DOI: 10.24892/RIJIE/20250406

Влияние силовых факторов на процесс сверления*

Шульгин А.Н., Гречушкин И.Е.
Снежинский физико-технический институт (филиал) ФГАОУ ВО “НИЯУ “МИФИ”,
г. Снежинск, Российская Федерация
ANShulgin@mephi.ru

Аннотация. **В данной работе проведен сравнительный обзор исследований, посвященных влиянию силовых факторов на процесс сверления композиционных материалов, включая полимерно-композиционные материалы, пластики, армированные углеволокном, и пластики, армированные стекловолокном. Рассмотрены математические модели различных авторов, описывающие зависимость осевой составляющей силы резания и крутящего момента от скорости резания, подачи, геометрии режущего инструмента и свойств материала. Особое внимание уделено экспериментальным исследованиям с использованием динамометров, а также применению CAE-систем (ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, DeFORM и др.) для моделирования процессов резания. Выявлены основные подходы к анализу влияния силовых факторов на процесс сверления. Описана разработка и реализация собственной математической модели для определения осевой составляющей силы резания при сверлении стеклотекстолита. Установлена сходимость результатов работы модели с реальными значениями, полученными практическим путем. С использованием разработанной модели смоделированы операции сверления с различными сверлами и композитными материалами при различных режимах работы. Определены рациональные режимы работы для смоделированных условий.**

Ключевые слова: **Осевая составляющая, Сила резания, Крутящий момент, Композиционные материалы, CAE-системы, Математические модели.**

Введение

Композитный материал – это многокомпонентный материал, изготовленный из двух или более компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами. В современном мире машиностроение и приборостроение не могут обойтись без применения композиционных материалов, обладающих высокой твердостью, прочностью и стойкостью к высоким температурам при сравнительно малом удельном весе относительно традиционных материалов (сталь, чугун, алюминий, латунь и т.п.).

Ключевыми проблемами, возникающими при сверлении композиционных материалов, являются расслаивание, повреждения на входе и выходе отверстия, а также ускоренный износ режущего инструмента. Эти явления обусловлены сложным характером взаимодействия между режущим инструментом и многослойной структурой материала, включающей матрицу и армирующие волокна.

Для повышения качества обработки и снижения сил резания активно разрабатываются и применяются математические модели, описывающие процесс резания. Такие модели учитывают влияние различных факторов, включая геометрию режущего инструмента, режимы резания и свойства материала.

Обзор существующих моделей

Исследованию влияния силовых факторов на процесс сверления композиционных материалов посвящено большое количество работ. Эмпирические модели составляющих сил резания разных авторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Эмпирические модели составляющих силы резания при сверлении

№ п/п	Авторы	Математическая модель
1.	А.А. Степанов	$P_o = C_p D^{Xp} S^{Yp} K_p, K_p = K_{p\varphi} K_{p\alpha} K_{p\gamma},$ $M_{кр} = C_M D^{XM} S^{YM} K_M$ $K_M = K_{Mh}\, K_{M\varphi}$
2.	П.И. Буловский, Н.А. Петрова	$P_0 = 152 * S^{0.89}; M_{кр} = 1.45 * D^{1.56}$ $P_0 = 156 * S^{0.742}; M_{кр} = 2.35 * D^{1.44}$
3.	Р.С. Ананд, К. Патра	$K_{nk} = a_{0k} h^{b0k} \upsilon^{c0k}$ $K_{\beta k} = a_{1k} h^{b1k} \upsilon^{c1k}$
4.	И. Рахаматулла, М.С. Шунмугам	$Thru_{swr} = k_{f1} + k_{f2} * V_R + k_{f3} * S$ $Torq_{swr} = k_{m1} + k_{m2} * V_R + k_{m3} * S$
5.	С.С. Цао, Г. Хоченг	$F = -23.03 + 54T + 0.181G - 224\, f + 9.575 * 10^{-2} S$
6.	Н. Батнагар, М.К. Джалутхария	$F_c = \frac{\Delta W \tau_3 f \sin(k/2)\cos(\beta-\alpha)}{2\sin\varphi\cos(\varphi+\beta-\alpha)}$ $F_t = c_1 F_c \tan(\beta-\alpha)$ $T = c_2 (F_c + \mu F_t) \rho R$
7.	М. Фернандес, К. Кук	$F = K_1 (fd)^{1-a} + K_2; T = kf^{0.39} d^{1.39}$
8.	И. Гонг, К. Лин, К. Ф. Эхман	$F_z = \frac{4k(1+\varphi) f_r R_\alpha \sin\delta_n}{\cos\delta_n - \sin(\delta_n - \varphi)}; M_z = \frac{2k(1+\varphi) f_r R_\alpha^2 \cos\delta_n}{\cos\delta_n - \sin(\delta_n - \varphi)}$
9.	Л.Б. Жанг, Л.Дж. Ванг, К.Ю. Лиу	$P_c = \frac{3\pi}{\xi}\sqrt{2G_{IC}D}$
10.	М.Б. Лазар, П. Ксирочакис	$\frac{\partial F_z((r_1,h_1),(r_2,h_2))}{\partial r} = \frac{F_z((r_1,h_1),(r_2,h_2))}{r_2 - r_1}$
11.	Е.А. Окутан	$\frac{M_d}{d^2 H_B} = K_6 \frac{s^{2a} f^{1-a}}{d^{1+a}} \left(\frac{f^{0.8}}{d^{1.2}} * \frac{1-\left(\frac{c}{d}\right)^2}{1+\left(\frac{c}{d}\right)^2} + K_7 \left(\frac{c}{d}\right)^{2-a} \right)$ $\frac{T_V}{d^2 H_B} = K_{13} \frac{s^{2a} f^{1-a}}{d^{1+a}} \left(\frac{1-\frac{c}{d}}{1+\left(\frac{c}{d}\right)^a} + K_{14} \left(\frac{c}{d}\right)^{1-a} \right) + K_{12} \left(\frac{c}{d}\right)^2$

