

УДК 621.95.01

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СИНТЕГРАНА ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ СВЕРЛАМИ

Рогов В.А., Кокарев В.И., Велис А.К.

*Российский университет дружбы народов, Москва, e-mail: vladimirrogov@yandex.ru*

В статье изложены результаты экспериментов исследований по установлению взаимосвязи параметров режимов обработки с характеристиками силового нагружения при обработке отверстий в синтегране твердосплавными сверлами в МГТУ «Станкин» на обрабатывающем центре с ЧПУ, созданном на базе фрезерного станка 24K40SF4, оснащенного системой управления FlexNC-70 фирмы СТАНКОЦЕНТР, программная оболочка которой позволяет записать крутящий момент и осевую силу в режиме реального времени. Исследование проводилось в два этапа с варьированием параметров, влияющих на силовые характеристики станка. Первый этап проводился при постоянных значениях осевой подачи (на двух уровнях), в то время как варьировали скорость резания. Второй этап проводили при постоянных значениях скорости резания (на двух уровнях), в то время как варьировали значения осевой подачи. Даны графики силовых характеристик, полученных в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** сверление синтегран, твердосплавные сверла, режимы обработки синтегран, крутящий момент, вертикальная сила, компьютерная диагностика, режим реального времени

## RESEARCH ABOUT THE PROCESS OF DRILLING SINTEGRAN WITH CARBIDE DRILLS

Rogov V.A., Kokarev V.I., Veliz A.C.

*People's Friendship University, Moscow, e-mail: vladimirrogov@yandex.ru*

The paper presents the experimental results of researches done, to establish the relationship of processing parameters with mechanical characteristics when drilling holes on synthetic granite (sintegran) with carbide drills at Moscow State Technological University «STANKIN» with the use of the CNC machining center, based on a milling machine 24K40SF4, equipped with the system FlexNC-70 software from the company «STANKOTSENTR». This program environment allows to record the torque and axial force in real time. The research process was conducted in two stages, varying input parameters affecting the technical characteristics of the CNC machining center. The first stage was carried out at constant axial feed (at two levels), while we varied the cutting speed. The second phase was carried out at constant cutting speed (at two levels), while we varied the values of axial feed. Graphics are were plotted with the mechanical characteristics obtained in real-time.

**Keywords:** drilling synthetic granite, sintegran, carbide drill bits, processing modes of sintegran, torque, vertical force, computer diagnostics

При лезвийной обработке композиционных материалов возникает много проблем, поскольку подавляющее большинство из них имеют неоднородную структуру, наполнители, заполнители, матрицы, связующие, армирующие элементы имеют разные физико-механические характеристики. Используемый при их обработке инструмент в большинстве случаев проектировался и предназначен для обработки металлов. В результате чего он быстро изнашивается и выходит из строя. Поскольку класс композиционных материалов практически не ограничен, то отсутствуют какие-либо рекомендации и нормативы по режимам резания. Наибольшее распространение имеет обработка композиционных материалов абразивным инструментом, но в ряде случаев приходится использовать токарные и фрезерные работы. Большую сложность вызывает необходимость получения отверстий в композиционных материалах, т.к. сверла являются наиболее слабым звеном системы СПИД; они быстро изнашиваются, перегреваются и часто ломаются. Кроме того, при сверлении композиционных материалов, имеющих полимерное связующее

(например, синтегранов, полимербетонов, гранитанов и др.), последнее плавится, горит, создаёт вязкую стружку в виде смолы с абразивным порошком, что может привести к заклиниванию и поломке сверла. В настоящее время процессы, происходящие при сверлении синтегран лезвийным инструментом, мало изучены, поэтому целью настоящей работы является расширение имеющихся знаний об обработке синтегран. В связи с этим была поставлена задача, исследовать процессы сверления синтегран для определения оптимальных значений скорости резания ( $v$ ) и осевой подачи ( $S$ ), при которых силовые параметры станка являются минимальными.

Синтегранны представляют собой высоконаполненные композиционные материалы на основе эпоксидного связующего на базе эпоксидных смол, наполнителей в виде щебня трех-четырёх фракций и мелкодисперсного порошка из высокопрочных гранитов или габбро-диабазов. Они относятся к разряду полимерных бетонов и имеют высокие физико-механические характеристики.

