

В. М. АЛИМОЧКИН, канд. техн. наук

### АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Дальнейшее совершенствование авиаконструкций связано с внедрением новых конструкционных материалов, обладающих высокой удельной прочностью и жесткостью относительно

87

основных видов воздействия. В связи с этим в последние годы усилилась тенденция к внедрению в авиаконструкции принципиально новых материалов, состоящих из высокопрочных и жестких волокон, соединенных между собой полимерным связующим, которые получили название композиционных материалов [1].

Одной из специфических особенностей композиционных материалов является резко выраженная анизотропия свойств — исключительно высокие прочностные и упругие характеристики вдоль направления волокон и низкие характеристики в поперечном направлении. Специфические особенности композиционных материалов и предопределяют особенности процессов и оборудования для их обработки.

Получение качественных деталей из композиционных материалов зависит от правильно спроектированного технологического процесса механической обработки, геометрии инструмента и условий обработки. Применяемые методы и инструмент для механической обработки традиционных конструктивных материалов используются в основном при обработке композиционных материалов. Однако исходя из физико-механических свойств композиционных материалов, структуры и состава имеются и существенные особенности при механической обработке. Эти особенности заключаются в характере контактных явлений, режимах обработки, геометрии инструмента, параметрах, определяющих режущие свойства инструмента, типе применяемого инструментального материала и условий обработки.

Одним из основных методов получения отверстий в композиционных материалах является сверление. Высокая работоспособность сверла во многом зависит от величин и характера изменения геометрических параметров вдоль его режущих кромок. Важнейшими из параметров являются угол  $2\varphi$  при вершине сверла, передний угол  $\gamma$  и задний  $\alpha$ . Угол  $2\varphi$  оказывает противоречивое влияние на процесс сверления композиционных материалов. Его оптимальное значение зависит от многих факторов, предопределяющих характер работы сверла. Величина угла  $2\varphi$  во многом определяет стойкость инструмента, производительность и качество обработки.

Передний угол  $\gamma$  является важнейшим из геометрических параметров инструмента, определяющим процесс превращения срезаемого материала в стружку. От его величины зависят степень деформации срезаемого слоя, работа стружкообразования, силы резания, количество выделяемого в зоне резания тепла и температура резания. Поэтому величина переднего угла во многом определяет стойкость режущего инструмента при обработке отверстий в композиционных материалах.

Задний угол  $\alpha$  является важным элементом конструкции сверл, особенно сверл, предназначенных для сверления высокоупругих материалов, какими являются большинство современ-

ных композиционных и неметаллических материалов. Его величина в значительной мере влияет на стойкость инструмента. Зависимость периода стойкости инструмента от изменения заднего угла имеет экстремальный характер. Вначале по мере увеличения заднего угла уменьшается ширина площадки контакта и сила трения на задней поверхности, что снижает интенсивность ее изнашивания. Период стойкости возрастает при дальнейшем увеличении заднего угла, угол заострения  $\beta$  чрезмерно уменьшается, что снижает прочность режущего клина и ухудшает отвод тепла в тело инструмента. Вследствие этого период стойкости инструмента с большими задними углами уменьшается. С ростом величины упругого восстановления поверхности среза, т. е. толщины упруго деформируемого слоя поверхности обрабатываемой детали, увеличивается ширина площадки соприкосновения задней поверхности сверла с поверхностью резания, в пределах которой фактический задний угол равен нулю. Поэтому с увеличением предела упругости материала обрабатываемой детали оптимальный задний угол становится больше.

Одним из основных факторов, определяющих оптимальную величину заднего угла, является толщина срезаемого слоя. М. Н. Ларин рекомендует определять оптимальные значения величин задних углов по формуле

$$\sin \alpha_{\text{опт}} \approx \frac{C}{a^{0,3}},$$

где  $C$  — постоянная величина;  $a$  — толщина срезаемого слоя, мм.

На оптимальные величины значений заднего угла оказывает влияние также диаметр сверла, жесткость системы СПИД, принятые величины режима резания и другие факторы. Для конкретных условий обработки могут быть определены оптимальные значения задних углов, обеспечивающие в данных условиях максимальную стойкость инструмента.

Угол  $\omega$  наклона винтовых канавок спирального сверла влияет на величину переднего угла на его режущей части, особенно на периферию сверла. С увеличением угла  $\omega$  передний угол также увеличивается. Это приводит к уменьшению усилий резания, что способствует лучшему отводу стружки. Однако у сверл с большим углом наклона винтовых канавок снижается жесткость и чрезмерно ослабляется режущая часть, что приводит к снижению стойкости инструмента. Поэтому существует оптимальное значение угла  $\omega$ , обеспечивающее наибольшую стойкость, необходимые передние углы, хороший отвод стружки из зоны обработки на жесткость сверла.

Величины углов  $2\varphi$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha$  и  $\omega$ , выбираемые в зависимости от типа композиционного материала, его физико-механических

свойств, могут находиться в следующих пределах:  $2\varphi$  — от 45 до 130°;  $\gamma$  — от 3 до 10°;  $\alpha$  — от 8 до 25°;  $\omega$  — от 10 до 30°.

