МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Снежинский физико-технический институт –
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СФТИ НИЯУ МИФИ)

На правах рукописи



Шульгин Алексей Николаевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ ИЗ ФОЛЬГИРОВАННОГО СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА

05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
доцент
Дьяконов Александр Анатольевич

Снежинск 2019

Содержание 2
Введение 6
Глава 1 Состояние вопроса и постановка задач исследований. Цель и задачи работы 11
1.1 Композиционные материалы. Стеклотекстолит. Особенности обработки 11
1.2 Методы получения отверстий на фольгированном стеклотекстолите 17
1.3. Основные факторы, влияющие на качество сверления отверстий 21
1.3.1 Использование качественных базовых материалов. Заусенцы фольги 23
1.3.2 Распределение филаментов и содержание стекла в материале 26
1.3.3 Режимы резания при сверлении 30
1.3.4 Режущий инструмент. Геометрические параметры. Влияние износа 34
1.3.5 Влияние силовых факторов на процесс сверления 39
1.4 Методы моделирования процессов резания 43
1.5 Основные пути повышения эффективности сверления отверстий 47
1.6 Результаты и выводы 48
1.7 Постановка цели и задачи исследования 50
Глава 2 Разработка компьютерной имитационной модели сверления отверстий в слоистой системе и ее численная реализация 52
2.1 Постановка задачи 52
2.1.1 Расчетная схема 54
2.1.2 Математическая постановка задачи 58
2.2 Численная реализация решения задачи методом конечных элементов 61
2.2.1 Конечно-элементная модель в ANSYS Workbench 64
2.2.1.1 Решение задачи средствами ANSYS Workbench, LS-DYNA 67
2.2.1.2 Форма представления результатов расчета 69
2.3 Работоспособность имитационной модели процесса сверления 73
2.3.1 Экспериментальная оценка работоспособности модели 73
2.3.1.1 Общее описание эксперимента: формулировка задачи 74
2.3.1.2 Определение осевой составляющей силы резания с помощью динамометрической установки 78

2.3.1.3 Схождение теоретических и экспериментальных исследований 80
2.3.2 Сопрягаемость модели сверления с имеющимися решениями 88
2.4 Анализ результатов 90
2.5 Результаты и выводы 93
Глава 3 Теоретические исследования процесса сверления печатных плат 95
3.1 Адаптация компьютерной имитационной модели 95
3.2 Статистическая оценка работоспособности адаптированной модели 100
3.3 Определение механических свойств базовых материалов 103
3.4 Общее описание эксперимента: формулировка задачи 109
3.5 Многофакторное определение осевой составляющей силы резания 113
3.6 Построение графических зависимостей осевой составляющей силы резания от подачи 115
3.7 Проведенные исследования: особенности, специфика 119
3.8 Определение формульных зависимостей осевой составляющей силы резания 121
3.8.1 Методы аппроксимации экспериментальных данных 121
3.8.2 Анализ зависимости: выбор аппроксимирующей функции 123
3.9 Обработка данных теоретических исследований процесса сверления 126
3.10 Результаты и выводы 130
Глава 4 Определение рациональных факторов сверления отверстий 132
4.1 Бездефектное сверление слоистого материала 132
4.1.1 Ограничения на режимы резания 133
4.1.2 Алгоритм бездефектных режимов резания 134
4.2 Определение рациональных режимов резания: постановка задачи 137
4.2.1 Определение зависимости частоты вращения шпинделя от подачи 139
4.2.2 Определение зависимости скорости движения осевой подачи от диаметра обрабатывающего инструмента 142
4.3 Определение рациональных режимов резания 145
4.4 Дополнительные особенности сверления отверстий 148
4.4.1 Процесс стружкообразования при сверлении 148

4.4.2 Влияние режимов резания на процесс стружкообразования 151
4.4.3 Влияние режимов резания на качество отверстий и шероховатость 154
4.4.4 Влияние режимов резания на упругое восстановление материала 157
4.4.5 Влияние режимов резания на наличие заусенцев фольги в отверстии 158
4.4.6 Общие закономерности влияния режимов резания на сверление 163
4.5 Влияние затупления инструмента на значение P_0 и процесс сверления 167
4.6 Автоматизация расчетов 171
4.7 Результаты и выводы 176
Глава 5 Практическое использование и внедрение результатов работы 178
5.1 Подтверждение адекватности методики по назначению рациональных режимов резания 178
5.1.1 Экспериментальная проверка методики: техническое обоснование внедрения 178
5.1.2 Экономическое обоснование внедрения методики 181
5.2 Автоматизированная программа для оптимизации работы ГИХ (группы инструментального хозяйства) 182
5.3 Программа для автоматической компоновки карт наладки оборудования с учетом расчета режимов резания и нормирования трудозатрат 190
5.4 Разработка технологических рекомендаций 198
5.5 Результаты и выводы 201
Заключение. Общие результаты и выводы 202
Список использованных источников 204
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Результаты обработки экспериментальных данных. Зависимость $P_0(t)$ на разных скоростях движения осевой подачи S 223
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 Результаты обработки экспериментальных данных: аппроксимация экспериментальных данных полиномом 4-й степени: зависимость усредненных значений P_0 на разных S 228
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Результаты обработки экспериментальных данных: аппроксимация экспериментальных данных полиномом 4-й ст.: зависимость усредненных значений P_0 на разных S с поправочными коэффициентами 233

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 Карта наладки многооперационной обработки ст. СМ-600 234
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 Акт внедрения результатов научно-технических и технологических работ 235
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 Акт о промышленном использовании методик и технологических рекомендаций по выбору режимов резания при обработке печатных плат из фольгированного стеклотекстолита 237
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 Акт приемки к внедрению 238

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Производство печатных плат из фольгированного стеклотекстолита занимает одно из ключевых мест в приборо 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.

Повышение эффективности сверления отверстий на базовом материале подразумевает системный подход и увеличение качественных и количественные показателей обработки. К количественным показателям относится общее увеличение производительности механической обработки, увеличение стойкости инструмента и сокращение количества переналадок оборудования. К основным качественным показателям можно отнести минимизацию дефектов при сверлении, а также снижение количества технологического отхода материала на отработку режимов резания.

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 производите-

лями базовых материалов и твердосплавных сверл параметры обработки существенно рознятся 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 обработки 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 материла 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 отверстии 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 положения 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 MATH Cad. В качестве базового пакета для построения конечо-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 оптимальных 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 количественные 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 236 страницах машинописного текста, включает 95 поясняющих рисунков и 34 таблицы.

Глава 1 Состояние вопроса и постановка задач исследований. Цель и задачи работы

1.1 Композиционные материалы. Стеклотекстолит. Особенности обработки

Композиционный материал (по тексту далее – КМ) или композит – неоднородная система, которая состоит из сильно отличных между собой по физическим свойствам компонентов, которые взаимно не растворены в общем объеме, а общее внутреннее построение материала позволяет использовать преимущества каждого компонента. Основную составляющую при упрочнении материала вносят наполнители, которые называют упрочнители. Упрочнители достаточно прочны, имеют высокий модуль упругости и твердость. По типам наполнителя КМ разделяют на волокнистые, слоистые и дисперсноупрочненные и (рис. 1.1).

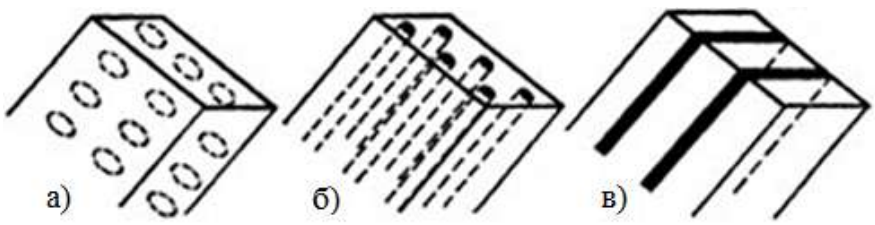


Рис. 1.1. Строение композиционного материала
а) – дисперсноупрочненные; *б)* – волокнистые; *в)* – слоистые

К основным базовым материалам для изготовления печатных плат относятся фольгированные и нефольгированные диэлектрики, керамические и др. материалы, из которых изготавливают основания.

Диэлектрики имеют слоистую композиционную структуру и состоят из наполнителя и связующего (фенольной, эпоксидной и др. смолы). В качестве наполнителя может быть использована стеклоткань, стекловолокно и пр. [56]. На рис. 1.2 схематично представлено внутренне строение фольгированного стеклотекстолита.

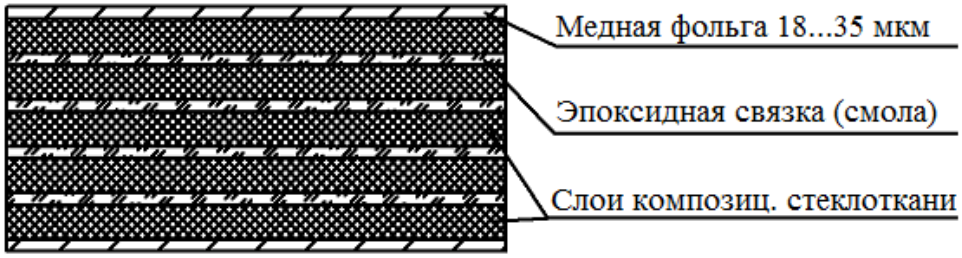


Рис. 1.2 Строение фольгированного стеклотекстолита

Основную массу печатных плат общего и специального назначения изготавливают из фольгированных диэлектриков на основе стеклоткани, изготовленной из нитей алюмоборосиликатного стекла, смолы для пропитывания стеклоткани и фольги (чаще медной), используемой в качестве металлического покрытия. К наиболее распространенным маркам стеклотекстолитов относят FR4, FR5, G10, G11.

Особенности сверления КМ сопряжены с их внутренним анизотропным строением [32, 45, 67, 75…78, 90, 95 – 107 и др.]. К ним можно отнести:

1. Анизотропность материала, которая определяет различия при перерезании волокон поперек и вдоль и оказывает влияние на качественные показатели обработки;

2. Сравнительно не высокие прочностные характеристики материала и его хрупкость. Очень часто не высокая адгезия армирующих волокон и полимерной связки. Это приводит к трещинообразованию армирующих волокон, деструкции полимерного слоя, выкрашиваниях материала, появлению паутинообразных ореолов на входе и выходе инструмента. Появление данных дефектов гипертрофируется с увеличением степени износа режущего инструмента. Поэтому обрабатывать КМ допускается только инструментом с острой заточкой;

3. Достаточно низкие показатели теплопроводности. В зависимости от разных типов и марок композиционных материалов теплопроводность может составлять 0,13 ...0,9 Вт/(м·°С) [72] . Это на несколько порядков меньше значений теплопроводности, характерной для металла. Таким образом, отвод тепла из зоны резания осуществляется через обрабатывающий инструмент. По данным разных авторов эта доля может составлять: 99 % (А. Кобаяши [45]) , 55 - 60 % (А.Н. Резников и

Е.А. Цирулина [74]), 90% (Б.П. Штучный [91], А.А.Степанов [78]). Именно поэтому теплофизические свойства материала обрабатывающего инструмента имеют очень важное значение при резании композиционных материалов;

4. Достаточно высокие упругие свойства КМ и высокий коэффициент линейного расширения (порядка $20…100\times10^{6}$ $^{o}C^{-1}$). Это приведет к росту контактной площади трения и, как следствие, возрастанию работы сил трения. Согласно исследований автора В.И. Дрожжина [25, 26], работа сил трения достигает 70% от всей работы, которая имеет место при обработке КМ. Данный факт приводит к существенному ухудшению поверхности обработки, поскольку при затуплении инструмента, волокна материала упруго восстанавливаются и обрываются. Вышеописанное характерно для механической обработки термореактивных пластмасс и проявляется а наличии в зоне резания характерных дефектов в виде расслоения и разлохмачивания базового материала [113, 126, 134, 138, 147, 148, 150, 161, 167, 175, 176, 185]. В своей научной работе авторы Е.Киликап [147, 148] и И.С. Шиха [174] отметили, что на входе в отверстие имеют место больше дефекты в виде разлохмачиваний, а на выходе дефекты в виде расслоений. Автор Л.М. Дурао [119] показал на эксперименте, что факт уменьшения по пределу прочности на смятие увязан с возрастанием расслоения базового материала. Дополнительно эти данные подтверждены У.А. Хашабом [146]. Кроме того, поскольку при упругом восстановлении базового композиционного материала имеет место возрастание силового контакта по задней поверхности обрабатывающего инструмента с поверхностью резания, то происходит увеличение момента трения, что в конечном итоге существенно осложняет механическую обработку;

5. Абразивная составляющая КМ. Авторами А.В. Рудневым, А.А. Королевым [75, 78] зафиксировано превалирование абразивной составляющей износа по сравнению со всеми остальными, имеющими место при обработке композиционных материалов. Автор О. Изибир [138] составил зависимость износа обрабатывающего инструмента (рис. 1.3), где имеют место только две составляющие: приработка инструмента (на рис. отмечена сплошной линией) и установившейся из-

нос (на рис. отмечена штриховой линией). Катастрофического износа режущего инструмента, типичного для классической теории резания металлов нет.

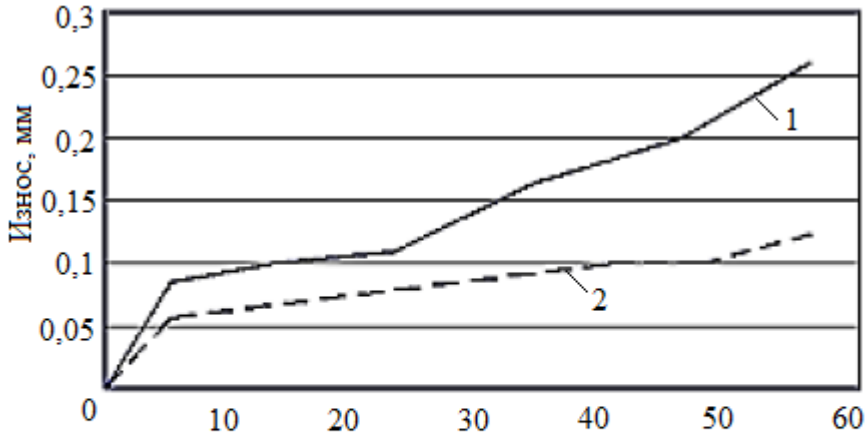


Рис. 1.3 Развитие износа инструмента в зависимости от номера просверленного отверстия *1* - износ по задней поверхности; *2* - износ по передней поверхности

Подобные выкладки сделаны автором А.А. Степановым [78], который ввел понятие технологического критерия износа обрабатывающего инструмента при обработке КМ;

6. Понятие разрушения или деструкции полимерной связки при обработке композиционных материалов. При воздействии и тепловых и механических нагрузок имеет место разрушение полимерной связки при одновременном образовании значительного числа паразитных макрорадикалов, которые обладают излишней энергией. Под этим воздействием на режущих поверхностях обрабатывающего инструмента имеет место вырыв отдельных частиц различной величины. Таким образом появляется механический и химический адсорбционный износ. Данный вид дефекта типичен только при резании материалов на полимерной основе. Автор В.И. Дрожжина [26] дополнительно отметил вышеописанный тип износа инструмента как основной из всех возможных типов износа обрабатывающего инструмента;

7. Косвенный критерий износа режущего инструмента. Так как качественные показатели обработанной поверхности (отсутствие расслоений, сколов, раз-

лохмачиваний, заполировки, засаливания) и требуемый порог шероховатости при обработке в основном имеют привязку к износу обрабатывающего инструмента, то пороговые значения износа инструмента принимаются при отсутствии вышеописанных дефектов. Пороговые значения износа режущего инструмента при резании КМ несколько меньше, нежели при резании изотропным материалов, в частности, металлов. Различные исследователи приводят разные пороговые значения (от 0,1 мм до 0,4 мм при проведении измерений по задней поверхности обрабатывающего инструмента) [31…33, 39, 78, 91].

8. Низкие показатели теплостойкости КМ (100...370°С). Это приводит к тому, что при температурном влиянии на режущей поверхности появляются дефекты в виде прижогов. Следует уточнить, что снижение температурного воздействия с помощью смазывающе-охлаждающих жидкостей практически не возможно, так как базовые КМ в высокой степени гигроскопичны, что приводит к требованиям дополнительной сушки материала с введением в технологический процесс дополнительных операций и увеличении производственного цикла изготовления продукции;

9. Критерий охраны труда при обработке КМ. При резании композиционных материалов необходимым условием выступает использование принудительной вытяжной вентиляции, поскольку при обработке в воздух поступает мелкодисперсная пылевидная взрывоопасная смесь и летучие токсические вещества.

Таким образом, обработка композиционных материалов системно объединяет цикл явлений, имеющих место при обработке: от явлений деформирования базового материала до явлений теплообразования и износа режущего инструмента. На выходе анализируемыми факторами выступают температура в зоне резания, действующие силы при обработке и отсутствие дефектообразования при резании. На основании эффективности при выполнении операций механической обработки материалов выполняется назначение режимов обработки и геометрии режущего инструмента [25].

Поэтому механическая обработка анизотропных КМ – это ответственная и достаточно сложная и задача, которая сопровождается рядом трудностей, каса-

тельно физических свойств материала и особенностей его обработки. Для достижения высокой эффективности обработки нужно учитывать весь комплекс выше описанных принципиальных особенностей обработки композиционных материалов, поскольку теория резания и природа материала существенно отличается от классической механики обработки металлов в привычном понимании.

Анализ работ, посвященных обработке КМ, показал, что процесс обработки фольгированного стеклотекстолита практически не изучен. Имеется исследования авторов в смежных областях. Так работа Ю.Н. Литвака, посвящена повышению точности расположения отверстий в многослойных печатных платах [51, 52], работа А.С. Дударева – по повышению эффективности обработки отверстий на основе стабилизации процесса сверления из КМ [27]. Работы Е.Г. Чигринца и Е.Н. Белецкого [1, 88] описывают совершенствование процессов обработки антифрикционных углепластиков и полимерных КМ типа стеклопластик-титан. В работах А.А. Торопова и Е.С. Огневенко [67, 84] приводятся общие принципы повышения производительности обработки отверстий и прогнозирование и минимизация заусенцев при обработке резанием без привязке к конкретному типу КМ. Таким образом, нет достаточных исследований, позволяющих определить основные закономерности обработки фольгированного стеклотекстолита.

В то же время, обработка отверстий, в том числе, подлежащих металлизации, является одной из важнейших операций при изготовлении печатной платы, поскольку от ее выполнения зависит качество металлизации и точность изготовления конечного узла. При обработке отверстий создается микрошероховатость поверхности, которая обуславливает хорошие условия для адсорбирования каталитических частиц палладия и соответственно последующее качественное меднение. Это обосновывает актуальность исследований, направленных на повышение качества и производительности механической обработки печатных плат из фольгированного стеклотекстолита.

1.2 Методы получения отверстий на фольгированном стеклотекстолите

Одной из основных операций механической обработки печатных плат является получение монтажных и подлежащих металлизации (металлизируемых) отверстий. На практике применяются различные методы получения отверстий, основными из которых является лазерная обработка, обработка методом штамповки и сверление [84, 98].

Наиболее прогрессивным из перечисленных методов получения отверстий, в особенности малого диаметра, является резка лазером типа CO_2. К бесспорным преимуществам лазерной обработки можно отнести: возможность обрабатывать отверстия диаметром до 20 мкм [63], высокую скорость сверления до 4000 отв./сек [62], микроструктурирование, высокую точность при обработке [17], возможность получения как сквозных, так и глухих отверстий в любом слое без опасности повреждения низлежащих слоев. Основным недостатком лазерной обработки является необходимость предварительного формирования окон в верхнем проводящем слое ввиду отличия адсорбционных свойств медной фольги и диэлектрического основания [64]. Авторы Л.А. Громов и А.М. Медведев рекомендуют для этого использование плазмохимического травления через защитную маску либо использование гибридного лазера CO_2 + УФ [17, 59]. При использовании гибридной лазерной обработки к преимуществам добавляется очищение микроотверстий ультрафиолетовым лазером. В данном случае процесс обработки будет выглядеть следующим образом (рис.1.4).

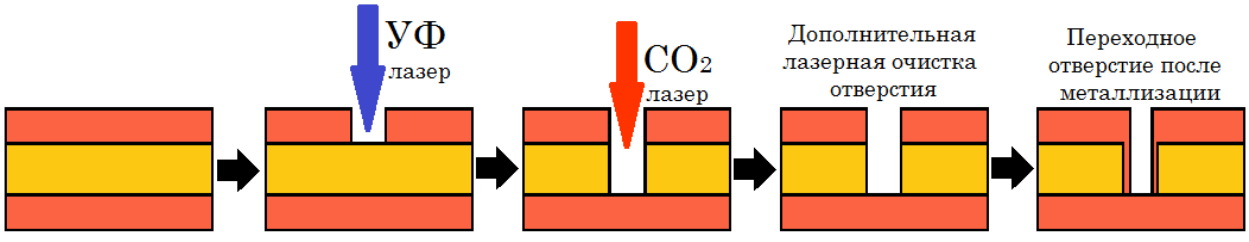


Рис. 1.4. Сверление отверстий малого диаметра гибридным лазером (CO_2+УФ)

Кроме того, достаточно серьезной проблемой лазерного сверления является необходимость дополнительной наружной обработки поверхности платы и полученных отверстий для дальнейшей металлизации ввиду наличия загрязнений продуктами расплава в зоне обработки. Примером оборудования для формирования микроотверстий является линейка обрабатывающих лазерных центров фирмы «Excellon», «Hitachi», «Asida» и пр.

Штамповочные операции широко применяются в производстве радиоэлектронной аппаратуры при ориентации предприятия на выпуск массовой продукции в виде односторонних, двусторонних и многослойных печатных плат [58]. Операции штамповки заготовок плат производится на стандартных кривошипных или эксцентриковых прессах. Авторами Е.П. Котовым, Л.И. Жаком, М. Махмудовым рассматривается 4 стадии пробивки фольгированного диэлектрика [46, 58]. Это стадия пластической деформации до появления трещин со стороны пуансона, направленных сторону основного материала, стадия хрупкого разрушения с максимальным усилием пробивки, стадия разделения с соединением трещин от пуансона и матрицы, стадия проталкивания с удалением отхода в матрицу. В.А. Ильин дополнительно рекомендует осуществлять нагрев материала перед штампованием для уменьшения сколов и посветлений и снижения количества трещин при обработке [37].

К несомненным достоинствам получения отверстий методом штамповки можно отнести высокую производительность, поскольку обработка всей номенклатуры отверстий выполняется за один удар (рабочий ход – 0,1…0,15 мин). Однако ввиду дорогостоящей подготовки производства (необходимость разработки и изготовления индивидуально беззазорного вырубного штампа под каждый тип платы) данный тип обработки отверстий используется только в массовом и близком к нему крупносерийном производстве и только для неметаллизируемых отверстий (односторонних печатных плат). Кроме того, из-за низкой степени штампуемости большинства марок диэлектриков и наличием сквозных трещин между близко расположенными отверстиями, ореолов, расслоений, сколов применение

штамповки для получения монтажных отверстий с шагом менее 3,75 мм не рекомендуется.

При изготовлении современной радиоэлектронной аппаратуры дефекты, присущие отверстиям, получаемым методом штамповки, категорически недопустимы, поэтому для получения монтажных отверстий с шагом менее 3,75 операцию пробивки заменяют сверлением на станках с ЧПУ. Кроме того, обработка отверстий является одной из важных операций в производстве печатных плат, так как от ее выполнения зависит качество металлизации и точность совмещения проводящих рисунков схемы [96, 186, 187].

При выборе сверла необходимо учитывать, что по ГОСТ 22093 диаметры сверл различаются между собой на величину, кратную 0,1мм т. е. образуют ряд 0,9; 0,8; 0,7 и т. д., поэтому полученные по вышеприведенной формуле результаты следует округлять до десятых долей миллиметра. В некоторых отраслевых стандартах рекомендуется диаметр сверла увеличивать на 0,10–0,15 мм по отношению к диаметру металлизированного отверстия. Для скоростного сверления рекомендуются укороченные сверла по ГОСТ 20686–75. Необходимо отметить, что большое влияние на качество сверления и стойкость сверла оказывает его геометрия [104].

М. Капица [41] указывает, что при изготовлении многослойных плат, встречается такой дефект как чрезмерное наволакивание смолы на торцы контактных площадок [37]. Разогрев в зоне резания происходит из-за больших затруднений по выходу стружки вдоль канавок сверла. Для снятия наволакивания на торцах внутренних контактных площадок и подготовки поверхности отверстий под металлизацию следует производить их очистку на установках гидроабразивной зачистки прокачиванием абразивной суспензии через обрабатываемые отверстия или подачей ее под давлением с помощью форсунок [58].

Основные методы получения отверстий с привязкой к типу производства и указанием достоинств и недостатков каждого из них приведены в табл. 1.

Таблица 1

Методы получения отверстий в плате

Тип производства	Метод получения отверстий на плате		
	Лазерное сверление	Метод штамповки	Механическое сверление на ст. с ЧПУ
Массовое и крупносерийное	Для односторонних, двусторонних и многослойных плат, в т.ч. под дальнейшую металлизацию	Только для односторонних и двусторонних печатных плат, без металлизации.	Для односторонних, двусторонних и многослойных плат, в т.ч. под дальнейшую металлизацию
Среднесерийное	Ограниченно для односторонних, двусторонних и многослойных плат, в т.ч. под дальнейшую металлизацию	Не применяется ввиду дорогостоящей подготовки производства.	Для односторонних, двусторонних и многослойных плат, в т.ч. под дальнейшую металлизацию
Мелкосерийное и единичное	Не применяется ввиду дороговизны оборудования и расходных материалов.	Не применяется ввиду дорогостоящей подготовки производства.	Для односторонних, двусторонних и многослойных плат, в т.ч. под дальнейшую металлизацию
Достоинства	Высокая производительность; получение глухих отверстий; возможность обработки гибких и гибко-жестких плат.	Высокая производительность (получение всей номенклатуры отверстий за один удар)	Наиболее универсальный метод для обработки отверстий, в т.ч. под дальнейшую металлизацию.
Недостатки	Дорогостоящее оборудование и расходные материалы; необходимость предварительного формирования окон в медной фольге (для технологии CO_2); необходимость дополнительной обработки отверстия под дальнейшую металлизацию	Дорогостоящая подготовка производства; невозможность использования для обработки отверстий под дальнейшую металлизацию; наличие дефектов; не возможно использовать на платах с большой степенью интеграции для близко расположенных отверстий.	При назначении правильных режимов резания практически отсутствуют. Основные затраты на производство приходятся на приобретение твердосплавных сверл ввиду их ограниченного ресурса (1500...3000 отверстий, 3-4 переточки).

