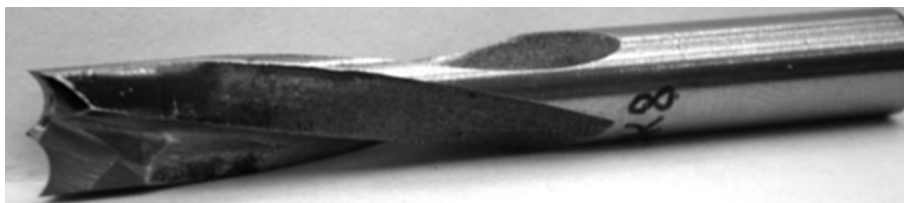


Рис. 2. Сверло \varnothing 6,5 мм

Испытания проводили на образцах (фрагментах натуральных звукопоглощающих панелей). Материал образцов – углепластик КМУ-11э. Физико-механические характеристики материала приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Физико-механические характеристики углепластика
(в нормальных условиях, при температуре 20 °С)**

Материал	Модуль упругости при растяжении, кгс/мм ²		Предел прочности при растяжении, кгс/мм ²		Предел прочности при сжатии, кгс/мм ²		Предел прочности при сдвиге, кгс/мм ²		Предел прочности при межслойном сдвиге, кгс/мм ²	Толщина моно-слоя, мм	Плотность г/см ³
	E_0	E_1	σ_0	σ_1	σ_0	σ_1	τ_0	τ_{90}			
Углепластик (препрег ТУ 1–595–43–500–97), КМУ-11э	13 500	750	110	3	115	17	18,5	12	6,5	0,125	1,52

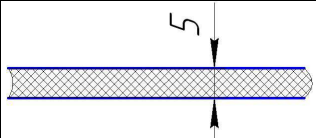
Индексы: 1 – свойства в направлении основы; 0 – свойства в направлении утка.

Размеры образцов $120 \times 120 \text{ мм}^2$, толщина 5 мм, с многослойной укладкой волокон, с углом $\alpha = 90^\circ$ между слоями.

Типоразмер и схемы армирования образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Типоразмер образцов, подвергаемых испытаниям

Фрагмент ЗПК	Диаметр волокна (толщина моно-слоя), мм	Общая толщина образца, мм	Схема армирования	Углы укладки волокон	Количество слоев
	0,125	5		$0^\circ/90^\circ$ $/0^\circ/90^\circ$	40

Для измерения силовых характеристик процесса сверления использовался динамометр УДМ-100.

При исследовании вибрационного сверления при фиксированных значениях амплитуды A и частоты f , полученных в результате расчетов компенсационных колебаний (значения параметров компенсирующих колебаний: частоты $\omega_k = 209,32 \text{ с}^{-1}$; амплитуды, выраженной в единицах силовых параметров, $A = 4,3 \text{ Н}$), регистрировали следующие показатели: наличие сколов и отслоений материала на выходе инструмента, стойкость сверла (мин).

Экспериментальные исследования проводились с применением теории статистического планирования экспериментов [3].

При проведении испытаний стойкости сверл за критерий затупления принимались признаки нарушения нормальной работы, требующие замены инструмента из-за резкого падения качества обработанных отверстий: появления вырывов, «разлохмачивания» ПКМ (КМУ-11э) вокруг отверстия. Этот критерий соответствовал затуплению сверла по задней поверхности $h_3 \geq 0,2 \text{ мм}$, на периферии режущей кромки. Стойкость сверл определялось количеством обработанных отверстий. Затем количества обработанных отверстий без явного ухудшения качества пересчитывали во время работы сверла путем умножения времени обработки одного отверстия на их количество.

Отслоения слоев ПКМ на выходе сверла оценивалось величиной заусенца, которая фиксировалась с помощью лупы ЛИ-3 по ГОСТ 25706–83, имеющей шкалу с ценой деления 0,1 мм, погрешностью 0,01 мм. Для отверстий $\varnothing 6,5 \text{ мм}$ принята предельная величина заусенца вокруг отверстия до 0,65 мм.

Произведено 14 замеров осевой силы при двух вариантах сверления, результаты которых приведены в табл. 3. Условия обработки: материал образцов – углепластик КМУ-11э, структура – ортотропная, сверло с ПРК \varnothing 6,5 мм, материал режущей части твердый сплав ВК 8, подача – 0,12 мм/об, частота вращения шпинделя 1000 об/мин.

Таблица 3

Результаты замеров осевой силы

Вариант сверления	Значение замеров P , Н														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	\bar{x}
Традиционное	80	92	97	96	100	94	96	90	99	97	85	102	93	106	94
Вибрационное	93	86	88	85	90	94	83	99	84	87	89	88	83	89	88

По результатам испытаний определяем математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение осевой силы [3], которые составили: $\bar{x}_1 = 94$; $\bar{x}_2 = 88$; $\sigma_1 = 6,75$; $\sigma_2 = 4,54$.