Синтегранны содержат не более 10% связующего. По своим физико-механическим

характеристикам – пределу прочности при сжатии и изгибе, модулю упругости, теплопроводности, износостойкости – приближаются к натуральным гранитам и значительно превосходят их по технологичности [6]. У синтеграна прочность при растяжении, сжатии, изгибе мало зависят от содержания  $\delta$  = (6–11 %) связующего и определяются в основном свойствами гранитного щебня и плотностью его упаковки. Динамический модуль упругости  $E$ , коэффициенты линейного расширения и ползучести более чувствительны к изменению содержания связующего ( $\delta$ ) и с увеличением его процентного содержания, как правило, ухудшаются по сравнению с характеристиками природного гранита [4].

Свойства композиционных материалов, такие как термостойкость, термостабильность, ударная прочность, водостойкость, химическая стойкость, а также механические свойства, определены свойствами полимерной матрицы [2]. Важным свойством синтеграна при сверлении без СОЖ является термостойкость синтеграна, так как эпоксидная смола теряет свои свойства при достижении температуры термостойкости (133–260°C) [3] в зоне контактного взаимодействия.

На первом этапе исследований рассмотрено влияние скорости резания инструмента при сверлении синтеграна сверлами, оснащенными твердосплавными пластинами марки ВК8, на силовые характеристики станка, такие, как крутящий момент ( $M_2$ ) и осевая сила ( $P_z$ ).

На втором этапе рассмотрено влияние осевой подачи на те же характеристики.

Опыты проводились на экспериментальном обрабатывающем центре, созданном на базе станка 24К40СФ4 в МГТУ «Станкин», оснащенном числовым программным управлением (ЧПУ) FlexNC-70 фирмы «СТАНКОЦЕНТР», позволяющим получать аналитическую информацию в режиме реального времени с интервалами 10 миллисекунд. На рис. 1, показана рабочая зона станка с блоком синтеграна, закрепленным в тисках, установленных на обрабатывающем центре.

Блок синтеграна имеет габариты 250×250×250 мм. Обработка осуществлялась спиральными сверлами с напайными пластинами ВК8, передний и задний углы 30°, угол вершины 130°. Сверлились отверстия диаметром 12 мм в шахматном порядке на расстоянии 18 мм друг от друга. Глубина отверстий 200 мм.

Во время проведения предварительных экспериментов были определены границы разумных режимов резания. Так, например, при скорости резания 4 м/мин и осевой подаче 40 мм/мин срабатывал ограничитель по крутящему моменту станка, установленный на уровне 75%.

Затем были проведены два однофакторных эксперимента [1]. Каждый эксперимент повторили шесть раз, проводя рандомизацию результатов для уменьшения ошибки, связанных со случайными факторами, влияющими на эксперимент. Каждая точка в нижних диаграммах представляет усредненное значение шести опытов. На рис. 2 показана одна сторона исследуемой заготовки.



Рис. 1. Блок синтеграна на обрабатывающем центре во время его обработки



Рис. 2. Блок синтеграна с просверленными отверстиями

Критерием для выбора параметров оптимизации была минимизация силовых характеристик станка – крутящего момента –  $M_z$ , и осевой силы –  $P_z$ . В ранее выбранном диапазоне скоростей и подач.

На первом этапе исследований скорость резания  $v$  варьировалась от

4 до 83 м/мин и осевая подача –  $S$ , была постоянной на двух уровнях 40 и 5 мм/мин.

1.1.  $S = 40$  мм/мин постоянная, скорость резания  $v$  варьировалась от 4 до 83 м/мин с интервалом 11 м/мин. График показан на рис. 3, 4.

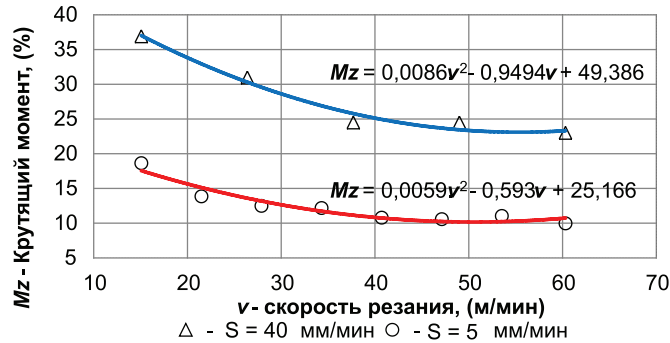


Рис. 3. График  $M_z - v$ , при постоянных осевых подачах

При проведении эксперимента наблюдалось следующее:

– При режимах резания  $v = 4$  м/мин и  $S = 40$  мм/мин станок остановился. Это показало невозможность проведения исследования при малых скоростях резания и больших подачах.