Таким образом, получение монтажных и подлежащих металлизации отверстий является одной из основных операций механической обработки печатных плат. Операция штамповки в пробивных штампах применяется в массовом производстве при обработке односторонних и двусторонних печатных плат с неметаллизированными отверстиями. В мелкосерийном и единичном производстве при обработке односторонних и двусторонних печатных плат, а также при крупносерийном и массовом производстве при обработке отверстий под металлизацию применяется сверление на станках с ЧПУ и универсальных сверлильных станках. Отверстия под дальнейшую металлизацию получают только сверлением вне зависимости от типа производства и количества заготовок в партии, поскольку режущая часть спирального инструмента создает микрошероховатость поверхности, которая обуславливает хорошие условия для адсорбирования каталитических частиц палладия и соответственно последующее качественное меднение.

Оборудование для лазерной обработки является достаточно прогрессивным и высокопроизводительным, обеспечивает стабильность сверления, а за счет высокой скорости резания снижает затраты на механическую обработку. Однако, необходимо отметить, что методом лазерного сверления рационально обрабатывать именно отверстия малого диаметра до 0,2–0,3 мм. В противном случае скорость обработки (резания) резко падает.

Поэтому сверление на станках с помощью твердосплавного инструмента в настоящее время остается основным методом получения отверстий на печатных платах, как наиболее универсальный метод для обработки отверстий, в т.ч. под дальнейшую металлизацию.

1.3. Основные факторы, влияющие на качество сверления отверстий

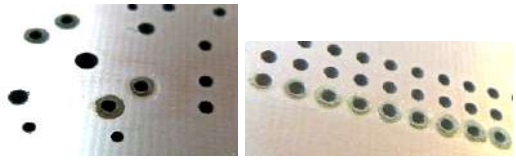
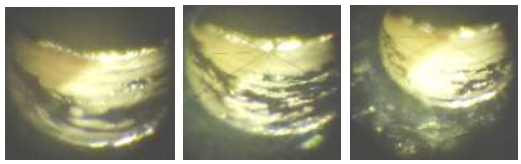
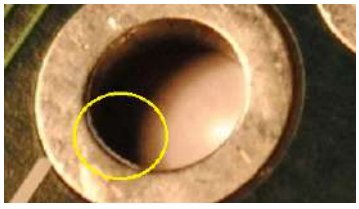
Сверление отверстий в заготовках из стеклотекстолита позволяет получить достаточно точные поверхности. Материал обладает высокой упругостью и достаточно низкой теплопроводностью, что приводит к повышенному трению между

сверлом и базовым материалом и выделению большого количества теплоты в зоне резания. Перегрев сверла ведет к появлению прижогов и его интенсивному изнашиванию.

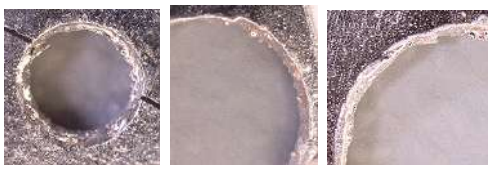
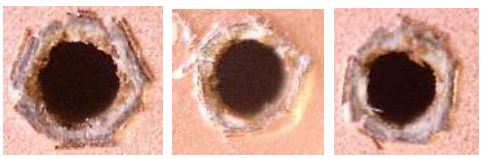
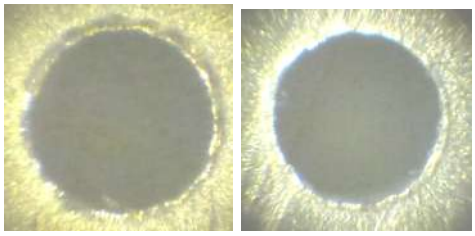
Неправильно выбранные режимы резания, использование сверл с неправильной заточкой, использование некачественных базовых материалов, в т.ч. со слишком плотным распределением филаментов стекловолокна, работа изношенным инструментом и пр. приведут к массовому браку готовой продукции на производстве. Поэтому реализация заданных требований к базовому материалу требует в каждом случае технически грамотного подхода к выбору условий и режимов резания. В табл. 2 сведены основные дефекты печатных плат, вследствие некачественного сверления с указанием основных причин их появления.

Таблица 2

Основные дефекты печатных плат, вследствие некачественного сверления

Описание дефекта	Причины появления	Вид дефекта
Некачественное сверление	1. Использование неправильно заточенного или не заточенного сверла. 2. Поломка сверла в процессе сверления.	
Нарушение металлизации в отверстиях	1. Выбор неправильных режимов резания, заполировка отверстия (малая подача). 2. Отсутствие микрошероховатости в отверстии, вследствие чего операция палладирования проведена не качественно.	
Наличие «ободков» вокруг металлизированного отверстия	1. Работа затупленным сверлом. 2. Выбор неправильных режимов резания.	
Посветления материала на входе и выходе сверла, выкрашивание материала	1. Выбор неправильных режимов резания: сверло давит, а не режет. 2. Не правильная заточка или поломка сверла.	

Окончание табл. 2

Описание дефекта	Причины появления	Вид дефекта
Излишняя шероховатость в отверстии	1. Не правильный подбор инструмента; 2. Режимы резания не обеспечивают качественной обработки.	
Расслоение базового материала на выходе сверла	1. Использование неправильно заточенного или не заточенного сверла. 1. Превышение силы резания над адгезией связующего с армирующим волокном	
Наличие заусенцев в отверстиях печатной платы более 40 мкм	1. Выбор неправильных режимов сверления (подача, скорость вращения шпинделя). 2. Работа тупым инструментом. 3. Отсутствие технологических подкладок на входе и выходе заготовки.	

Анализ причин появления дефектов проведен на основании практических данных, в результате отработки методик сверления при переходе на новую линейку режущего инструмента [100]. Очевидно, что наряду с выбором базового материала, основными факторами, влияющими на качество обработки отверстий, является выбор оптимальной геометрии режущего инструмента и назначение правильных режимов резания.

1.3.1 Использование качественных базовых материалов. Заусенцы фольги

При изготовлении печатных плат в зависимости от их конструктивных особенностей и масштабов производства применяются различные варианты технологических процессов, в которых применяются различные гальванические и химические процессы и используется предварительное механическое сверление [72]. Все боль-

шее стремление к уменьшению габаритов печатных плат, повышение степени интегративности расположения дорожек и контактных апертур под дальнейший монтаж элементов в отверстия и на поверхность неизбежно приводит к минимизации диаметров отверстий на печатных платах и увеличению их количества [2].

Для производства печатных плат, в том числе базовым позитивным методом используются различные марки фольгированного стеклотекстолита. К наиболее распространенным базовым материалам выступает стеклотекстолит марки FR-4, который выпускается многими промышленными предприятиями в России и за ее пределами. Стеклотекстолит марки СФ используется реже, но так же распространен ввиду сравнительно низкой цены.

Как было описано выше, основным косвенным критерием при определении количественных и качественных показателей обработки выступает технологический критерий износа, который имеет привязку к наличию заусенцев медной фольги более 40 мкм, особенно на выходе печатных плат. Природе образования заусенцев в материале посвящено большое количество научных трудов [79,109,141,160,177,178], однако понятие заусенца медной фольги в научной литературе практически не встречается. Однако, именно заусенец медной фольги при дальнейшей химической и гальванической отделке дает характерный дефект в виде «ободков» контактных площадок, которые категорически не допустимы при дальнейшей работе и эксплуатации изделий [84].

Механизм образования заусенца на выходе связывают с выдавливанием обрабатываемого материала под действием осевой составляющей силы резания. В табл. 3 представлены основные пути по снижению образования заусенцев на входе и выходе сверла.

Для удаления заусенцев применяют способы механической обработки или методику электрохимического полирования. Помимо всего прочего, механическая зачистка самой фольги удаляет окисные пленки, риски, царапины и различные загрязнения типа следов масла и жира [92].

Таблица 3.

Основные способы минимизации образования заусенцев [96, 110]

№ п/п	Мероприятие	Примечание
1.	Снижение подачи	Используется при разработке специальных конструкций со следящим приводом [141, 160]
2.	Увеличение переднего угла и угла при вершине сверла	Вследствие уменьшения силы резания
3.	Состояние режущего инструмента (режущих кромок)	Увеличение фаски износа или выкрашивание режущих кромок приводит к увеличению осевой составляющей силы
4.	Осевые вибрации	Уменьшается значение постоянной составляющей осевой составляющей силы и увеличение ее переменной составляющей (к положительному эффекту не приводит)

В России наиболее распространена «мокрая» и «сухая» зачистка объемными шлифовальными вращающимися дисками из абразивных материалов с различной зернистостью[37]. В качестве примера можно привести зачистную установку типа КПМ 2.079.002, имеющую четыре вала, по 2 с каждой стороны, рис. 1.5.



Рис. 1.5. Абразивные зачистные круги из объемного полотна ТУ2-036.775-81

Ввиду наличия проблем по приобретению отечественных абразивных зачистных кругов из объемного полотна типа «Акрол» в качестве альтернативы может быть использована зачистная щеточная установка (рис. 1.6) с постоянной подачей водной эмульсии в зону зачистки. Дополнительно в состав таких установок, для оптимизации работы и сокращения производственного цикла изготовления, включают модули конечной промывки, обдувки и сушки.



Рис. 1.6. Абразивные зачистные цилиндрические щетки

К одним из наиболее производительных процессов зачистки заготовок можно отнести гидроабразивную обработку, которая применяется как основной способ удаления оксидных пленок с поверхности печатной платы, имеющихся заусенцев медной фольги на входе и выходе отверстий, а также остатков травильных растворов из отверстий, которые имеют место после проведения операций травления заготовок [37].

В рамках исследования влияния базового материала на качество обработки было проведен ряд экспериментальных исследований, результаты которых приведены ниже (дают понятие о необходимости применения той или иной марки стеклотекстолита). Дополнительно, описаны способы по выбору фольгированного стеклотекстолита в привязке к его внутренней структуре и строению, стеклонаполненности волокна, от которых зависят качественные и количественные показатели обработки печатных плат, а также конечная стоимость продукции.

1.3.2 Распределение филаментов и содержание стекла в материале

Поскольку из базовых стеклонаполненных материалов производятся как одно, так и двусторонние печатные платы, тем более многослойные печатные плат (количество слоев может достигать 16 и более), в том числе для изделий специального назначения, механической обработке базовых печатных узлов уделяется особое внимание. Тот факт, что материал является анизотропной структурой с сочетание различных материалов (касательно полимерной связки, стеклонаполнителя, медной фольги) только усложняет задачу получения качественных отвер-

стий на выходе. Стекловолокно по своему строению представляет плотное и прочное плетение тонких стеклянных нитей [37].

Ниже рис. 1.7 приведен участок стеклонаполненной ткани, увеличенный в 50 раз.

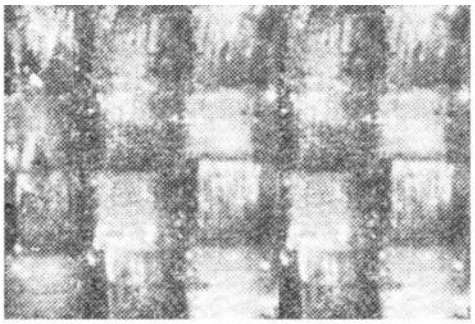


Рис.1.7. Участок стеклоткани, увеличенный в 50 раз

При детальном рассмотрении поперечного сечения участка можно видеть слоистую структуру материала, в которой слои стеклоткани и слои полимерного связующего имеют послойное чередование. Автор М. Махмудов указал, что при слишком плотной укладке стекловолокна появляются необходимые для трещинообразования материала условия ввиду наличия дополнительных зон концентрации механических напряжений, так как в данном случае уменьшается объем полимерного связующего, который может принять и нивелировать большой объем местных деформаций [58]. Стремление к трещинообразованию и расслоениям базового материала напрямую привязана к возможности предварительной деструкции стеклоткани, что может иметь место при ее изготовлении, обработке, транспортировании и хранении.

Автор В.А. Ильин [37] дополнительно обозначил факт лучшей обрабатываемости базового материала при низкой плотности укладки волокон ввиду снижения давления множества разорванных частиц стеклянных нитей из-за снижения доли стеклоткани.

Помимо этого, имеется привязка к количественным касательным напряжениям между стекловолокном и полимерной связкой по контактной поверхности, что также может в конечном итоге привести к расслоению базового материала.

Пороговые значения касательных напряжений для КМ выражается согласно следующезависимости:

$$\tau_{\max} = C' \cdot \sigma_в \cdot \sqrt{\frac{G_n}{E_в} \cdot \frac{d}{b}}, \qquad (1.1)$$

где C' – коэффициент, изменяющийся в пределах от 0,1 до 1; $\sigma_в$ – предел прочности на растяжение ткани; G_n – модуль сдвига полимерного связующего; $E_в$ – модуль упругости стеклоткани; d – диаметр волокон; b – расстояние между волокнами.

Таким образом, склонность к расслоению (как следствие действия максимальных касательных напряжений) возрастает при увеличении предела прочности на растяжение стеклоткани, отношения модуля сдвига к модулю упругости и отношению диаметра стекловолокна к расстоянию между ними. Несколько уменьшить склонность материала расслаиваться можно за счет уменьшения G_n при условии использования более пластичной связки.

Плотность упаковки волокон характеризуется отношением диаметра стекловолокна к расстоянию между волокнами. Из (1.1) очевидно, что при увеличении в материале содержания наполнителя появляется характерная опасность. С сокращением b увеличиваются максимальные касательные напряжения. Достаточно остро повышаются значения τ_{max}, при сравнительно малых величинах b [58].

Для проверки справедливости вышеописанных выкладок выполнены экспериментальные работы [93] для 3-х марок обрабатываемых базовых материалов. Обработка выполнялась для базовых узлов с разной плотностью укладки волокон (высокой – с числом нитей до 200–210 шт/100 мм длины, средней – с числом нитей до 160–170 шт /100 мм длины и низкой – число нитей до 100–110 шт /100 мм длины).

Выполнение анализа проводилось согласно следующих критериев: наличие дефектообразования и периода стойкости обрабатываемых сверл. Проведенная работа доказала, что на образцах с низкой плотностью укладки волокон (100–110 шт /100 мм длины) заусенцы медной фольги на выходе инструмента составили

менее 5 мкм, в материале со средней плотностью укладки волокон (160–170 шт /100 мм длины) заусенцы медной фольги на выходе инструмента составили 15 мкм, в материале с высокой плотностью укладки волокон (200–210 шт/100 мм длины) заусенцы медной фольги на выходе инструмента составили 22 мкм. Таким образом, выводы, полученные авторами М. Махмудовым и В.А. Ильиным, подтвердились.

Предельно высокая концентрация стекловолокна при производстве печатных узлов отразится на качетсве и долговечности работы изделия. В связи с этим чтобы улучшить показатели обрабатываемости нужно резко снять имеющие место концентраторы напряжений в материале. По данным авторов П.И. Буловского и Н.А. Петровой [4] наиболее высокая концентрация напряжений развивается при содержании в материале 70–80 % стеклоткани.

На рис. 1.8 представлена зависимость концентрации напряжений от степени наполнения при диаметре стекловолокна 10 мкм. На рисунке участок кривой, соответствующий 20–45 % стекловолокна, имеет плавный вид, что соответствует небольшому возрастанию концентрации напряжений в материале. В композите с содержанием 45 % и выше происходит резкое возрастание концентрации напряжений.

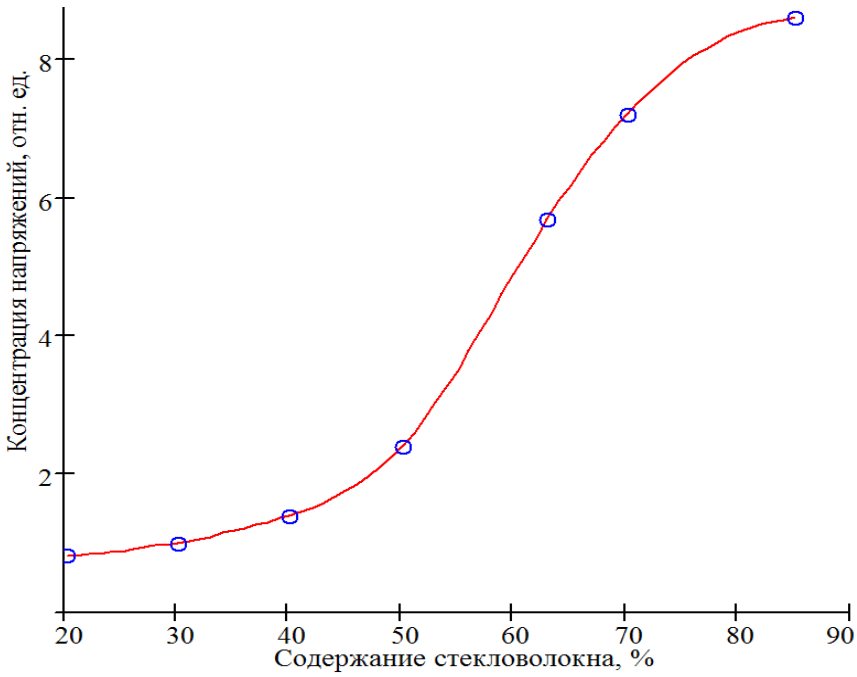


Рис. 1.8. Зависимость концентрации напряжений от степени наполнения стеклопластика

Поэтому в качестве базового материала необходимо применять такие образцы, содержание стекловолокна в которых не более 30–40 %. Такое содержание стекловолокна позволит снизить концентрацию напряжений в 3–4 раза по сравнению с материалом, в котором содержится 70 – 80 % стекловолокна.

Таким образом, использование качественных базовых материалов с невысокой плотностью распределения филаментов стекловолокна (100–110 шт на длине 100 мм) и содержанием стекла в материале до значений 30…40 % влияет на механическую обрабатываемость базового материала, период стойкости инструмента и стоимость конечных изделий. Тем не менее, необходимо иметь ввиду, что слишком низкая плотность укладки волокон и снижение содержания стекловолокна в материале, ниже 30 %, приведет к снижению жесткости готового печатного узла, что ухудшит показатели автоматизации процесса установки радиоэлектронных элементов, в том числе, на поверхность.

1.3.3 Режимы резания при сверлении

Процесс сверления стеклотекстолита протекает в достаточно сложных условиях, которые еще более усложняются технологическими особенностями механической обработки композиционных материалов. Нужно отметить, что систематизированных материалов, которые позволяли бы назначать оптимальные режимы резания, практически нет. Б.П. Штучный приводит отдельные технологические рекомендации [91], однако их недостаточно. В общем виде методика состоит из четырех этапов с определением подачи и скорости резания.

Однако данная методика не учитывает влияние параметров стенки обрабатываемого отверстия, поскольку принятые условия обработки могут не обеспечить нужной шероховатости; значения подачи согласно рекомендациям разных источников [42–44, 69] имеют значительный разброс, что затрудняет ее выбор; в формуле для расчета режимов резания отсутствует учет критерия затупления режущего инструмента; в расчете режимов резания упор делается только на стой-

кость режущего инструмента, при этом не учитывается оценка других показателей, например температуры в зоне резания.

Для примера, согласно рекомендациям Б.П. Штучного [91] для обработки стеклотекстолита твердосплавными сверлами типа ВК6, ВК8 значение скорости движения осевой подачи составляет 0,1...0,6 мм/об, а скорости резания 0,8...1,34 м/с (48…80,4 м/мин). Получим, что для сверла диаметром D = 1мм: частота вращения шпинделя n=15278 об/мин…25592 об/мин., тогда как в среднем обработка стеклотекстолита сверлами такого диаметра на станках типа СМ-600 в зависимости от базового материала производится при значениях n=40000...50000 об/мин.

В табл. 4 приведены данные согласно ОСТ 107.460092.004.02-86 «Платы печатные. Типовые технологические процессы», рекомендующие режимы сверления отверстий в печатных платах на станках с числовым программным управлением [69]. Более актуальной российской нормативной документации на сегодняшний день нет.

Таблица 4

Рекомендуемые режимы сверления отверстий
в печатных платах на станках с ЧПУ [69]

Диаметр сверла, мм	Част. вращения шпинд., об/мин	Подача/оборот, мм/об	Скор. дв. осев. подачи, мм/мин
0,8	44000	0,05	2200
0,9	40000	0,05	2000
1,0	36000	0,06	2160
1,1	34000	0,07	2380
1,2	33000	0,07	2310
1,3	33000	0,08	2640
1,4	32000	0,08	2560
1,5	31000	0,09	2790
1,6	30000	0,10	3000
1,8	28000	0,11	3080
2,0	27000	0,12	3240

В табл. 5,6 приведены данные, рекомендованные производителями твердосплавных сверл для обработки печатных плат из фольгированного стеклотекстолита и базового материала Isola P96, используемого на предприятии (данные при-

ведены только для номенклатуры сверл 0,8...2,0 мм). Общих рекомендаций по выбору режимов резания при обработке материалов СФ2 ГОСТ10316-78 и GEM (ILM), применяемых так же в массовом количестве нет.

Таблица 5

Режимы резания, рекомендуемые производителем твердосплавных сверл Ham [32]

Диаметр сверла, мм	Част. вращения шпинд., об/мин	Подача/оборот, мм/об	Скор. дв. осев. подачи, мм/мин
0,8	72000	0,06	4300
0,9	64000	0,07	4500
1	57000	0,08	4600
1,1	52000	0,09	4700
1,2	48000	0,1	4800
1,3	44000	0,1	4400
1,4	41000	0,1	4100
1,5	38000	0,1	3800
1,6	36000	0,1	3600
1,7	34000	0,1	3400
1,8	32000	0,1	3200
1,9	30000	0,12	3600
2	28000	0,12	3400

Таблица 6

Режимы резания при сверлении стеклотекстолита Isola [34]

Диаметр сверла, мм	Част. вращения шпинд., об/мин	Подача/оборот, мм/об	Скор. дв. осев. подачи, мм/мин
0,7620	47747	0,046	2159
0,8890	43654	0,051	2235
1,0160	42972	0,064	2718
1,2700	34377	0,064	2159
1,5240	28648	0,064	1829
2,0320	21486	0,064	1397

При анализе данных табл. 4 – 6 видно, что рекомендуемые режимы резания рознятся, остается непонятным, чем пользоваться при выборе: рекомендациями производителей базового материала, режущего инструмента, либо общими отраслевыми нормативными документами. Кроме того, сложность заключается в том,

что не все производители приводят схемы обработки. Необходимо иметь ввиду, существует прямая зависимость между набором одновременно обрабатываемых заготовок, собираемых в пакет и режимами резания, что так же не учтено.

Таким образом, задача определения режимов резания с помощью выполнения расчетов представляется достаточно сложной. Для практической проверки возможности использования режимов резания, приведенных в табл. 4 – 6 проведен ряд экспериментов [95, 96, 97, 102, 103, 106] с использованием двух типов базового материал и двумя типами сверл с разной геометрией Ø 1 мм. В общей сложности обработано по 480 программных заготовок по каждому режиму резания.

Согласно общих рекомендаций, приводимых В.А. Ильиным, М. Махмудовым, Б.П. Штучным и нормативными документами [37, 58, 68, 70, 91], все опытно-экспериментальные режимы, в т.ч. выбранные согласно рекомендаций [42–44] выдержали испытания (допускается обработка не менее 1000-1500 отверстий до переточки инструмента). Критерием оценки выступали заусенцы фольги более 30 мкм (при допустимых 40 мкм по ГОСТ 23664-79) [10]. Однако ввиду большого разброса полученных результатов (количество обработанных отверстий от 3700 до более чем 10000, в зависимости от режима и сочетания базовый материал-сверло), проведенный эксперимент доказал, что использование режимов, рекомендованных производителями режущего инструмента, базовых материалов и нормативно-технической документации согласно [32–34] нецелесообразно.

Необходимо учесть, что возможны различные вариации базовый материал – режущий инструмент, поэтому четко определить режимы резания не представляется возможным. Отраслевые рекомендации по сверлению печатных плат разработаны еще в советское время, когда не было современных марок базовых материалов. Поэтому на реальном производстве, как правило, режимы резания назначаются опытно-практическим путем. При таком подходе определить наиболее оптимальные режимы резания с точки зрения качество-производительность не возможно ввиду ограниченности в материале и времени на настройку.

1.3.4 Режущий инструмент. Геометрические параметры. Влияние износа

Конструкция режущего инструмента для сверления отверстий рассмотрена достаточно подробно П.И. Буловским, Н.А. Петровой [4], В.И. Дрожжиным [23, 24], Л.Л. Кравченко [48], А.А. Ерохиным [33], А. Кобаяши [45], Ю.Я. Прохоровым [73], А.А. Степановым [78], И.С. Тереньтьевым [82], В.Г. Фокиным [86] и пр.

