

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ФОЛЬГИРОВАННОГО СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА

А.Н. Шульгин¹, А.А. Дьяконов², М.М. Тверской², А.Е. Городкова²

¹АО «Радий», г. Касли, Россия,

²Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В статье приведены результаты экспериментального исследования силы резания при получении отверстий различного диаметра сверлением в слоистом композиционном материале – фольгированном стеклотекстолите. Неоднородная структура материала имеет ограничения по механической обработке, связанные с появлением расслоений из-за неравномерного распределения механической нагрузки. Знания о величине механической нагрузки позволят спрогнозировать наиболее оптимальные режимы резания. В ходе проведения экспериментов получены зависимости изменения осевой составляющей силы резания от подачи при разных частотах вращения, обрабатываемых марках материала и диаметров сверел. В качестве обрабатываемого материала выбраны 3 наиболее распространенные в производстве марки: Isola DE 104, GEM (ILM), СФ2-35 ГОСТ10316-78. Выведена общая закономерность по выбору оптимальных режимов резания при сверлении слоистого композиционного материала. Для оценки влияния затупления режущего инструмента на параметры осевого усилия проведен эксперимент с использованием затупленного сверла диаметром 1 мм на всех трех типах материала по всем ранее выбранным режимам резания. Результат обработки экспериментальных данных показал, что зависимости осевой силы от подачи при использовании обрабатывающего инструмента разного диаметра и разных типов материалов (эпоксидная связка между слоями, стеклоткань, распределение филаментов волокна, разная стеклонаполненность) при одной и той же частоте вращения шпинделя схожи. Полученные зависимости и закономерности позволят построить силовую модель сверления композиционных материалов, что значительно упростит процедуру проектирования операции.

Ключевые слова: слоистый композиционный материал, сверление, сила резания, фольгированный стеклотекстолит.

Введение. Стеклотекстолит представляет собой листовой композиционный слоистый пластик, изготовленный на основе стеклянной ткани и полимерного связующего [1–2]. Использование композиционных армированных материалов в производстве достаточно актуально, поскольку по своим прочностным характеристикам они заменяют некоторые виды сталей, алюминия и его сплавов в аэрокосмической, автомобильной промышленности, судостроении электротехнике и радиотехнике ввиду легкого веса, высокой удельной жесткости и более высокого срока службы усталости [3].

Применение интегральных микросхем и микросборок, стремление к миниатюризации и все большей интеграции в сборке приводит к повышению плотности проводящего рисунка печатного монтажа и, как следствие, к уменьшению диаметров отверстий и увеличению их количества на плате [4]. В настоящее время сверление остается одним из приоритетных способов получения отверстий в печатных платах как процесс, обеспечивающий необходимую производительность и применимый для большинства композиционных технических материалов [5–7]. Однако сверление фольгированного стеклотекстолита является весьма сложной задачей ввиду неоднородной структуры материала, его анизотропии и абразивной природы [8–12]. Из-за композитного строения механическая нагрузка (осевая сила и вращающий момент) неравномерно распределяется от слоя к слою, что приводит к появлениям дефектов во внутренней структуре материала заготовки, т. е. расслоениям [12–16]. В продолжение работ по выбору оптимальной геометрии сверла и определению качественных и количественных показателей обработки отверстий на печатных платах в зависимости от выбора фольгированного стеклотекстолита и режимов резания [17] в данной работе приводятся результаты экспериментального исследования силы резания при сверлении

фольгированного стеклотекстолита различными инструментами при различных режимах резания. Полученные результаты позволят построить зависимости осевой силы от поперечной подачи. Принято считать, что равнодействующие радиальных составляющих силы резания на обоих перьях направлены к оси сверла, т. е. навстречу друг другу и поэтому взаимно уравниваются. Пара окружных сил создает крутящий момент, а осевые силы на каждом перье – суммарную осевую силу. Суммарные силы резания при обработке материала сверлом, заточенным симметрично, приводятся к так называемому силовому винту. Основными его составляющими являются крутящий момент M и осевая составляющая силы резания. Их называют технологическими составляющими этих сил [18, 19]. Именно поэтому при выполнении измерений фиксировалась осевая составляющая силы резания. Измерение крутящего момента не проводилось из экономии времени.

1. Экспериментальные исследования. Обработка отверстий производилась на сверлильном многошпиндельном станке СМ-600 (рис. 1).



Рис. 1. СМ-600, станок для обработки стеклотекстолита, 4-шпиндельный

В качестве заготовок выбран базовый материал печатных плат трех наиболее распространенных марок, используемых на предприятиях: Isola DE 104, GEM (ILM), СФ2-35 ГОСТ10316-78 производства Германии, КНР и республики Молдова соответственно. Габаритный размер заготовок – 100×100 мм. Заготовки закреплялись на динамометре с помощью штатных отверстий за два диаметрально противоположных отверстия (рис. 2). Для исключения повреждения измерительной области прибора при выходе сверла из отверстия применялись прокладки из гетинакса толщиной 2,0 мм.

