

На правах рукописи



Шульгин Алексей Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ
ИЗ ФОЛЬГИРОВАННОГО СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Снежинск – 2019

Работа выполнена в Снежинском физико-техническом институте-филиале Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ» (СФТИ НИЯУ МИФИ)

Научный руководитель – Дьяконов Александр Анатольевич
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Реченко Денис Сергеевич
доктор технических наук, доцент кафедры
«Металлорежущие станки и инструменты»
ФГБОУ ВО «Омский государственный техни-
ческий университет»

Рычков Даниил Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Машиностроения и транспорта» ФГБОУ ВО
«Братский государственный университет»

**Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследо-
вательский политехнический университет»**

Защита диссертации состоится 19 декабря 2019 г., в 12-00 ч., на заседании объединенного диссертационного совета Д999.003.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, ГСП, г.Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445667, ГСП, г.Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: г. Ульяновск. Ул. Энгельса, д. 3, первый учебный корпус, ауд. 117.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта: www.ulstu.ru.

Автореферат разослан «___» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Н.И. Веткасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность.

Производство печатных плат из фольгированного стеклотекстолита занимает одно из ключевых мест в приборостроении и радиоаппаратостроении. Технологический процесс изготовления печатных узлов относится к особо ответственным, что означает исключительную важность плат в обеспечении надежности и долговечности конечных изделий, особенно в изделиях военной техники. Стеклотекстолит поддается любым видам механической обработки, однако наиболее распространенным методом получения отверстий в условиях серийного производства является сверление на станках с помощью твердосплавного инструмента. При этом возникают сложности, связанные со слоистой структурой композиционного материала и высоким абразивным действием стеклоткани, на основе которой изготавливается материал.

Соблюдение общепринятых рекомендаций, связанных с использованием подкладок сверху и снизу пакета заготовок, использованием принудительной вытяжной вентиляции и охлаждения в зоне резания, надежным закреплением и прижимом заготовок во время сверления не может гарантировать бездефектную обработку. Основными технологическими критериями, влияющими на качество сверления отверстий, выступают правильная геометрия режущего инструмента и грамотное назначение режимов резания. И если геометрические параметры сверл и их влияние на качество обработки изучено предметно, то при назначении режимов резания имеют место существенные трудности. Рекомендуемые производителями базовых материалов и твердосплавных сверл параметры обработки существенно разнятся между собой и отличаются от режимов резания, приведенных в ОСТ 107.460092.004.02-86, который разработан еще в советское время. Поэтому на реальном производстве, как правило, режимы резания назначаются инженером-технологом исходя из его производственного опыта, что приводит к повышенному расходу режущего инструмента, частым остановкам оборудования и повышенному технологическому отходу материала на настройку.

При этом оцениваемыми выходными параметрами на производстве после проведения операции сверления являются только качество обработанной поверхности, которое определяется визуально и наличие заусенцев медной фольги. Фактически же о качестве обработанных отверстий можно судить только после проведения последующей химико-гальванической обработки и проведения замеров толщины покрытия. С другой стороны стремление к миниатюризации и интеграции в сборке приводит к повышению плотности проводящего рисунка печатного монтажа и уменьшению диаметров отверстий и увеличению их количества на плате.

Анализ работ, посвященных обработке композиционных материалов, показал, что процесс сверления фольгированного стеклотекстолита практически не изучен, имеются лишь исследования авторов в смежных областях. Это обосновывает актуальность исследований, направленных на повышение эффективности механической обработки печатных плат.

Цель. Повысить производительность и качество обработки отверстий на печатных платах на основе расчетного определения режимов резания. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд *задач*.

1. Сформировать комплекс технологических решений для улучшения обработки фольгированного стеклотекстолита, учитывающий бездефектность обработки.

2. Разработать силовую модель резания композиционного материала в привязке к слоистой структуре и анизотропности свойств стеклотекстолита.

3. Разработать методику расчетного определения режимов резания с учетом технологических ограничений на процесс сверления стеклотекстолита.

4. Разработать технологические рекомендации, обеспечивающие заданную производительность и качество сверления фольгированного стеклотекстолита.

Научная новизна

1. Разработана компьютерная имитационная модель, с использованием которой получены математические модели для расчета рациональной частоты вращения шпинделя по известной скорости движения осевой подачи и рациональной подачи по известному диаметру сверла.

2. Разработана методика назначения эффективных режимов резания с учетом комплекса технологических ограничений на сверление фольгированного стеклотекстолита.

3. Определены значения осевой составляющей силы резания, при которых обеспечиваются лучшие условия резания материала и предельные значения, при превышении которых имеет место образование недопустимых дефектов при обработке.

4. Установлено влияние режимов резания материала на процесс образования стружки, качество отверстий и шероховатость стенок отверстий, упругое восстановление материала и наличие заусенцев фольги в отверстиях после обработки.

Практическая ценность

1. Выполнена экспериментальная проверка правильности назначения рациональных режимов резания при сверлении отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита. Практически доказано повышение эффективности обработки, как с точки зрения количественных, так и качественных показателей.

2. Проведена оптимизация работ на предприятии, занимающемся изготовлением печатных плат посредством автоматизации расчетов режимов резания, составления расчетно-технологических карт наладки и оптимизации работы группы инструментального хозяйства (ГИХ). Разработаны технологические рекомендации для бездефектной обработки фольгированного стеклотекстолита. Проведено обучение технического и производственного персонала с оформлением сопроводительных документов.

3. Результаты научно-технических и технологических работ внедрены на трех предприятиях УрФО, занимающихся изготовлением печатных плат с оформлением актов внедрения и промышленного использования. Программа SverloProg.exe передана в производственную эксплуатацию.

4. Проведено экономическое обоснование от внедрения результатов работы. Установлено повышение рентабельности выпускаемой продукции за счет значительного снижения трудовых и материальных затрат при производстве печатных плат.