В большинстве случаев отверстия в деталях из пластмасс получают перовыми и спиральными сверлами стандартной или специальной конструкции [91]. Основной материал сверл для обработки композиционного стеклотекстолита – твердый сплав марок ВК8 или ВК6М. Сплав состоит из смеси карбидов вольфрама (92 – 94%) и кобальта (6 – 8%). Нужно отметить, что сверла из легированных и углеродистых сталей при обработке данного материала категорически не пригодны, поскольку затупляются после сверления нескольких отверстий.

Из геометрических параметров инструмента наибольшее внимание уделяется выбору угла при вершине сверла – 2φ, поскольку как отмечено в работах Р.А. Тихомирова, В.И. Николаева, Б.П. Штучного [83, 91], он более всего влияет на качество получаемых отверстий, производительность процесса и износ инструмента.

В работах Л.А. Кравченко, Б.П. Штучного указано, что с увеличением угла при вершине сверла крутящий момент снижается, а осевая составляющая силы резания возрастает [48, 91]. Это увеличивает выкрашивание материала на выходе заготовки. Тем не менее, это справедливо только при углах наклона винтовой канавки 3 – 50^{o}. Для значений угла наклона в пределах 10 –20^{o} данная зависимость нарушается и меняется на противоположную [31].

Выбор угла при вершине зависит также от материала инструмента. При обработке сверлами из твердого сплава, как указывает И.С. Терентьев, его величина должна быть больше для того, чтобы предотвратить выкрашивание клина режущего инструмента [82]. В табл. 7 представлены значения углов при вершине и их влияние на процесс резания материала с необходимыми пояснениями.

Таблица 7

Влияние угла при вершине на процесс резания

№ п/п	Значение параметра	Лит. источник	Примечание
1.	$30 – 60^o$	[91]	Сила подачи минимальна. Плавный вход и выход сверла из отверстий. Отсутствуют сколы и выкрашивание торцев отверстий. Плохой теплоотвод от режущей части сверла. Большая кривизна главных режущих кромок спиральных сверл. Применяется при получении сквозных отверстий малого диаметра глубиной 2,0-2,5 мм.
2.	$60 – 90^o$	[91]	Уменьшается кривизна главных режущих кромок, увеличивается по сравнению с п.1 теплоотводящая способность и стойкость инструмента. Увеличенная сила подачи и ухудшение качества поверхности на выходе отверстия.
3.	$<70^o$ $90 – 100^o$ $130 – 150^o$	[84]	Пылевидная стружка, возможно слипание и плохое удаление из канавок сверла под воздействием высокой температуры. Стружка типа короткой сливной. Выход пылевидной стружки минимален.

Б.С. Львов, Г.В. Сагалаев отмечают, что для предотвращения ухудшения качества поверхности на выходе сверла и устранения заусенцев применяют сверла с двойной заточкой режущей части $2\varphi = 60 – 80^o$, $2\varphi_0 = 35^o$ [55].

При обработке композиционных материалов А.И. Исаев рекомендует применять конструкцию сверл с подрезающими режущими кромками, что позволяет исключить «разлохмачивание» материала при обработке отверстий [39]. Однако такая конструкция приводит к расслаиванию материала со стороны выхода инструмента ввиду увеличенного значения осевой составляющей силы резания, которая возрастает с увеличением глубины резания.

Основное влияние на отведение стружки оказывает угол наклона винтовой канавки ω. Рекомендованное значение ω лежит в диапазоне $10 – 20^o$. В табл. 8 представлены значения углов наклона винтовой канавки и их влияние на процесс резания материала с необходимыми пояснениями.

Таблица 8

Влияние значений углов наклона винтовой канавки на процесс резания

№ п/п	Значение параметра	Лит. источник	Примечание
1.	10^o	[48]	Режущий инструмент с $\omega > 15^o$ подрывает материал.
2.	$15 – 17^o$	[83]	Уменьшение угла наклона винтовой канавки до $10 – 15^o$ позволяет улучшить отвод стружки при сверлении отверстий глубиной до двух диаметров сверла. При сверлении отверстий глубиной 2 – 5 диаметров угол наклона необходимо принять $15 – 20^o$. При сверлении отверстий глубиной более пяти диаметров угол наклона необходимо принять порядка 40^o. Увеличение ω уменьшает крутящий момент и осевую составляющую силы резания, поскольку происходит увеличение переднего угла.

Р.А. Тихомиров, В.И. Николаев, А.Р. Чудновский, Н.Я. Кестельман, Л.С. Ахмечет, отмечают, что существенное влияние на стойкость инструмента и качество обработанной поверхности оказывают величины передних и задних углов. При увеличении заднего и переднего углов инструмента уменьшается площадь контакта режущего клина с обрабатываемым материалом. Это приводит к снижению сил трения и, следовательно, к уменьшению температуры в зоне резания. В табл. 9 представлены величины передних углов и их влияние на процесс резания материала с необходимыми пояснениями.

Таблица 9

Влияние переднего угла на процесс резания

№ п/п	Значение параметра	Лит. источник	Примечание
1.	$10 – 15^o$	[83]	При величине переднего угла менее 10^o возникает вибрации сверла и появляется деформирующие дефекты в отверстии. При величине переднего угла более 15^o уменьшается угол при заострения и ухудшаются условия по теплоотведению.
2.	$0 – 25^o$	[89]	В зависимости от обрабатываемого материала.
3.	$10 – 15^o$	[91]	Влияние переднего угла на стойкость режущего инструмента не значительное.

Р.А. Тихомиров, В.И. Николаев, И.С. Тереньтьев, Б.П. Штучный дополнительно указывают, что износ режущего инструмента происходит в основном по задней поверхности, поэтому уменьшение заднего угла, снижет работу сил трения. Это приводит к увеличению стойкости сверл.

В табл. 10 представлены значения задних углов и их влияние на процесс резания материала с необходимыми пояснениями.

Таблица 10.

Влияние заднего угла на процесс резания

№ п/п	Значение параметра	Лит. источник	Примечание
1.	$14 – 32^{o}$	[83]	Уменьшение заднего угла приводит к увеличению стойкости сверл из-за снижения работы сил трения.
2.	$8 – 31^{o}$	[91]	
3.	$14 – 16^{o}$	[82]	Достигается наименьшее усилие резания в случае применения спиральных сверл.

При небольших значениях скорости движения осевой подачи происходит разрыхление стеклянных нитей, а при больших – обратный эффект, характеризующийся оплавлением и расслоением материала. Перетачивание сверл производится не реже 1000 – 1500 отверстий, однако, в отдельных случаях переточка производится после сверления 3000 отверстий (в основном для режущего инструмента диаметром более 2 мм). Как правило, для ответственных узлов допускается не более 3-х переточек сверла [38, 68, 70].

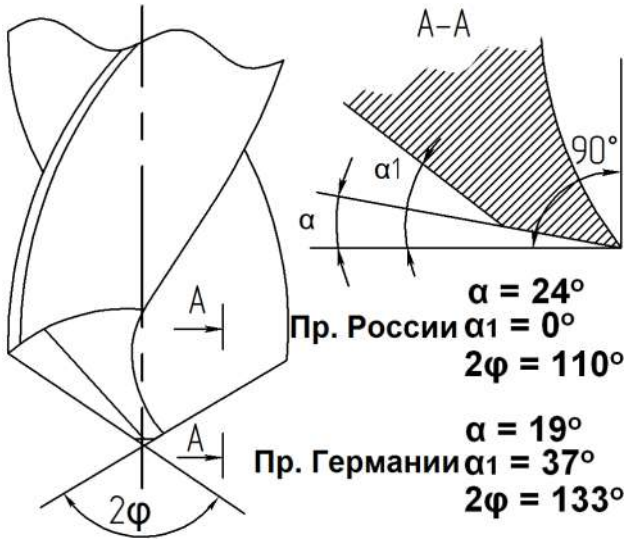


Рис. 1.9 Геометрия сверл



Рис.1.10 Внешний вид свёрл

Для проверки влияния геометрии режущего инструмента на процесс резания проведен ряд практических работ [104] с использованием твердосплавных сверл с разной геометрией (рис. 1.9, 1.10).

Проведенные эксперименты доказали, что геометрия сверла и правильная, прогрессивная заточка напрямую влияет на износ сверла, качество обработки материала, и производительность изготовления. Стойкость сверл пр. Германии значительно выше, чем отечественных на тех же режимах резания при обработке одного и того же материала. Это означает, что сократится количество подготовительно-заключительного времени на переналадку оборудования и трудоемкость на переточку сверл. Кроме того, использование сверл с правильной геометрией, позволяет исключить некоторые операции механической подготовки поверхности заготовок из-за отсутствия заусенцев.

Работы проводились на промышленном предприятии при переходе на линейку импортных твердосплавных сверл. По результатам замеров и работ была перестроена схема заточки режущего инструмента, введены корректирующие поправки в настройку заточного станка и переточен весь задел сверл, в том числе сверл производства России. Методика заточки сверл оформлена в виде руководящей инструкции (РИ). В РИ вошли методика и геометрия заточки режущего инструмента, а также рекомендации по выбору рациональных режимов резания в зависимости от диаметра используемого сверла.

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 фольгированного стеклотекстолита описания четкой геометрии режущего инструмента не сформулировано.

1.3.5 Влияние силовых факторов на процесс сверления

Исследованию влияния силовых факторов на процесс сверления композиционных материалов посвящено большое количество работ. Эмпирические модели составляющих сил резания разных авторов приведены в табл. 11.

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), КППН (получены методом косослойной продольно-поперечной намотки) и однонаправленного углепластика, марка которого не приводится [77]. 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 [4].

Таблица 11

Эмпирические модели составляющих силы резания при сверлении

№ п/п	Автор (ы)	Математическая модель
1.	А.А. Степанов [77]	$P_0 = C_p D^{Xp} s^{Yp} K_p$, $K_p = K_{ph} K_{p\varphi} K_{p\alpha} K_{p\gamma}$ $M_{кр} = C_M D^{XM} s^{YM} K_M$ $K_M = K_{Mh} K_{M\varphi}$
2.	П.И. Буловский Н.А. Петрова [4]	1. $P_0 = 152 \cdot s^{0,89}$; $M_{кр} = 1,45 \cdot D^{1,56}$ 2. $P_0 = 156 \cdot s^{0,742}$; $M_{кр} = 2,35 \cdot D^{1,44}$
3.	Р.С. Ананд, К. Патра [110]	$K_{nk} = a_{0k} h^{b_{0k}} v^{c_{0k}}$ $K_{fk} = a_{1k} h^{b_{1k}} v^{c_{1k}}$
4.	И. Рахаматулла, М.С. Шунмугам [180, 181, 182]	$Thru_{swr} = k_{f1} + k_{f2} \cdot V_R + k_{f3} \cdot s$ $Torq_{swr} = k_{m1} + k_{m2} \cdot V_R + k_{m3} \cdot s$
5.	С.С. Цао, Г. Хоченг [180, 181]	$F = -23.03 + 54T + 0.181G - 224f + 9.575 \cdot 10^{-2} S$
6.	Н. Батнагар, М.К. Джалутхария [169]	$F_c = \frac{\Delta W \tau_3 f \sin(k/2)\cos(\beta - \alpha)}{2 \sin\phi \cos(\phi + \beta - \alpha)}$ $F_t = c_1 \cdot F_C \cdot \tan(\beta - \alpha)$; $T = c_2 \cdot (F_C + \mu \cdot F_t) \cdot \rho \cdot R$

Окончание табл.11

№ п/п	Автор (ы)	Математическая модель
7.	М. Фернандес, К. Кук [124, 125]	$F = K_1(fd)^{1-a} + K_2$; $T = kf^{0.39}d^{1.39}$
8.	И. Гонг, К. Лин, К. Ф. Эхман [128, 129]	$F_Z = \frac{4k(1+\varphi)f_r R_a \sin\delta_n}{\cos\delta_n - \sin(\delta_n - \varphi)}$; $M_Z = \frac{2k(1+\varphi)f_r R_a^2 \cos\delta_n}{\cos\delta_n - \sin(\delta_n - \varphi)}$
9.	Л.Б. Жанг, Л.Дж. Ванг К.Ю. Лиу [188]	$P_C = \frac{3\pi}{\xi}\sqrt{2G_{IC}D}$
10.	М.Б. Лазар, П. Ксирочакис [140]	$\frac{\partial Fz((r_1,h_1),(r_2,h_2))}{\partial r} = \frac{Fz((r_1,h_1),(r_2,h_2))}{r_2 - r_1}$
11.	Е.А. Окутан [159]	$\frac{M_d}{d^2 H_B} = K_6 \frac{s^{2a} f^{1-a}}{d^{1+a}} \left(\frac{f^{0.8}}{d^{1.2}} \cdot \frac{1-\left(\frac{c}{d}\right)^2}{1+\left(\frac{c}{d}\right)^2} + K_7 \left(\frac{c}{d}\right)^{2-a} \right)$ $\frac{T_v}{d^2 H_B} = K_{13} \frac{s^{2a} f^{1-a}}{d^{1+a}} \left(\frac{1-\frac{c}{d}}{1+\left(\frac{c}{d}\right)^a} + K_{14}\left(\frac{c}{d}\right)^{1-a} \right) + K_{12}\left(\frac{c}{d}\right)^2$

Широкий круг работ представлен по обработке пластика, армированного углеродным волокном (CFRP carbon fiber reinforced plastic). Так Р. Ананд и К. Патра в своей работе [110] 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 [180, 181] показано влияние размера филиментов волокна, подачи и скорости резания на осевую со-

стовляющую силы резания. Н. Батнагар и М. Джалутхария проводят ряд опытов по определению предела прочности на сдвиг для оптимизации модели базового материала [169]. 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 [188]. 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 [124, 125]. 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 [128, 129]. 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 [181, 182] 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 [140] 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 [159] 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 P_0. Процесс влияния силовых факторов на обработку композиционных материалов предметно рассмотрен в работах отечественных и зарубежных авторов [4, 77, 110, 124, 125, 128, 129, 140, 159, 169, 180, 181, 188], 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 [110, 128,

129, 140, 180, 181, 182, 188 и пр.]. 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 [110, 140, 180, 181 и пр.].

Основное количество трудов по тематике влияния силовых факторов на процесс сверления посвящено обработке пластика, армированного углеродным волокном [110, 140, 180, 181 и пр.] 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.

1.4 Методы моделирования процессов резания

Под понятием моделирования понимается процесс построения модели объекта и исследование его свойств путем исследования модели. Оно предполагает под собой 2 этапа: непосредственная разработка самой модели и дальнейшее ее исследование с формулированием необходимых выводов. Разработано достаточно большое количество методов численного решения уравнений в частных производных. Наиболее часто используемые из них – методы конечных разностей и конечных элементов.

Метод конечных разностей был разработан раньше остальных и на первый взгляд является наиболее простым для его реализации. Идея методики состоит в разбиении области прямоугольной сеткой, в которой решается уравнение, и дискретизация дифференциального оператора. Решая линейную систему уравнений, находят приближенные решения в узлах самой решетки. Основные трудности связаны с учетом граничных условий, если граница области имеет сложную геометрическую форму.

В.Г. Фокин при рассмотрении механики деформируемого твердого тела указывает, что МКЭ сходится быстрее, чем метод конечных разностей, а подчас обладает оптимальной скоростью сходимости [70]. В настоящее время данная методика моделирования процессов резания достаточно популярна среди инженеров всех специальностей благодаря работам Зенкевича, Галлагера, Одена, Лионе, Равьяра, Сильвестера, Хаслингера, Шольца, Тейлора [7, 36, 50, 130–132, 155–158, 170, 171].

Сегодня МКЭ является мощным инструментом инженерного анализа и физических исследований благодаря созданию пакетов компьютерных программ, таких как ANSYS, LS-DYNA, MSC.NASTRAN, MSC.MARC, COSMOS, ABAQUS, DEFORM, которые не только реализуют вычислительный процесс МКЭ, но и имеют удобный интерфейс для ввода исходных данных, контроля процесса вычислений и обработки результатов расчёта [86]. Однако количество, научных трудов по использованию конечно-элементных методов при сверлении композиционных материалов, большинство из которых посвящено обработке пластика, армированного углеродным волокном (CFRP carbon fiber reinforced plastic), явно ограничено, а работ по моделированию обработки фольгированного стеклотекстолита нет. Так, в трудах авторов С. Абрата, Д.А. Уолтона приведены традиционные методы обработки композиционных материалов с указанием их основных особенностей и учетом анизотропных свойств. Приводятся основные принципы проектирования заготовки и режущего инструмента.

Авторами Я. Хи, Г. Жангом и Дж. Ксуе проведен конечно-элементный анализ для сверления углеволокна CFRP, разработана конечно-элементная модель с помощью программного комплекса ABAQUS [133]. Заготовка спроектирована как однородный изотропный материал. Анизотропные пластические свойства учтены заданием коэффициента неоднородности согласно критерию разрушения Хашина. Модель заготовки предварительно разработана в пользовательской программе VUMAT. В процессе сверления проведен анализ влияния условий обработки на осевую составляющую силы резания P_0. Анализ проводился для трех режимов ре-

зания. Установлено, что увеличение скорости движения осевой подачи при уменьшении частоты вращения шпинделя приводят к снижению P_0.

При анализе процесса обработки материала с металлической матрицей авторами В. К. Думрой, К. Дебнатом и И. Сингхом разработана конечно-элементная модель для сверления композиционного материала Al1100/10% SiC в программном комплексе ABAQUS [118]. Необходимо отметить, что при проектировании заготовки анизотропия свойств не учтена. При проведении исследований доказано влияние скорости резания и подачи на величину осевой составляющей силы резания. Установлено схождение теоретических и экспериментальных данных (соответствующие эксперименты были предварительно выполнены с помощью сверления и измерения сил резания с помощью динамометра Kistler 9272). Моделирование проведено для трех режимов резания. Предложены мероприятия по оптимизации процесса моделирования: учет влияния износа режущего инструмента и температуры в зоне резания на процесс сверления.

Исследование вертикального резания композиционной матрицы, упрочненной волокнами с использованием конечно-элементного анализа рассмотрено авторами Д. Аролой и М. Рамулу. Ими разработана двухмерная модель режущего клина инструмента и двухмерная конечно-элементная модель однонаправленного композиционного материала на основе графита и эпоксидной связки [114]. Материал дает четкое понимание механического процесса резания, формирования и удаления стружки. Доказано влияние ориентации волокон на процесс резания и осевую составляющую сил резания. Дополнительно проведен ряд экспериментов и показано схождение теоретических и экспериментальных данных.

Конечно-элементный анализ для сверления углеволокна применен в работах авторов О. Изибира, Е. Чассемиха [137]. Рассмотрена оптимизация процесса сверления для исключения дефектов при обработке углеволокна, таких как расслоение, разлохмачивание, образование микротрещин и посветлений в материале, прижогов и пр. Проведен анализ влияния скорости движения осевой подачи и скорости резания на осевую составляющую силы резания. Для подтверждения полученных результатов на тех же режимах обработки проведено практическое из-

мерение силы резания с использованием динамометра Kistler 9255B. Приведены критические значения осевой составляющей силы резания, приводящие к вышеописанным дефектам. Конечно-элементная модель построена в системе ABAQUS.

Анализ современного состояния научных исследований по сверлению композиционных материалов показал высокий уровень проработки вопроса. Однако, рассматривая задачу моделирования процесса сверления фольгированного стеклотекстолита методами конечных элементов, необходимо учитывать следующие факторы:

1. Общей особенностью при создании конечно-элементных моделей процесса сверления вне зависимости от CAE-системы, в которой проводится симуляция процесса, является сложность построения модели заготовки, поэтому ни один из авторов при проектировании модели композиционного материала [114, 118, 137] не учел его слоистую структуру, ограничившись введением коэффициента неоднородности;

2. Разработка модели сверла – задача достаточно сложная и трудоемкая: необходимо задание спиральных сплайнов для построения стружечной канавки и правильное, грамотное формирование режущей части. Интерфейс CAE-систем не приспособлен для формирования во внутренней программной среде таких сложных формообразующих. Поэтому, разработку 3D модели приходится создавать во внешней CAD-системе и конвертировать в один из форматов, читаемых CAE-системой. Могут возникнуть серьезные сложности, в основном связанные с корректной загрузкой и восприятием модели.

3. Необходимо отметить достаточно длительный процесс симуляции сверления композиционного материала (от нескольких часов до нескольких суток в зависимости от режимов обработки, толщины заготовки и плотности конечно-элементной сетки материала и режущего инструмента). Поэтому в работах [114, 118, 137] количество выполненных экспериментов не превышает трех, что недостаточно для полного и качественного анализа процесса резания. Уменьшение числа конечных элементов приведет к снижению времени симуляции и ухудшению качества расчетов. Поэтому единственным способом повышения эффективности

работы в CAE-системах при моделировании обработки композиционных материалов является использование ЭВМ повышенной мощности (в идеале высокоскоростной «суперкомпьетер»). Однако, это не всегда представляется возможным для решения повседневных промышленных задач вне специализированных выч. центров при НИИ.

4. Основное количество трудов по тематике моделирования процесса сверления в CAE-системах посвящено обработке пластика, армированного углеродным волокном [133, 137 и пр.] и электротехническим пластикам и математические модели, полученные авторами для обработки фольгированного стеклотекстолита принципиально не подходят.

Таким образом, моделирование процесса сверления фольгированного стеклотекстолита методиками конечных элементов – процесс достаточно длительный, сложный и трудоемкий. Вместе с тем он позволяет задавать все необходимые параметры реализуемой технологии обработки при создании модели процесса, тем самым, обеспечивая адекватные результаты моделирования, и для предварительной оценки вполне годится. Кроме того, работ по обработке фольгированного стеклотекстолита методиками МКЭ в открытой печати не обнаружено, что в настоящее время делает актуальной задачу разработки математической модели сверления отверстий для дальнейшего определения оптимальных факторов и режимов резания.

1.5 Основные пути повышения эффективности сверления

Основными факторами, влияющими на качество и производительность при сверлении плат с высокой плотностью рисунка, являются [56, 57]:

1. Использование принудительной вытяжной системы;
2. Использование прижимного устройства при сверлении заготовок;
3. Использование верхних и нижних прокладок при обработке пакета;

4. Использование качественных базовых материалов при изготовлении печатных узлов;

5. Использование грамотно подобранных режимов резания;

6. Использование режущего инструмента с наиболее оптимальным конструктивом.

Учет данных факторов приведет к снижению количества дефектных отверстий на печатных платах и повысит эффективность обработки для изготовления качественной и востребованной продукции.

1.6 Результаты и выводы

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 ввиду:

1. Основное количество трудов по тематике влияния силовых факторов на процесс сверления посвящено обработке пластика, армированного углеродным волокном и электротехническим пластикам 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 CAE-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 моделирования 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 обработке фольгированного стеклотекстолита установлено, что производители базового материала и режущего инструмента приводят разные режимы сверления, 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. Отраслевые рекомендации по сверлению печатных плат разработаны еще в советское время, когда не было современных марок базовых материалов. Поэтому на реальном производстве, как правило, режимы резания назначаются опытно-практическим путем. При таком подходе определить наиболее оптимальные 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 фольгированного 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.

1.7 Постановка цели и задачи исследования

В настоящее время процесс сверления печатных плат из фольгированного стеклотекстолита целиком не изучен. В некоторых работах рассмотрены частные вопросы механической обработки композиционных материалов [112, 141–145,149, 151, 152 160–168, 170–173].

Однако, применительно к современному производству систематизированных рекомендаций, позволяющих обоснованно назначать бездефектные режимы обработки фольгированного стеклотекстолита, нет. Все существующие эмпирические зависимости не учитывают анизотропных свойств материала и различие всевозможных марок стеклотекстолита, что является достаточно существенным недостатком [37, 58 и пр.].

Основной **целью** исследований, выполненных в работе является увеличение эффективности обработки отверстий и улучшение их качества за счет определения бездефектных факторов сверления и назначения режимов резания.

Для достижения поставленной цели возникла необходимость решить следующие **задачи**:

1. Ввиду ограниченности в условиях реального производства возможности проведения практических исследований по определению рациональных режимов резания и отсутствии дополнительного материала, необходимо разработать силовую модель резания композиционного материала. При разработке модели учесть ранее установленную схему заточки инструмента и параметры базового материала. Проверить работоспособность разработанной модели.

2. На основе полученных данных разработать методику расчетного определения режимов резания с учетом технологических ограничений на процесс сверления стеклотекстолита. Провести анализ расчетов с возможностью получения рациональных режимов резания для всех типов базовых материалов и всей номенклатуры сверл, используемых на предприятии от 0,8 до 2,0 мм. Определить влияние геометрии и фактора затупления инструмента на процесс обработки.

3. В продолжение работ по повышению эффективности функционирования участка изготовления печатных плат и сопутствующих служб, на основе полученных закономерностей по определению рациональных режимов резания, разработать комплекс автоматизированных программ для минимизации «человеческого фактора» при проведении подготовки производства.

4. Сформировать комплекс технологических решений и разработать технологические рекомендации для бездефектной обработки фольгированного стеклотекстолита.

Глава 2 Теоретические исследования обработки отверстий на фольгированном стеклотекстолите

Сверление заготовок из фольгированного стеклотекстолита для производства печатных плат в настоящее время остается одним из основных способов получения отверстий. Основным критерием при проведении технологической подготовки производства, в т.ч. при переходе на новую номенклатурную группу изделий, является наибольшая производительность и эффективность при обеспечении должного качества для создания рентабельного, конкурентоспособного изделия.

Как отмечает И.В. Горбунов с соавторами, повышенные требования к точности позиционирования отверстий, их геометрии, шероховатости стенки приводят к необходимости предварительной отработки режимов резания [9].

Как показывает практика и опыт обработки печатных плат из фольгированного стеклотекстолита, при механической обработке нередко возникают дефекты, имеющие силовую природу [100]. Поэтому при проектировании бездефектных методов обработки необходимо знать закономерности нагружения обрабатываемой заготовки в привязке к геометрии режущего инструмента для исключения возможных дефектов еще на стадии проектирования.