Операция сверления проводилась с использованием твердосплавных сверл фирмы «Нат»,

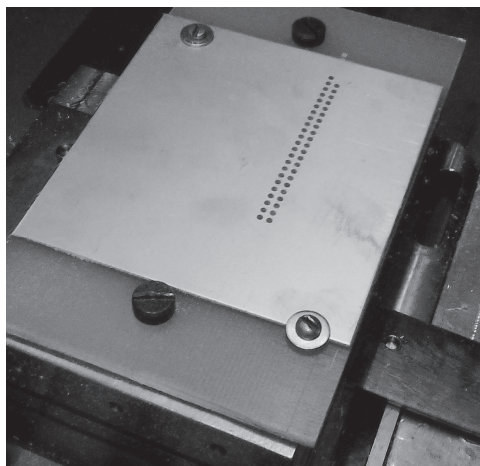


Рис. 2. Схема базирования заготовок

схема заточки инструмента согласно полученным методикам А.Н. Шульгина, А.А. Орлова [18]. Диаметры выбранных сверл: 1,0; 1,5; 2,0 мм. Режимы резания: число оборотов шпинделя – 36 000, 43 000, 48 000 об/мин; подача: 1100, 1300, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700 мм/мин. Дополнительно проведен эксперимент с использованием затупленных сверл диаметром 1 мм на всех трех типах материала по всем ранее выбранным режимам резания для оценки влияния затупления режущего инструмента на параметры осевого усилия.

Измерения осевой составляющей силы резания производилось с помощью пятикомпонентного пьезоэлектрического динамометра Kistler Mini Dyn 9256C2 с минимальной чувствительностью – 0,002 Н (рис. 3).

В комплекте с динамометром использовался мультисканальный усилитель типа 5070А, который преобразует полученный сигнал от динамометра в напряжение и посылает данные в систему приема и накопления. Частота дискретизации, используемая для хранения данных через систему приема, составляла 7142 Гц.

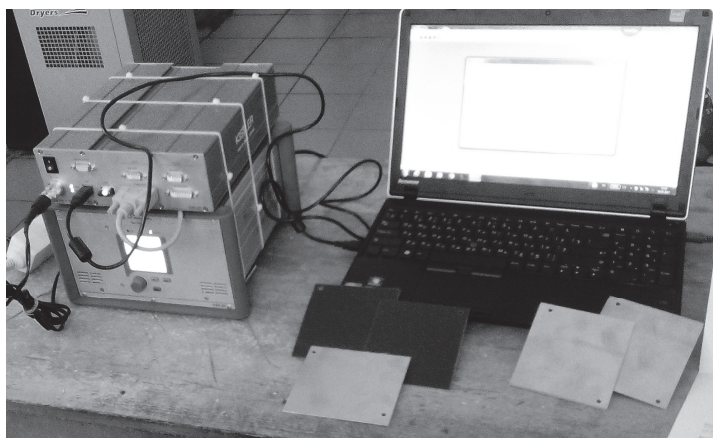


Рис. 3. Рабочее место с динамометром Kistler и блоком управления и анализа

Для оптимизации процесса измерения и анализа введено ограничение по частоте дискретизации прибора в 1000 Гц. На рис. 4 круглой областью выделен полезный сигнал, необходимый для выделения и дальнейшего анализа.

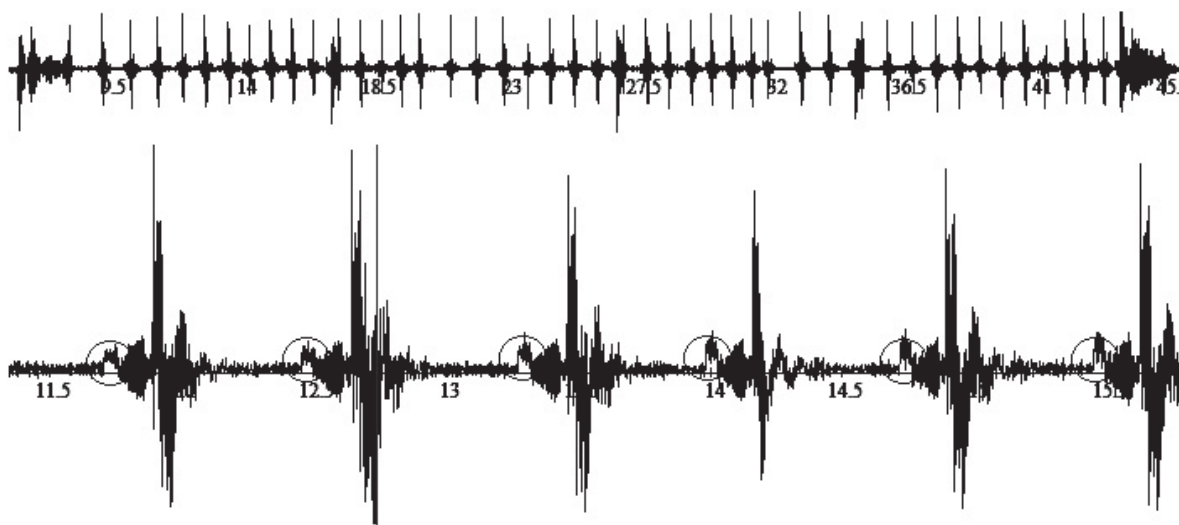


Рис. 4. Аналоговый выходной сигнал измерения осевой составляющей силы резания

Основной сложностью при обработке экспериментальных данных является выделение «полезных» участков аналогового сигнала, необходимых для анализа. На рис. 5 представлен результат выделения полезного сигнала для материала СФ2-35 ГОСТ10316-78 при сверлении затупленным сверлом $\varnothing 1$ мм. Обработка сигнала проводилась в пакете MathCAD с использованием опции File Input. Получение усредненных данных для последующего анализа осуществлялось с помощью функции $mean(x)$ пакета MathCAD, далее выполнялось нахождение средних значений осевой составляющей силы резания для режима в целом.