Методология и методы исследований. Проведенные исследования базируются на основных положениях технологии машиностроения, методиках конечно-элементного моделирования, теории вероятностей и математической статистики. Обработка теоретических и экспериментальных данных, графические построения и статистический анализ проводились в прикладной программе научных и инженерных расчетов MathCAD. В качестве базового пакета для построения конечно-элементной модели и проведения теоретических исследований процесса сверления исследуемого базового материала выбраны ANSYS и LS-DYNA. Практические исследования выполнены на исправном, действующем промышленном оборудовании. Измерения проведены аттестованными измерительными средствами.

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, математического моделирования, современного оборудования и подтверждаются корректным соотношением результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Результаты работы внедрены на двух специализированных предприятиях Уральского региона. Разработаны методики и инструкции по заточке режущего инструмента (в т.ч. введены корректирующие поправки в настройку заточного оборудования) и выбору режимов резания. Проведено обучение рабочего состава.

Основные положения и промежуточные результаты диссертационных исследований неоднократно докладывались на научных сессиях НИЯУ МИФИ. Результаты работ обсуждались на научных семинарах кафедры «Технология машиностроения» СФТИ НИЯУ МИФИ в 2014 – 2018 гг. Результаты работы прошли промышленную апробацию.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа содержит решение актуальной задачи, которая определяется производственной необходимостью повышения эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита, что подразумевает системный подход: увеличение качественных и количественных показателей обработки. Содержание диссертации соответствует специальности 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Публикации по теме. По теме работы опубликовано 22 печатные работы, в том числе 6 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 в периодическом издании с цитированием в научной базе данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы (188 наименований) и

шести приложений. Работа изложена на 238 страницах машинописного текста, включает 95 поясняющих рисунков и 34 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования и дается аннотация диссертации.

В первой главе на базе работ отечественных авторов А.А. Степанова, П.И. Буловского, Н.А. Петровой, В.И. Дрожжина, Л.Л. Кравченко, А.А. Ерохина, А. Кобаяши, Ю.Я. Прохорова, И.С. Тереньтьева, В.Г. Фокина, Р.А. Тихомирова, В.И. Николаева, Л.А. Кравченко, Б.С. Львова, Г.В. Сагалаева, А.Р. Чудновского, Н.Я. Кестельмана, Л.С. Ахмечета и зарубежных авторов Р. Ананда, К. Патры, И. Рахматурры, М.С. Шунмугама, С.С. Цао, Х. Хоченга, Н. Братнагара, М.К. Джалутхари, М. Фернандес, Ц. Кука, И. Гонга, Ц. Лин, К.Ф. Эхмана, Л.Б. Жанга, Л.Дж. Ванга, К.И. Луи, М. Лазара, П. Ксирочакиса, Е.А. Окутана, С. Абрата, Д.А. Валтона, И. Хе, Г. Жанга, Д. Ксуе, В.К. Думры, К. Дебры, И. Сингха, Д. Аролы, М. Рамулу, О. Исбира и др. анализируются исследования, посвященные обработке композиционных материалов и факторы, влияющие на качество обработки отверстий. Рассмотрены существующие экспериментальные и расчетные критерии и подходы к оценке обрабатываемости анизотропных материалов методом сверления. Среди проанализированных работ принципиально выделяются труды Р.С. Ананда и К. Патры, поскольку авторами проведен анализ выходных сил резания отдельно по каждому слою эпоксидного компаунда и композиционного волокна, что не встречается ни в одном научном труде. Анализ современного состояния научных исследований по обработке композиционных пластиков показал высокий уровень проработки вопросов, связанных с решением частных задач по сверлению материалов, однако, в привязке к обработке фольгированного стеклотекстолита необходимо иметь в виду:

1. основное количество трудов по тематике влияния силовых факторов на процесс сверления посвящено обработке пластика, армированного углеродным волокном и электротехническим пластиком и силовые модели, полученные авторами, для обработки фольгированного стеклотекстолита принципиально не подходят.

2. при проведении анализа методик моделирования процессов сверления композиционных материалов необходимо отметить, что общей особенностью при создании конечно-элементных моделей процесса сверления вне зависимости от САЕ-системы, в которой проводится симуляция процесса, является сложность построения модели заготовки. Поэтому ни один из авторов при проектировании модели композиционного материала не учел его слоистую структуру, ограничившись введением коэффициента неоднородности.

2.1 процесс симуляции сверления композиционного материала достаточно длительный. Поэтому в работах количество выполненных экспериментов не превышает трех, что недостаточно для полного и качественного анализа процесса резания и для проведения большего количества экспериментов необходимо выполнить оптимизацию моделей.

3. анализируя рекомендации по выбору режимов резания при сверлении фольгированного стеклотекстолита установлено, что производители базового материала и режущего инструмента приводят разные режимы обработки, которые кроме того, отличаются от рекомендованных общими отраслевыми нормативными документами. Дополнительно необходимо учесть, что возможны различные вариации базовый материал – режущий инструмент, поэтому четко определить режимы резания не представляется возможным. Поэтому на реальном производстве, как правило, режимы резания назначаются опытно-практическим путем. При таком подходе определить наиболее рациональные режимы резания с точки зрения качество-производительность не возможно ввиду ограниченности в материале и времени на настройку.

4. при анализе влияния геометрических параметров режущего инструмента на формирование качественного отверстия необходимо отметить высокий уровень проработки авторами частных задач по влиянию углов резания на обрабатываемость материала и возникновению возможных дефектов при обработке. Однако касательно обработки стеклотекстолита описания четкой геометрии режущего инструмента не сформулировано. Поэтому для проверки влияния геометрии режущего инструмента на процесс резания проведен ряд практических работ и определена оптимальная заточка сверл.

На основании этих выводов сформулированы цель и задачи исследования. Работы проводились на промышленном предприятии при переходе на линейку импортных твердосплавных сверл.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию сверления отверстий в фольгированном стеклотекстолите. В настоящее время на большинстве предприятий отработка и назначение режимов резания производится опытно-практическим путем, т.е. режимы резания выбираются согласно общим методикам и рекомендациям с предварительной настройкой и отладкой на 10...20 заготовках и подкорректировкой на первой партии плат. Однако, при использовании таких приемов часто возникает повышенный технологический отход материала и массовый брак при изготовлении.