– При скорости резания 15 м/мин наблюдалось самое большое значение момента;

– При значениях скорости резания  $v$  больше 60 м/мин началось размягчение связующего и возникновение дыма, что ограничило возможность проведения экспери-

мента на более высоких скоростях резания. Было принято верхнее значение скорости резания  $v = 60$  м/мин.

С помощью метода наименьших квадратов (МНК) было получено полиномиальное уравнение регрессии второго порядка для сверления отверстий при  $S = 40$  мм/мин.

$$M_z = 0,0086v^2 - 0,9494v + 49,386. \quad (1)$$

Производная от скорости резания была приравнена к нулю для получения минимального значения момента.

$$\frac{dM_z}{dv} = \frac{d(0,0086v^2 - 0,9494v + 49,386)}{dx} = 0,0172v - 0,9494 = 0 [v = 55 \text{ м/мин}]. \quad (2)$$

Оптимальное значение крутящего момента при скорости резания  $v = 55$  м/мин составляет 23% от номинального значения 10 Н·м.

Минимальное значение крутящего момента можно объяснить ослаблением связующего синтегранна нагреванием в зоне резания.

Вертикальная сила  $P_z$  с увеличением скорости резания уменьшается во всем выбранном диапазоне значений, и показывает, что она обратно пропорциональна скорости резания. Эта линейная зависимость была определена с помощью линейной регрессии.

$$P_z = 36,597 - 0,1558v. \quad (3)$$

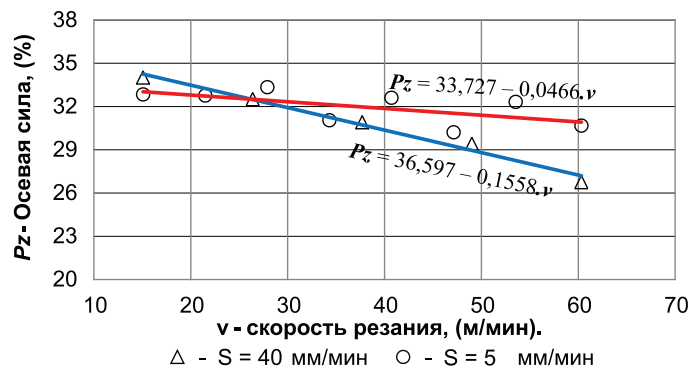


Рис. 4. График  $P_z - v$ , при постоянных осевых подачах

Для оптимального значения скорости резания ( $v = 55$  м/мин) вертикальная сила составляет 32% от номинальной.

1.2.  $S = 5$  мм/мин постоянна, скорость резания  $v$  варьировалась от 15 до 60 м/мин с интервалами 6,4 м/мин. График показан на рис. 3, 4.

После проведения первой части эксперимента ограничились нижней и верхней скоростью резания – 15 и 60 м/мин соответственно и держали осевую подачу  $S$  постоянной.

При проведении эксперимента наблюдалось следующее:

$$\frac{dM_z}{dv} = \frac{d(0,0059v^2 - 0,593v + 25,166)}{dx} = 0,0118v - 0,593 = 0 [v = 50 \text{ м/мин}]. \quad (5)$$

Минимальный крутящий момент  $M_z$  составляет 10% от номинального при скорости резания  $v = 50$  м/мин (см. рис. 3).

На втором этапе исследований осевая подача варьировалась в диапазоне

– Максимальный крутящий момент – при минимальной скорости резания – 15 м/мин.

С помощью МНК получили уравнение регрессии, (экспоненциальное уравнение второго порядка) крутящего момента от скорости резания для сверления отверстий при  $S = 5$  мм/мин.

$$M_z = 0,0059v^2 - 0,593v + 25,166. \quad (4)$$

Производную крутящего момента от скорости резания приравняли к нулю для получения оптимального значения момента, т.е. минимального.

$S = 5 - 40$  мм/мин при двух постоянных значениях скорости резания  $v = 60$  и 15 м/мин соответственно.

2.1.  $S = 5 - 40$  мм/мин, при постоянной скорости резания  $v = 60$  м/мин (рис. 5 и 6).