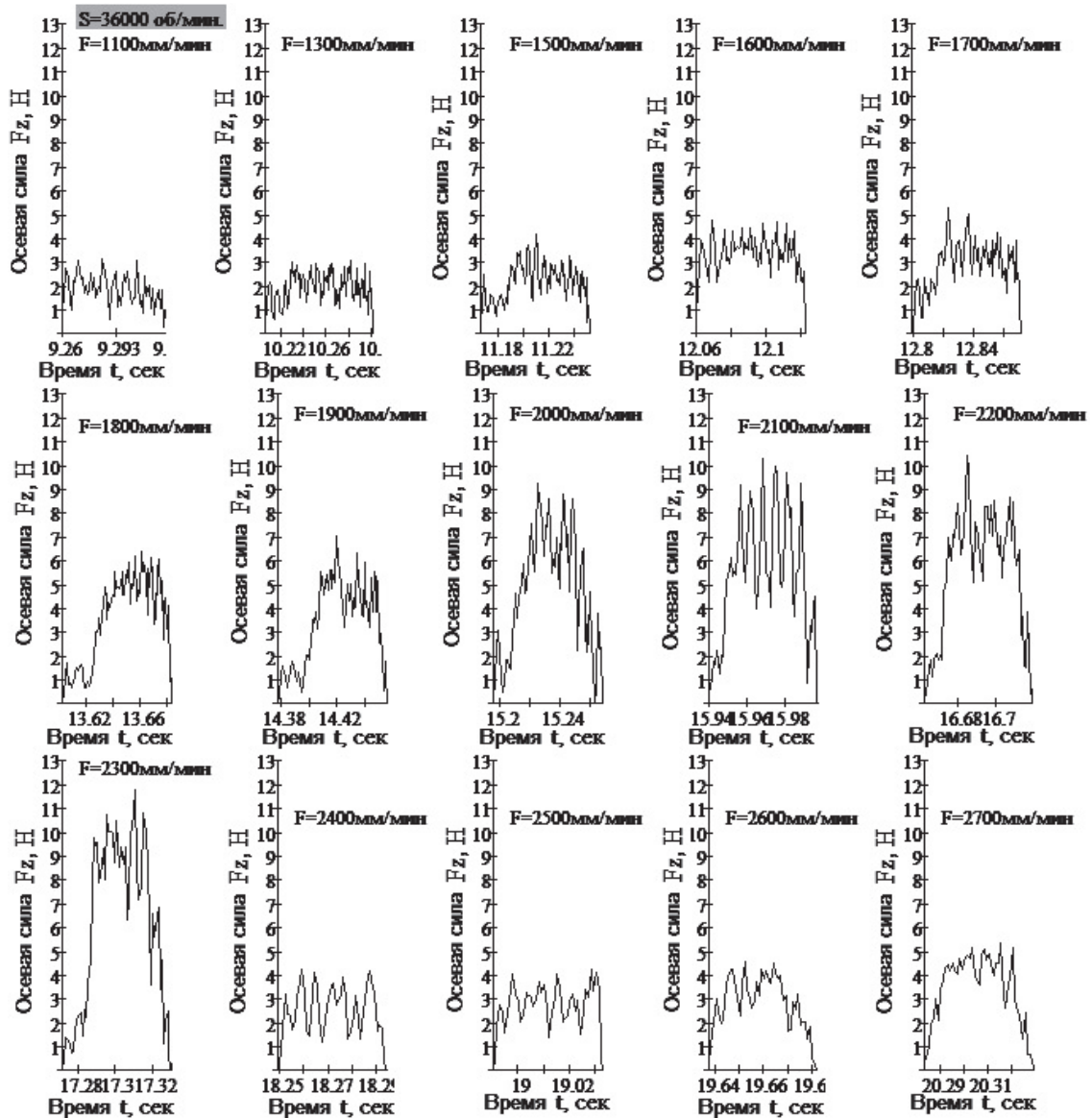


Рис. 5. Результат обработки экспериментальных данных

2. Результаты и обсуждение. На основании полученных результатов построены функциональные зависимости осевой составляющей силы резания от подачи для каждого (рис. 6–9).