Существенно снизить трудозатраты и материальные затраты при проведении технологической подготовки производства можно используя для моделирования сверления стеклотекстолита пакетов программ для инженерных расчетов CAE-систем, использующих методики конечно-элементного моделирования.

В качестве базового пакета для построения конечно-элементной модели и проведения теоретических исследований процесса сверления исследуемого базового материала выбраны ANSYS и LS-DYNA.

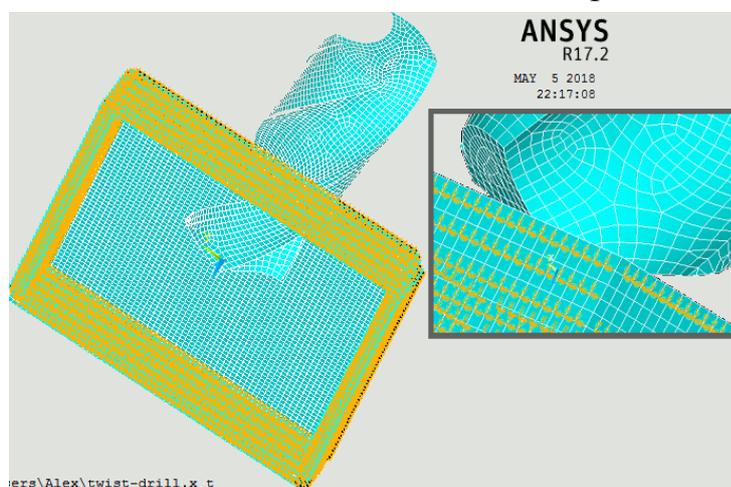


Рис. 1 Конечно элементная модель сверло-заготовка в Ansys

Разработанная конечно-элементная модель сверло-заготовка представлена на рис.1. Материал заготовки набран послойно с разбивкой на основу и уток и заданием механических характеристик, предоставленных компанией Isola. Движение инструмента задано тремя массивами: перемещение – 1,8 мм для гарантированного выхода сверла из зоны резания; время перемещения 0,09...0,04 секунды (в зависимости от режима резания 1100 м/мин...2700 м/мин соответственно) – фактическая скорость движения осевой подачи; вращение инструмента в зависимости от режима резания – 36000 об/мин...48000 об/мин. Результатом расчета является осевая составляющая силы резания P_0 , рис. 2.

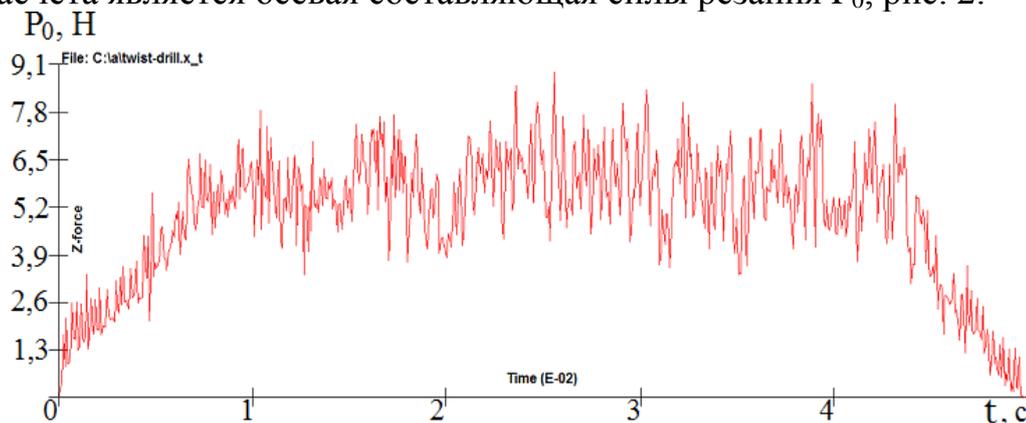


Рис. 2 Осевая составляющая силы резания P_0 на заготовке

Дальнейшая обработка выходных данных осевой составляющей силы резания P_0 выполнена в пакете MathCAD. Изначально проведена симуляция и построены графические зависимости осевой составляющей силы резания на режимах $n = 36\ 000$ об/мин; $S = 1100; 1600; 2000; 2400; 2700$ мм/мин. На соответствующих скоростях движения осевых подач получили усредненные значения P_0 : 2,726; 4,049; 4,932; 3,304; 3,539 Н соответственно.

Для определения сопрягаемости модели сверления с имеющимися решениями схожих по структуре и строению со стеклонаполненным слоистым текстолитом проанализированы зависимости М. Фернандес, К. Кука, И. Рахматуллы, М.К. Шунмугама, К.К. Цао, Х. Хоченга и Р. Ананда, К. Патры. Установлено, что ни одна из ранее разработанных моделей сверления композиционного материала не годится для обработки стеклотекстолита.



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

Для проверки работоспособности модели проведены экспериментальные работы с использованием пяти компонентного пьезоэлектрического динамометра Kistler Mini Dyn 9256C2, рис. 3.

Для процесса сверления использован сверлильный многошпиндельный станок SM-600. Операция сверления проводилась с использованием твердосплавных сверл фирмы «Ham» на материале Isola. Режимы резания: частота вращения шпинделя – 36000 об/мин;

скорости движения осевой подачи: 1100, 1300, 1500, 1700, 1900, 2100, 2300, 2500, 2700 мм/мин.

Проведенный анализ совмещенных выходных данных осевой составляющей силы резания позволил определить, что структура, форма, характер и предельные значения P_0 графиков на всех режимах резания аналогичны. На основании проведенной статистической обработки данных установлено, что выборки, полученные в результате определения осевой составляющей силы резания, принадлежат к одной генеральной совокупности, а среднее абсолютное отклонение составило не более 12 %.

Таким образом, разработанная модель позволяет определять результирующую осевую составляющую силы резания по оси Z (для проведения графического построения и дальнейшего анализа).