Коэффициенты вариации [3]:

$$V_1 = \frac{\sigma_1}{\bar{x}_1} = \frac{6,75}{94} = 0,072; \quad V_2 = \frac{\sigma_2}{\bar{x}_2} = \frac{4,54}{88} = 0,052.$$

Значения результатов измерения суммарного крутящего момента приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты замеров суммарного крутящего момента

Вариант сверления	Значение замеров M , Н·мм														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	\bar{x}
Традиционное	550	598	490	602	572	601	523	593	499	541	618	580	566	584	565,5
Вибрационное	501	515	521	529	519	533	523	505	523	531	507	506	539	535	521

Статистические показатели:

$$\bar{x}_1 = 565,5; \quad \bar{x}_2 = 521; \quad \sigma_1 = 39,73; \quad \sigma_2 = 12,26.$$

Коэффициенты вариации:

$$V_1 = \frac{\sigma_1}{x_1} = \frac{39,73}{565,5} = 0,070; \quad V_2 = \frac{\sigma_2}{x_2} = \frac{12,26}{521} = 0,023.$$

Результаты экспериментов показывают, что при сверлении с наложением компенсирующих колебаний значения осевой силы и суммарного крутящего момента имеют меньшую вариацию по сравнению с традиционным сверлением. Это означает, что процесс сверления с вибрациями более стабилен по силовым характеристикам – осевой силе и крутящему моменту, по сравнению с традиционным сверлением. Таким образом, предложенный способ сверления обеспечивает стабильность процесса сверления отверстий в ПКМ.

Результаты исследования стойкости сверл приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения стойкости сверл

Вариант сверления	Приведенные значения T , мин														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	\bar{x}
Традиционное	4,6	8,2	6,9	4,8	10,1	7	4,7	5,2	3,9	6,6	9,3	4,9	5,6	6,8	6,33
Вибрационное	6,7	9,15	8,5	9,5	10,1	9,8	7,9	6,1	9,3	8,2	8,1	7,8	9,0	8,3	8,46

Статистические характеристики:

$$\bar{x}_1 = 6,33; \quad \bar{x}_2 = 8,46; \quad \sigma_1 = 1,87; \quad \sigma_2 = 1,13.$$

Коэффициенты вариации:

$$V_1 = \frac{\sigma_1}{x_1} = \frac{1,87}{6,33} = 0,29; \quad V_2 = \frac{\sigma_2}{x_2} = \frac{1,13}{8,46} = 0,13.$$

Результаты показывают, что при сверлении с наложением компенсирующих колебаний зафиксированы не только большие показатели стойкости сверл, но и меньшие вариации значений стойкости. Это означает, что процесс сверления с вибрациями более стабилен по показателям стойкости, по сравнению с традиционным сверлением.

Результаты исследования стойкости сверл, $\varnothing 6,5$ мм с ПРК, при обработке материала КМУ-11э на режимах: $n = 1000$ об/мин, $S = 0,12$ мм/об по двум вариантам, представлены на рис. 3.

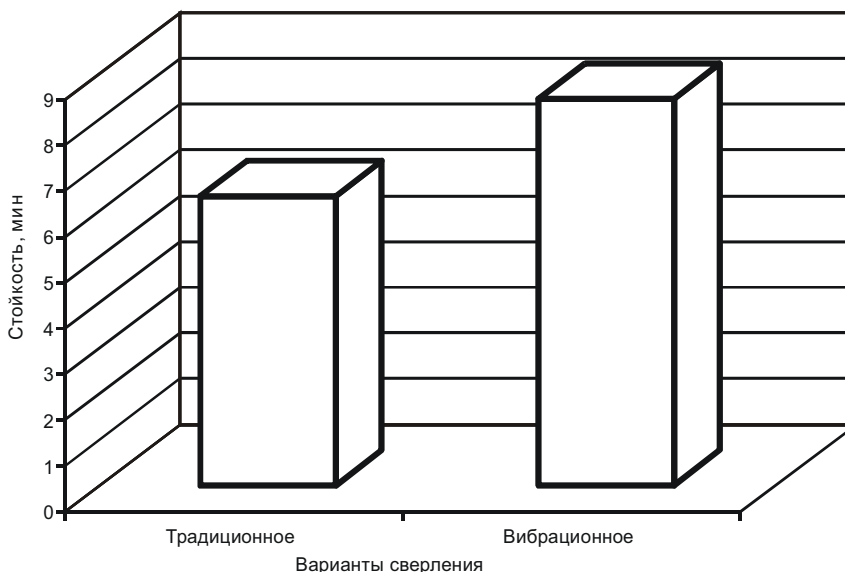


Рис. 3. Стойкость сверл $\varnothing 6,5$ мм в зависимости от вариантов сверления

Сделаем следующие выводы:

1. Разработанная методика назначения параметров компенсирующих колебаний при сверлении ПКМ позволяет стабилизировать динамику процесса сверления.

2. Для обработки отверстий $\varnothing 6,5$ мм в углепластике КМУ-11э с ортогональной схемой армирования были получены расчетные параметры компенсирующих колебаний – значения частоты и амплитуды, эффективность применения которых подтверждается экспериментами. Результаты экспериментальных исследований показали стабильность выходных характеристик процессов сверления с вибрациями. В результате снижается образование сколов на выходе сверла из отверстий, повышается стойкость инструмента.

3. Достигнуто повышение стойкости сверл при сверлении с компенсирующими колебаниями на 33–40 %.

Список литературы

1. Дударев А.С. Вопросы получения отверстий в элементах звукопоглощающих панелей авиационных двигателей из композиционных материалов // Аэрокосмическая техника и высокие технологии: сб. тез. VIII Всерос. науч.-техн. конф.; Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2005. – С. 45.

2. Дударев А.С., Ломаев В.И., Свирщев В.И. Методика подбора параметров колебаний при сверлении изделий из полимерных композиционных

материалов // XXVII Российская школа по проблемам науки и технологий: сб. тез.; Межрегион. совет по науке и технологиям. – Миасс, 2007. – С. 21.

3. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.

4. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 176 с.

Получено 4.05.2010