Автором А.А. Степановым проведено определение осевой составляющей силы резания и крутящего момента при сверлении полимерно-композиционных материалов типа ППН (получены методом продольно-поперечной намотки),

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

КППН (получены методом косослойной продольно-поперечной намотки) и однонаправленного углепластика, марка которого не приводится [1]. Режимы резания: скорость резания 0,08...1,0 м/сек, скорость движения осевой подачи 0,08...0,62 мм/об, диаметр сверла 4...20 мм.

П.И. Буловский и Н.А. Петрова предлагают зависимости, связывающие величину подачи с осевой составляющей силы резания и зависимости крутящего момента от диаметра отверстия для электроизоляционных материалов СТ и СТЭФ [2].

Широкий круг работ представлен по обработке пластика, армированного углеродным волокном (CFRP carbon fiber reinforced plastic). Так Р. Ананд и К. Патра в своей работе [3] подробно рассматривают геометрия заточки режущего инструмента и влияние радиуса закругления режущей кромки rβ и скорости резания и подачи на динамику процесса резания. Описываю математическая модель процесса сверления. Практическая отработка результатов выполнена на установке Kistler Mini Dyn 9256C2. Резание материала осуществлялось на высоких скоростях резания: подача 1...4 мкм/об, скорость резания 15,7...39,28 м/мин. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных осевой составляющей силы резания и крутящего момента. Интересным является факт, что выходные данные усреднялись послойно и отдельно для эпоксидного слоя и углеволокна.

С.С. Цао и Г. Хоченг выполняют обработку углепластика алмазной коронкой диаметром 10 мм с воздушным удалением стружки из зоны резания. Для опытных работ используется динамометр Kistler 5007. В [4, 5] показано влияние размера филаментов волокна, подачи и скорости резания на осевую состовляющую силы резания. Н. Батнагар и М. Джалутхария проводят ряд опытов по определению предела прочности на сдвиг для оптимизации модели базового материала [6]. Л. Жанг, Л. Ванг и К. Лиу разработали математическую модель для решения дифференциальных уравнений для определения максимальных усилий резания для исключения расслоения материала на выходе сверла [7]. Авторами дополнительно выполнена проверка модели на динамометре Kistler model 9273 на разных режимах резания при использовании сверл диаметром 6 мм и показано схождение теоретических и экспериментальных данных. Особое внимание уделено уводу сверла во время обработки.

Для не уточненной марки углеволокна авторами М. Фернандес и К. Куком проведен ряд экспериментов по сверлению микроразмерными сверлами диаметром 0,2 мм [8, 9]. Использована установка для измерения усилий резания собственной разработки. Обработка выходных данных выполнялась с использованием уравнений Шоу. Сделан упор на минимизации предельных осевых усилий для исключения расслаивания материала. При проведении экспериментов учтено влияние затупления инструмента по время сверления.

Для неуказанной марки композиционного материала авторами И. Гонгом, К. Лин и К. Эхманом разработана математическая модель и решены дифференциальные уравнения для определения максимальных усилий резания для исключения расслоения материала на выходе сверла [10, 11]. Дополнительно выполнена проверка модели на динамометре Kistler 6061Al-T6 на разных режимах резания при использовании сверл диаметром 6 мм. Показано схождение теоретических и экспериментальных данных. Особое внимание уделено построению динамической модели процесса сверления и стабилизации процесса резания.