В третьей главе описаны теоретические исследования процесса сверления печатных плат. С целью сокращения времени расчетов экспериментальным путем установлен оптимальный размер сетки конечных элементов. Предварительно проведена корректировка командного файла входных данных с увеличением сетки конечных в 4 раза и сокращением времени расчета до 1,5 часов, что является приемлемым для дальнейшего проведения экспериментов. Для оценки адекватности выходных данных проведена статистическая оценка работоспособности адаптированной модели. Установлено, что выборки выходных данных P_0 с размером сетки 0,05 и 0,2 мм соответственно статистически принадлежат к одной генеральной совокупности, а среднее абсолютное отклонение на всех режимах резания не превышает 10%.

Моделирование операции сверления проводилось с использованием сверл диаметрами: 1,0 мм (наиболее распространенный); 1,5 мм; 2,0 мм (максимальный диаметр инструмента при сверлении печатных плат) по предварительно разработанным 3D моделям. Режимы резания: частота вращения шпинделя – 36000 об/мин, 43000 об/мин, 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 для сверл диаметром 1 мм; 43000 об/мин – согласно рекомендаций компании Isola при сверлении стеклотекстолита сверлами $\varnothing 1$ мм; 48000 об/мин – предмаксимальная частота вращения шпинделя станка СМ-600 Ф4 (ввиду ограничения пневмосети).

Далее выполнялось нахождение средних значений осевых составляющих силы резания P_{0cp} для режима в целом. Функциональные зависимости средних значений $P_{0cp}(S)$ приведены на рис. 4.

Анализ получившиеся зависимости позволил определить области рациональных режимов резания: $S = 2400...2600$ (36000 об/мин); $2100...2300$ (43000 об/мин); $1600...1800$ мм/мин (48000 об/мин). В зависимости от диаметра обрабатываемого инструмента имеется некоторый сдвиг в пределах обозначенных интервалов.

Соответственно, при использовании данных режимов резания при обработке фольгированного стеклотекстолита будем иметь наибольшее количество обработанных отверстий и наибольший ресурс инструмента.

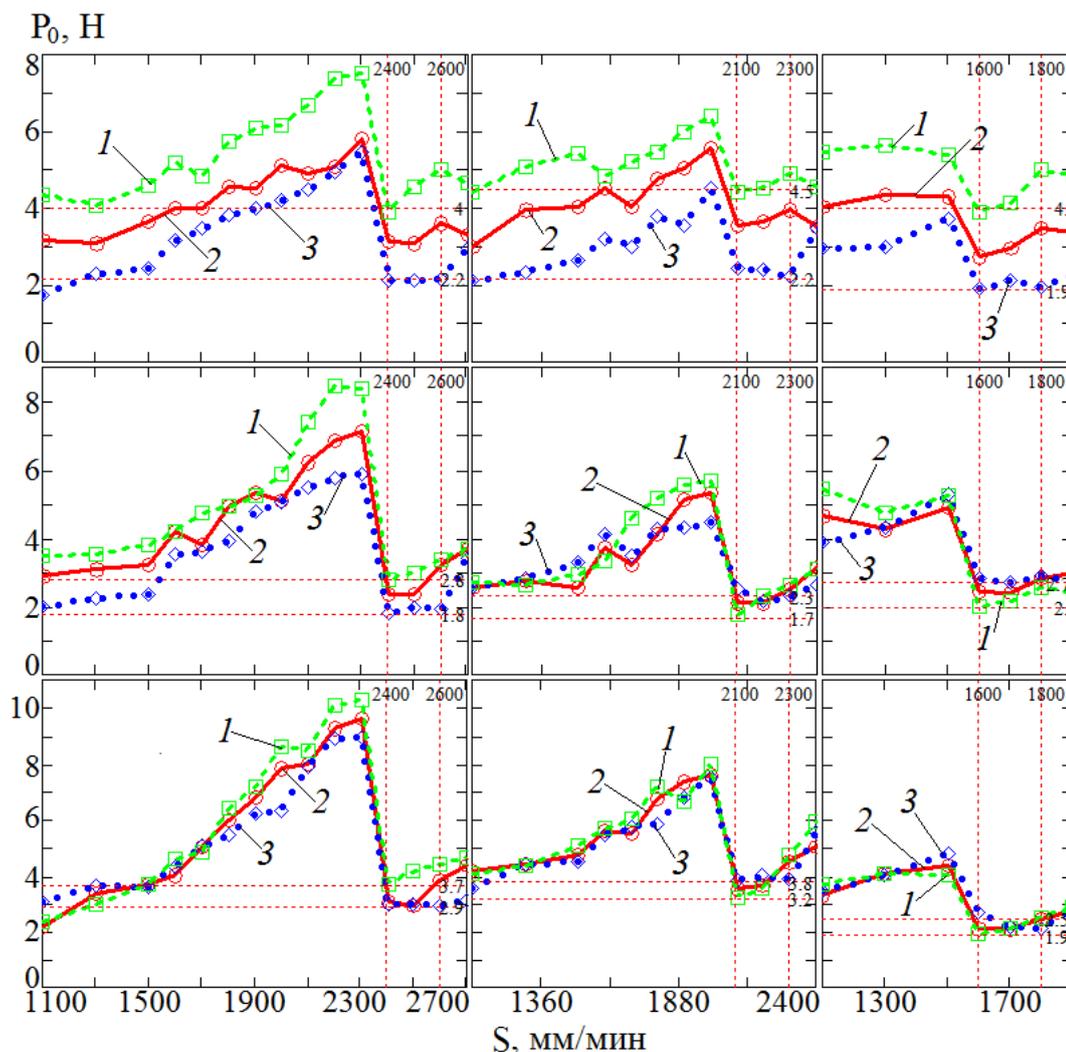


Рис. 4 Зависимость $P_{0cp}(S)$ при $n=36000...43000$ об/мин
 1 – материал СФ-2; 2 – материал Isola; 3 – материал Gem

Дополнительно проведено исследование влияния режимов обработки на процесс стружкообразования, качество обработанных отверстий и шероховатость, а также наличие заусенцев фольги в отверстии. Доказано, что наиболее предпочтительными для обработки отверстий с учетом выше обозначенных факторов являются режимы резания со средними значениями P_{0cp} до 3,5 Н.