Во избежание налипания стружки к передней поверхности сверла и ее пакетирования в отверстии стружечные канавки спиральных сверл должны быть предельно расширены и тщательно отполированы, а поперечная режущая кромка — максимально укорочена.

Большое влияние на качество обработанной поверхности, износ инструмента оказывают параметры режима резания. Скорость резания в большей степени, чем другие параметры режима резания, влияет на стойкость инструментов при сверлении композиционных материалов. Это связано с возрастанием скорости резания и трения в единицу времени, а также с интенсификацией роста температур в зоне резания и оптимально восстановительных процессов на контактных площадках инструмент-полимер. Влияние подачи примерно на 30% меньше, чем влияние скорости резания. Это объясняется незначительным увеличением удельной силы резания, работы деформации и трения. С увеличением диаметра сверления улучшаются условия теплоотвода и стойкость инструмента повышается. Диаметр сверла оказывает влияние на величину крутящего момента и осевую силу резания, однако при сверлении композиционных материалов это влияние менее существенно, чем при сверлении сталей. Это объясняется тем, что усадка и разбивка обрабатываемых отверстий происходит одновременно.

При сверлении отверстий малых диаметров преобладает усадка отверстий, вызванная упругими деформациями материала заготовки. С увеличением диаметра сверления преобладает разбивка отверстий и, как следствие, уменьшается момент трения цилиндрических направляющих ленточек о стенки отверстия. Износ инструмента, в свою очередь, оказывает большое влияние на осевую составляющую силы резания и крутящий момент, причем осевая сила резания в большей мере зависит от величины затупления инструмента, чем величина крутящего момента. Это вызвано возрастанием удельных сил резания на передней и задней поверхностях сверла при подминании слоя обрабатываемого материала. На долю недеформированной сердцевины сверла приходится до 50—60% осевой составляющей силы резания. Зависимости осевой составляющей силы резания и крутящего момента от режима сверления имеют вид [2, 3]:

$$P_0 = \frac{C_p \cdot S_{yp} D^{xp}}{v^{xp}}; \quad M = \frac{C_m \cdot S_{ym} \cdot D^{xm}}{v^{xm}}.$$

Коэффициенты и показатели степени для каждого обрабатываемого материала имеют свои значения. Износ инструмента при сверлении композиционных материалов носит усталостно-

механический и молекулярно-химический характер и сопровождается массовым вырывом микрочастиц инструментального материала [2, 3]. Основными причинами интенсивного износа сверл являются: большая площадь фактического контакта инструмента с обрабатываемым материалом; образование в условиях высоких температур и давлений на границе трения металл—полимер поверхностно-активных радикалов, способствующих насыщению структуры дислокациями и диспергированию поверхностного слоя металла; непрерывное сцепление полимера с микровыступами инструментального материала. Динамическое воздействие твердых частиц наполнителя материала интенсифицирует, а в ряде случаев и предопределяет скорость износа сверл. Наиболее интенсивное изнашивание режущего клина сверл протекает в зоне сопряжения главных и вспомогательных поверхностей, несколько меньше — на прикромочных участках передней поверхности.

Величина износа сверла по задней поверхности на уголке в период пропорционального износа зависит главным образом от свойств инструментального материала, наполнителя композиционного материала и режима резания. Обобщенную зависимость величины износа сверла от условий резания, полученную при сверлении стеклопластика твердосплавными сверлами, можно выразить в виде

$$h_3 = \frac{C_h \cdot t \cdot v^z \cdot S^y}{D^x},$$

где  $t$  — время работы, мин;  $v$  — скорость резания, м/мин;  $S$  — подача, мм/об;  $D$  — диаметр сверла, мм;  $C_h$  — коэффициент пропорциональности;  $x, y, z$  — безразмерные показатели степени. При сверлении деталей из стеклопластика сверлами  $D = 6 \div 20,0$  мм со скоростью резания  $v = 30 \div 85$  м/мин и подачей  $S = 0,1 \div 0,4$  мм/об  $C_h = 7,8 \div 10^{-3}$ ;  $m = 0,56$ ;  $z = 0,55$ ;  $y = 0,36$ ;  $x = 0,70$  [2].

В процессе изнашивания режущего клина сверла увеличивается радиус округления режущей кромки, который зависит от степени износа задней поверхности сверла [2]:

$$\rho = \rho_0 + kh_3,$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий в основном от физико-механических свойств инструментального и обрабатываемого материала.

Величина износа передней поверхности сверла примерно равна 40—50% величины износа его задней поверхности. При обработке слоистых материалов критерий затупления следует устанавливать по технологическим признакам: недопустимости деструкции поверхностного слоя и образования сколов и заусенцев у кромок отверстия; обеспечения заданной шероховатости обработанных поверхностей. Допустимая величина износа

сверл из быстрорежущих сталей и твердых сплавов при сверлении композиционных и неметаллических материалов в зависимости от материала сверла в подавляющем большинстве случаев не должна превышать 0,15—0,35 мм. Для определения оптимальной величины скорости резания в зависимости от условий сверления можно пользоваться уравнением [2]

$$v = \frac{C_v \cdot D^x}{T_m \cdot S^y} \cdot K_{uv}$$

Не менее важным при механической обработке композиционных материалов является качество обработанной поверхности. Качество обработки композиционных материалов во многом зависит от их обрабатываемости, физико-механических свойств, тепловых условий резания, методов крепления заготовок, величины износа режущего инструмента, геометрических параметров режущей части сверл, режима резания и других факторов [4, 6].