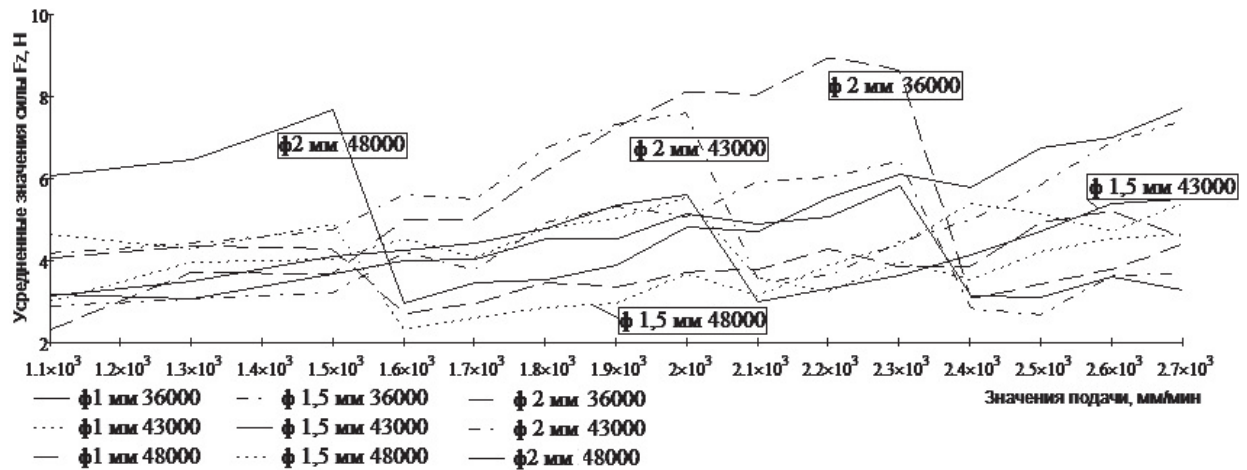


Рис. 6. Зависимость осевой составляющей силы резания от подачи. Материал Isola

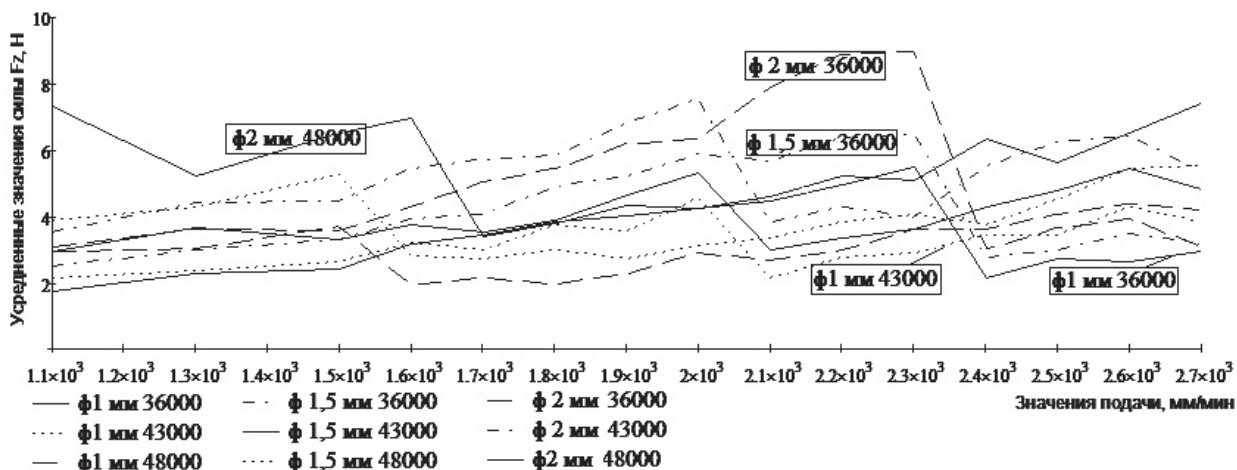


Рис. 7. Зависимость осевой составляющей силы резания от подачи. Материал Gem

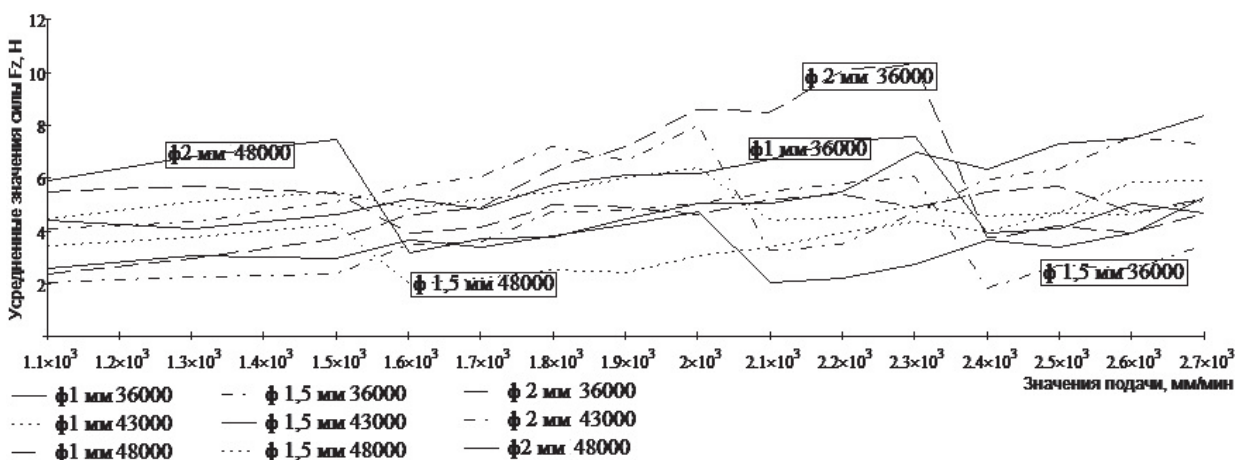


Рис. 8. Зависимость осевой составляющей силы резания от подачи. Материал Mi

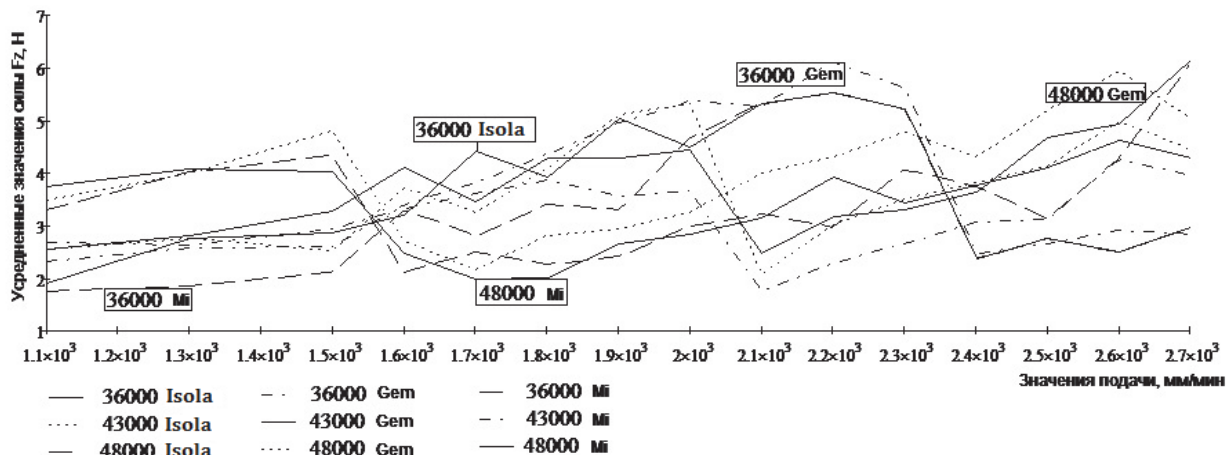


Рис. 9. Зависимость осевой составляющей силы резания от подачи на затупленных сверлах $\varnothing 1$ мм

Полученные зависимости демонстрируют, что наименьшие значения осевой составляющей силы резания для всех типов материала с использованием сверл $\varnothing 1,0; 1,5; 2,0$ мм получены на режимах:

- 1) $S = 2400$ мм/мин на 36 000 об/мин;
- 2) $S = 2100$ мм/мин на 43 000 об/мин;
- 3) $S = 1600$ мм/мин на 48 000 об/мин.

Ввиду наименьшей осевой составляющей силы резания можно сделать общий вывод о наличии на данных режимах наименьшей действующей силы трения в зоне контакта со сверлом и

Технология

действию наименьшего крутящего момента в точке сверления. Соответственно, при использовании данных режимов резания при обработке фольгированного стеклотекстолита будем иметь наибольшее количество обработанных отверстий и наибольший ресурс инструмента.

Далее, согласно имеющимся зависимостям построен результирующий график по наименьшим усредненным значениям осевой составляющей силы резания на подачах 2400–2100–1600 мм/мин (рис. 10). Из графика видна общая закономерность по выбору оптимальных режимов резания:

- при наименьшей подаче (1600 мм/мин) среднее значение осевой составляющей силы резания (на любом материале и при использовании любого сверла) составляет 2,628 Н;
- при средней подаче (2100 мм/мин) среднее значение осевой составляющей силы резания – 2,924 Н;
- при наибольшей подаче (2400 мм/мин) среднее значение осевой составляющей силы резания – 2,876 Н.