2.1 Постановка задачи

Как правило, на большинстве производственных предприятий отработка 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 и настройкой на первой партии плат. Однако, при использовании таких приемов часто возникают существенные трудности:

– повышенный технологический отход материала (10…20 заготовок или в среднем от 80 до 2000), который будет списан за счет предприятия;

– возможен массовый брак при изготовлении, ввиду ряда особенностей при обработке фольгированного стеклотекстолита;

– определить наиболее рациональные режимы с точки зрения качество-производительность вряд ли удастся ввиду ограниченности в материале и времени на настройку;

– рекомендуемые режимы обработки производителей режущего инструмента, производителей базовых материалов и нормативных документов существенно рознятся [42, 43, 44, 68, 69, 70], что приводит к сложности установки начальных режимов резания;

– даже при использовании качественных базовых материалов твердость стеклотекстолита разных партий поставки может отличаться и использование «шаблонных» режимов резания некорректно.

Существенно эффективность технологической подготовки производства можно повысить при использовании для моделирования сверления стеклотекстолита пакетов программ для инженерных расчетов CAE-систем, использующих методики конечно-элементного моделирования, описанные в главе 1. Одним из основных достоинств МКЭ применительно к задаче обработки фольгированного стеклотекстолита является возможность решать нестационарные контактные задачи сверления материала с заданием любых граничных условий на входе [86].

В настоящее время существует достаточное количество программ для проведения инженерного анализа. Одним из наиболее часто используемых пакетов для решения задач геометрического и конечно-элементного моделирования выступает ANSYS. Кроме того, достаточно известными и распространенными пакетами являются LS-DYNA, ABAQUS, COSMOS, I-DEAS, NASTRAN, DEFORM и пр. Они позволяют не только выполнить качественное моделирование систем различной физической природы, но и исследовать отклик этих систем на внешние воздействия в виде распределения напряжений, температур, скоростей, электромагнитных полей и т.д. Анализ полученных результатов позволит подобрать необходимую геометрию режущего инструмента и режимы обработки.

2.1.1 Расчетная схема

Для представления реальной слоистой структуры фольгированного стеклотекстолита, необходимо соединить стеклонаполненные слои материала по основе, утку и слои эпоксидной связки. На рис. 2.1 показаны три стеклонаполненных слоя по основе, два слоя по утку и слои эпоксидной связки.

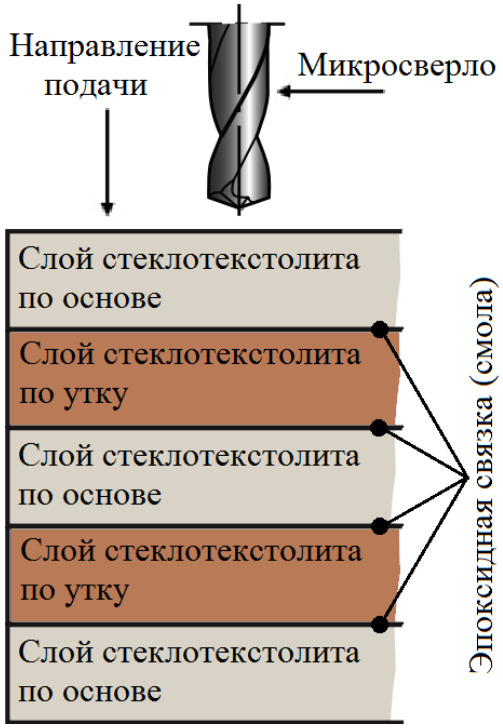


Рис.2.1 Модель процесса сверления композиционного стеклотекстолита

На рис. 2.2 показана схема расположения точки сверления (состоит из главной и поперечной режущей кромки) в разные промежутки времени. Видно, что точка сверления располагается либо в одном слое, либо в двух слоях в зависимости от перемещения инструмента. Однако ширина режущей кромки достаточно мала, так что режущая часть в процессе сверления может находиться только в одном слое.

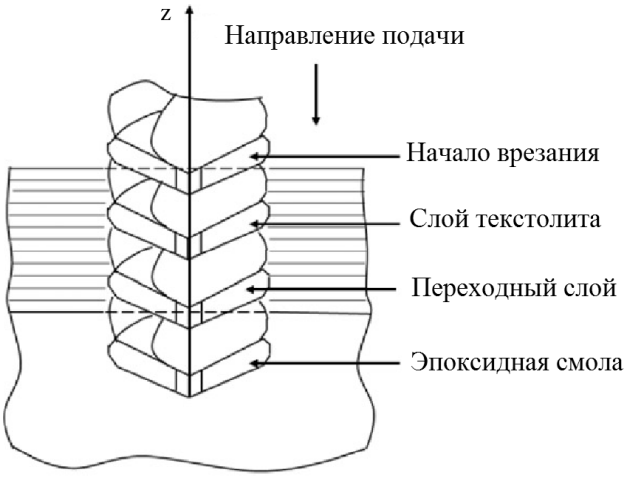


Рис.2.2 Расположение режущей кромки инструмента при сверлении

Элементарная осевая составляющая силы резания определяются согласно следующей зависимости:

$$\delta F_{ock} = F_{удk} \cdot \delta A \,, \tag{2.1}$$

где k указывает на слой в композиционном материале (1 для слоя стеклотекстолита, 2 для слоя эпоксидной смолы и т.д.); $P_{удk}$ – удельная осевая сила; δA – элементарная площадка главной режущей кромки.

Главную режущую кромку можно разделить на сегменты, как показано на рис.2.3 (а). Элементарная площадка гл. режущей кромки определяется как

$$\delta A = \frac{h \cdot \delta x \cdot cos(i)}{sin(\phi)}, \tag{2.2}$$

где i – угол наклона режущей кромки; ϕ – половина угла при вершине; δx – элементарная ширина срезаемого слоя; h – недеформированная толщина срезаемого слоя.

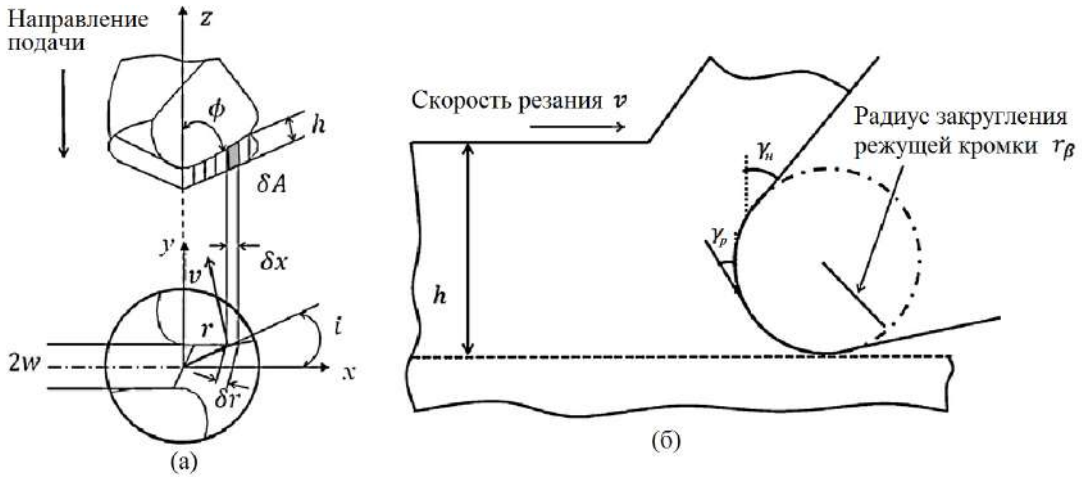


Рис. 2.3 Геометрия режущего инструмента (а) и рабочий передний угол инструмента с радиусом закругления режущей кромки (б) при сверлении

Недеформированная толщина срезаемого слоя h может быть получена через подачу S и угол при вершине ϕ:

$$h = 0{,}5S \cdot \sin(\phi) \tag{2.3}$$

Угол наклона режущей кромки для конического сверла определяется как угол между толщиной перемычки $2w$ и углом при вершине 2ϕ.

$$i = \sin^{-1}(w \cdot \sin\phi / r) \tag{2.4}$$

На механизм микросверления значительное влияние оказывает отношение радиуса закругления режущей кромки r_β к недеформированной толщине срезаемого слоя h. Отношение r_β / h – это параметр, который оказывает влияние на удельные силы резания. Когда это значение меньше 1, и далее уменьшается, имеет место значительное и нелинейное увеличение удельной силы резания, что известно как масштабный или размерный эффект [23, 110]. Для обычной острокромочной модели, материал удаляется в процессе стружкообразования и силы резания определяются по отношению к постоянному переднему углу. Однако, при микросверлении материал удаляется вдоль закругления режущей кромки. Поэтому врезание или врубание также возникает вдоль этой кромки. Влияние врезания является основным до толщины еще не срезанной стружки. Когда стружка не сформирована на ее формирование оказывает влияние врезание кромки инструмента. С. Рао и М.С. Шунмугам [23, 110] уточнили рабочий передний угол γ_p,

рис.2.3 (б), который необходимо использовать вместо нормального $\gamma_н$ для определения сил резания. Рабочий передний угол $\gamma_р$ связан с недеформированной толщиной стружки h и радиусом закругления режущей кромки r_β согласно следующей зависимости

$$\gamma_р = \sin^{-1}\left(\frac{h - r_\beta}{r_\beta}\right) \tag{2.5}$$

Рабочий передний угол отрицателен, когда недеформированная толщина стружки меньше чем радиус закругления режущей кромки. Угол становится положительным, когда недеформированная толщина стружки становится больше радиуса закругления режущей кромки. Рабочий передний угол равен нормальному переднему углу, когда недеформированная толщина стружки достигнет предельного значения h_{lim} которое равно $r_\beta \cdot (1 + \sin\gamma_н)$. В этой механической модели влияние переменного рабочего переднего угла рассматривается при определении коэффициентов сил резания.

Учитывая рабочий передний угол вместо нормального в обычном уравнении силы резания [26, 110,127, 128, 129], элементарные силы резания могут быть найдены через элементарную осевую составляющую силы резания и силу трения:

$$\delta F_{рад} = \delta F_{тр}(\cos\eta_{кан} \cdot \sin i \cdot \sin\gamma_р - \sin\eta_{кан} \cdot \cos i) + \delta F_{ос} \cdot \cos\gamma_р \cdot \sin i \tag{2.6}$$

$$\delta F_{рез} = \delta F_{тр}(\cos\eta_{кан} \cdot \cos i \cdot \sin\gamma_р - \sin\eta_{кан} \cdot \sin i) + \delta F_{ос} \cdot \cos\gamma_р \cdot \cos i \tag{2.7}$$

$$\delta F_{нор} = \delta F_{тр} \cdot \cos\eta_{кан} \cdot \cos\gamma_р - \delta F_{ос} \cdot \sin\gamma_р, \tag{2.8}$$

где элементарная сила резания $\delta F_{рез}$ действует противоположно направлению скорости; элементарная нормальная осевая составляющая силы резания $\delta F_{нор}$ действует перпендикулярно плоскости вектора скорости резания; элементарная радиальная $\delta F_{рад}$ сила перпендикулярна силе резания и осевой составляющей силы резания [23, 110], как показано на рис.2.4.

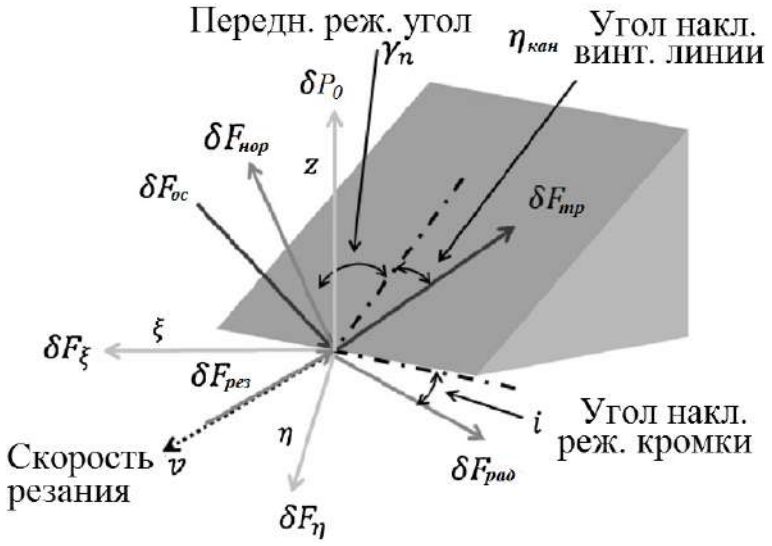


Рис. 2.4 Составляющие силы резания на режущей кромке

Элементарные силы резания при сверлении $\delta F_{рад}$, $\delta F_{рез}$ и $\delta F_{нор}$ из полученных выше уравнений можно преобразовать в элементарную осевую составляющую силы резания δP_0, как следует из [23, 110].

$$\delta P_0 = \delta F_{нор} \frac{\cos\rho \cdot \sin\phi}{\cos i} - \delta F_{рад} \frac{\cos\phi}{\cos i}, \qquad (2.9)$$

где $\rho = sin^{-1}(w/r)$

2.1.2 Математическая постановка задачи

Процесс резания перемычкой сверла представляет собой вертикальное резание. Элементарная площадка главной режущей кромки и недеформированная толщина стружки может быть вычислена, используя условия ортогональности резания, а именно $i = \eta_c = 0$. Рис. 2.5(а) показывает зону режущей кромки сверла и ее составляющие. Элементарная площадка поперечной режущей кромки δA в радиальном направлении обозначена как δr [22].

$$\delta A_{пер} = h \cdot \delta r \qquad (2.10)$$

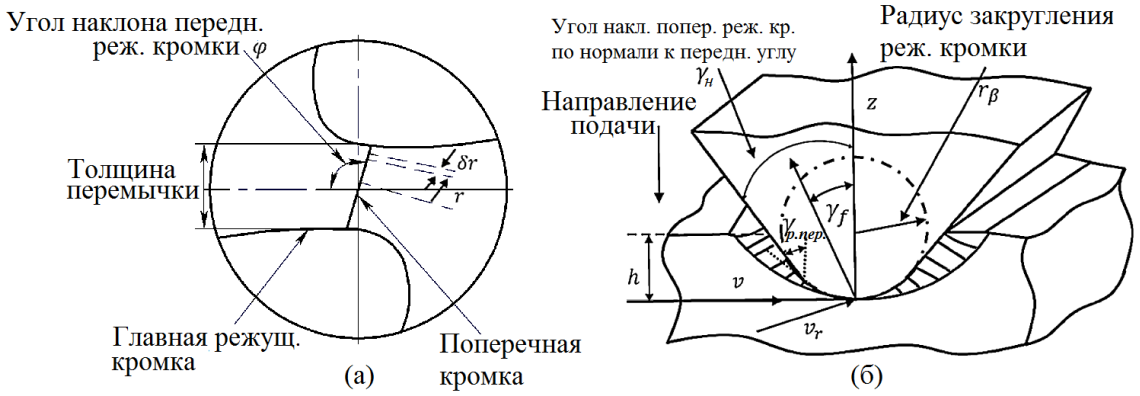


Рис. 2.5 Сверло, вид сверху (а) и рабочий передний угол на поперечной режущей кромке с радиусом закругления (б)

Для учета влияния радиуса закругления поперечной режущей кромки необходимо учитывать рабочий передний угол $\gamma_{р.пер}$, который имеет привязку к толщине недеформированного слоя стружки h и радиусу закругления режущей кромки r_β, как показано на рис. 2.5(б).

Рабочий передний угол $\gamma_{р.пер.}$ перемычки может быть найден через угол при вершине сверла и угол наклона поперечной режущей кромки φ [23].

$$\gamma_{р.пер} = -tg^{-1}(tg\phi \cdot \cos(\pi - \varphi)) \tag{2.11}$$

Учитывая рабочий передний угол, вместо нормального главного переднего угла в уравнении вертикального сверления для поперечной кромки, можно определить силы резания из элементарной осевой составляющей силы резания и силы трения.

$$F_{нор} = \delta F_{тр} \cdot \cos\gamma_{р.пер} - \delta F_{ос} \cdot \sin\gamma_{р.пер} \tag{2.12}$$

$$F_{рез} = \delta F_{тр} \cdot \sin\gamma_{р.пер} - \delta F_{ос} \cdot \cos\gamma_{р.пер} \tag{2.13}$$

Из полученных выше уравнений можно найти элементарную вертикальную осевую составляющую силы резания δP_0:

$$\delta P_0 = \delta F_{thu} \tag{2.14}$$

Полная осевая составляющая силы резания P_0 при микросверлении может быть найдена путем суммирования всех элементарных осевых составляющих сил резания на главной режущей кромке и поперечной режущей кромке. Если для од-

ной главной режущей кромки принять число составляющих «n», а для одной стороны поперечной режущей кромки от центра сверла – «m», то полную осевую составляющую силы резания можно выразить согласно следующей зависимости:

$$P_0 = 2\sum_{j=1}^{n}\left(\delta F_{Гл.z}\right)_j + 2\sum_{q=1}^{m}\left(\delta F_{Попер.z}\right)_q \qquad (2.15)$$

Удельная сила резания $F_{удк}$, которая определяет элементарные силы, как правило связана с толщиной стружки h, скоростью резания v (или подачей S) и передним углом резания γ_c. Для малых подач, применяемых в микросверлении, толщина срезаемого слоя зависит от рабочего переднего угла и радиуса закругления режущей кромки. Рабочий передний угол не меняется вдоль главной режущей кромки на малых подачах, поскольку толщина недеформированного срезаемого слоя меньше, чем радиус закругления режущей кромки. В результате, в отличие от традиционного сверления, удельная сила резания при микросверлении не меняется вдоль главной режущей кромки, поскольку рабочий передний угол остается постоянным вдоль главной режущей кромки для малых значений подач, обычно используемых при микросверлении. Следовательно, влияние переднего угла не учитывается при моделировании удельной силы резания.

Таким образом, при математической постановке задачи зависимость осевой составляющей силы резания от факторов резания будет иметь вид:

$$P_0 = A \cdot D^b \cdot S^c \cdot K\,, \qquad (2.16)$$

где A – коэффициент, характеризующий обрабатываемый базовый материал; D – диаметр сверла; S – подача; b, c – показатели степени; K – коэффициент, учитывающий геометрические параметры сверл:

$$K = K_{изн} \cdot K_{геом}, \qquad (2.17)$$

где $K_{изн}$ – коэффициент, характеризующий критерий износа сверла; $K_{геом}$ – коэффициент, характеризующий геометрические параметры заточки.

Данная совокупность уравнений представляет собой математическую постановку задачи определения осевой составляющей силы резания в многослойной композиционной системе. Анализ известных методов решения подобных задач

показал, что аналитические решения возможны лишь в простейших случаях. В более сложных вариациях, в том числе и для контактных задач, решение сводится к какому-либо варианту численной схемы (МКЭ, метод сеток) с дальнейшей проверкой с помощью проведения экспериментальных исследований [4, 77, 110, 124, 125, 128, 129, 140, 159, 169, 180, 181, 188 и пр.].

2.2 Численная реализация решения поставленной задачи методом конечных элементов

При проектировании новых технологических процессов обработки фольгированного стеклотекстолита, как отмечалось, оптимизация параметров обработки производится эмпирически, что приводит к повышенным временным затратам и затратам на базовый материал при первоначальной отработке. Существенно снизить время на технологическую подготовку производства и повысить эффективность проектирования можно при применении CAE-систем с предварительным построением модели.

Общие принципы моделирования процесса сверления в CAE-системах включают:

1. Предварительное построение 3D-модели сверла;

2. Задание параметров размещения инструмента в системе координат.

3. Определение характеристик материала режущего инструмента, количества слоёв покрытия, их толщины и материала каждого слоя;

4. Задание параметров сетки конечных элементов для сверла;

5. Определение геометрии обрабатываемой заготовки;

6. Задание параметров сетки конечных элементов для обрабатываемой заготовки;

7. Задание характеристик материала обрабатываемой заготовки;

8. Задание параметров режима резания: скорости резания (или числа оборотов шпинделя), подачи;

9. Задание параметров теплообмена с окружающей средой и параметров взаимодействия инструмента с заготовкой;

10. Проверка параметров базы данных и генерация базы данных для решения задачи моделирования процесса резания;

11. Проверка задачи моделирования и анализ результатов.

Существенное влияние на процесс резания оказывает геометрия режущего инструмента, поэтому правильное создание модели сверла очень важно. При моделировании процесса сверления фольгированного стеклотекстолита спиральными сверлами имеют место существенные сложности, основная из которых связана с геометрией режущего инструмента. Разработка модели сверла – задача достаточно сложная и трудоемкая: необходимо задание спиральных сплайнов для построения стружечной канавки и правильное, грамотное формирование режущей части. Наиболее простой и инженерно-адаптированной программой с точки зрения задания геометрии режущего инструмента является DEFORM, который имеет собственный модуль по созданию геометрии спирального сверла на основе размеров и углов, которые задаются вручную. В модуле DesignModeler (ANSYS Workbench) и программном модуле ABAQUS возможно построение геометрических моделей с использованием операций экструзии, вращения и пр. Препроцессоры LS-DYNA так же позволяют задать геометрию режущего инструмента. Кроме того. Практически все CAE-системы имеют возможность работать с внешними моделями CAD-систем (отновные форматы x_t, iges, step, stl).

Основным преимуществом ANSYS Workbench и DEFORM по сравнению с аналогичными программными модулями является наличие библиотек материалов и возможность их редактирования и создания новых. В LS- DYNA библиотек нет и создавать модель материала приходится по известным параметра: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, текучесть и пр.

Композиционные материалы – материалы с неоднородным внутренним строением. В настоящее время композиты имеют достаточно широкое распространение и возможность моделирования такого материала выступает одним из основных критериев при сравнении CAE-систем [9]. Пакет LS- DYNA позволяет

задавать анизотропные материалы благодаря большому количеству типов моделей, но удобного инструмента для создания типа слоев в LS- DYNA нет. В ABAQUS и ANSYS анизотропный материал задается по слоям с указанием толщины и направления выкладки слоев. В DEFORM инструмента для создания композитов нет, возможность работы есть только с однородными по структуре материалами, а задания коэффициента Ланкфорда недостаточно для задания необходимых анизотропных пластических свойств.

Для моделирования процессов резания оптимальным вариантом является ANSYS Workbench ввиду наличия гибкого инструмента построения и изменения конечно-элементной сетки. С точки зрения простоты и удобства построения сетки конечных элементов наиболее приемлемой CAE-системой является DEFORM, в которой помимо всего прочего имеется возможность сгущения сетки в областях пластической деформации детали, что позволяет сократить время на расчет. Принципы задания граничных условий для различных CAE-систем похожи: определение движения инструмента и обрабатываемой заготовки; место контакта инструмента и заготовки; фиксация заготовки; использование СОТЖ; температура окружающей среды и пр.

Таким образом, наиболее оптимальным пакетом для моделирования обработки композиционных материалов является ANSYS Workbench. Он позволяет построить все основные параметры не углубляясь в детальную настройку. Необходимо только указать входные данные: модели заготовки и режущего инструмента, материалы, сетки, граничные условия. При использовании LS- DYNA инженеру необходимо настраивать процесс резания начиная от времени перемещения объекта и заканчивая контролем выходных параметров. Однако LS- DYNA имеет простой и логически понятный пост-процессор, который имеет возможность работы с выходными данными ANSYS, что очень удобно. Инженерная платформа DEFORM, в отличие от вышеописанных расчётных программ, программный комплекс DEFORM-3D разработан для технологов и не требует глубоких знаний по сопротивлению материалов. Вместе с тем он позволяет задавать все необходимые параметры реализуемой технологии обработки при создании моде-

ли процесса, тем самым, обеспечивая адекватные результаты моделирования. Однако, возможности работы с композиционными материалами у DEFORM нет применительно к обработке фольгированного стеклотекстолита пакет годится лишь для усредненных вычислений.

2.2.1 Конечно-элементная модель в ANSYS Workbench

Отличительной особенностью работы программы, в отличие от других смежных пакетов, является предварительная подготовка трехмерной модели сверла. Основной сложностью при разработке инструмента было правильное формирование режущей части с заданием необходимой геометрии (угол при вершине, задний угол, угол наклона винтовой линии и пр.), полученных в Главе 1. 3D модель сверла выполнена в пакете T-Flex Cad, затем сконвертирована в формат x_t, который принимает пакет Ansys (рис.2.6).

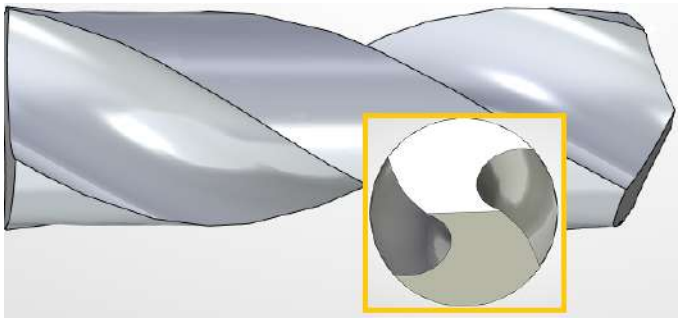


Рис.2.6. 3D модель твердосплавного сверла Ø1 мм.

Для работы в пакете ANSYS предварительно разработан командный файл ввода данных, в котором заданы параметры режущего инструмента и композитной заготовки и режимы резания, рис. 2.7. Сверло предварительно задано, как недеформируемый материал, у которого забрано 4 степени свободы (заделка по периметру, по каждому слою), оставлено только перемещение по оси z и возможность вращения. Плотность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона заданы для материала ВК6.