Далее выполнена обработка данных теоретических исследований процесса сверления и получены формульные зависимости осевой составляющей силы резания от подачи. Установлено, что зависимости осевой составляющей силы резания от скорости движения осевой 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 исследования дают возможность для дальнейшего определения рациональных факторов обработки отверстий для разных типов обрабатываемых композиционных материалов, используемых на производстве.

В Главе четыре приводится определение рациональных факторов обработки отверстий. Предварительно разработан алгоритм назначения бездефектных режимов резания с дополнительной технологической проверкой и техниче-

ским заключением. Критерием выбора режимов резания выступают как прямые, так и косвенные показатели качества: период стойкости сверл до переточки (минимум 8000 обработанных отверстий до переточки, что превышает нормативные требования стандартов в 5 с лишним раз). Кроме того, одним из основных факторов выступает величина заусенцев медной фольги на выходе сверла свыше 40 мкм и отсутствие дефектов металлизированного отверстия после гальванической обработки и металлизации.

Анализируя значения $P_{0cp}(S)$ на рис.4 получен график зависимости скорости движения осевой подачи от частоты вращения шпинделя, рис. 5

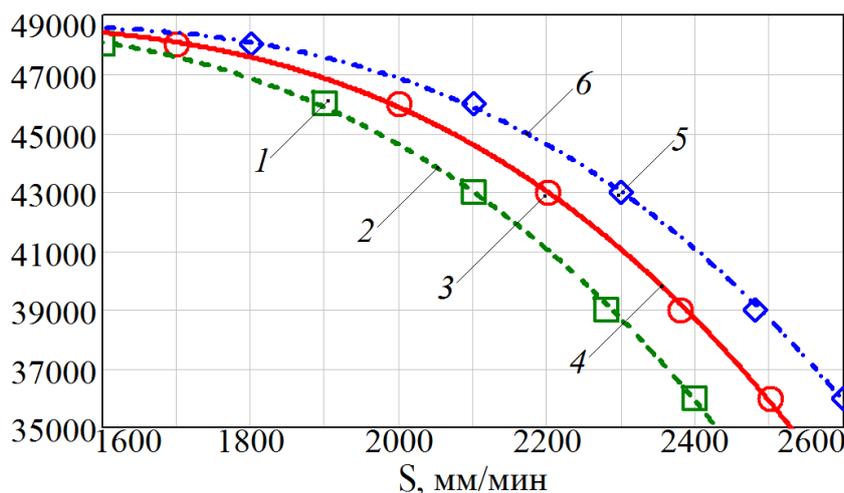


Рис. 5 Зависимость подачи от частоты вращения шпинделя

1 – теорет. точки, материал СФ-2; 2 – аппрокс. полин. 2-й ст., мат. СФ-2; 3 – теорет. точки, материал Isola; 4 – аппрокс. полин. 2-й ст., мат. Isola; 5 – теорет. точки, материал Gem; 6 – аппрокс. полин. 2-й ст., мат. Gem

Полученные графики позволяют назначать рациональную частоту вращения шпинделя в зависимости от скорости движения осевой подачи и марки обрабатываемого материала. Так, например, для материала СФ-2 при $S = 1800$ мм/мин, $n = 47\ 000$ об/мин; для материала Isola при $S = 2300$ мм/мин, $n = 41\ 000$ об/мин и т.д. В результате получившиеся математические зависимости имеют следующий вид:

$$n^{CF-2}(S) = 3,034 \cdot 10^4 + 29,309 \cdot S - 0,011 \cdot S^2 \quad (1)$$

$$n^{ISOLA}(S) = 3,044 \cdot 10^4 + 28,494 \cdot S - 0,01 \cdot S^2 \quad (2)$$

$$n^{GEM}(S) = 3,056 \cdot 10^4 + 27,735 \cdot S - 0,0098 \cdot S^2 \quad (3)$$

где $n(S)$ – частота вращения шпинделя, об/мин, S – скорость движения осевой подачи сверла, мм/мин.

Таким образом, при определении зависимости частоты вращения шпинделя от подачи имеем нелинейные функции второго порядка. Отличительной особенностью полученных зависимостей является схождение графиков по всем трем типам материалов на высоких частотах вращения шпинделя (свыше значений 49 000 об/мин) на малых скоростях движения осевой подачи сверла (менее 1 500 мм/мин). Т.е. на малых подачах различия в механических свойствах композиционных материалов не существенны. Однако, данные режимы резания менее производительны и величину подачи следует максимально сдвигать к правой границе графика.

Согласно зависимостям (1)...(3) можно задавать рациональные режимы резания без привязки к диаметру сверла. Однако при использовании материалов

разных марок есть необходимость в корректировке скорости движения осевой подачи относительно механических свойств самого ламината для получения оптимальной производительности при минимальной осевой нагрузке на сверло и, следовательно, максимального периода стойкости режущего инструмента.

С повышением диаметра обрабатываемого отверстия и диаметра сверла на высоких скоростях движения осевой подачи возрастают значения осевой составляющей силы резания P_0 . Более наглядно это отмечается на примере материала СФ-2. Кроме того, средне-номенклатурное количество отверстий большего диаметра на печатных узлах сравнительно не велико (на 2 порядка меньше сравнительно сверл диаметра 1 мм). Поэтому скорость движения осевой подачи для сверл диаметром 2 мм можно выбирать: 1600 мм/мин для материала СФ-2, 1700 мм/мин для Isola, 1800 мм/мин для материала Gem на 48000 об/мин.

Таким образом, сверление отверстий малого диаметра необходимо выполнять на более высоких режимах обработки: 2600 – 2400 мм/мин. При увеличении диаметра сверла скорость движения осевой подачи сверла следует снижать до 1600 – 1800 мм/мин. Для более твердых материалов подачу следует выбирать несколько ниже (на 100 мм/мин), относительно более мягких марок; для больших диаметров сверл подачу следует выбирать выше (на 100 мм/мин). На основании этого получены графические зависимости скорости движения осевой подачи от диаметра сверл, рис.6.