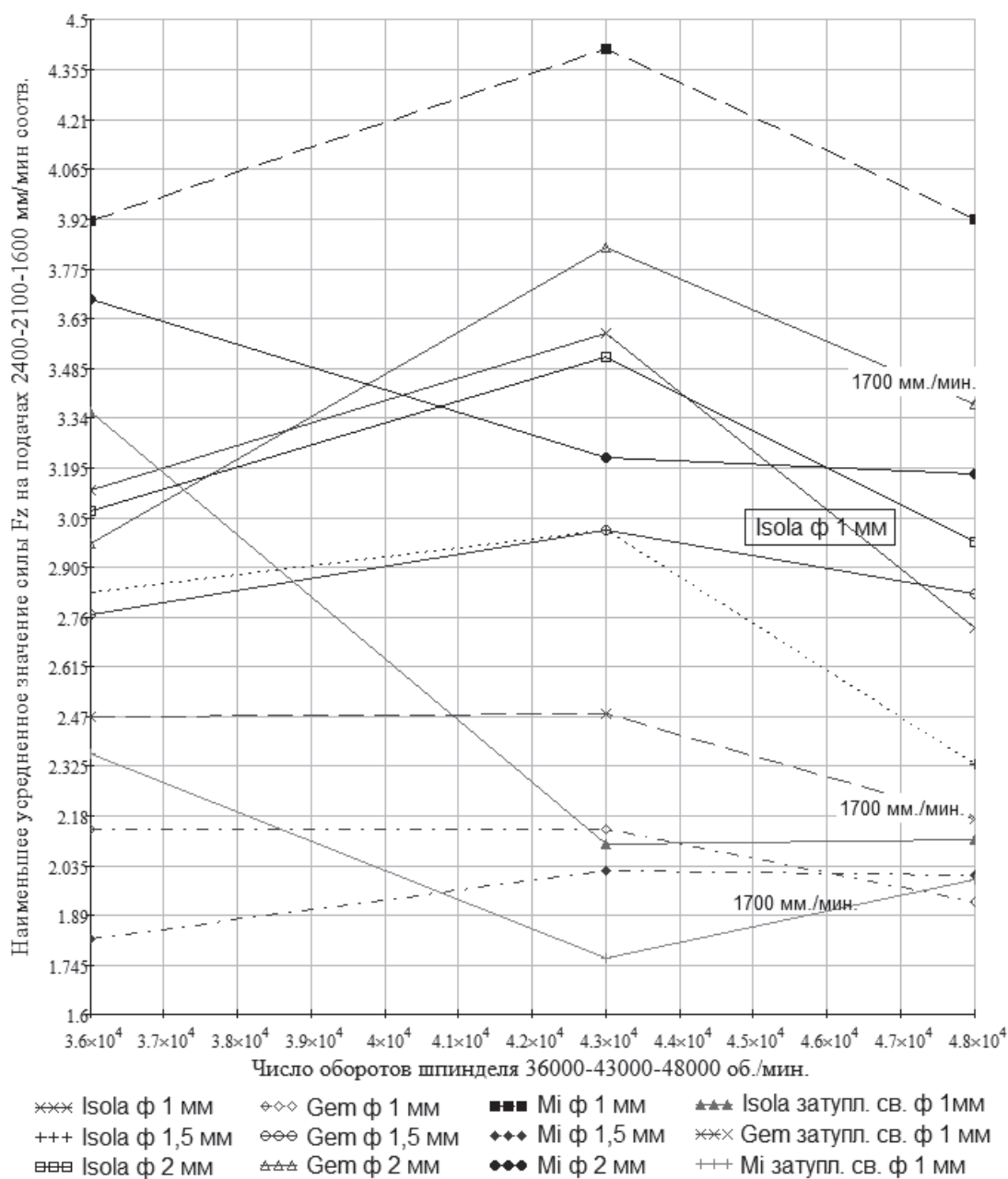


Рис. 10. Наименьшее усредненное значение осевой составляющей силы резания на подачах 2400–2100–1600 мм/мин

Разница среднего значения силы не существенная, однако режим 1 ($S = 2400$ мм/мин на 36 000 об/мин) в 1,5 раза производительней режима 3 ($S = 1600$ мм/мин на 48 000 об/мин), что в условиях крупносерийного и массового производства даст существенную экономию в трудозатратах и положительно скажется на стоимости конечной продукции.

При использовании затупленного инструмента имеет место разброс параметров (см. рис. 9) и зависимости, полученные по наименьшим значениям осевой составляющей силы резания (см. рис. 6–8) для всех типов материала с использованием сверл $\varnothing 1,0; 1,5; 2,0$ мм нарушаются. Имеет место сдвиг по оси подач, и спрогнозировать оптимальные режимы резания для затупившегося инструмента достаточно проблематично.

Выводы. В ходе экспериментального исследования:

1. Установлено, что на выходе сверла из обрабатываемого материала нагрузка распределена от слоя к слою неравномерно. Это объясняется тем, что фольгированный стеклотекстолит – композиционный материал, имеющий неоднородную структуру.

2. Получена общая закономерность осевой составляющей силы резания от подачи, позволяющая подобрать режим резания, обеспечивающий большую производительность при допустимой величине осевой составляющей силы резания.

3. Дополнительно проведены эксперименты для затупленных сверл. Результат обработки экспериментальных данных показал, что зависимости осевой составляющей силы резания от подачи при использовании обрабатывающего инструмента разного диаметра и разных типов обрабатываемых материалов (эпоксидная связка между слоями, стеклоткань, распределение филаментов волокна, разная стеклонаполненность) при одной и той же частоте вращения шпинделя схожи. Косвенно данный факт говорит о правильности выполненных измерений.

Обсуждение и применение. Для более подробного анализа силы 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 рис. 6–9 и получить зависимости типа $F_1 = f_1(S)$, $F_2 = f_2(F)$... $F_n = f_n(S)$, где F_1, F_2 ... F_n – осевая составляющая силы резания (Н) для разных материалов, диаметров сверл при разном числе оборотов шпинделя; $f_1(S), f_2(S)$... $f_n(S)$ – формульные зависимости по подаче (мм/мин).

Математические зависимости в дальнейшем позволят определить зависимости подачи от частоты вращения шпинделя и диаметра обрабатываемого отверстия для разных типов обрабатываемых композиционных материалов, используемых на производстве.

Литература

1. Meshcheryakov, Yu.Ya. *Technological aspects of production of foiled glass-cloth-base laminates* / Yu.Ya. Meshcheryakov // *Elektrotehnika*. – 1994. – P. 6–10.
2. Yurov, L.L. *Improving production technology and development of new types of foiled glass-cloth-base laminates* / L.L. Yurov, Yu.G. Ganin, A.N. Briksa // *Elektrotehnika*. – 1994. – P. 10–15.
3. Brinksmeier, E. *Drilling of Composites and Resulting Surface Integrity* / E. Brinksmeier, S. Fangmann, R. Rentsch // *CIRP Annals*. – 2011. – Vol. 60. – P. 57–60. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.077
4. Rahamathullah, I. *Mechanistic Approach for Prediction of Forces in Micro-Drilling of Plain and Glass-Reinforced Epoxy Sheets* / I. Rahamathullah, M.S. Shunmugam // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2014. – Vol. 75. – P. 1177–1187. DOI: 10.1007/s00170-014-6202-z
5. Rahamathullah, I. *Analyses of Forces and Hole Quality in Micro-Drilling of Carbon Fabric Laminate Composites* / I. Rahamathullah, M.S. Shunmugam // *Journal of Composite Materials*. – 2013. – Vol. 47 (9). – P. 1129–1140. DOI: 10.1177/0021998312445594
6. Liow, J.L. *Mechanical Micromachining: A Sustainable Micro-Device Manufacturing Approach* / J.L. Liow // *Journal of Cleaner Production*. – 2009. – Vol. 17. – P. 662–667. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.11.012
7. 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 (3). – P. 301–307. DOI: 10.1007/s11740-014-0526-2
8. Faraz, A. *Cutting Edge Rounding: An Innovative Tool Wear Criterion in Drilling CFRP Com-*