Так как в большинстве композиционные материалы являются вязкоупругими, то в процессе механической обработки наблюдаются пластические деформации, зависящие от различных факторов. Упругое восстановление поверхностных слоев влияет на точность и шероховатость обработки отверстий. Так как в большинстве случаев при обработке композиционных материалов диаметр просверленного отверстия получается меньше диаметра сверла, то диаметр сверла необходимо выбирать больше номинального диаметра обрабатываемого отверстия на величину «усадки» [2]:

$$\delta = \left[ \rho \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}} - 1 \right) + l_a \right] \sin \alpha - \rho \left[ \frac{\left( \sin \frac{\beta}{2} + \alpha \right)}{\sin \frac{\beta}{2}} - 1 \right],$$

где  $\rho$  — радиус округления режущих кромок сверла;  $\beta$  — угол заострения режущего клина инструмента;  $l_a$  — длина контакта обработанной поверхности материала с задней поверхностью инструмента;  $\alpha$  — задний угол сверла.

Величина радиуса округления режущей кромки может быть приближенно определена по формуле

$$\rho = (0,56 \div 0,64) \cdot h_a.$$

Чем меньше износостойкость инструментального материала и чем больше изнашиваемость композиционного материала, тем меньше радиус округления режущих кромок у изношенных сверл при сопоставимой величине износа задних поверхностей. С увеличением износа инструмента увеличивается радиус округления режущих кромок, растет сила отжима инструмента от детали и уменьшается величина упругого восстановления.

В результате упругого деформирования увеличивается трение между обработанной поверхностью и задними поверхностями режущего инструмента. В зоне резания наблюдается обильное выделение тепла. Кроме того, низкая теплопроводность композиционных материалов усугубляет напряженные температурные условия работы режущего инструмента. Практически все тепло, выделяемое в процессе резания, поглощается режущим инструментом и только незначительная его часть отводится вместе со стружкой. Тепловое расширение композиционных материалов больше, чем металлов, что приводит к дополнительному расширению поверхностных слоев под действием образующегося тепла, к увеличению трения и интенсификации теплообразования. Повышение температуры в зоне резания ведет к преждевременному износу режущего инструмента, уменьшению точности и увеличению шероховатости обработанных поверхностей, появлению задиров, оплавлений и других дефектов.

Для повышения класса шероховатости обработку композиционных материалов необходимо проводить с применением СОЖ, состав и способ подвода которого в рабочую зону зависят от типа материала и условий обработки. От совершенства конструкции режущего инструмента во многом зависит качество и, главным образом, производительность механической обработки отверстий в деталях композиционных материалов [6].

Большое разнообразие типов и марок композиционных материалов, значительное отличие их физико-механических свойств определяют оптимальные значения величин геометрических параметров режущей части инструмента и вызывают необходимость разработки различных конструкций режущего инструмента для обработки отверстий.

Важным условием разработки высокопроизводительного инструмента для качественной обработки отверстий в композиционных материалах является наличие в их конструкции стружкоотводящих канавок увеличенных размеров, достаточных для транспортировки размягченной, иногда оплавленной и липкой стружки. Стружечные канавки спиральных сверл рекомендуется полировать или хромировать, а режущую часть затачивать кругами из сверхтвердых материалов.

Особенностью конструкции большинства инструментов для сверления композиционных материалов является наличие укороченной рабочей части, что позволяет уменьшить трение и теплообразование при обработке [5, 6].

Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что механическая обработка, в частности процесс получения отверстий в деталях из различных композиционных материалов, имеет свои особенности, зависящие от физико-механических свойств материала и характера контактных явлений в рабочей зоне.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туманов А. Т. Современные композиционные материалы. — М., ОНТИ, 1974. — 146 с.
2. Семко М. Ф., Дрожин В. Н., Кравченко Л. С. — Прогрессивные конструкции сверл и их рациональная эксплуатация. Тезисы докл./ Всесоюзн. научно-технический симпозиум по режущим инструментам. — Вильнюс: Лит. ДНТП, 1974, 35—40 с.
3. Семко М. Ф., Сустан Г. К., Дрожин В. Н. Обработка резанием электроизоляционных материалов. — М.: Энергия, 1974. — 175 с.
4. Тихомиров Р. А., Николаев В. И. Механическая обработка пластмасс. — М.—Л.: Машиностроение, 1975. — 130 с.
5. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. — М.: Машиностроение, 1974. — 192 с.
6. Криштопа Н. А., Радзевич С. П., Бобко А. И. Обработка отверстий в композиционных и неметаллических материалах. — Киев: Техника, 1980. — 126 с.