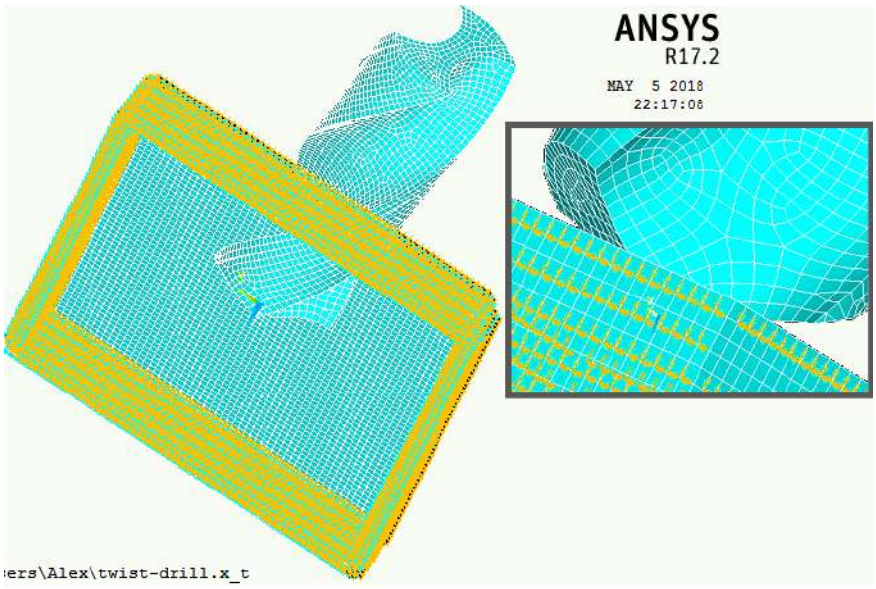


Рис. 2.7 Конечно элементная модель сверло-заготовка в Ansys

Материал набран послойно с разбивкой на основу и уток и заданием плотности ламината, модуля упругости, коэффициента Пуассона и пр. Механические характеристики материала предоставлены официальными дистрибьюторами компании Isola (табл. 12). Данные предоставлены через запрос, поскольку согласно нормативной документации на материал известны только: интервал рабочих температур, удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, сопротивление изоляции, пробивное напряжение и пр. электрические характеристики. Из механических свойств известна только плотность.

Таблица 12

Механические свойства Isola

№	Свойство	Значение	Размерность
1	Прочность на отрыв фольги	1,14...1,25	Н/мм
2	Макс. температура эксплуатации	140	^{o}C
3	Плотность ламината	1,8	г/см^{3}
4	Теплопроводность	0,4	Вт/К·м
	Коэфициент температурного расширения		
5	по оси x	13	ppm/K
6	по оси y	14	ppm/K
7	по оси z	55	ppm/K

Окончание табл.12

№	Свойство	Значение	Размерность
	Предел прочности на изгиб		
8	по основе	576	Мпа
9	по утку	382	МПа
	Предел прочности на растяжение		
10	по основе	382	МПа
11	по утку	244	МПа
	Коэффициент Пуассона		
12	по основе	0,19	
13	по утку	0,15	
	Модуль Юнга		
14	по основе	28000	МПа
15	по утку	25000	МПа

Далее набранные слои склеены (команда vglue), поскольку в программе каждый слой разбивается своей сеткой конечных элементов и на каждой поверхности объема будут свои узлы, их номера не будут совпадать и, следовательно, заготовка не будет сплошной.

Движение инструмента задано тремя массивами: перемещение – 1,8 мм для гарантированного выхода сверла из зоны резания; время перемещения 0,09…0,04 сек (в зависимости от режима резания 1100 м/мин…2700 м/мин соответственно) – скорость движения осевой подачи; частота вращение инструмента 3600*rads…4800*rads (в зависимости от режима резания 36000 об/мин…48000 об/мин) – частота вращения шпинделя. Дополнительно в управляющий файл введена команда edout, rcforc для вывода текстового файла, в котором содержатся силы реакции (в т.ч. нужная нам составляющая P_0) для последующей обработки пост процессором.

Результатом обработки данных служит выходной файл с расширением k, он же будет входным для решателя LS-DYNA и проведения дальнейшего анализа в пост-процессоре LS-DYNA. K-файл по свей структуре содержит: описание всех координат узлов (сверла Master-Part и модели заготовки Slave-Component); определение секций Shell (сверло) и Solid (заготовка); описание материала; определение элементов; определение контактного интерфейса.

2.2.1.1 Решение задачи средствами ANSYS Workbench, LS-DYNA

Основное преимущество пост-процессора LS-DYNA состоит в том, что в нем имеется возможность смотреть результаты прямо во время расчета и выполнять необходимые корректировки, т.е. видеть процесс симуляции в динамике, рис.2.8. В ANSYS же пока расчет не будет завершен посмотреть и проанализировать результаты невозможно, что представляет существенное неудобство и временные издержки.

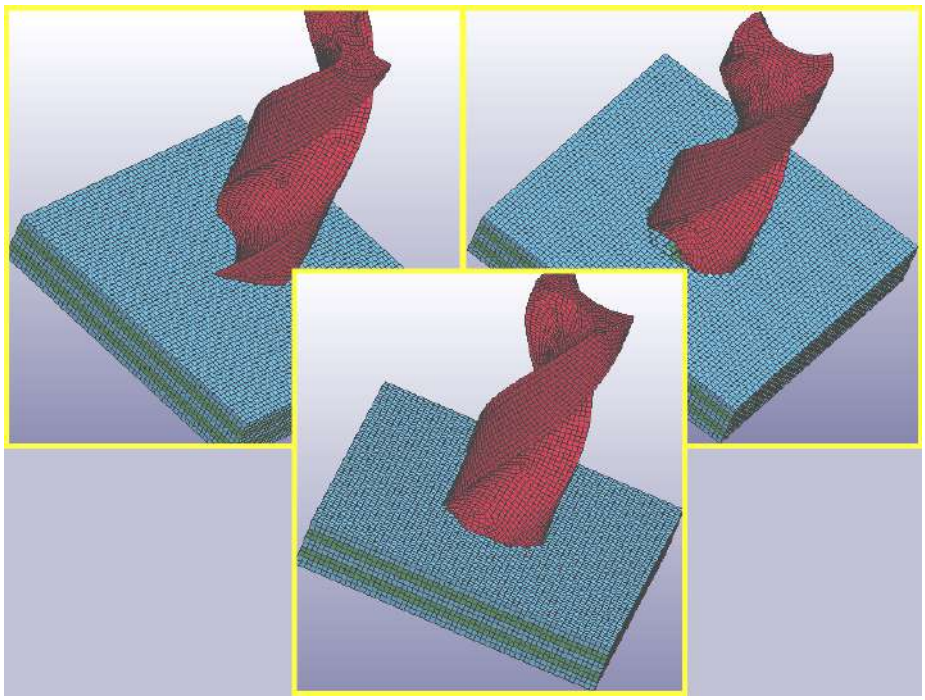


Рис. 2.8 Процесс сверления в динамике

Для построения и дальнейшего анализа осевой составляющей силы резания в пост-процессор LS-DYNA встроен графический построитель ASCII с возможностью выбора в качестве базы сверла (SI-1 contact input) либо материала заготовки (Ma-1 contact input). При этом необходимо выбрать выходной параметр, по которому будет производиться построение: силы, моменты, масса и пр. На рис. 2.9 представлена результирующая осевая составляющая силы резания по оси Z (Z-force).

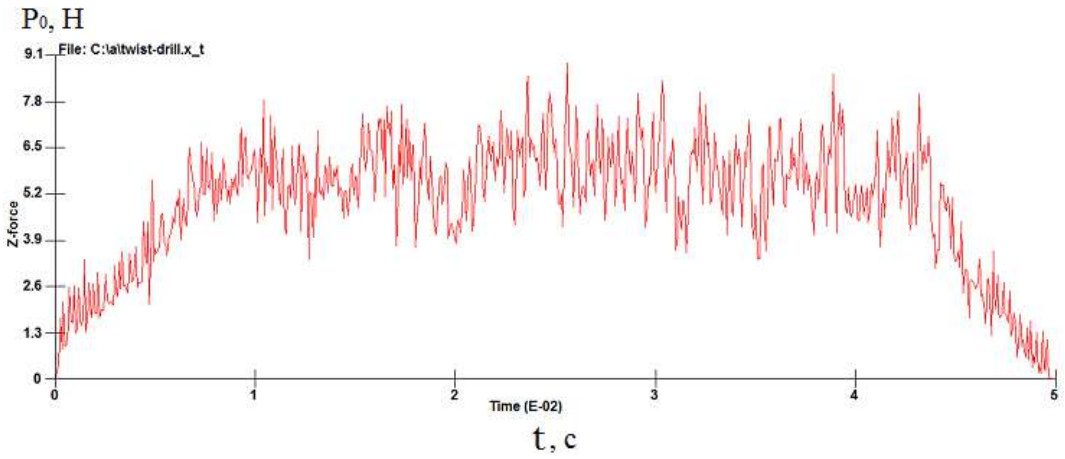


Рис. 2.9 Результирующая P_0 на заготовке

Достаточно наглядным является инструмент по воспроизведению эквивалентных напряжений (Stress) в процессе резания (FComp). На рис. 2.10 представлены максимальные девиаторные напряжения на выходе сверла (Bottom). При необходимости можно выполнить построение на входе сверла (Top), с торца (Front) и пр. При этом напряжения отранжированы цветом от минимального к максимальному (от темно синего – min до ярко красного – max).

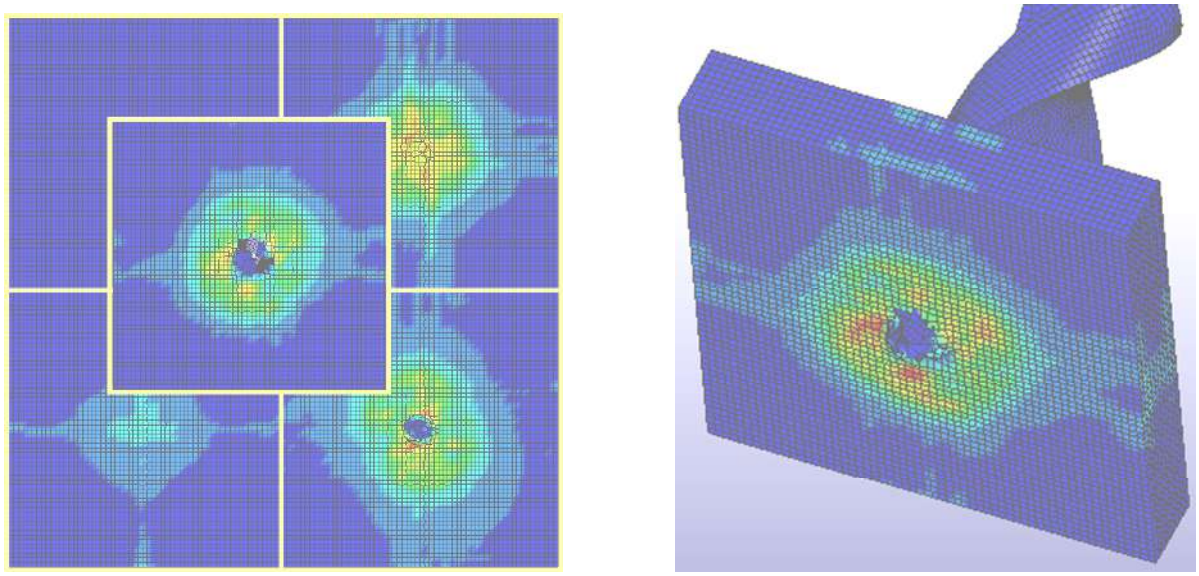


Рис. 2.10 Максимальный девиатор напряжений при сверлении

Для более подробного анализа можно воспользоваться функцией плоского сечения (SPlane) и рассечь область по направлению X, Y или Z. На рис. 2.11 представлено девиаторное напряжение в сечении X. Необходимо отметить, что при создании конечно-элементной модели сверло выполнено в форме оболочки

для уменьшения числа конечных элементов, узлов и сокращения времени расчетов. Поэтому в сечении часть режущего инструмента не видна.

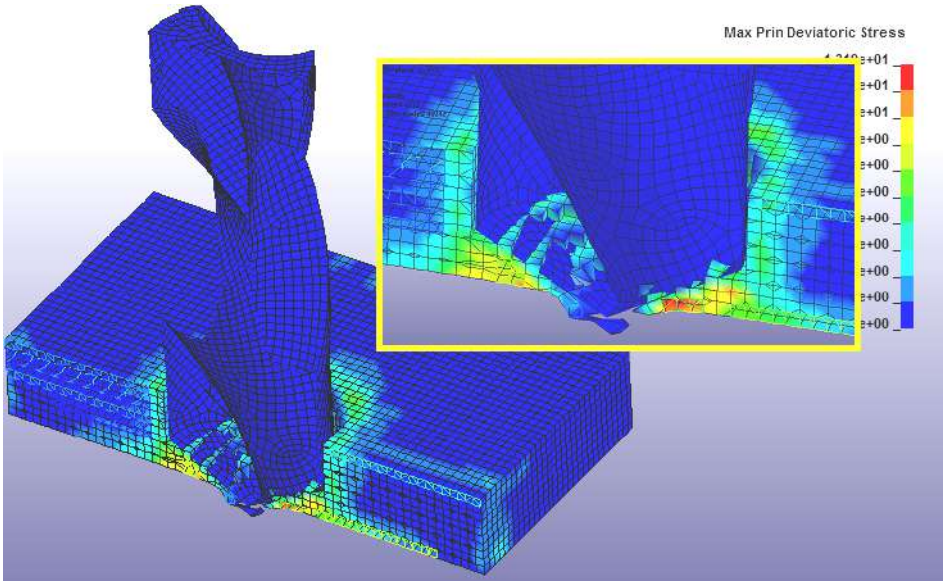


Рис. 2.11 Девиаторное напряжение в сечении

Согласно вышеописанной процедуре проведена симуляция процесса сверления фольгированного стеклотекстолита с записью выходных данных усилий резания в файлы типа *rcforc на пяти режимах резания n = 36 000 об/мин; S = 1100; 1600; 2000; 2400; 2700 мм/мин. Анализ и обработка результатов выходных данных в специальном мат. приложении рассмотрена ниже.

2.2.1.2 Форма представления результатов расчета

Для дальнейшего анализа результатов и нахождения усредненных данных осевой составляющей силы резания, разработана программа Substr.exe для работы с выходными данными LS-DYNA, предварительно записанными в файл *rcforc. Поскольку выходные данные представляют собой сплошной массив составляющих сил (по x, y, z) и моментов сил (mx, my, mz) на инструменте (slave) и заготовке (master), рис. 2.12, то выделить и обработать необходимые данные по времени и осевой составляющей силы резания P_0 достаточно проблематично.

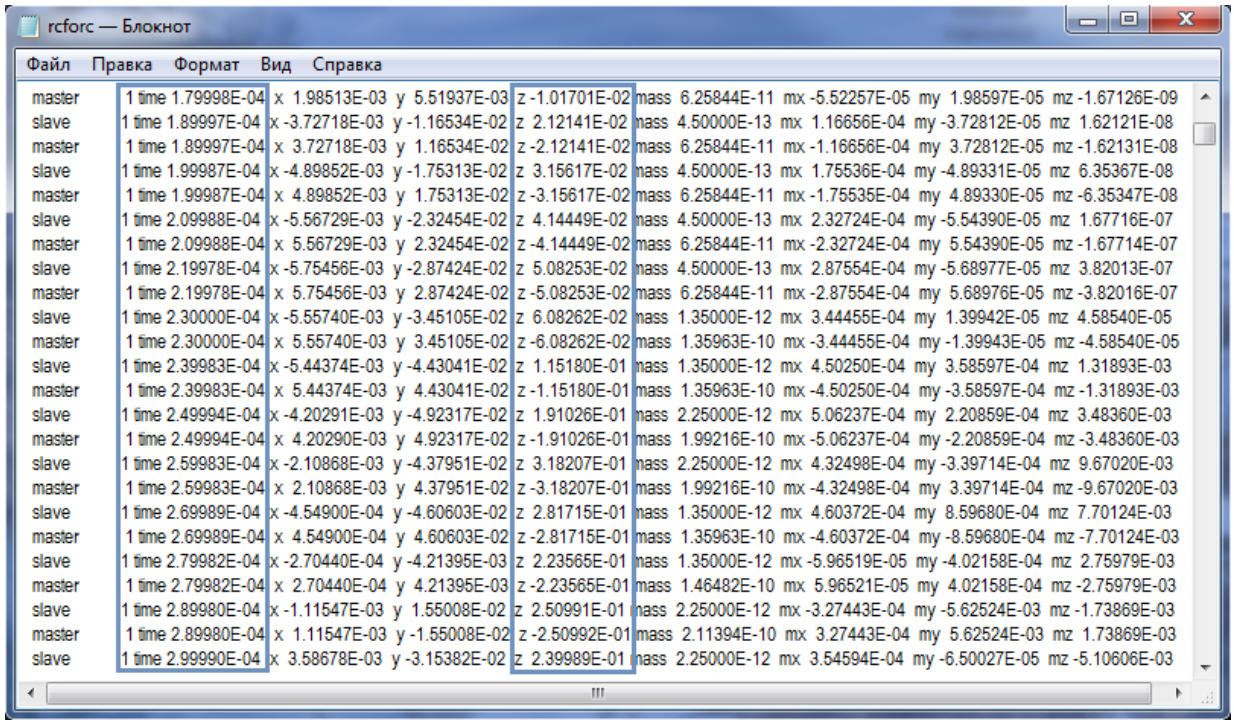


Рис. 2.12 Форма выходного файла *rcforc

Используя данные по времени резания (time) и осевой составляющей силы резания (z) на заготовке (slave) формируется новый текстовый файл (рис. 2.13), который в дальнейшем используется для обработки в пакете MathCAD с использованием опции File Input и нахождения средних значений с использованием стандартной функции mean(x).

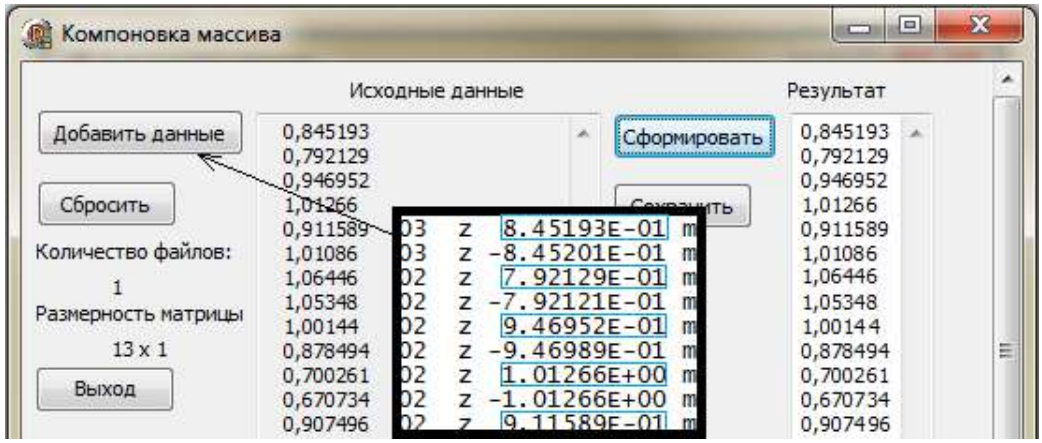


Рис. 2.13 Окно работы программы с выходными данными

На рис. 2.14...2.16 представлены результаты обработки файла выходных данных осевой составляющей силы резания P_0

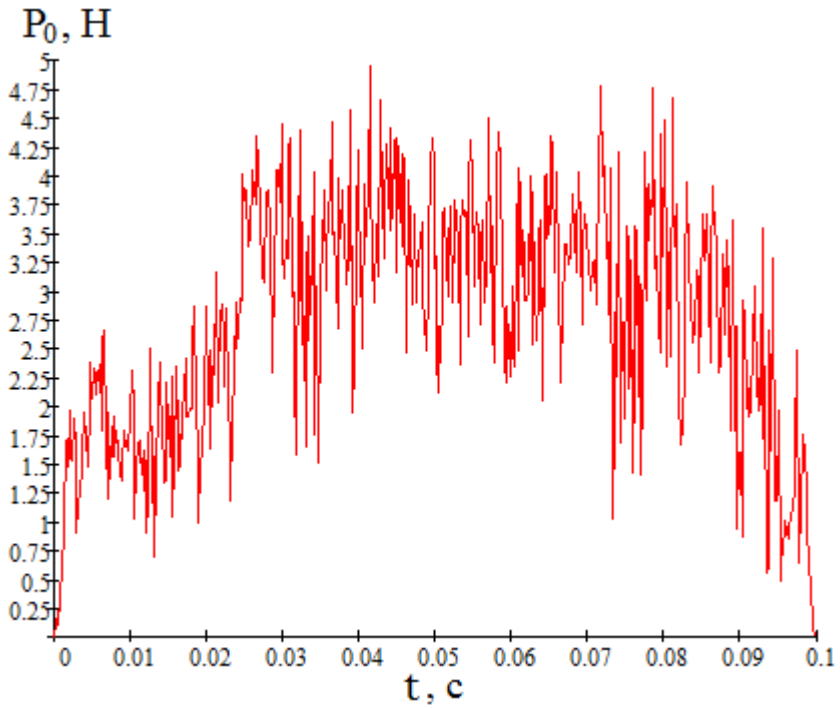


Рис. 2.14 Осевая составляющая силы резания на режимах S=1100 мм/мин; n=36000 об/мин

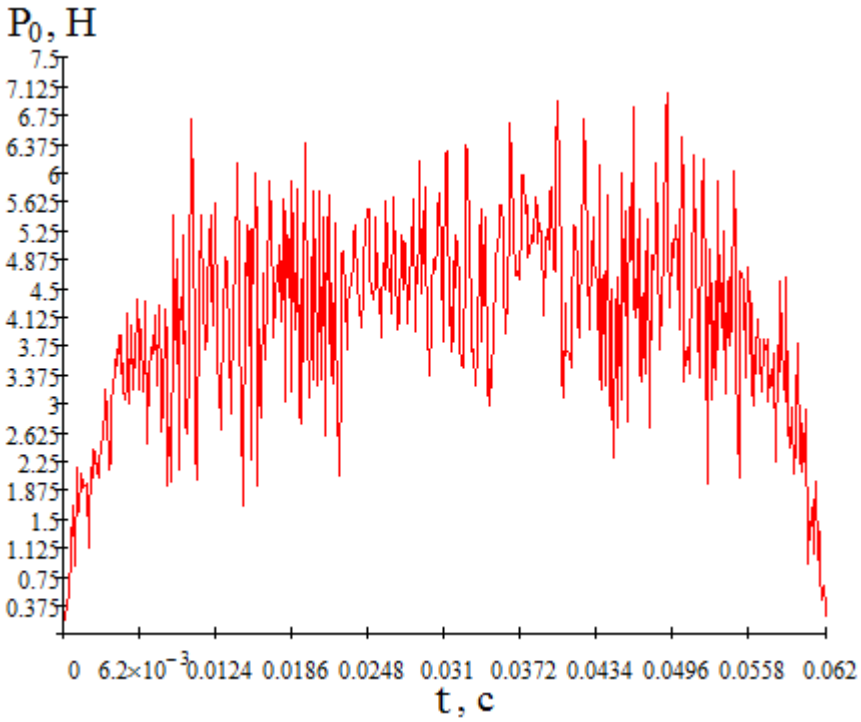


Рис. 2.15 Осевая составляющая силы резания на режимах S=1600 мм/мин; n=36000 об/мин

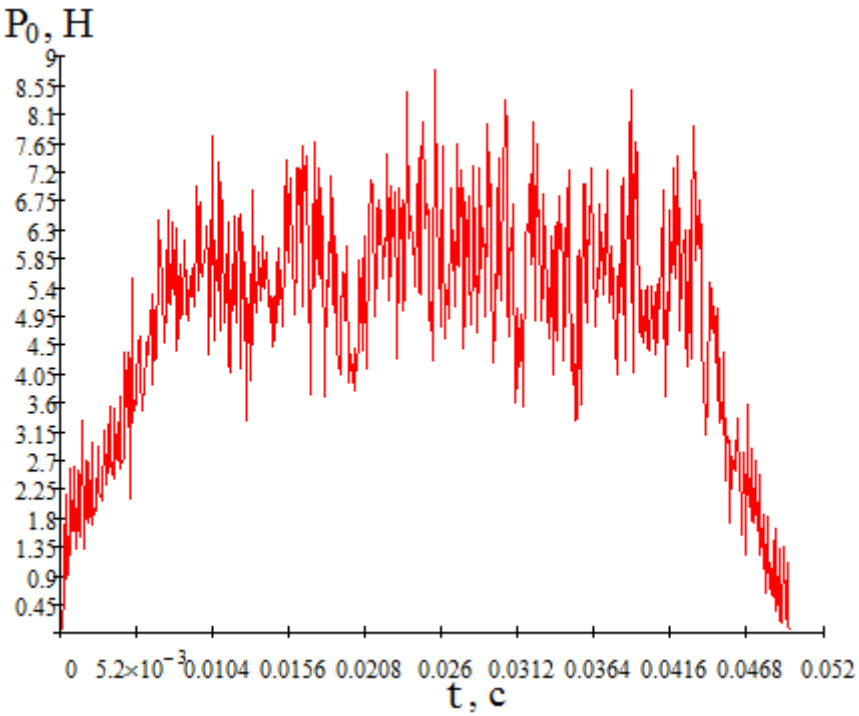


Рис. 2.16 Осевая составляющая силы резания
на режимах S=2000 мм/мин; n=36000 об/мин

Таким образом, построены графические зависимости осевой составляющей силы резания P_0 на режимах резания n = 36 000 об/мин; S = 1100; 1600; 2000 мм/мин. На соответствующих подачах получили усредненные значения P_0: 2,726; 4,049; 4,932 соответственно. Согласно графических зависимостей рис.2.14…2.18 видим постепенное нарастание осевой составляющей силы резания с врезанием сверла в материал заготовки. Кроме того, значения P_0 меняются при прохождении режущего инструмента через чередующиеся слои стеклоткани. Значения силы максимальны, когда сверло полностью вошло в материал заготовки. При выходе сверла из заготовки P_0 постепенно спадает до нулевого значения при полном прорезании материала режущим инструментом. С увеличением скорости движения осевой подачи S имеет место постепенное нелинейное увеличение осевой составляющей силы резания P_0 со значений 2,726 до 4,932 Н.