posite Laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weinert // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49. – P. 1185–1196. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.08.002

9. *Chandrasekharan, V.A Mechanistic Approach to Predicting the Cutting Forces in Drilling: With Application to Fibre Reinforced Composite Materials / V. Chandrasekharan, S.G. Kapoor, R.E. DeVor // Journal of Engineering for Industry. – 1995. – Vol. 17. – P. 559–570. DOI:10.1115/1.2803534*

10. Дрожжин, В.И. Силы резания при сверлении слоистых пластмасс / В.И. Дрожжин, Л.С. Кравченко // *Резание и инструмент, Харьков. – 1972. – Вып. 5. – С. 38–43.*

11. Дрожжин, В.И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В.И. Дрожжин. – Харьков: ХПИ, 1982. – 32 с.

12. *Lazar, M. Experimental Analysis of Drilling Fibre-Reinforced Composites / M. Lazar, P. Xirouchakis // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2011. – Vol. 51. – P. 937–946.*

13. *Elhachimi, M. Mechanical Modelling of High Speed Drilling 1: Predicting Torque and Thrust / M. Elhachimi, S. Torbaty, P. Joyot // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1999. – Vol. 39. – P. 553–568. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00050-9*

14. Егоров, С.В. *Обработка резанием конструкционных пластмасс / С.В. Егоров. – М.: Оборонгиз, 1955. – 115 с.*

15. Егоров, С.В. Силы резания при обработке конструкционных пластмасс / С.В. Егоров // *Обработка металлов и пластмасс резанием. – М.: Машигиз, 1955. – С. 35–44.*

16. Ерохин, А.А. *Обработка резанием стеклопластиков / А.А. Ерохин // Высокопроизводительное резание в машиностроении. – М.: Наука, 1966. – С. 48–54.*

17. Шульгин, А.Н. *Повышение качества и производительности обработки отверстий на печатных платах путем выбора оптимальной геометрии сверл с учетом динамики процесса сверления. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. науч. тр. I Междунар. заоч. науч.-техн. конф., 16–17 дек. 1013 г. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2014. – С. 432–437.*

18. Виноградов, А.А. *Физические основы процесса сверления труднообрабатываемых металлов твердосплавными сверлами / А.А. Виноградов. – Киев: Наук. думка, 1985. – 264 с.*

19. Штучный, Б.П. *Механическая обработка пластмасс: справ. / Б.П. Штучный. – М.: Машиностроение, 1987. – 152 с.*

Шульгин Алексей Николаевич, инженер-технолог, АО «Радий», г. Касли, shulgin_alex@mail.ru.

Дьяконов Александр Анатольевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, diakonovaa@susu.ru.

Тверской Михаил Михайлович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, профессор кафедры «Мехатроника и автоматизация», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, tverskoimm@susu.ru.

Городкова Анастасия Евгеньевна, аспирант кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, gorodkovaee@susu.ru.

Поступила в редакцию 30 мая 2018 г.

DETERMINATION OF CUTTING FORCE WHEN DRILLING FOILED GLASS-CLOTH-BASE LAMINATE

A.N. Shulgin¹, shulgin_alex@mail.ru,
A.A. Dyakonov², diakonovaa@susu.ru,
M.M. Tverskoy², tverskoimm@susu.ru,
A.E. Gorodkova², gorodkovaee@susu.ru

¹JSC "Rady", Kasli, Russian Federation,

²South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The paper presents the results of an experimental study of the cutting force while drilling holes of various diameters in laminate composite, i.e. foiled glass-cloth-base laminate. Due to its inhomogeneous structure, the material has processing limitations associated with bundles caused by uneven distribution of mechanical load. If the value of mechanical load is known, it is possible to predict the most optimal cutting conditions. During the experiments, we obtained the dependences of the change in the axial component of cutting force on the feed at different rotational speeds, grades of processed material and drill diameters. Three most widely used brands, that is Isola DE 104, GEM (ILM), and SF2-35 GOST10316-78, were selected as the material to be processed. We obtained a general rule for choosing the optimal cutting conditions for drilling laminated composite material. To assess the effect of tool blunting on axial thrust parameters, we conducted an experiment which consisted in applying dull drills with a diameter of 1 mm to all three types of material for all previously selected cutting modes. The analysis of experimental data showed that the dependences of the axial force on the feed when using tools of different diameters and different types of materials (epoxy bond between the layers, fiberglass cloth, fiber filament distribution, and different glass filling) at the same spindle speed are similar. The obtained dependences and regularities will make it possible to develop a force model for drilling composite materials, which may significantly simplify the operation design.