S , мм/мин

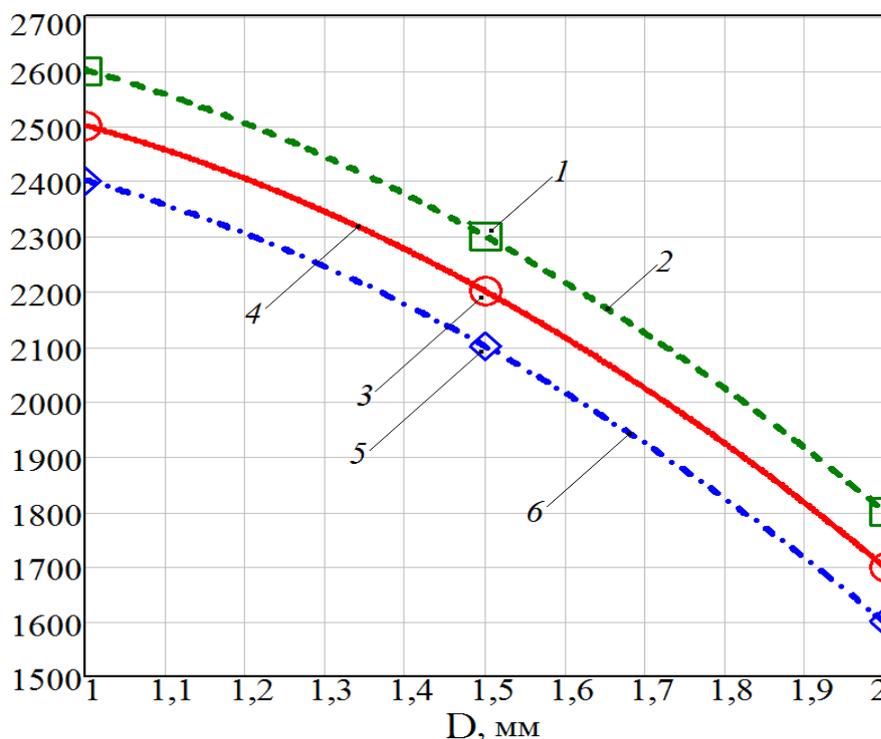


Рис. 6 Зависимость подачи от диаметра обрабатываемого инструмента

1 – теоретические точки, материал СФ-2;
 2 – аппрокс. полин. 2-й ст., материал СФ-2;
 3 – теоретические точки, материал Isola;
 4 – аппрокс. полин. 2-й ст., материал Isola;
 5 – теоретические точки, материал Gem;
 6 – аппрокс. полин. 2-й ст., материал Gem

В результате, полученные математические зависимости имеют вид:

$$S^{C\Phi-2}(D) = 3,605 \cdot 10^3 + 396,097 \cdot D - 399,858 \cdot D^2 \quad (4)$$

$$S^{ISOLA}(D) = 2,505 \cdot 10^3 + 396,097 \cdot D - 399,858 \cdot D^2 \quad (5)$$

$$S^{GEM}(D) = 2,405 \cdot 10^3 + 396,097 \cdot D - 399,858 \cdot D^2 \quad (6)$$

где $S(D)$ – скорость движения осевой подачи сверла, мм/мин; D – диаметр сверла, мм.

Согласно полученным экспериментальным зависимостям (4)...(6) возможно получить оптимальное значение скорости движения осевой подачи сверла для всех типов базовых материалов и всей номенклатуры сверл, используемых на предприятии от 1,0 до 2,0 мм. Таким образом, алгоритм по назначению режимов резания будет иметь последовательность, изображенную на рис. 7.



Рис. 7 Назначение режимов резания

Дополнительно, для упрощения работы с полученными зависимостями все данные по назначению оптимальных режимов резания с учетом диаметра обрабатываемого инструмента и номенклатуры материалов сведены в таблицу. Кроме того, для более надежного расчета и освобождения от негативного влияния человеческого фактора при подготовке производства разработана автоматизированная программа Regime.exe, которая позволяет по принципу задания предварительных входных данных выполнить назначение режимов резания и ввод данных в стойку управления станком. Программа работает с выходными файлами статистических данных пакетов программ P-Cad, Altium Designer, которые содержат данные о количестве и диаметрах обрабатываемых отверстий на печатной плате.

При разработке программного обеспечения учтен перевод диаметров обрабатываемых отверстий в диаметры сверл с учетом необходимого технологического зазора под дальнейшую гальваническую обработку и металлизацию. Окно выходных данных работы программы представлено на рис.8.

Диаметр отв. п/п	Диаметр сверла	Кол-во оборотов	Поп.подача	Вид отверстия	Кол-во отв.
0,6	0,8	34700	2570	Металлизированное	211
0,8	1	36400	2500	Металлизированное	2
1,1	1,3	40000	2340	Металлизированное	104

Всего отверстий: 317

Обозначение: КСИШ.741645.028

Открыт файл: H:\Аспирантура\сверла\сверла\Плата Ф8 v1.sta

Рис. 8 Окно выходных данных Regime.exe

При качественном предварительном наборе файлов статистики Regime.exe позволяет существенно сократить время назначения рациональных режимов резания и ускорить технологическую подготовку производства.

Пятая глава посвящена практическому использованию и внедрению результатов работы.

Для оптимизации работ инженерно-технического состава предприятия разработаны автоматизированные программы SverloProg.exe и AutoKarta.exe. Аналогично работе в Regime.exe, обе программы используют файлы статистических данных P-Cad, Altium Designer о количестве и диаметрах обрабатываемых отверстий на печатной плате. Для корректной работы программ на первом этапе предварительно создана база данных сверл в пересчете на диаметр отверстия, необходимого для обработки. Алгоритм пересчета предусматривает +0,1 мм к диаметру отверстия без металлизации (односторонняя печатная плата либо с дополнительным рассверливанием под крепежное отверстие) и +0,2 мм к диаметру отверстия под дальнейшую металлизацию (для двусторонних печатных плат).