Следует уточнить, что при моделировании процесса резания методиками конечных элементов в качестве оценки влияния факторов приняты величины максимальных значений осевой составляющей силы резания. Поскольку при сверлении инструмент вначале давит, затем разрывает нити и, наконец, размельчает

стекловолокно, поэтому случаи с максимальными значениями P_0 являются худшими (сверло скорее выдавливает отверстие, а не режет), а режимы резания с минимальными нагрузками – наилучшими.

Для более подробного анализа и учета всех технологических параметров (механические свойства слоистого материала, режимы резания, инструмент) на процесс сверления, очевидно, требуется гораздо большее число экспериментов с уменьшением шага по скорости движения осевой подачи, на разных частотах вращения шпинделя, с использованием сверл разного диаметра и различных материалах.

Необходимо отметить, что на ЭВМ с характеристиками: процессор Intel® Core™ i7 4x2.2 ГГц, Ram 4096 Мб расчет занимает более 7 суток. Поэтому симуляция выполнялась в специализированном вычислительном центре с более быстродействующими ЭВМ; при этом расчет одного режима занимал порядка 2 суток. Следовательно, при проведении дополнительных экспериментов (ориентировочно порядка 500) будет потрачено времени на два порядка больше.

2.3 Работоспособность имитационной модели процесса сверления

Проверка корректности построенной компьютерной имитационной модели процесса сверления проведена по двум направлениям:

– экспериментальная оценка работоспособности.

– проверка сопрягаемости модели с имеющимися решениями на предмет отражения общих закономерностей процесса;

2.3.1 Экспериментальная оценка работоспособности модели

Обрабатываемый материал представляет слоистую композицию пластик, которая выполнена из стеклонаполненной основы и полимерной связки. Компо-

зиционные армированные материалы распространены при изготовлении печатных плат, т.к. имеют высокий срок службы усталости [116], высокие прочностные характеристики, при этом отличаются более легким весом по сравнению с металлами и их сплавами.

На сегодняшний день сверление, как способ получения отверстий на печатных платах остается одним из основных, поскольку обеспечивает заданную производительность отверстий при гарантированном качестве изготовления. Кроме того, сверление годится для обработки большинства композиционных пластиков[142, 164, 165, 166].

2.3.1.1 Общее описание эксперимента

Обработка композиционного текстолита достаточно сложна, поскольку материал отличается анизотропной структурой и абразивной природой [123]. Ввиду неоднородного состава осевая составляющая силы резания имеет неравномерное распределение между слоями. Это сопряжено с возможным возникновением дефектов при обработке, в том числе проявляющихся в расслоениях между слоями [140].

Чтобы проверить работоспособность имитационной модели сверления принято решение использовать 5-ти компонентный пьезоэлектрический динамометр Kistler Dyn Mini 9256C2. Частота дискретизации динамометра, которая используется чтобы хранить данные имеет порядок 7142 Гц; минимальная чувствительность прибора согласно техническому описанию составляет 0,002 Н. Комплектно с прибором используется усилитель мультиканального типа 5070 для преобразования полезной составляющей сигнала в напряжение и использования данных для приема и накопления.

Прибор для измерения, блок управления и устройство для записи приведены на рис. 2.17.

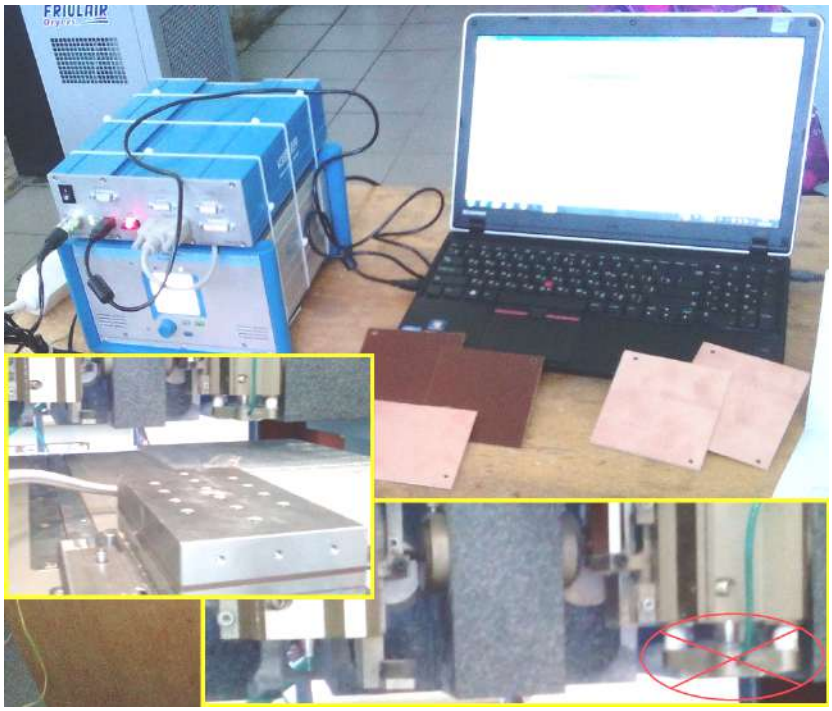


Рис. 2.17 Рабочее место с динамометром Kistler и блоком управления

Ввиду экономии времени измерения и заготовок при проведении экспериментов для проверки различных режимов обработки (дискретное изменение скорости движения осевой подачи) и применения ряда однотипных заготовок, технически процесс проведения замеров на выходе получился достаточно длительным и трудозатратным (рис.2.22). Поэтому при проведении измерений частота дискретизации динамометра была ограничена значениями 1000 Гц. На рис.2.18 приведен выделенный полезный сигнал, который используется для проведения дальнейшего анализа.

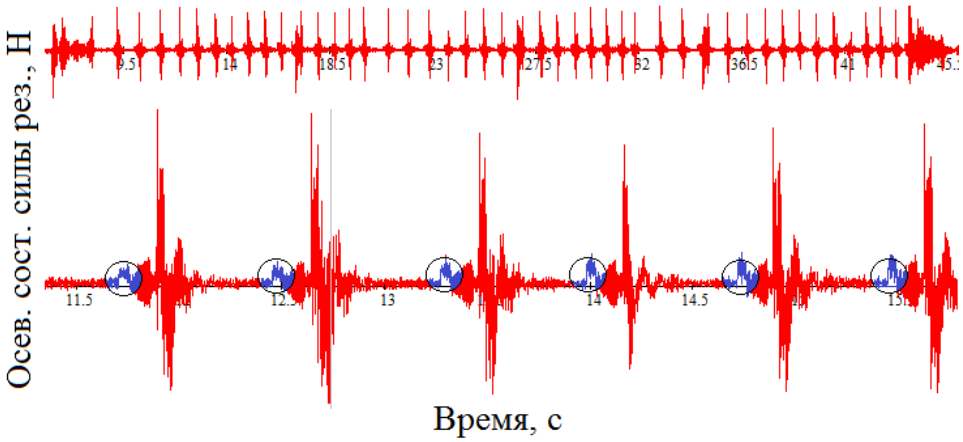


Рис.2.18 Аналоговый выходной сигнал измерения P_0

Для моделирования обработки заготовок применен многошпиндельный специализированный сверлильный станок СМ-600 (рис.2.21). Трудно реализуемой задачей при проведении процесса обработки выступила необходимость демонтажа основных базовых плит для обработки композиционного материала и регулировка вылета инструмента, так как в собранном виде прибор и заготовка составляют по высоте более 130 мм. При настройке вылета и начальной настройке и отработке процесса обработки, а также исключениея выхода из строя динамометрического прибора из-за ударения станочного шпиндельного узла, ошибок в определении вылета обрабатывающего инструмента и так далее, на начальном этапе был спроектирован имитатор заготовки динамометра, который по форме и габаритным размером идентичен прибору, рис.2.19.

предварительно была изготовлена модель по форме и размерам имитирующая прибор (рис.2.19). Для того, чтобы исключить влияние прижимного вакуумного устройства, на время проведения замером, оно было демонтировано (рис.2.17).



Рис. 2.19 Имитатор динамометрического прибора

При выполнении экспериментов в качестве основного материала был использован Isola P96. Предварительно подготовленная заготовка габаритами 100*100 мм закреплялась на динамометрическом приборе при помощи базовых отверстий через прокладочный материал 2,0 мм толщины, чтобы исключить воз-

можные повреждения области измерения динамометра на выходе сверла из заготовки. Заготовка базировалась на пару противолежащих отверстий (рис. 2.20).

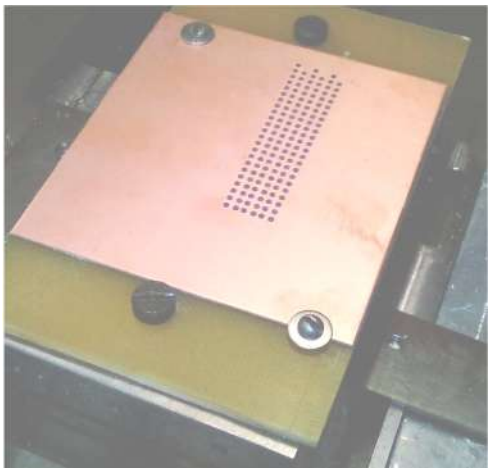


Рис. 2.20 Крепление и базирование заготовки на динамометре

Сверление выполнялось твердосплавными сверлами производства «Ham», заточенными на основании рекомендаций авторов Буловского П.И., Петровой Н.А. [4] на следующих режимах обработки: частота вращения шпинделя – 36000 об/мин; скорость движения осевой подачи: 1100, 1300, 1500, 1700, 1900, 2100, 2300, 2500, 2700 мм/мин.

На рис.2.21 приведена зависимость усредненных значений осевой составляющей силы резания для подач S = 1100; 1600; 2000; 2400; 2700 мм/мин и интерполяционная кривая по усредненным значениям.

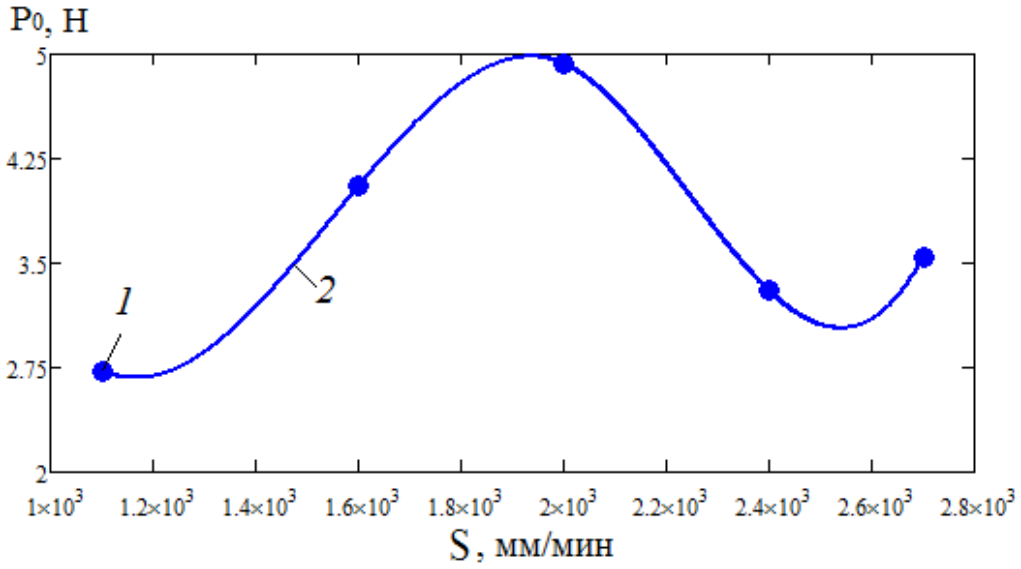


Рис. 2.21 Усредненные значения P_0 для разных подач S
1 – усредненные значения P_0, Н; 2 – интерполяционная функция P_0

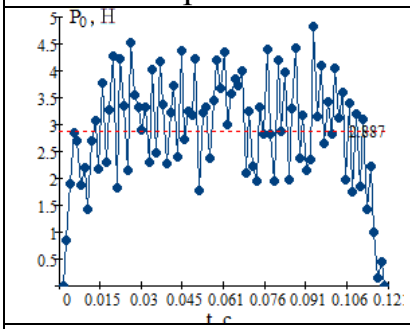
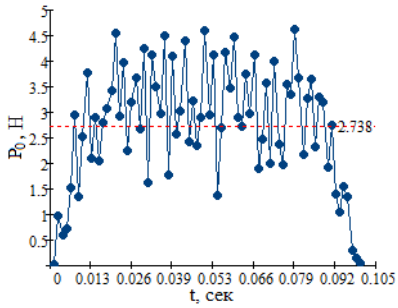
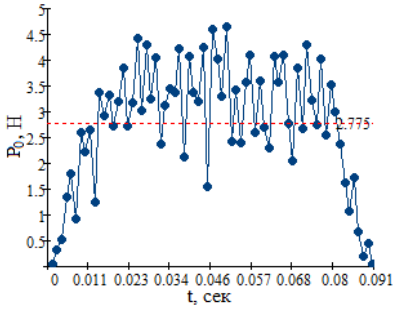
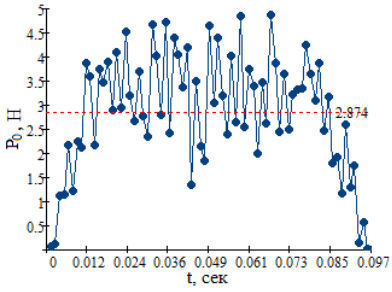
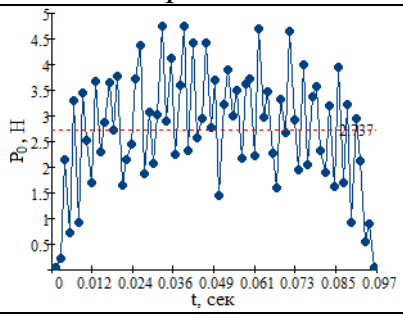
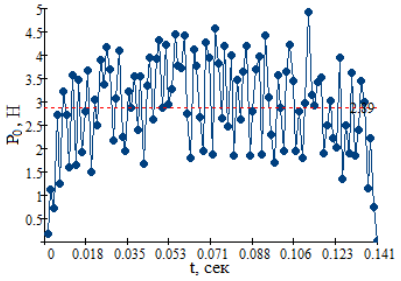
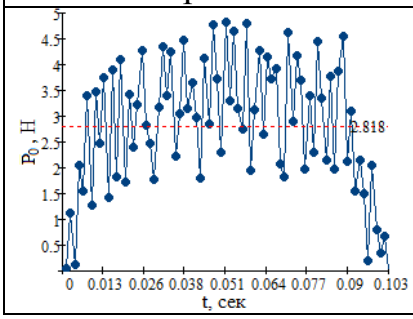
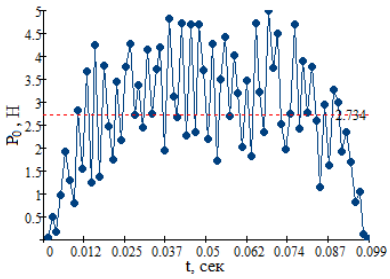
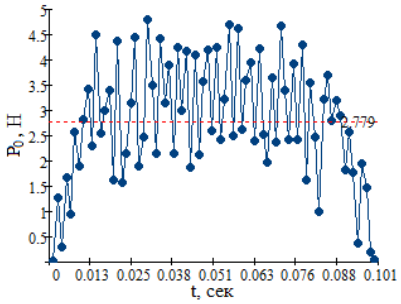
Согласно полученной зависимости видно, что с увеличением значений скорости движения осевой подачи, осевая составляющая силы резания P_0 сначала постепенно возрастает (до подач 2000 мм/мин), а потом убывает (при значении подачи 2400 мм/мин), затем снова начинает возрастать. Подробное описание методики проведения экспериментальных работ с необходимыми техническими выкладками и пояснениями выполнено при измерениях осевой составляющей силы резания при сверлении фольгированного стеклотекстолита [104]. Экспериментально установленные особенности при обработке анизотропного композиционного стеклотекстолита учтены далее в данной работе при проведении компьютерного моделирования процесса резания с помощью размерных поправочных коэффициентов.

2.3.1.2 Определение осевой составляющей силы резания с помощью динамометрической установки

Задача по обработке необходимого выходного сигнала сопряжена с необходимостью выделения нужных участков из непрерывного, условно аналогового сигнала, которые необходимы для дальнейшего анализа. Результаты обработки «полезного» сигнала выполнены с помощью математического пакета MATH Cad14 с использованием внутренней команды «Ввод файла». Формат файлов выбиран с разрешением *.txt, так так ПО динамометрического прибора позволяет конвертирование выходных данных в формат текста. В табл. 13 приведены данные по выделению выходного сигнала для режима обработки S = 1100 мм/мин; n = 36000 об/мин. На изображениях штриховкой графически построена граница математических ожиданий осевой составляющей силы резания P_0, которые вычислены с помощью внутренней команды «MEAN» программного пакета MATH Cad14.

Таблица 13

Результаты обработки экспериментальных данных

Материал Isola, Германия. Сверло Ø1 мм. n = 36000 об/мин; S = 1100 мм/мин.		
Отверстие №1	Отверстие №2	Отверстие №3
		
Отверстие №4	Отверстие №5	Отверстие №6
		
Отверстие №7	Отверстие №8	Отверстие №9
		

Очевидно, что согласно проделанных экспериментальных получены выходные данные осевой составляющей силы резания одного порядка с математическим ожиданием 2,734...2,890 Н или 2,812Н±0,078Н. Таким образом разброс экспериментальных данных не превысил и 9%, что говорит о корректно и качественно проведенных измерениях.

2.3.1.3 Схождение теоретических и экспериментальных исследований

Для набора статистики и проведения дальнейшего статистического анализа данных для каждого режима резания дополнительно проведено 9 измерений осевой составляющей силы резания, с помощью ранее разработанной компьютерной имитационной модели. Для проверки схождения теоретических и экспериментальных исследований и получения выходных данных, размер сетки конечных элементов базового материала существенно увеличен.

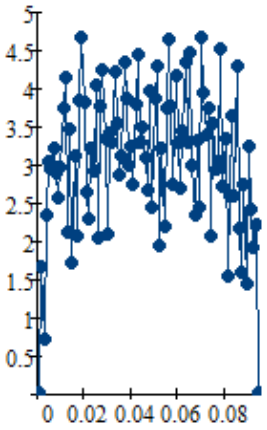
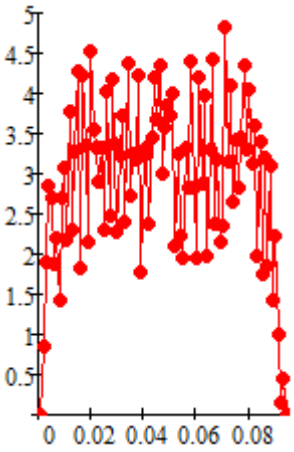
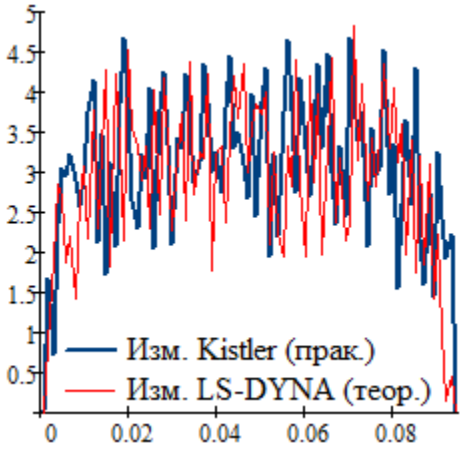
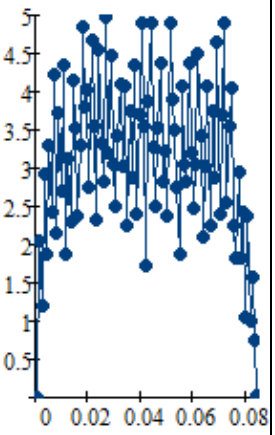
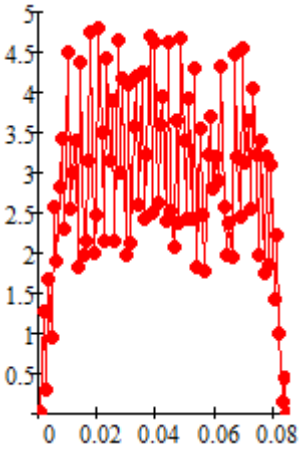
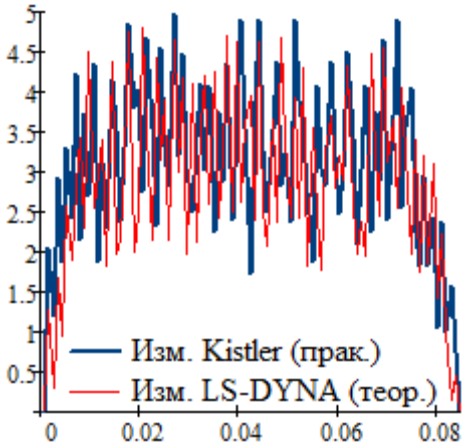
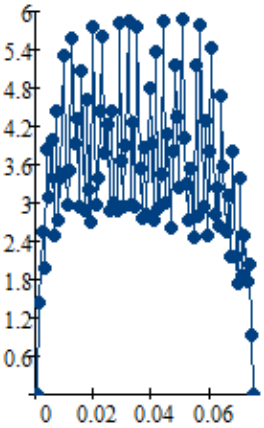
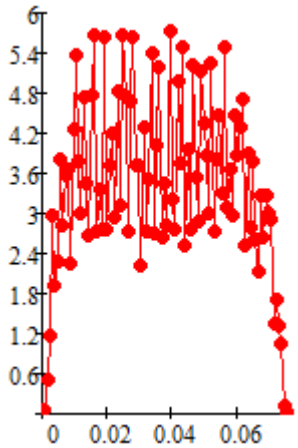
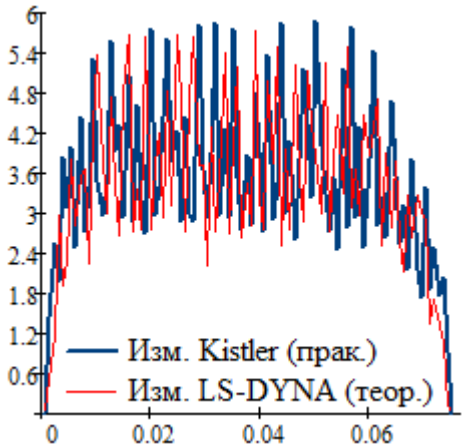
Согласно проведенных теоретических исследований по сверлению отверстий на фольгированном стеклотекстолите получены и построены графические зависимости осевой составляющей силы резания P_0 на режимах резания n = 36 000 об/мин; S = 1100, 1300, 1500, 1700, 1900, 2100, 2300, 2500, 2700 мм/мин. С другой стороны, проведены запланированные экспериментальные исследования процесса сверления на всех ранее определенных режимах резания, включая режимы, симуляция которых проводилась методами конечно-элементного моделирования в пакетах ANSYS и LS-DYNA.