Keywords: laminar composite, drilling, cutting force, foiled glass-cloth-base laminate.

References

1. Meshcheryakov Yu.Ya. Technological Aspects of Production of Foiled Glass-Cloth-Base Laminates. *Elektrotehnika*, 1994, pp. 6–10.
2. Yurov L.L., Ganin Yu.G., Briksa A.N. Improving Production Technology and Development of New Types of Foiled Glass-Cloth-Base Laminates. *Elektrotehnika*, 1994, pp. 10–15.
3. Brinksmeier E., Fangmann S., Rentsch R. Drilling of Composites and Resulting Surface Integrity. *CIRP Annals*, 2011, vol. 60, pp. 57–60. DOI: 10.1016/j.cirp.2011.03.077
4. Rahamathullah I., Shunmugam M.S. Mechanistic Approach for Prediction of Forces in Micro-Drilling of Plain and Glass-Reinforced Epoxy Sheets. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 75, pp. 1177–1187. DOI: 10.1007/s00170-014-6202-z
5. Rahamathullah I., Shunmugam M.S. Analyses of Forces and Hole Quality in Micro-Drilling of Carbon Fabric Laminate Composites. *Journal of Composite Materials*, 2013, vol. 47 (9), pp. 1129–1140. DOI: 10.1177/0021998312445594
6. Liow, J.L. Mechanical Micromachining: A Sustainable Micro-Device Manufacturing Approach. *Journal of Cleaner Production*, 2009, vol. 17, pp. 662–667. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.11.012
7. Anand R.S., Patra K., Steiner M. Size Effects in Micro Drilling of Carbon Fibre-Reinforced Plastic Composite. *Production Engineering Research and Development*, 2014, vol. 8 (3), pp. 301–307. DOI: 10.1007/s11740-014-0526-2
8. Faraz A., Biermann D., Weinert K. Cutting Edge Rounding: An Innovative Tool Wear Criterion in Drilling CFRP Composite Laminates. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, vol. 49, pp. 1185–1196. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2009.08.002
9. Chandrasekharan V., Kapoor S.G., DeVor R.E. A Mechanistic Approach to Predicting the Cut-

ting Forces in Drilling: With Application to Fibre Reinforced Composite Materials. *Journal of Engineering for Industry*, 1995, vol. 17, pp. 559–570. DOI:10.1115/1.2803534

10. Drozhzhin, V.I., Kravchenko L.S. [Cutting Forces When Drilling Laminated Plastics]. *Rezanie i instrument* [Cutting and tools]. Kharkov, 1972, no. 5, pp. 38–43. (in Russ.)

11. Drozhzhin, V.I. *Fizicheskie osobennosti i zakonomernosti protsessa rezaniya sloistykh plastmass* [Physical Features and Regularities of Cutting Laminated Plastics]. Kharkov, 1982. 32 p.

12. Lazar M., Xirouchakis P. Experimental Analysis of Drilling Fibre-Reinforced Composites. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, vol. 51, pp. 937–946.

13. Elhachimi M., Torbaty S., Joyot P. Mechanical Modelling of High Speed Drilling 1: Predicting Torque and Thrust. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1999, vol. 39, pp. 553–568. DOI: 10.1016/S0890-6955(98)00050-9

14. Egorov S.V. *Obrabotka rezaniem konstruktsionnykh plastmass* [Cutting of Structural Plastics]. Moscow, Oborongiz Publ., 1955. 115 p.

15. Egorov S.V. [Cutting Forces When Processing Structural Plastics]. *Obrabotka metallov i plastmass rezaniem*. Moscow, Mashgiz Publ., 1955, pp. 35–44. (in Russ.)

16. Erokhin A.A. [Fiberglass Cutting]. *Vysokoproizvoditel'noe rezanie v mashinostroyeni* [High-performance Cutting in Mechanical Engineering]. Moscow, Science Publ., 1966, pp. 48–54. (in Russ.)

17. Shulgin A.N., Orlov A.A. [Improve the Quality and Productivity of Hole Machining on PCBs by Choosing the Optimal Drill Geometry, Taking into Account the Dynamics of the Drilling Process]. *Tekhnologicheskoe obespechenie mashinostroyitel'nykh proizvodstv* [Technological Support of Machine-Building Productions]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2014, pp. 432–437. (in Russ.)

18. Vinogradov A.A. *Fizicheskie osnovy protsessa sverleniya trudnoobrabatyvaemykh metallov tverdospлавными сверлами* [The Physical Foundations of the Drilling Hard-to-Work Metals with Carbide Drills]. Kiev, 1985. 264 p.

19. Shtuchnyj, B.P. *Mekhanicheskaya obrabotka plastmass: spravochnik*. [Mechanical Processing of Plastics: Reference Book]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1987. 152 p.

Received 30 May 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Определение силы резания при сверлении фольгированного стеклотекстолита / А.Н. Шульгин, А.А. Дьяконов, М.М. Тверской, А.Е. Городкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 51–60. DOI: 10.14529/engin180206

FOR CITATION

Shulgin A.N., Dyakonov A.A., Tverskoy M.M., Gorodkova A.E. Determination of Cutting Force when Drilling Foiled Glass-Cloth-Base Laminate. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 51–60. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180206