Обработке электроизоляционного полиэфирного стеклопластика толщиной 2,2 мм с размером ячейки 10 мкм (GRP glass reinforced polyester), по своим свойствам схожим со стеклотекстолитом посвящены работы авторов И. Рахматуллы и М. Шунмугама. В их работах [5, 12] подробно рассмотрена геометрия режущего инструмента и ее влияние на процесс резания материала. Дополнительно проведены экспериментальные работы с использованием установки Kistler MiniDyn 9256C2. Результаты оформлены в виде выходных графиков и таблиц. Численно доказано влияние трения боковой стенки сверла на осевую составляющую силы резания и крутящий момент.

М. Лазар и П. Ксирочакис в своих трудах [13] рассматривают обработку пластика, армированного углеродным волокном (CFRP carbon fiber reinforced plastic) и пластика, армированный стекловолокном (GFRP glass fiber reinforced plastic) при обработке тремя типоразмерами сверл (5,36 мм, 5,55 мм, 5,6 мм) разной геометрии. Измерения осевой составляющей силы резания выполнялись с помощью динамометра Kistler 9255B. Авторами проведен сравнительный анализ осевых нагрузок при обработке углеволокна и стекловолокна. Установлено, что основное влияние на осевую составляющую силы резания оказывает скорость движения осевой подачи и геометрия инструмента, в то время как частота вращения шпинделя не существенна.

Е. Окутан [14] с помощью экспериментальных данных и модели Show-Oxford, которая применяется для расчета осевой составляющей силы резания и крутящего момента при сверлении металлов, получил зависимости для расчета составляющих сил резания при сверлении отверстий в электроизоляционном пластике, армированном стекловолокном.

Таким образом, основными составляющими сил резания при обработке базового материала симметрично заточенным сверлом являются крутящий момент M и осевая составляющая силы резания P0. Процесс влияния силовых факторов на обработку композиционных материалов предметно рассмотрен в работах отечественных и зарубежных авторов [1-11, 13, 14], из которых необходимо выделить Рави Ананда и Карали Патру, поскольку в их работе анализ выходных сил резания выполнен отдельно по каждому слою эпоксидного компаунда и композиционного волокна.

Основными подходами к анализу влияния силовых факторов на процесс сверления является, во-первых, разработка математической модели и решение систем дифференциальных уравнений с дальнейшей проверкой с помощью экспериментальных данных, полученных при измерении силы динамометром [3-5, 7, 10-13]. Во-вторых, это построение теоретической модели в CAE-системах типа ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, DeFORM и пр. и проверка схождения теоретических и экспериментальных данных, которые так же получены с помощью реальных измерений динамометром либо аналогичными приборами [3-5, 13].

Разработка собственной модели

В связи с отсутствием модели, подходящей для обработки фольгированного стеклотекстолита, средствами ANSYS Workbench, LS-DYNA была разработана и реализована собственная модель, которая позволяет определять осевую составляющую силы резания P_0. Адекватность выходных данных разработанной имитационной модели процесса обработки композиционного материала доказана

проведением ряда практических экспериментов с использованием прецизионного динамометра Kistler Mini Dyn 9256C2 и дальнейшим проведением статистического анализа. Установлено, что выборки, полученные в результате определения осевой составляющей силы резания, сопоставимы и принадлежат одной генеральной совокупности.

Также были определены механические характеристики материалов, используемых в производстве. Доказано, что среднее абсолютное отклонение данных, полученных в результате моделирования процесса сверления с сеткой КЭ 0,05-02 мм не превышает 10%.

В продолжении работ было принято решение определения осевой составляющей силы резания с помощью ранее разработанной компьютерной имитационной модели согласно алгоритма (рис. 1).