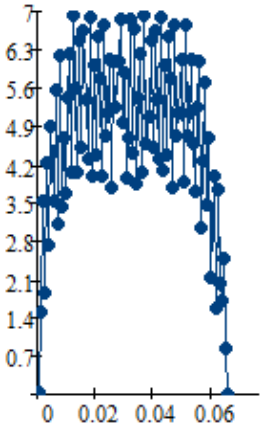
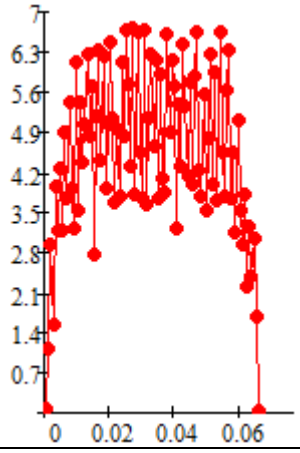
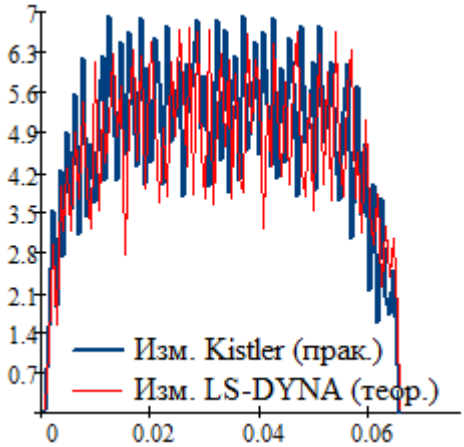
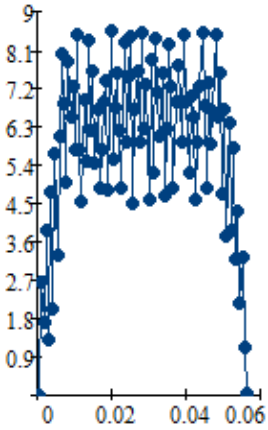
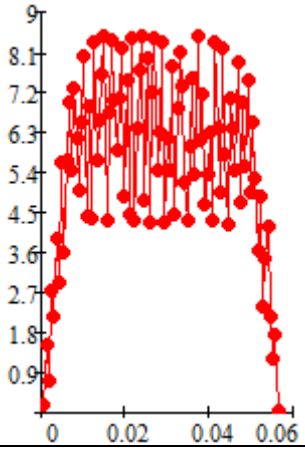
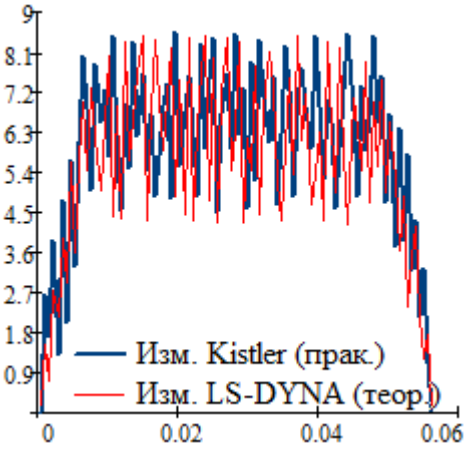
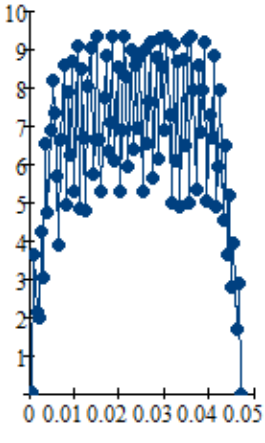
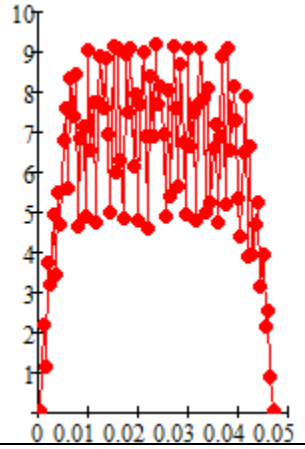
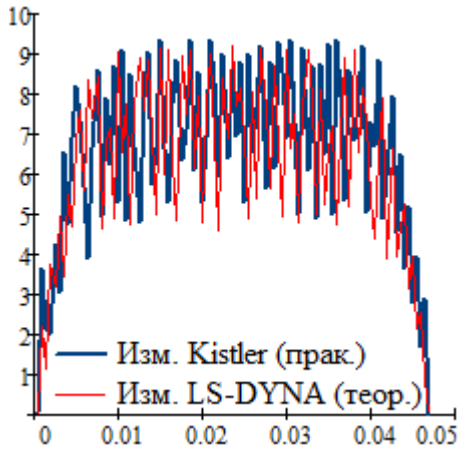
Для определения схождения теоретических и практических исследований необходимо провести анализ выходных данных с совмещением графики осевой составляющей силы резания P_0 и нахождением средних значений.

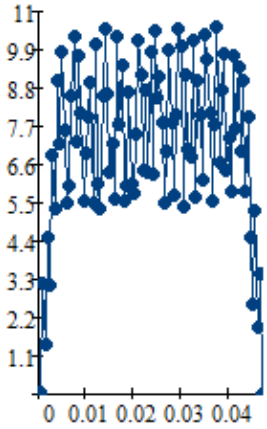
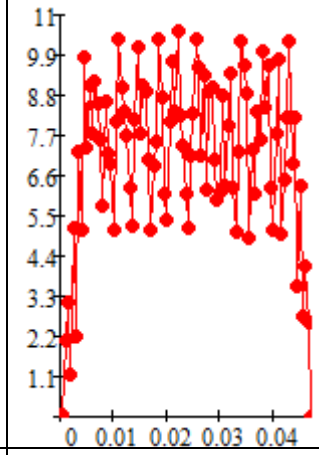
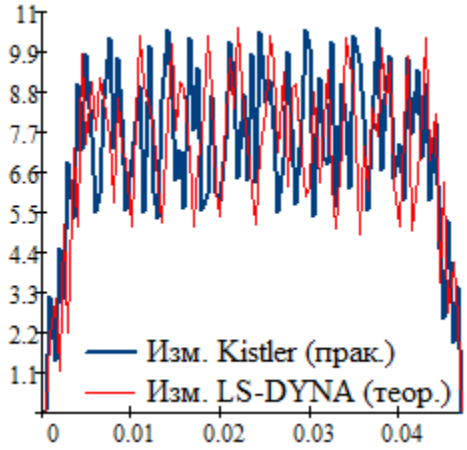
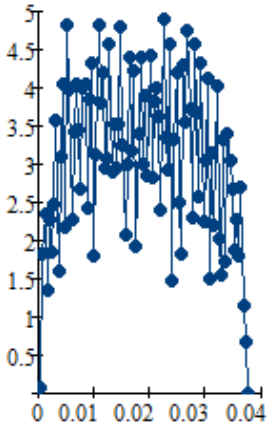
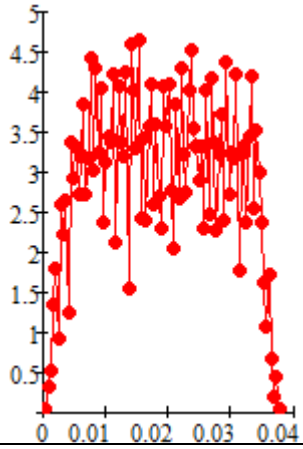
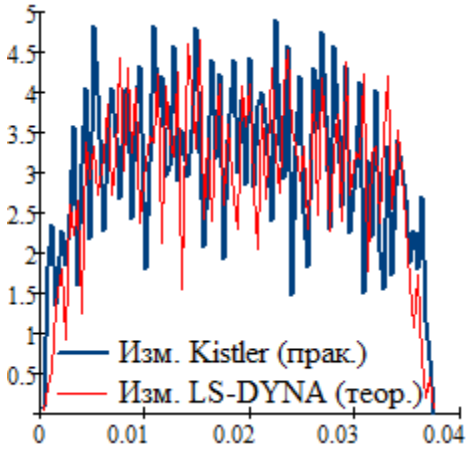
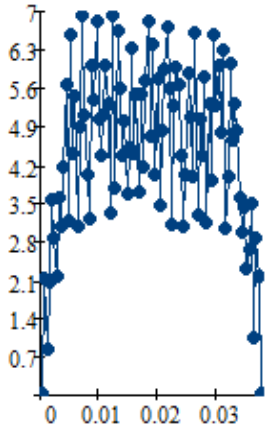
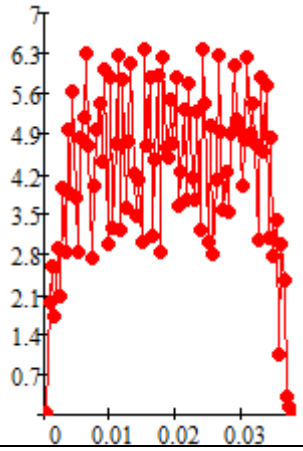
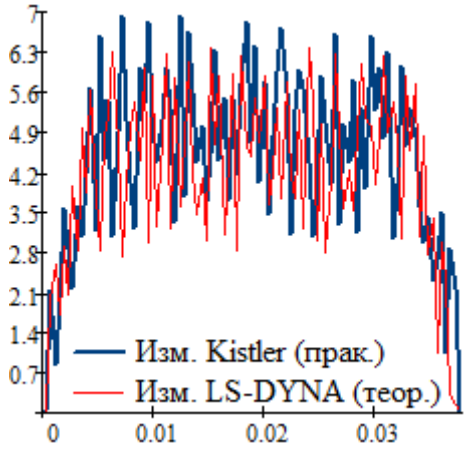
Для построения графических зависимостей по P_0 использован пакет MathCAD. В табл. 14 сведены графические зависимости осевой составляющей силы резания от времени для материала Isola при использовании твердосплавных сверл Ø1 мм. Согласно совмещенных выходных данных по P_0 (рис. 2.25–2.29) видим, что структура, форма, характер и предельные значения зависимостей похожи.

Таблица 14

Результаты обработки теоретических и экспериментальных данных

№ п/п	S	Практические измерения (Kistler), $P_0(t)$, Н	Измерения LS-DYNA (мат. моделир.), $P_0(t)$, Н	Сводные данные, $P_0(t)$, Н
1.	S = 1100 мм/мин			
2.	S = 1300 мм/мин			
3.	S = 1500 мм/мин			

№ п/п	S	Практические измерения (Kistler), $P_0(t)$, Н	Измерения LS-DYNA (мат. моделир.), $P_0(t)$, Н	Сводные данные, $P_0(t)$, Н
4.	S = 1700 мм/мин			
5.	S = 1900 мм/мин			
6.	S = 2100 мм/мин			

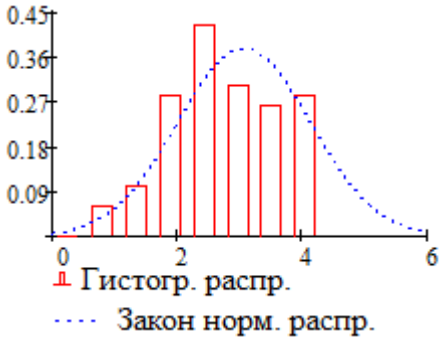
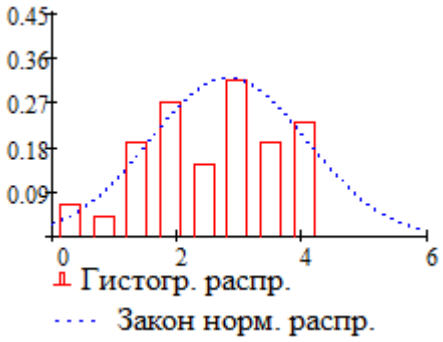
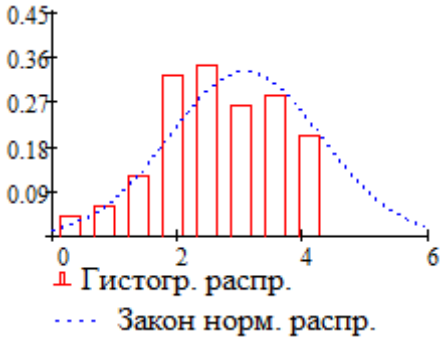
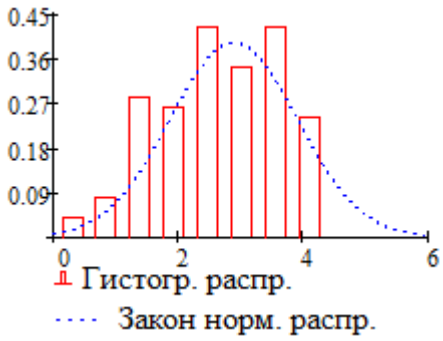
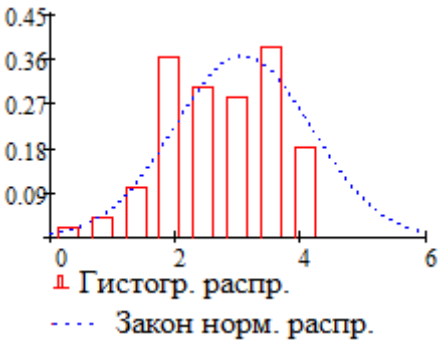
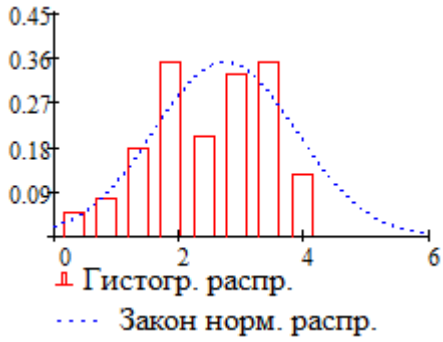
№ п/п	S	Практические измерения (Kistler), $P_0(t)$, Н	Измерения LS-DYNA (мат. моделиров.), $P_0(t)$, Н	Сводные данные, $P_0(t)$, Н
7.	S = 2300 мм/мин			
8.	S = 2500 мм/мин			
9.	S = 2700 мм/мин			

Установление схождения теоретических и экспериментальных данных проведено с помощью аппарата математической статистики. Проверка принадлежности двух выборок одной и той же генеральной совокупности может быть проведена с помощью параметрических и непараметрических критериев. Параметрические критерии базируются на нормальном типе распределения генеральной совокупности или используют параметры этой совокупности. Непараметрические критерии не опираются на тип распределения генеральной совокупности и не используют параметры этой совокупности.

Таким образом, для выбора критерия проверки гипотез необходимо предварительно определить характер распределения генеральных совокупностей. Для этого, с помощью пакета MathCAD построим гистограммы распределений для ранее обозначенного материала и режимов сверления и сравним их с нормальным законом распределения. При построении графических зависимостей использованы следующие встроенные статистические функции программы mean(x) – математическое ожидание, stdev(x) – среднеквадратическое отклонение, dnorm (x, m, S) – плотность вероятности для нормального распределения, hist (int, x) – функция для построения группировочного статистического ряда, где int – набор точек, расположенных по возрастанию и определяющих последовательность интервалов в гистограмме. В табл. 15 представлены графики нормального закона распределения и фактические гистограммы распределения на режимах резания n = 36 000 об/мин; S = 1100, 1300, 1500 мм/мин.

Таблица 15

Построение гистограмм распределений

№ п/п	S	Практические измерения (Kistler), $P_0(t)$, Н	Измерения LS-DYNA (мат. моделирование), $P_0(t)$, Н
1.	S = 1100 мм/мин		
2.	S = 1300 мм/мин		
3.	S = 1500 мм/мин		

Таким образом, очевидно, что характер распределения генеральных совокупностей имеет отличный от нормального закон распределения. Для проведения дальнейшей проверки принадлежности двух выборок одной и той же генеральной совокупности используем одну из наиболее мощных непараметрических гипотез – критерий знаков. Суть гипотезы заключается в сравнении генеральной совокупности, если принять, что выборки, полученные в результате определения осевой составляющей силы резания сопоставимы. Таким образом, если гипотеза истина,

то вероятность положительной разности должна быть равна вероятности отрицательной разнице. Для проверки этой гипотезы применяется критерий K^+, который определяет число положительных разностей d. Расчет разностей в выборках приведен в табл.16. Для наглядности отрицательные разности дополнительно выделены цветом.

Таблица 16

Расчет разностей в выборках

t, сек	Теория	Практ.	di=xi-yi	t, сек	Теория	Практ.	di=xi-yi	t, сек	Теория	Практ.	di=xi-yi
0,001	0,01351	0,01214	0,00137	0,032	3,28979	3,73523	-0,44544	0,063	4,35181	3,96331	0,38850
0,002	1,66626	0,83813	0,82813	0,033	4,21753	2,39148	1,82605	0,064	3,29285	1,96494	1,32791
0,003	0,71274	1,89819	-1,18545	0,034	3,54822	4,38232	-0,8341	0,065	4,47083	3,30505	1,16578
0,004	2,33765	2,83813	-0,50048	0,035	2,87476	2,71606	0,1587	0,066	2,99072	4,43115	-1,44043
0,005	3,06091	2,70081	0,3601	0,036	3,11584	3,25928	-0,14344	0,067	2,33765	2,36511	-0,02746
0,006	2,94287	1,88599	1,05688	0,037	4,35388	3,17993	1,17395	0,068	3,32642	3,17078	0,15564
0,007	3,22266	2,20239	1,02027	0,038	3,87268	4,21355	-0,34087	0,069	2,43835	2,14844	0,28991
0,008	2,89307	1,41907	1,474	0,039	2,99683	1,76379	1,23304	0,07	4,66614	2,34375	2,32239
0,009	2,57874	2,69775	-0,11901	0,04	3,24097	3,22571	0,01526	0,071	3,93982	4,82788	-0,88806
0,01	2,96326	3,07922	-0,11596	0,041	2,74451	3,31421	-0,5697	0,072	3,39355	3,14941	0,24414
0,011	3,74146	2,17993	1,56153	0,042	3,80554	2,37122	1,43432	0,073	3,74756	4,08936	-0,3418
0,012	4,14875	3,76489	0,38386	0,043	4,46167	3,44543	1,01624	0,074	2,07214	2,65808	-0,58594
0,013	2,11987	2,31018	-0,19031	0,044	3,29121	4,20837	-0,91716	0,075	3,54004	3,43225	0,10779
0,014	3,48042	3,26538	0,21504	0,045	3,50342	3,68042	-0,177	0,076	2,95541	2,83606	0,11935
0,015	1,71279	4,26282	-2,55003	0,046	3,10059	4,34854	-1,24795	0,077	3,05176	3,45542	-0,40366
0,016	3,11589	1,82271	1,29318	0,047	2,67334	2,99988	-0,32654	0,078	4,53491	4,35573	0,17918
0,017	2,07922	4,23584	-2,15662	0,048	3,97644	3,58582	0,39062	0,079	2,71301	3,29015	-0,57714
0,018	3,85132	3,35388	0,49744	0,049	2,46069	3,84827	-1,38758	0,08	3,35083	4,06086	-0,71003
0,019	4,67573	2,14026	2,53547	0,05	3,87268	3,73523	0,13745	0,081	1,55334	3,12545	-1,57211
0,02	3,81775	4,53601	-0,71826	0,051	4,29285	4,00793	0,28492	0,082	2,61133	3,61245	-1,00112
0,021	2,64599	3,55835	-0,91236	0,052	1,95923	2,10059	-0,14136	0,083	3,65601	1,97378	1,68223
0,022	2,28882	3,33557	-1,04675	0,053	3,21596	3,24707	-0,03111	0,084	2,60562	3,40572	-0,8001
0,023	3,22876	2,89001	0,33875	0,054	2,20032	2,21863	-0,01831	0,085	4,28772	1,73972	2,548
0,024	2,91748	3,31934	-0,40186	0,055	3,73584	1,95564	1,7802	0,086	2,17896	3,21424	-1,03528
0,025	4,05273	2,29187	1,76086	0,056	4,65601	3,32947	1,32654	0,087	1,60828	1,85442	-0,24614
0,026	2,05273	4,02222	-1,96949	0,057	3,78418	2,82288	0,9613	0,088	2,75781	3,09346	-0,33565
0,027	3,76282	2,47083	1,29199	0,058	2,76074	4,40815	-1,64741	0,089	1,44868	1,41978	0,0289
0,028	4,25251	4,16941	0,0831	0,059	4,18604	2,81575	1,37029	0,09	3,24707	2,22124	1,02583
0,029	3,35693	3,37524	-0,01831	0,06	3,29559	1,95715	1,33844	0,091	2,43225	1,07895	1,3533
0,03	2,10364	2,28577	-0,18213	0,061	2,69547	4,20227	-1,5068	0,092	1,93274	0,14545	1,78729
0,031	3,43628	3,23181	0,20447	0,062	3,45972	2,88391	0,57581	0,093	2,21841	0,44789	1,77052
								0,094	0,02817	0,01012	0,01805

Выдвигается гипотеза:

H_0: $F_i(x)=G_i(x)$

Гипотеза H_0 отвергается, если расчетное значение критерия превышает некоторое критическое значение:

$$F \geq F_{\alpha, m_1, m_2}$$

В теоретической статистике доказано, что для приближенной оценки критериев знака можно использовать распределение Фишера. В этом случае критическое значение гипотезы преобразуется к виду:

$$F = \frac{k^+}{n^* - k^+ + 1}, \qquad (2.18)$$

где K^+ - количество положительных разностей; n* - количество разностей, не равных нулю; α=0,01

$$\frac{k^+}{n^* - k^+ + 1} = 1{,}15909$$

Оценка гипотезы:

$\frac{k^+}{n^* - k^+ + 1} \geq F_{\alpha, m_1, m_2}$ – гипотеза отвергается; $\frac{k^+}{n^* - k^+ + 1} < F_{\alpha, m_1, m_2}$ – гипотеза принимается

По принятому значению вероятности ошибки при уровне значимости α=0,01, а также значениям m_1 и m_2 из таблицы распределения Фишера находим соответствующее значение критерия: F_{α, m_1, m_2} =1,836 [8].

В результате получаем: 1,15909 < 1,836

Таким образом, можно сделать вывод, что выборки, полученные в результате определения осевой составляющей силы резания, принадлежат к одной генеральной совокупности. Результаты статистической обработки по остальным режимам представлены в табл. 17.

Таблица 17

Результаты статистической обработки экспериментальных данных

№ п/п	Режим обработки	$\frac{k^+}{n^* - k^+ + 1}$
1.	n = 36 000 об/мин S = 1100 мм/мин	1,1591
2.	n = 36 000 об/мин S = 1300 мм/мин	1,6389
3.	n = 36 000 об/мин S = 1500 мм/мин	1,0652
4.	n = 36 000 об/мин S = 1700 мм/мин	1,3171
5.	n = 36 000 об/мин S = 1900 мм/мин	1,2619

Окончание табл. 17

№ п/п	Режим обработки	$\frac{k^+}{n^* - k^+ + 1}$
6.	n = 36 000 об/мин S = 2100 мм/мин	1,5
7.	n = 36 000 об/мин S = 2300 мм/мин	0,8627
8.	n = 36 000 об/мин S = 2500 мм/мин	1,1111
9.	n = 36 000 об/мин S = 2700 мм/мин	1,375
Табличное значение		< 1,836

Таким образом, согласно проведенной статистической обработке установлено схождение теоретических и экспериментальных данных на всех режимах обработки. Отсутствие более точной сходимости обусловлено отсутствием эпоксидных слоев компаунда для межслойного скрепления композиционного материала при моделировании заготовки в LS-DYNA (слои стеклоткани были просто склеены – команда vglue – для сокращения времени расчетов), сложным механизмом разрушения эпоксидной матрицы и межфазном расслоении ткани.

Тем не менее, сходимость теоретических и экспериментальных данных очевидна и находится в пределах погрешности построения конечно-элементных моделей и проведения экспериментальных исследований. Считаем модель годной для дальнейшего использования при проведении теоретических исследований резания композиционного стеклотекстолита.

2.3.2 Сопрягаемость модели сверления с имеющимися решениями

В качестве имеющихся решений задачи сверления композиционных материалов, схожих по структуре и строению со стеклонаполненным слоистым текстолитом взяты зависимости М. Фернандес, К. Кука [124, 125]; И. Рахматуллы, М.К. Шунмугама [164, 165, 166]; К.К. Цао, Х. Хоченга [180, 181, 182] и Р. Ананда,

К. Патры [110]. Общий вид зависимостей осевой составляющей силы резания от подачи представлен на рис. 2.22.

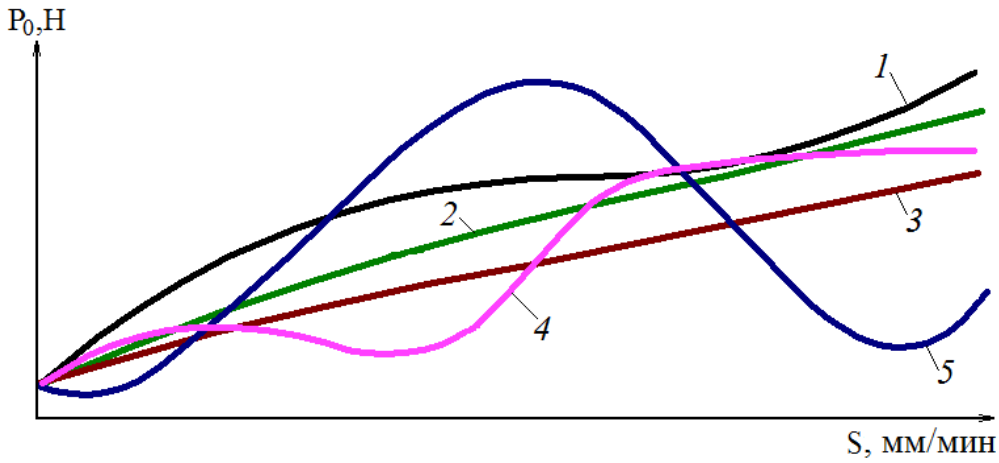


Рис. 2.22 Зависимости осевой составляющей силы резания от подачи. Общий вид аппроксимационных кривых
1 – М. Фернандес, К.Кук; *2* – И. Рахматулла, М.К. Шунмугам; *3* – К.К. Цао, Х. Хоченг; *4* – Р. Ананд, К. Патра; *5* – разработанная модель

Необходимо отметить, что в работах [110, 124, 125, 180, 181, 182] производится обработка и дальнейший анализ осевой составляющей силы резания для пластика, армированного углеродным волокном (CFRP carbon fiber reinforced plastic) разной толщины и распределения филаментов материала, инструментом разной геометрии и диаметра на разных режимах резания (в т.ч. подачах). Сводный график представлен только для оценки характера общей зависимости осевой составляющей силы резания от подачи.

Видим, что в уже разработанных моделях сверления композиционного материала имеет место постепенное нелинейное увеличение осевой составляющей силы резания при увеличении подачи. В модели (4) Р. Ананда, К. Патры имеет место некоторое уменьшение P_0 в середине интервала подач, а затем резкое увеличение величины P_0. При сопоставлении данных разработанной математической модели с имеющимися аппроксимационными кривыми очевидно, что ни одна из ранее разработанных моделей сверления композиционного материала не годится для обработки стеклотекстолита.

2.4 Анализ результатов

Таким образом, решена задача конечно-элементного моделирования процесса сверления стеклотекстолита средствами ANSYS Workbench, LS-DYNA. Разработанная модель позволяет определять результирующую Fz (для проведения графического построения и дальнейшего анализа). Работоспособность математической модели процесса сверления доказана проведением ряда практических экспериментов с использованием прецизионного динамометра Kistler Mini Dyn 9256C2. Проведен статистический анализ и приведено исследование схождения теоретических и экспериментальных данных. Доказано, что среднее абсолютное отклонение теоретических и экспериментальных данных составляет не более 12%, что доказывает работоспособность полученной компьютерной имитационной модели.

В качестве критерия оценки влияния технологических и конструктивных параметров согласно математической постановке задачи приняты максимальные значения осевой составляющей силы резания. Согласно проведенным теоретическим исследованиям установлено, что увеличение подачи с S=1600 мм/мин до значений 2000 мм/мин приводит к увеличению осевой составляющей силы резания (с 2,726 Н до 4,932 Н), затем происходит значительное снижение (до 3,304) на одной и той же частоте вращения шпинделя (36000 об/мин). Полученные результаты говорят о наличии области с минимальными нагрузками, оптимальной с технологической точки зрения (минимальное значение P_0 – максимальный ресурс режущего инструмента).