Программа SverloProg значительно упрощает работу инженера по инструменту (инженера ГИХ) в части расчета необходимого количества режущего инструмента для обработки фольгированного стеклотекстолита. При корректном введении расчетных данных достаточно сложный и трудоемкий «ручной» расчет производится в полуавтоматическом режиме с помощью ЭВМ за считанные минуты. Кроме того, программно предусмотрена работа с остатком сверл на складе, что позволяет производить расчет с достаточной степенью точности и грамотно распоряжаться бюджетом отдела и организации в целом, рис.9.

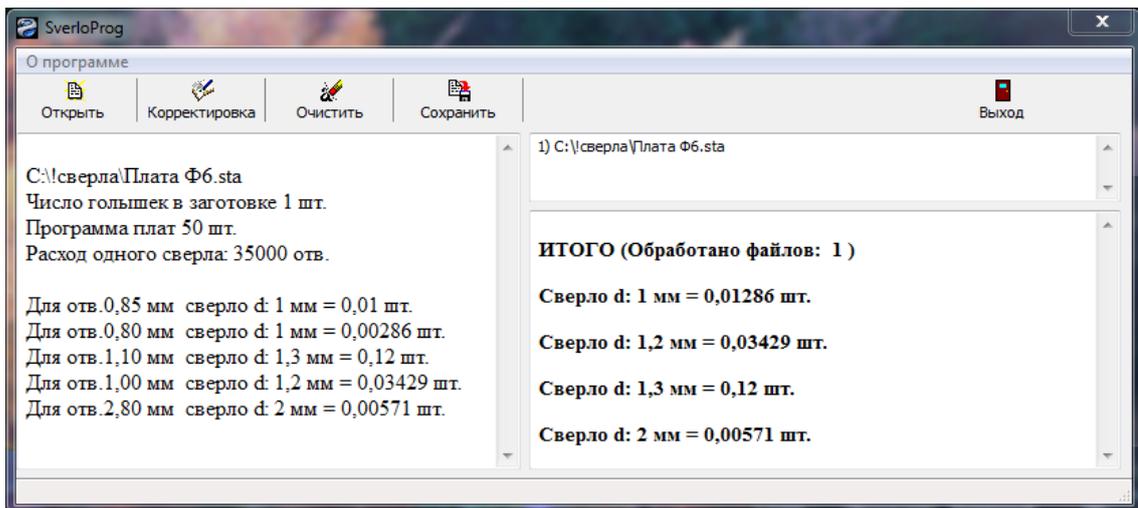


Рис. 9 Окно выходных данных программы SverloProg

Для минимизации трудозатрат инженера-технолога, на базе ранее спроектированной программы Regim.exe была разработана программа AutoKarta.exe для автоматической компоновки карт наладки оборудования с учетом расчета режимов резания и нормирования трудозатрат. Окно выходных данных работы программы приведено на рис. 10.

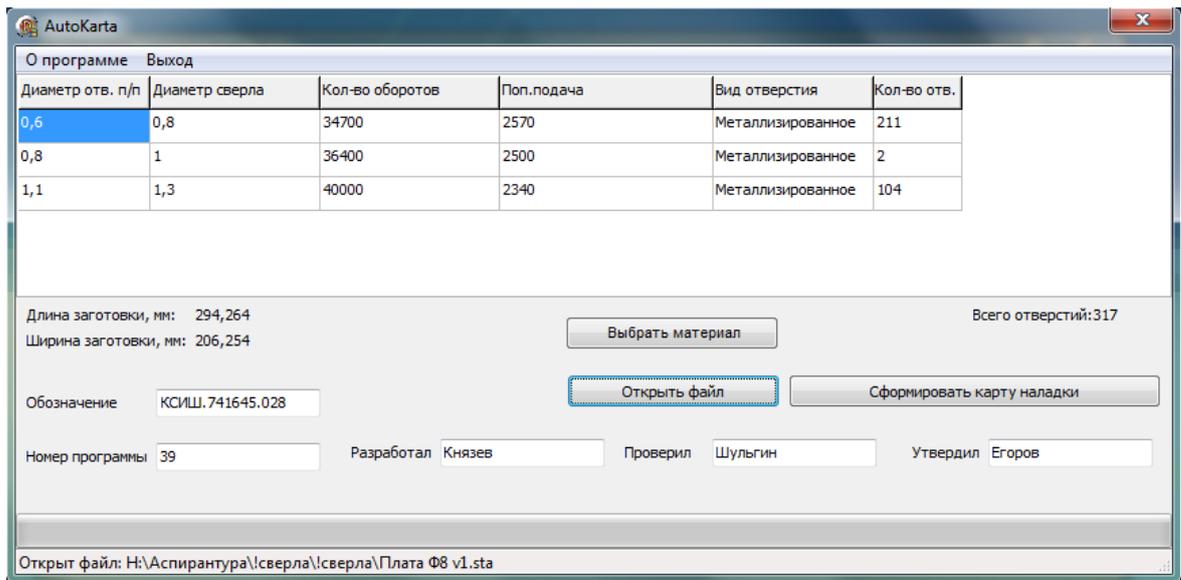


Рис. 10 Окно выходных данных программы AutoKarta

Программа AutoKarta.exe в автоматическом режиме выполняет: перевод отверстий, не применяемой номенклатуры сверл в используемую (например 1,15→1,2 мм); перерасчет диаметров обрабатываемых сверл в диаметры обрабатываемых отверстий; расчет трудоемкости, включая оперативную норму, штучное время и подготовительно-заключительное время на партию обрабатываемых плат; выбор подкладок (верхних и нижних) и количество плат в пакете в зависимости от толщины используемого базового материала; формирование карт наладки для рабочего (цеховой рабочий экземпляр) и комплекта технологической документации (ТД).

Дополнительно, в привязке к основным факторам, влияющим на качество и производительность обработки отверстий на фольгированном стеклотекстолит-

те, разработаны технологические рекомендации по сверлению печатных плат, которые оформлены в виде технологической инструкции.