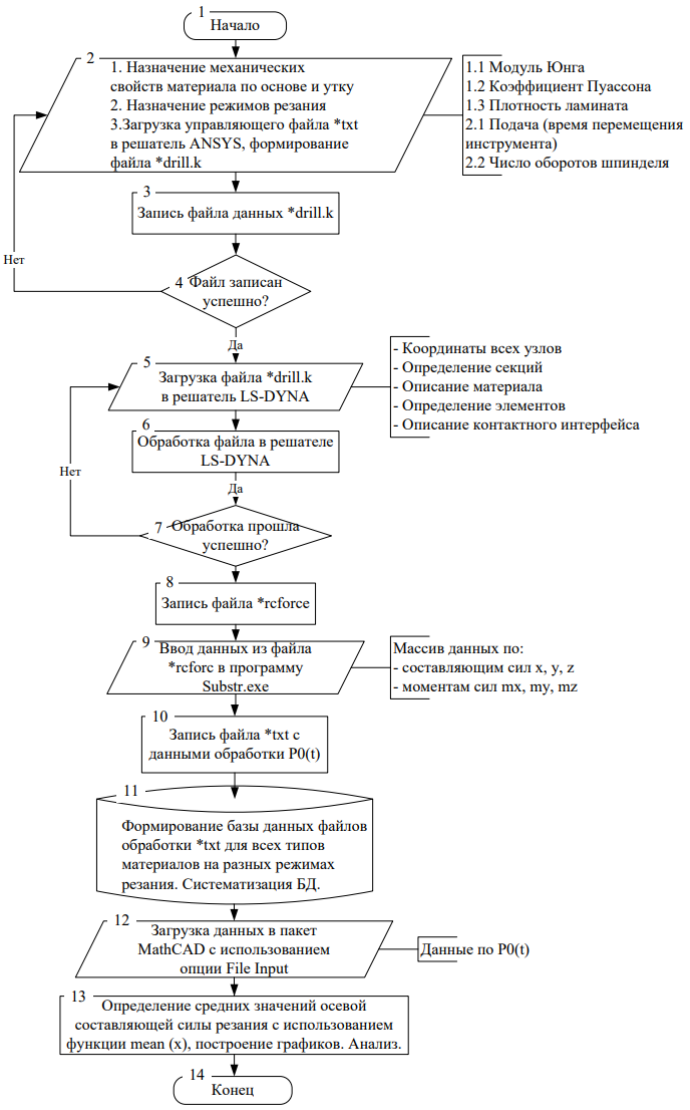

Рис. 1. Алгоритм теоретического определения осевой составляющей силы резания (P_0)

Согласно принятого алгоритма, перед началом исследования в командный файл вносятся параметры механических свойств материала по основе и утку. Далее назначаются режимы резания: частота вращения шпинделя и скорость движения осевой подачи (время перемещения инструмента). После загрузки командного файла в программу ANSYS формируется выходной файл с расширением *k, который содержит информацию по всем координатам узлов и модели заготовки, описание материала, определение элементов и контактного интерфейса. Данный файл обрабатывается в решателе LS-DYNA и при положительном расчете производится запись файла *rcforc. Далее с помощью предварительно разработанной программы производится обработка выходного файла и выделение полезного сигнала осевой составляющей силы резания P_0. Путем последовательного изменения входных данных формируется база файлов обработки для всей номенклатуры обрабатываемых материалов на интересующих режимах резания с использованием типового обрабатывающего инструмента. После в пакете MathCAD, в т.ч. с использованием встроенного математического аппарата, производится обработка результатов сверления, построение графических зависимостей и пр.

Дальнейшее моделирование операции сверления проводилась с использованием сверл диаметрами: 1,0 мм (наиболее распространенный); 1,5 мм; 2,0 мм (максимальный диаметр инструмента при сверлении печатных плат), схема заточки инструмента согласно [15]. Режимы резания: частота вращения шпинделя: 36000, 43000, 48000 об/мин; скорость движения осевой подачи: 1100, 1300, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700 мм/мин. Частота вращения шпинделя выбрана из соображений: 36000 об/мин – согласно рекомендаций ОСТ 107.460092.004.02-86 [16] для сверл Ø1 мм; 43000 об./мин – согласно рекомендаций компании Isola [17] при сверлении стеклотекстолита сверлами Ø1 мм; 48000 об./мин – предмаксимальная частота вращения шпинделя станка СМ600Ф4 (ввиду ограничения пневмосети предприятия).

Опыты проделаны для стеклотекстолита FR-4 производства «Isola», Германия, СФ-2, производства «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова, г. Мариуполь и FR-4 и Gem (ILM) производства КНР. Именно номенклатура данных базовых материалов массово применяется для изготовления печатных плат. В качестве входных данных касательно режущего инструмента использованы 3D модели сверл диаметрами 1,0 мм, 1,5 мм и 2,0 мм.

Таким образом, проведены измерения и обработка результатов осевой составляющей силы резания для вышеописанных материалов и режимов резания. Систематизация результатов и проведение дальнейшего анализа реализовано с помощью функции mean(x) пакета MathCAD. Для каждого режима найдены средние значения осевой составляющей силы резания P_0. В каждом эксперименте прослеживается общая тенденция по постепенному возрастанию осевой составляющей силы резания с резким спадом при достижении рациональных значений режима резания (скорость движения осевой подачи – частота вращения шпинделя) при увеличении подачи в каждом эксперименте.

Однако, граница рационального режима (наименьшие значения осевой составляющей силы резания при максимальной подаче) в каждом отдельном случае сдвигается в ту или другую сторону, что можно наблюдать на рис. 2-4.