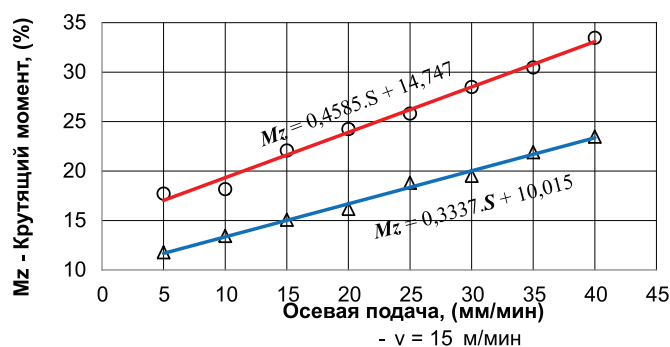


Рис. 5. График  $M_z - v$ , при постоянных скоростях резания

Для проведения этого эксперимента  $v = 60$  м/мин, держали постоянной, а осевая подача  $S$  варьировалась от 5 до 40 мм/мин, с интервалом 5 мм/мин.

При проведении эксперимента наблюдалось следующее:

– При увеличении значения осевой подачи крутящий момент прямо пропорционально увеличивается (рис. 5).

Уравнение регрессий по полученным данным для крутящего момента по отношению к осевой подаче следующее:

$$M_z = 0,3337S + 10,015. \quad (6)$$

$$\frac{dP_z}{dS} = \frac{d(0,013S^2 - 0,6831S + 35,149)}{dS} = 0,026S - 0,6831 = 0 [S = 26 \text{ мм/мин}]. \quad (8)$$

2.2.  $S = 5 - 40$  мм/мин, при постоянной скорости резания  $v = 15$  м/мин (см. рис. 5 и 6).

Для проведения этого эксперимента,  $v = 15$  м/мин, держали постоянной, а осевая

– Минимальный крутящий момент достигается при минимальной осевой подаче ( $S = 5$  мм/мин), в то время, как максимальный крутящий момент при максимальной ( $S = 40$  мм/мин).

Вертикальная сила имеет убывающий характер и её можно описать с помощью полиномиальной функции второго порядка:

$$P_z = 0,013S^2 - 0,6831S + 35,149. \quad (7)$$

Производную вертикальной силы от осевой подачи приравняли к нулю и получили оптимальное значение осевой силы, т.е. её минимальное значение  $P_z = 26\%$  при осевой подаче  $S = 26$  мм/мин (см. рис. 5).

подача  $S$  варьировалась от 5 до 40 мм/мин, с интервалом 5 мм/мин.

При проведении эксперимента наблюдалось следующее:



– Крутящий момент растет прямо пропорционально увеличению осевой подачи, (см. рис. 5).

Уравнение регрессий для крутящего момента по отношению к осевой подаче:

$$M_z = 0,4585S + 14,747. \quad (9)$$

– Минимальный крутящий момент достигается при минимальной осевой подаче

( $S = 5$  мм/мин), в то время как, максимальный крутящий момент при максимальной ( $S = 40$  мм/мин).

Из уравнения (6) и (9) видно, что эти линии почти параллельны и можно упрощать их в зависимости от скорости резания, следовательно:

$$M_z = 0,3961S + 16,324 - 0,105v. \quad (10)$$

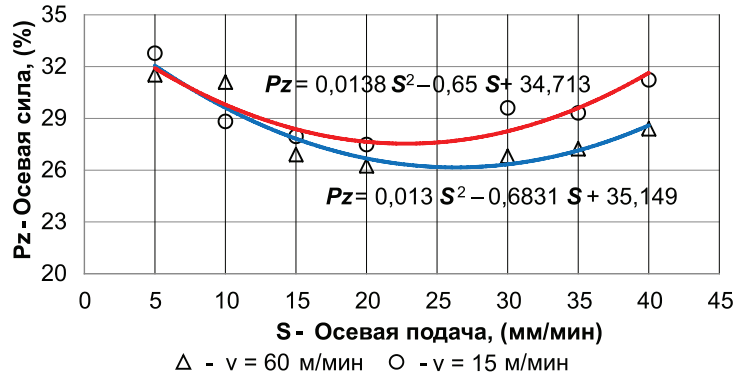


Рис. 6. График  $P_z - v$ , при постоянных скоростях резания

Вертикальная сила имеет убывающий характер и её можно описывать с помощью полиномиальной функции второго порядка:

$$P_z = 0,0138S^2 - 0,63S + 34,713. \quad (11)$$

$$\frac{dP_z}{dS} = \frac{d(0,0138S^2 - 0,63S + 34,713)}{dS} = 0,0276S - 0,63 = 0 [S = 23 \text{ мм/мин}]. \quad (12)$$

### Выводы

1. При постоянных осевых подачах:

– Крутящий момент уменьшается обратно пропорционально квадрату скорости резания (1) и (4). Входные факторы не взаимодействуют друг с другом, кривые не пересекают друг друга.

– Минимальные значения крутящего момента при обработке синтетрана – 55 и 50 м/мин, при 40 и 5 мм/мин соответственно.