Производственное освоение достигнутых технических результатов и комплекса технологической автоматизации существенно повысило эффективность обработки отверстий на печатных платах, как с точки зрения количественных показателей, так и качественных:

1. увеличена общая производительность изготовления печатных плат в 3,2 раза;

2. для всей номенклатуры сверл, в 6 – 8 раз увеличен период стойкости инструмента и количество отверстий, обрабатываемых с одной установки, что в 6 раз сократило количество переналадок станков и в 5,5 – 6 раза количество переточек инструмента;

3. сведены до 0,1% дефекты, возникающие при обработке отверстий;

4. минимизирован с 3 – 5% до 0,25% технологический отход материала на обработку режимов резания.

При этом отмечены следующие технические преимущества: снижение основного времени механической обработки отверстий на печатных платах на 660 мин/смену; уменьшение подготовительно-заключительного времени на 340 мин/смену.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основании анализа структуры и типа армирования фольгированного стеклотекстолита установлено влияние разных факторов на процесс обработки. Сформированы и описаны основные дефекты печатных плат на производстве. Выполнен анализ причин их появления, сформированы мероприятия по выполнению бездефектной обработки.

2. Впервые разработанная компьютерная имитационная модель сверления стеклотекстолита для определения осевой составляющей силы резания P_0 позволила установить зависимости скорости движения осевой подачи от диаметра обрабатываемого отверстия и частоты вращения шпинделя от подачи.

3. Установлено влияние затупления режущего инструмента и геометрии заточки сверла на значение осевой составляющей силы резания и процесс обработки. Определены критерии заточки режущего инструмента и показатели периода стойкости сверл.

4. Определено влияние режимов резания и действующей осевой составляющей силы резания P_0 на процесс обработки. Найдены наиболее предпочтительные для обработки значения P_0 , а также режимы резания со значениями P_0 , при которых сверление запрещено ввиду наличия дефектов.

5. Разработан алгоритм по назначению эффективных режимов резания, обеспечивающих заданную производительность и качество обработки. Найдены рациональные режимы резания для всей номенклатуры базовых материалов, используемых на предприятии. Определена методика сверления печатных плат, позволяющая на этапе проведения технологической подготовки производства задавать наиболее производительные бездефектные режимы резания.

6. Посредством комплекса технологической автоматизации расчетов режимов резания, составления расчетно-технологических карт наладки и оптимизации работы группы инструментального хозяйства проведена оптимизация работ на предприятии.

7. В рамках повышения эффективности процесса сверления решена прикладная задача по обеспечению требуемой стойкости инструмента, заданного качества отверстий для уменьшения времени переналадки оборудования, исключения некоторых операций подготовки поверхности материала и снижения себестоимости конечной продукции.

8. Промышленное внедрение результатов исследований на АО «Радий» г.Касли позволило значительно повысить производительность сверления отверстий в печатных платах из фольгированного стеклотекстолита. С учетом снижения затрат на покупку новых сверл, общий экономический эффект от внедрения составляет 873 440 руб/год при существующей загрузке участка и односменному режиму работы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Дьяконов, А.А., Городкова, А.Е., Шульгин, А.Н. Автоматизированная программа для оптимизации работы группы инструментального хозяйства / А.А. Дьяконов, А.Е. Городкова, А.Н. Шульгин // Автоматизация. Современные технологии. Том 72.8. – 2018. – С. 346 – 349.
2. Дьяконов, А.А., Городкова, А.Е., Шульгин, А.Н. Зависимость качественных и количественных показателей обработки отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита от схемы заточки режущего инструмента. / А.А. Дьяконов, А.Е. Городкова, А.Н. Шульгин // Автоматизация. Современные технологии. Том 72.9. – 2018. – С. 409 – 413.
3. Дьяконов, А.А., Орлов, А.А., Шульгин, А.Н. Разработка имитационной модели сверления стеклотекстолита. / А.А. Дьяконов, А.А. Орлов, А.Н. Шульгин // Естественные и технические науки. Том 6. – 2019. – С. 166 – 167.
4. Дьяконов, А.А., Орлов, А.А., Шульгин, А.Н. Теория механической обработки на станках с ЧПУ. / А.А. Дьяконов, А.А. Орлов, А.Н. Шульгин // Естественные и технические науки. Том 6. – 2017. – С. 91 – 93.
5. Шульгин, А.Н., Дьяконов, А.А., Тверской, М.М., Городкова, А.Е. Определение силы резания при сверлении фольгированного стеклотекстолита. / А.Н. Шульгин, А.А. Дьяконов, М.М. Тверской, А.Е. Городкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – №2. – С. 51–60.
6. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Зависимость качественных и количественных показателей обработки отверстий на печатных платах от выбора фольгированного стеклотекстолита и режимов резания. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Вестник ЮУрГУ. Серия «машиностроение». – 2015. – №2. – С. 32–39.
7. Shulgin A.N., Dyakonov A.A., Gorodkova A.E. [Influence of the Glassfiber Filaments Distribution on Quality and Performance of Hole Processing on Printboards]. Materials Science Forum, 2019, no. 946, pp. 223-227.

Публикации в других научных изданиях

1. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Влияние предварительной подготовки поверхности на адгезионные характеристики наносимого металлизированного покрытия. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Научные чтения СФТИ НИЯУ МИФИ, Том 1. Теоретические и прикладные вопросы механики, технологии и материалов. – 2015. – С. 107 – 111.
2. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Влияние физических свойств базового композиционного материала на механическую обрабатываемость. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Научные чтения СФТИ НИЯУ МИФИ. Теоретические и прикладные вопросы механики, технологии и материалов. – 2015. – С. 112 – 117.
3. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Механическая обработка отверстий в процессах изготовления печатных плат: штамповка или сверление. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Сборник научных трудов. Заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии». – 2016. – С. 31 – 34.
4. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Описание дефектов с указанием и анализом причин их появления на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Сборник научных трудов. Четвертое заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии». – 2014. – С. 112 – 119.

Шульгин Алексей Николаевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ ИЗ ФОЛЬГИРОВАННОГО СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 999.003.02
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»
(протокол №51 от 17.09.2019 г.)

Формат 6084 1/16

Подписано в печать «__» _____ 2019 г.

Заказ № _____. Тираж _____ экз.

Отпечатано в типографии АО «Радий» 456835, Челябинская область, г.Касли,
ул. Советская, 28