На основании полученных зависимостей видим, что наименьшие значения осевой составляющей силы резания для всех типов материала с использованием сверл Ø1,0; 1,5; 2,0 мм получены на режимах:

1. S = 2400...2600 мм./мин. на 36000 об./мин.;
2. S = 2100...2300 мм./мин. на 43000 об./мин.;
3. S = 1600...1800 мм./мин. на 48000 об./мин.

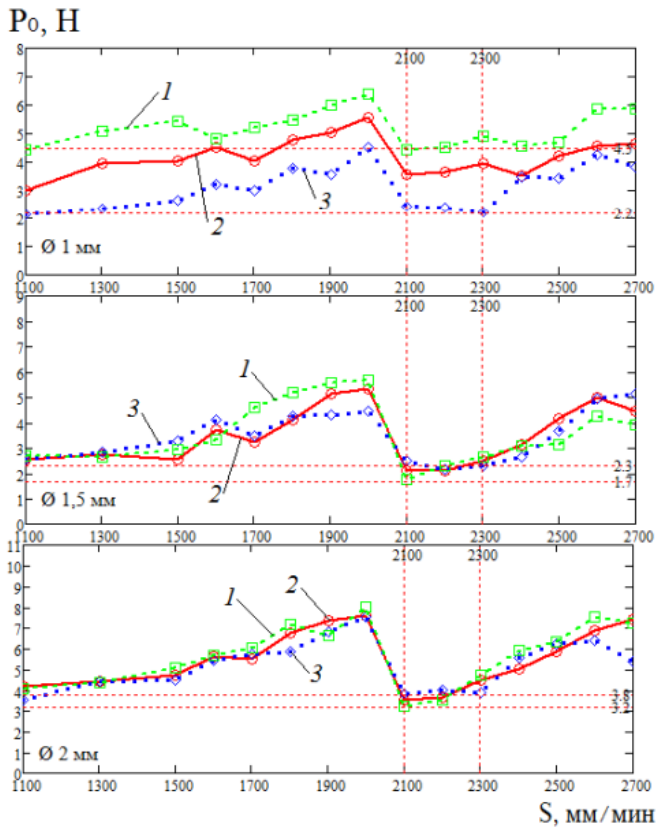

Рис. 2. Зависимость Po_ср(S) при n= 36000 об/мин:
1 – материал СФ-2; 2 – материал Isola; 3 – материал Gem

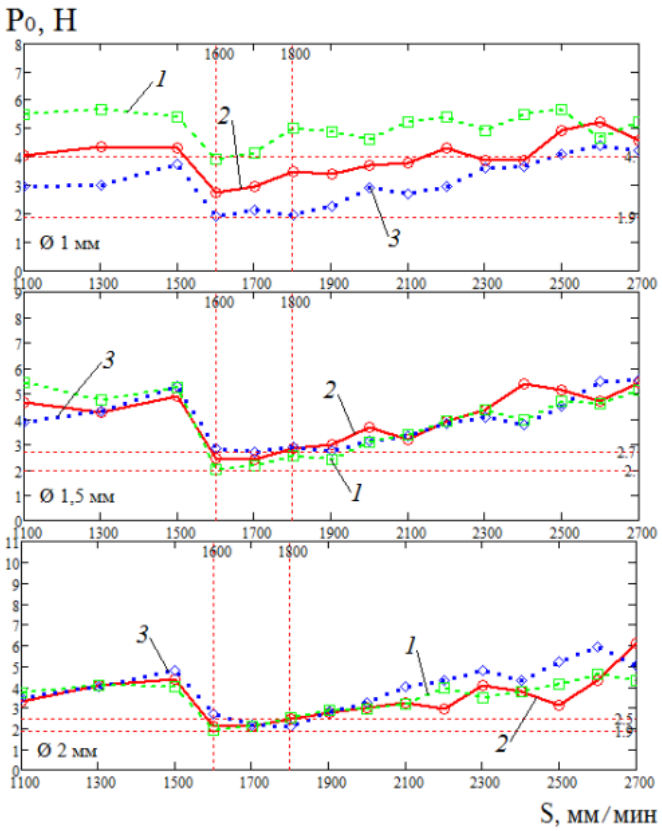

Рис. 3. Зависимость Po_ср(S) при n= 43000 об/мин:
1 – материал СФ-2; 2 – материал Isola; 3 – материал Gem