– При ограничении крутящего момента не больше 25% получена область скоростей резания при постоянной подаче  $S = 40$  мм/мин, в диапазоне  $v = (40-60)$  м/мин.

– Входные факторы, влияющие на вертикальную силу, взаимодействуют друг с другом, но в очень малой степени, так как значение вертикальной силы почти постоянно в интервале определения параметров и составляет 27–34%, и при оптимальном значении, лишь 28%, из (3).

2. При постоянных скоростях резания:

– Крутящий момент увеличивается прямо пропорционально осевой подаче и как

Производную вертикальной силы от скорости резания приравняли к нулю и получили её оптимальное значение, в этом случае, минимальное –  $P_z = 28\%$  при осевой подаче  $S = 23$  мм/мин (см. рис. 5).

при постоянной осевой подаче, входные факторы почти не взаимодействуют друг с другом и не оказывают влияния на крутящий момент. Взаимоотношения  $M_z$  и  $S$ , можно описывать уравнениями регрессии (6) и (9).

– Если ограничить крутящий момент не больше 25%, получим область подач при постоянной скорости  $v = 15$  м/мин,  $S = (5-22)$  мм/мин. Осевая сила будет меняться в интервале от 32 до 26% соответственно.

– Малые значения осевой подачи приводят к увеличению рабочего времени, поэтому рекомендуется работать с осевыми подачами ближе к 22 мм/мин.

### Заключение

В статье рассмотрены особенности влияния скорости резания на процесс сверления отверстий в синтетране сверлами 12 мм диаметром, оснащенными твердосплавными пластинами ВК8.

Обработка синтетрана является особенной, в связи с тем, что в состав его входит эпоксидная смола – реактопласт, с невысо-

кой термостойкостью температуры термостойкости (133–260 °С).

Показаны графические зависимости крутящего момента и вертикальной силы от скорости резания сверла при постоянной осевой подаче и при постоянной скорости резания.

Определены оптимальные скорости резания для сверления синтеграна при постоянных осевых подачах: 40–55 м/мин, 5–50 м/мин.

Определены оптимальные осевые подачи для сверления синтеграна при постоянных скоростях резания: при постоянной  $v = 15$  м/мин –  $S = (5–22)$  мм/мин, а при  $v = 60$  м/мин –  $S = (5–40)$  мм/мин. Можно использовать рис. 5 для графических расчетов осевых подач при постоянной скорости резания.

#### Список литературы

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Издво «Наука», 1976. – С. 254.
2. Алентьев А.Ю., Яблокова М.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов: учеб. пос. – М.: Изд. МГУ им. Ломоносова, 2010. – С. 67.
3. Ананьин С.В., Ананьева Е.С., Маркин В.Б. Композиционные материалы: учеб. пос. – Часть 2. – Изд-во АлтГТУ. 2007. – С. 94.
4. Барт, В.Е. и Санина, Г.С. Опыт применения синтеграна в машиностроении. – 1993. – Т. 1. – С. 15–17.

5. Елин А.В. Повышение эффективности и качества обработки полимербетонов шлифованием на примере синтеграна: дис. – М.: Изд. РУДН, 2008.

6. Рогов В.А., Позняк Г. Современные машиностроительные материалы и заготовки. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – С. 336.

#### References

1. Adler Ju.P., Markova E.V., Granovskij Ju.V. Experimental design in the search for optimal conditions. Publ. Nauka. Moscow, 1976. pp. 254.
2. Alentev A.Ju., Jabloкова M.Ju. Binders for polymer composites. Textbook. Publ. Moscow State University Lomonosov. Moscow, 2010. pp. 67.
3. Ananin S.V., Ananeva E.S., Markin V.B. Composite materials. Textbook. Part 2. Publ. Altai State Technical University. 2007. pp. 94.
4. Bart, V.E., Sanina, G.S. Experience in using sintegran in mechanical engineering. [Ed.]. 1993, Vol. 1. pp. 15–17. Moscow. Publ. Peoples Friendship University of Russia. 2008.
6. Rogov, V.A., i Poznjak, G. Modern engineering materials and workpiece. Moscow. Publ. Academy. Moscow, 2008. pp. 336.

#### Рецензенты:

Гусаков С.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой Теплотехники и тепловых двигателей инженерного факультета РУДН, г. Москва;

Расторгуев Г.А. д.т.н., профессор кафедры «Технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов» инженерного факультета РУДН, г. Москва.

Работа поступила в редакцию 04.04.2012