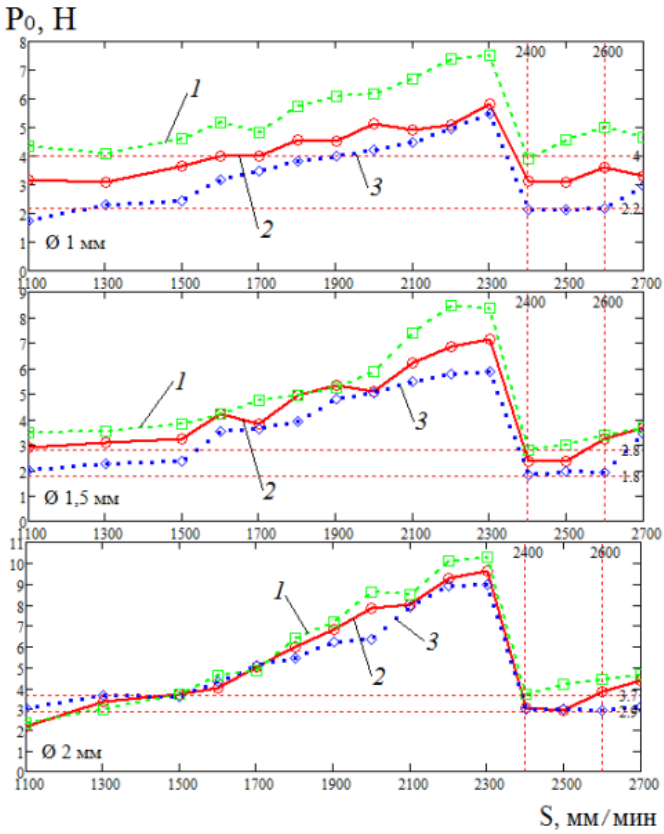

Рис. 4. Зависимость Po_ср(S) при n= 48000 об/мин:
1 – материал СФ-2; 2 – материал Isola; 3 – материал Gem

Ввиду наименьших значений осевой составляющей силы резания можно сделать общий вывод: при использовании данных режимов резания при обработке фольгированного стеклотекстолита будем иметь наибольшее количество обработанных отверстий и наибольший ресурс инструмента.

Для более подробного анализа усилий резания в пересчете на количество обработанных отверстий и ресурс сверл, в привязке к конкретному оборудованию, номенклатуре инструмента и используемым материалам необходимо выполнить аппроксимацию графических зависимостей и получить зависимости типа

$$P_{01}=f_1(S),\ P_{02}=f_2(S)\ \ldots\ P_{0n}=f_n(S),$$

где P_{01}, P_{02}... P_{0n} – осевая составляющая силы резания (Н) для разных материалов, диаметров сверл при разной частоте вращения шпинделя; $f_1(S)$, $f_2(S)$… $f_n(S)$ – формульные зависимости по значениям скорости движения осевой подачи (мм/мин).

Операция аппроксимации проводилась с использованием математического аппарата MathCAD и функции linfit – аппроксимация по методу наименьших квадратов. Результатом работы функции является вектор коэффициентов, при котором среднеквадратичная погрешность приближения исходных точек минимальна.

На рис. 5 приведены примеры полиномиальной аппроксимации 2-й ÷ 6-й степени (материал СФ-2, сверло Ø1 мм, S = 1100...2700 мм/мин).

При повышении порядка аппроксимации полиномами точность возрастает, но вычислительная устойчивость снижается. Для повышения устойчивости применяют G-

обращение, сингулярные разложения, регуляризацию Тихонова, но это не радикальные меры. На практике степень полинома повышают до тех пор, пока погрешность аппроксимации не станет сопоставима с погрешностью исходных данных. Для данной задачи полином 4-й степени оптимален: он достаточно точно описывает экстремумы (минимумы соответствуют оптимальным режимам), хотя и имеет отклонения в области монотонного возрастания. Использование полиномов более высокого порядка (6-го и выше) усиливает эти отклонения, поэтому решено ограничиться полиномом 4-й степени.

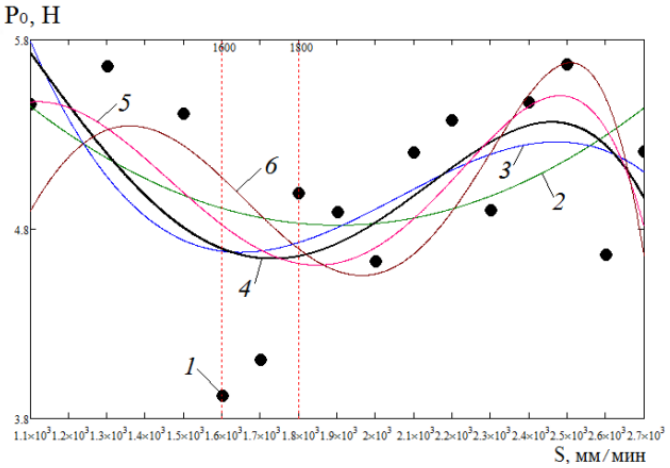

Рис. 5. Аппроксимация полиномами

1 – экспериментальные данные; 2 – аппрокс. полиномом 2-й степени; 3 – аппрокс. полиномом 3-й степени; 4 – аппрокс. полиномом 4-й степени; 5 – аппрокс. полиномом 5-й степени; 6 – аппрокс. полиномом 6-й степени

По результатам аппроксимации были получены зависимости P0(S) для трех материалов:

$$P_0^{Isola}(S) = 7{,}877\cdot10^{-6} + 7{,}4843\cdot10^{-3}\cdot S - 2{,}3047\cdot10^{-6}\cdot S^2 + \\ +1{,}8873\cdot10^{-9}\cdot S^3 - 0{,}5067\cdot10^{-12}\cdot S^4 \quad (1)$$

$$P_0^{GEM}(S) = -1{,}5268\cdot10^{-5} - 6{,}7533\cdot10^{-3}\cdot S + 1{,}5094\cdot10^{-5}\cdot S^2 - \\ -8{,}2946\cdot10^{-9}\cdot S^3 + 1{,}4228\cdot10^{-12}\cdot S^4 \quad (2)$$

$$P_0^{СФ-2}(S) = 5{,}3407\cdot10^{-5} + 2{,}3622\cdot10^{-2}\cdot S - 2{,}8633\cdot10^{-5}\cdot S^2 + \\ +1{,}3011\cdot10^{-8}\cdot S^3 - 1{,}9979\cdot10^{-12}\cdot S^4 \quad (3)$$

Таким образом выполнена обработка данных теоретических исследований процесса сверления и получены формульные зависимости осевой составляющей силы резания от подачи. Результат обработки экспериментальных данных показал, что зависимости P_0 от скорости движения осевой подачи при использовании обрабатывающего инструмента разного диаметра и разных типов материалов (стеклоткань, разные механические свойства: упругие свойства материала, характеризуемые модулем Юнга и коэффициентом Пуассона, плотность ламината) при одной и той же частоте вращения шпинделя схожи с точностью до поправочного коэффициента. Кроме того, косвенно данный факт говорит о правильности выполненных исследований [18].

Заключение

Основное количество трудов по тематике влияния силовых факторов на процесс сверления посвящено обработке пластика, армированного углеродным волокном [3-5, 13] и электротехническим пластикам и силовые модели, полученные авторами для обработки фольгированного стеклотекстолита, принципиально не подходят. При проведении анализа научных работ по сверлению фольгированного стеклотекстолита не обнаружено.

Разработана и реализована собственная математическая модель для определения осевой составляющей силы резания при сверлении стеклотекстолита средствами ANSYS Workbench, LS-DYNA. Был проведен ряд практических экспериментов по обработке композиционных материалов. Установлена хорошая сходимость результатов работы модели и значений, полученных практическим путем.

С использованием разработанной модели были смоделированы операции сверления с различными сверлами и композитными материалами при различных режимах работы. Определены рациональные режимы работы для смоделированных комбинаций сверло/материал/частота вращения шпинделя/скорость подачи.

Построены функциональные зависимости осевой составляющей силы резания от подачи и получены предварительные результаты (зоны) с минимальными значениями осевой составляющей силы резания для всех типов материала с использованием сверл Ø1,0; 1,5; 2,0 мм.

Проведена полиномиальная аппроксимация (4-го порядка) графических данных и получены зависимости типа $P_{01}=f_1(S)$, $P_{02}=f2(S)$, $P_{03}=f_3(S)$ для всех типов материалов.

Установлено, что зависимости осевой составляющей силы резания от подачи при использовании сверл разного диаметра и разных типов материалов при одной и той же частоте вращения шпинделя схожи с точностью до поправочного коэффициента.

Проведенные теоретические исследования дают возможность для дальнейшего определения рациональных факторов обработки отверстий для разных типов обрабатываемых композиционных материалов, используемых на производстве.

Литература

1. Степанов А.А. Алмазное сверление бороплластика / А.А. Степанов, В.Н. Карпов // Синтетические алмазы. – 1978. – Вып. 5. – С. 49-52.

2. Буловский П.И. Механическая обработка стеклопластиков / П.И. Буловский, Н.А. Петрова. – Л.: Машиностроение, 1969. – 152 с.

3. Anand R.S. Size Effects in Micro Drilling of Carbon Fibre-Reinforced Plastic Composite / R.S. Anand, K. Patra, M. Steiner // Production Engineering – Research and Development. – 2014. – vol. 8, is. 3. – P. 301-307.

4. Tsao C.C. Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network / C.C. Tsao, H. Hoheng // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – vol. 203. – P. 342-348.

5. Tsao C.C. Parametric Study on Thrust Force of Core Drill / C.C. Tsao, H. Hocheng // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – vol. 192–193. – P. 37–40.

6. Rao G.V.G. Micro-Mechanical Modeling of Machining of FRP – Cutting Force Analysis / G.V.G. Rao, P. Mahajan, N. Bhatnagar // Composites Science and Technology. – 2007. – vol. 67. – P. 579–593.

7. Zhang L.B. A Mechanical Model for Predicting Critical Thrust Forces in Drilling Composite Laminates / L.B. Zhang,

L.J. Wang, X.Y. Liu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture. – 2001. – vol. 215. – P. 135-146.

8. Fernandes M. Drilling of carbon composites using a one shot drill bit, Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque / M. Fernandes, C. Cook // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2006. – vol. 46. – P. 70-75.

9. Fernandes M. Drilling of Carbon Composites Using a One Shot Drill Bit. Part II. Empirical Modeling of Maximum Thrust Force / M. Fernandes, C. Cook // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2006. – vol. 46. – P. 76-79.

10. Gong G. Dynamics of Initial Penetration in Drilling: Part 2 – Motion Models for Drill Skid-ding and Wandering with Experimental Verification / G. Gong, C. Lin, K.F. Ehmann // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2005. – vol. 127. – P. 289-297.

11. Gong Y. Mechanistic Model for Dynamic Forces in Micro Drilling / Y. Gong, K.F. Ehmann // Proceeding 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (New York). – 2001. – P. 1-10.

12. Tsao C.C. Prediction of Thrust Force of Step Drill in Drilling Composite Materials by Taguchi Method and Radial Basis Function Network // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – vol. 36. – P. 11-18.

13. Lazar M. Experimental Analysis of Drilling FibreReinforced Composites / M. Lazar, P. Xirouchakis // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2011. – vol. 51. – P. 937-946.

14. Okutan E. A Study on the Derivation of Parametric Cutting Force Equations in Drilling of GFRP Composites / E. Okutan [et al.] // Strojniški vestnik. Journal of Mechanical Engineering. – 2013. – vol. 59, is. 2. – P. 97-105.

15. Ближевский А.А. Справочник по нормированию станочных работ / А.А.Ближевский, М.М.Корбов, А.В.Сергеев. – М.: Машгиз, 1995. – 460 с.

16. ОСТ 107.460092.004.02-86. Платы печатные. Типовые технологические процессы. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 42 с.

17. Каталог фольгированных ламинатов фирмы Isola, Германия: [Электронный ресурс]. – URL: http://www.isola-group.com (дата обращения 29.01.2025).

18. Shulgin A.N. Determination of rational Cutting Conditions with Oblique Determination of Figures of Merit / A.N. Shulgin, O.A. Chuprina, V.V. Pykhov, M.D. Ledovskih // Lecture Notes in Mechanical Engineering. Proceedings of the 8th InternationalConference on Industrial Engineering. – 2022. – P. 905-915.

DOI: 10.24892/RIJIE/20250406

Influence of Force Factors on the Drilling Process

Shulgin A.N., Grechushkin I.E.
National Research Nuclear University MEPhi (branch in Snezhinsk)
Snezhinsk, Russian Federation
ANShulgin@mephi.ru

Abstract. **This paper presents a comparative review of studies focused on the influence of force factors on the drilling process of composite materials, including polymer composite materials, carbon fiber reinforced plastics, and glass fiber reinforced plastics. Mathematical models from various authors, describing the dependence of axial cutting force and torque on cutting speed, feed rate, cutting tool geometry, and material properties, are examined. Special attention is given to experimental investigations using dynamometers, as well as the application of CAE systems (ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA, DeFORM, etc.) for cutting process simulation. The main approaches to analyzing the impact of force factors on the drilling process are identified. The development and implementation of a novel mathematical model for determining the axial cutting force during the drilling of fiberglass laminate is described. The convergence of the model's results with actual values obtained through practical testing has been established. Using the developed model, drilling operations with various drills and composite materials under different operating conditions have been simulated. Rational operating conditions for the simulated scenarios are determined.**

Keywords: **axial component, cutting force, torque, composite materials, CAE systems, mathematical models.**

Библиографическое описание статьи

Шульгин А.Н. Влияние силовых факторов на процесс сверления / А.Н. Шульгин, И.Е. Гречушкин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2025. – Т.12, №4. – С. 34-39. DOI: 10.24892/RIJIE/20250406

Reference to article

Shulgin A.N., Grechushkin I.E. Influence of force factors on the drilling process, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2025, vol.12, no.4, pp. 34-39. DOI: 10.24892/RIJIE/20250406