Необходимо отметить, что процесс моделирования методиками конечных элементов оказался достаточно длительным: в среднем расчет одного режима в специальном компьютерном центре занимает порядка 2–3 суток в зависимости от размера ячейки (0,05 мм...0,075 мм). На рис.2.23 представлены время обработки и выходные значения осевой составляющей силы резания для размера конечно-элементной сетки материала 0,05 мм, а на рис. 2.24 – для сетки 0,075 мм.

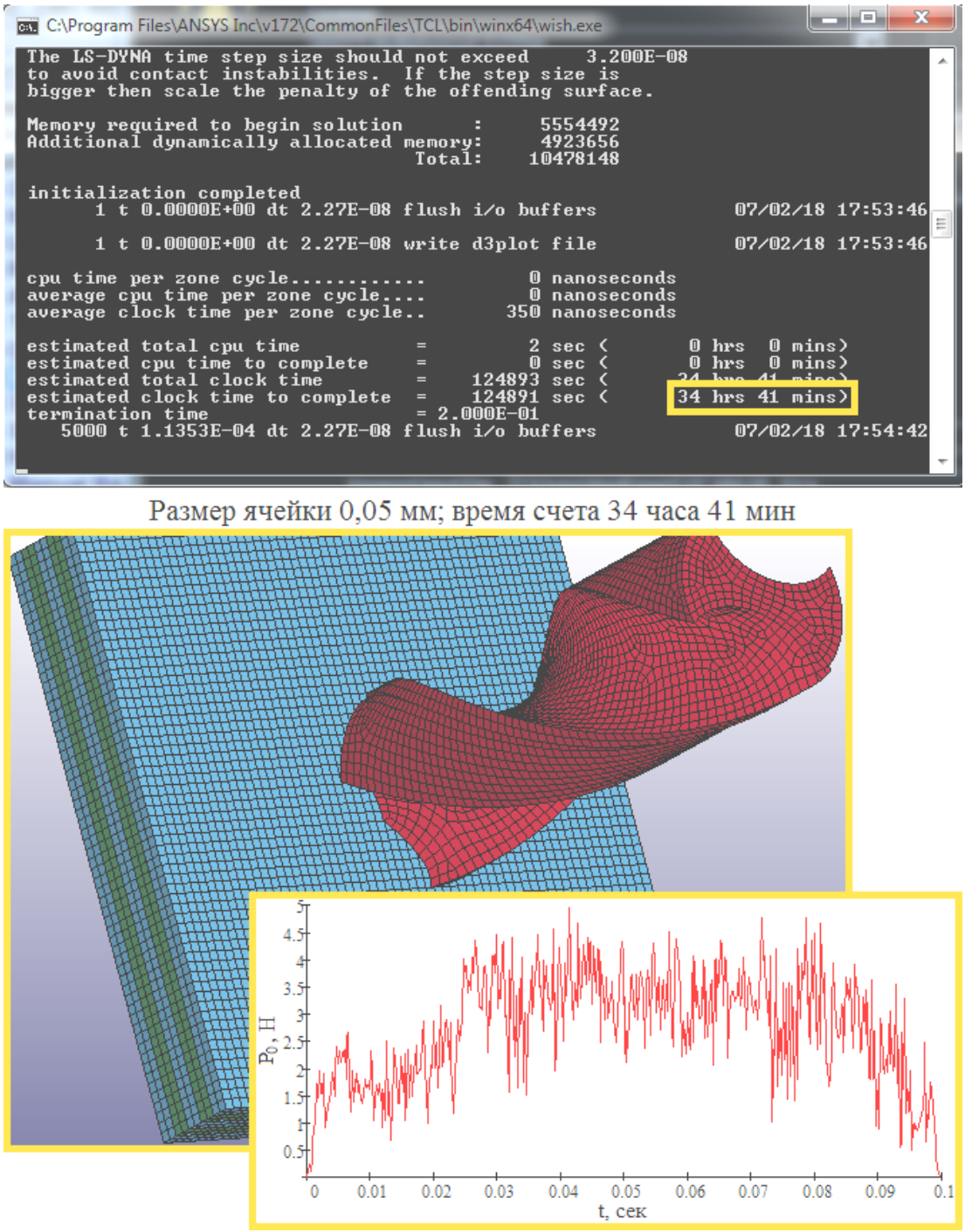
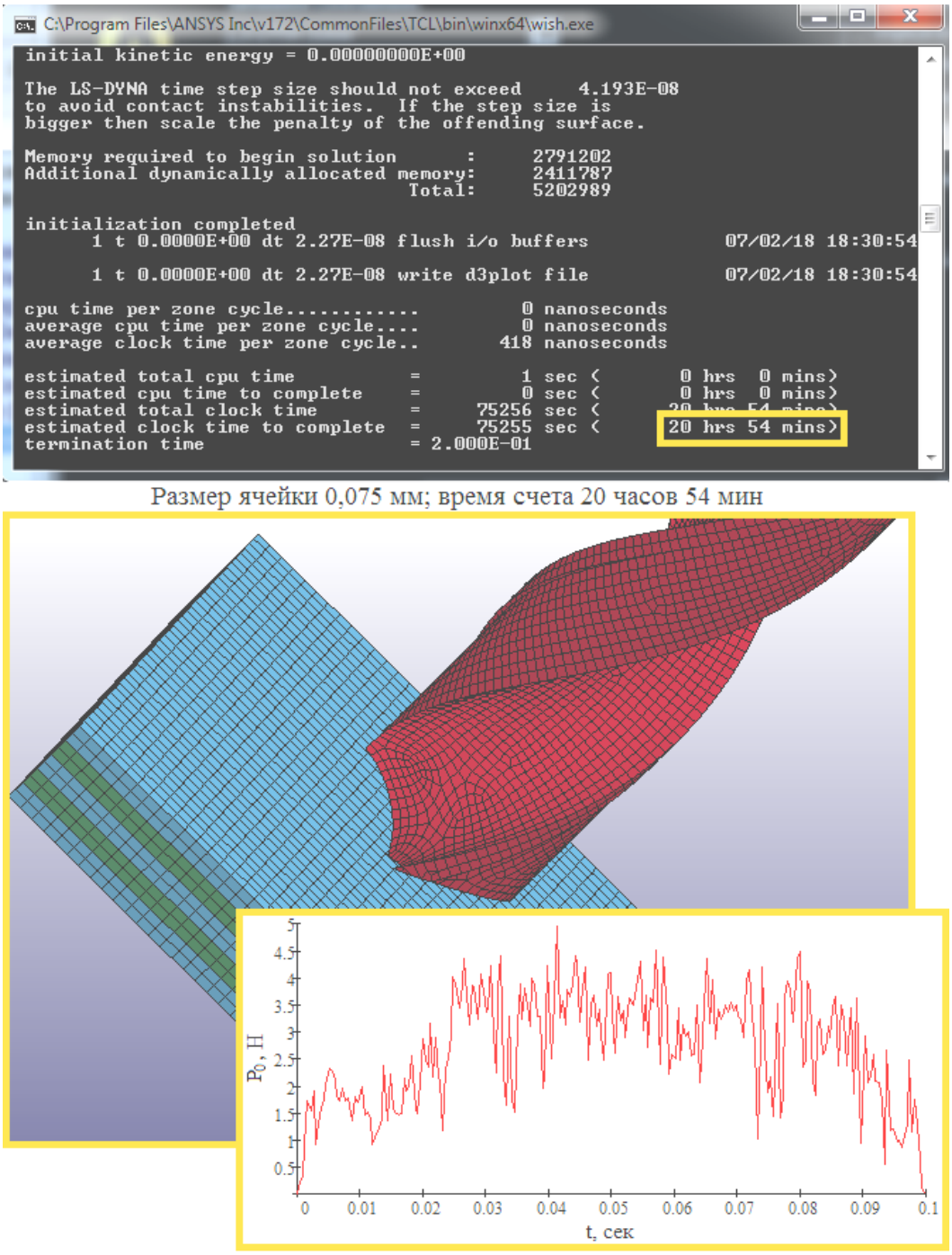


Рис. 2.23 Время обработки и выходные данные осевой составляющей силы резания для сетки материала 0,05 мм



Размер ячейки 0,075 мм; время счета 20 часов 54 мин

Рис. 2.24 Время обработки и выходные данные осевой составляющей силы резания для сетки материала 0,075 мм

Для дальнейшего анализа необходимо существенно большее количество экспериментов на разных режимах резания, с использованием всей номенклатуры базовых материалов и режущего инструмента. Поэтому принято решение увеличить размер ячеек сетки для сокращения время расчетов с проведением дополнительного анализа адекватности полученных результатов.

2.5 Результаты и выводы.

Таким образом, предварительно проведено описание расчетной схемы сверления отверстий в композиционном слоистом материале и приведена математическая постановка задачи определения осевой составляющей силы резания.

При проработке теоретического раздела проведено моделирование эксперимента в системах ANSYS-LS-DYNA. Предварительно поведено 3D моделирование режущего инструмента. Задание геометрических параметров режущего инструмента выполнено согласно главе 2, п.п. 2.6. Предварительно выполнено создание нового материала заготовки, введены упруго-пластические характеристики: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность и пр.

Выбор числа конечных элементов сетки выполнен исходя из экономии времени и приемлемой визуализации процесса сверления в пост-процессоре: 4500 – для сверла и 36000 для материала. Для уменьшения числа конечных элементов и сокращения времени вычислений модель сверла в ANSYS задана в форме оболочки.

Выходные данные обработаны пост-процессором, с помощью предварительно разработанной программы Substr.exe. Сформированы файлы для дальнейшей обработки в MathCAD и нахождения усредненных значений осевой составляющей силы резания. Полностью выполнено моделирование процесса сверления для обработки материала Isola спиральными сверлами Ø1 мм, на режимах: n=36000 об./мин; S= 1100; 1600; 2000; 2400; 2700 мм/мин. Усредненные значения осевой составляющей силы резания на соответствующих подачах составляют: 2,726; 4,049; 4,932; 3,304; 3,539 Н соответственно. Видим, что с увеличением подачи осевая составляющая силы резания сначала постепенно возрастает (до подач 2000 мм/мин), а потом убывает (при значении подачи 2400 мм/мин), затем снова начинает возрастать.

Кроме того, проведена практическая проверка адекватности конечно-элементной модели с использованием непосредственного замера осевой составляющей силы P_0 на динамометрической установке при тех же режимах резания на

действующем оборудовании. Обрабатываемый базовый материал Isola производства Германии (механические свойства материала Isola использованы при разработке модели). Проведена статистическая проверка схождения теоретических и практических результатов. Установлено, что выборки принадлежат одной и той же генеральной совокупности. Среднее абсолютное отклонение теоретических и экспериментальных данных составило не более 12%. Таким образом, сходимость очевидна и находится в пределах погрешности построения конечно-элементных моделей и проведения экспериментальных исследований, поэтому принимаем модель годной для дальнейшего использования при проведении теоретических исследований резания композиционного стеклотекстолита.

Дополнительно проведен анализ сопрягаемости модели сверления с имеющимися решениями. Установлено, что основные работы по сверлению композиционных материалов посвящены обработке пластиков, армированных углеродным волокном (CFRP carbon fiber reinforced plastic) разной толщины и распределения филаментов, схожих по строению со стеклонаполненным слоистым текстолитом, но имеющим другие механические свойства. Однако при сопоставлении данных разработанной математической модели с имеющимися аппроксимационными кривыми ни одна из ранее разработанных моделей сверления композиционного материала не годится для обработки стеклотекстолита.

Следует подчеркнуть, что моделирование процесса сверления фольгированного стеклотекстолита методиками конечных элементов оказалось достаточно длительным, а для более подробного анализа требуется гораздо большее число экспериментов с уменьшением шага по подаче, на разных оборотах шпинделя, с использованием сверл разного диаметра и различных материалах. Поэтому принято решение увеличить размер ячеек сетки для сокращения время расчетов с проведением дополнительного анализа адекватности полученных результатов. Дальнейшие исследования процесса сверления печатных плат подробно описаны в главе 3.

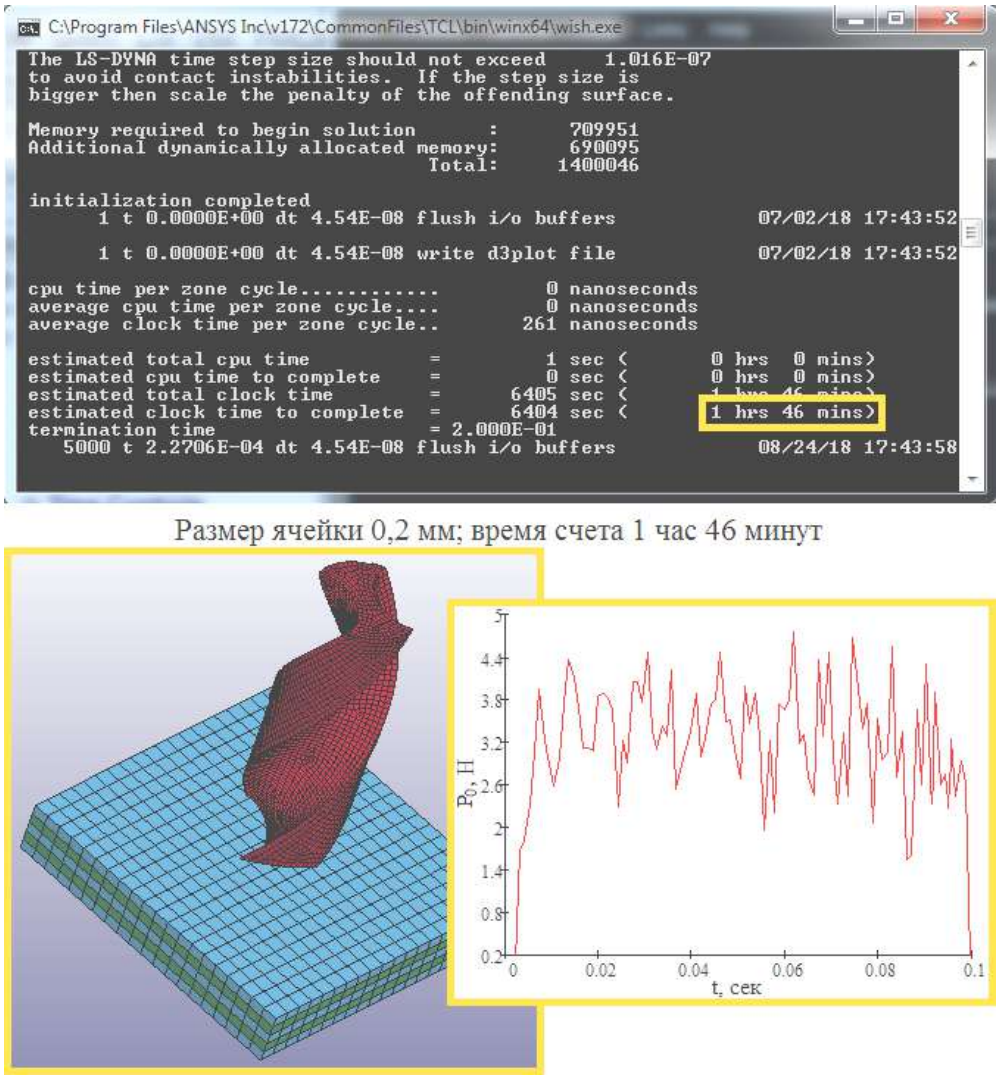
Глава 3 Теоретические исследования процесса сверления печатных плат

Согласно ранее определенной задаче конечно-элементного моделирования процесса сверления стеклотекстолита средствами ANSYS Workbench, LS-DYNA разработана и реализована 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. В качестве критерия оценки использована непараметрическая гипотеза критерия знаков. Установлено, что выборки, полученные в результате определения осевой составляющей силы резания, сопоставимы и принадлежат одной генеральной совокупности.

С другой стороны, необходимо подчеркнуть, что процесс моделирования конечно-элементным методом достаточно длительный: в среднем расчет одного режима в специальном компьютерном центре занимает порядка 2–3 суток в зависимости от размера ячейки (0,05 мм...0,075 мм). В этой связи принято решение по увеличению сетки конечных элементов до 0,2 мм.

3.1 Адаптация компьютерной имитационной модели

Применительно к поставленной задаче откорректирован командный файл входных данных. Проведено моделирование сверления стеклотекстолита на режимах резания: n = 36 000 об/мин; S = 1100; 1600; 2000; 2400; 2700 мм/мин. Необходимо отметить, что в данном варианте время расчета каждого режима в решателе LS-DYNA сократилось в среднем до 1,5 часов (рис.3.1). Для оценки адекватности выходных данных ниже приведена статистическая оценка работоспособности адаптированной модели.



Размер ячейки 0,2 мм; время счета 1 час 46 минут

Рис. 3.1 Время обработки и выходные данные осевой составляющей силы резания для сетки материала 0,2 мм

На рис. 3.2…3.6 приведены совмещенные графики осевой составляющей силы резания для сетки КЭ размером 0,05 и 0,2 мм соответственно.

Для построения графических зависимостей по P_0 использован пакет MathCAD. Графические зависимости осевой составляющей силы резания P_0 от времени построены для материала Isola при использовании сверл Ø1 мм.

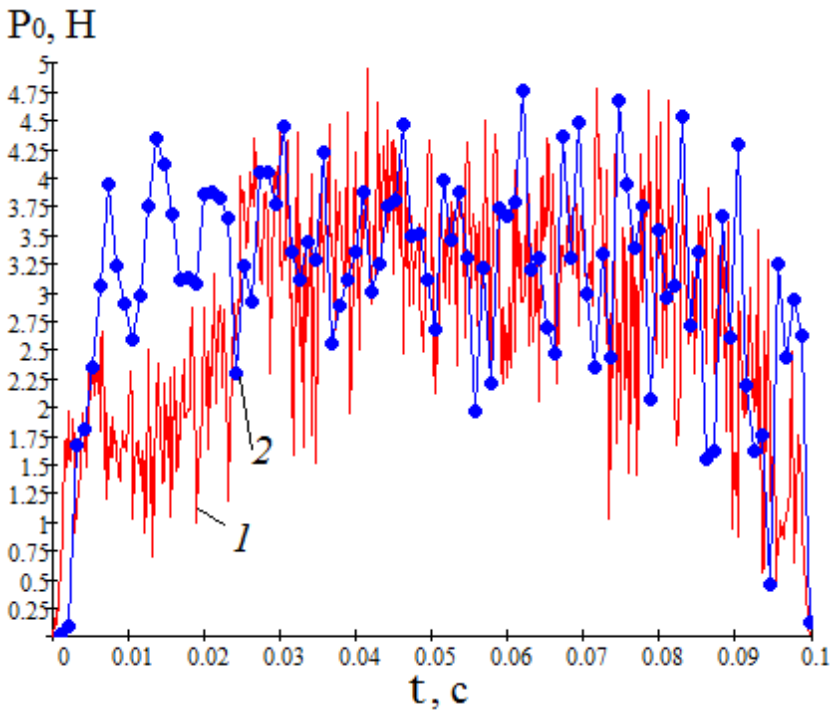


Рис. 3.2 P_0 на режимах n=36000 об/мин, S=1100 мм/мин
1 – размер сетки КЭ 0,05 мм; *2* – размер сетки КЭ 0,2 мм

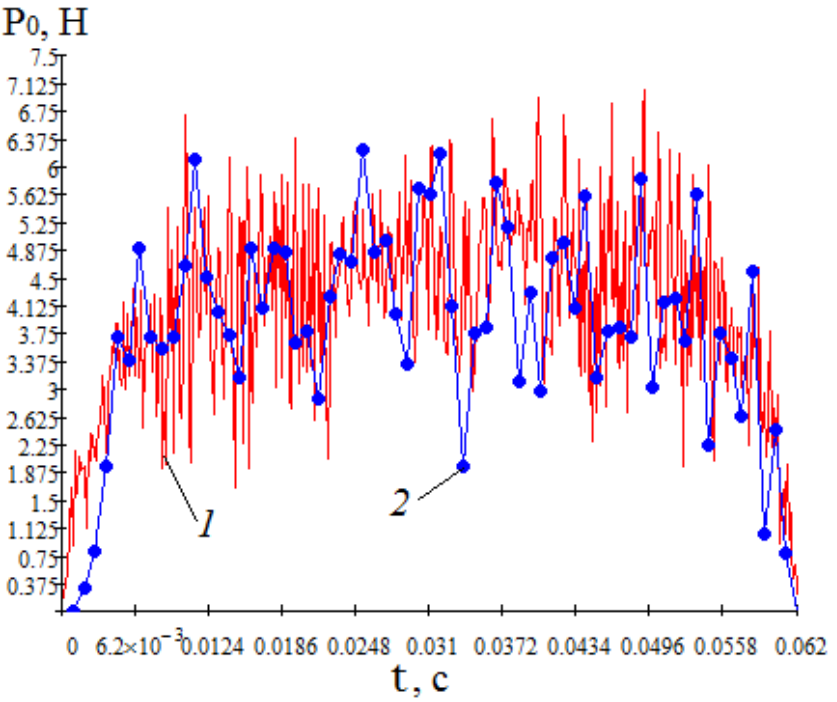


Рис. 3.3 P_0 на режимах n=36000 об/мин, S=1600 мм/мин
1 – размер сетки КЭ 0,05 мм; *2* – размер сетки КЭ 0,2 мм

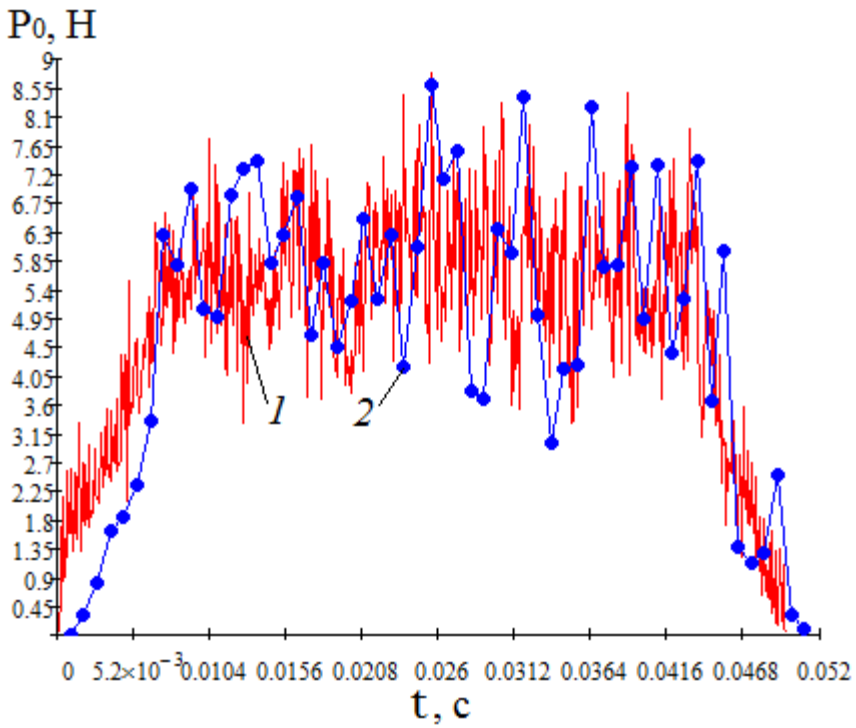


Рис. 3.4 P_0 на режимах n=36000 об/мин, S=2000 мм/мин
1 – размер сетки КЭ 0,05 мм; *2* – размер сетки КЭ 0,2 мм

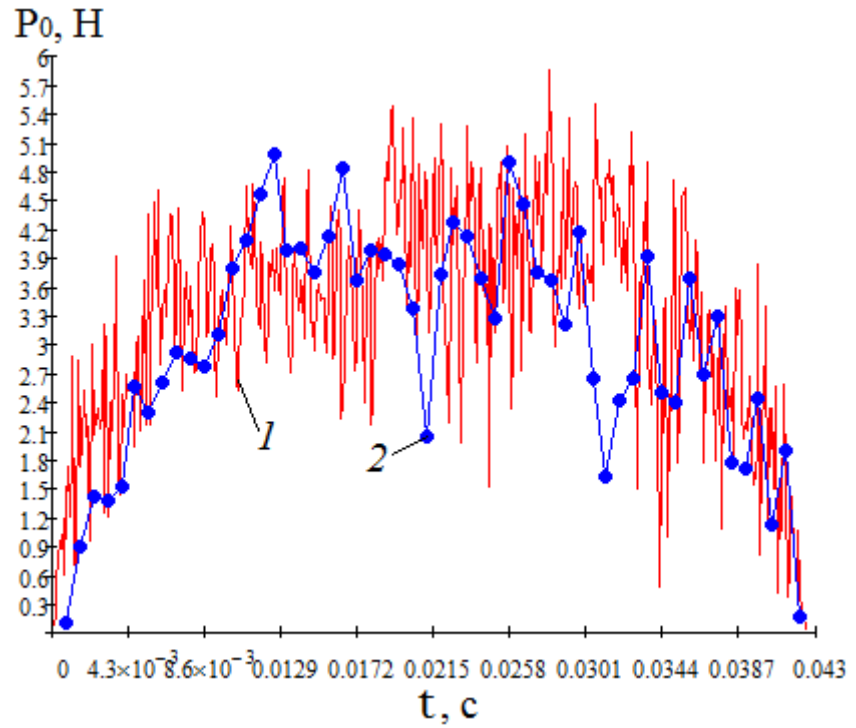


Рис. 3.5 P_0 на режимах n=36000 об/мин, S=2400 мм/мин
1 – размер сетки КЭ 0,05 мм; *2* – размер сетки КЭ 0,2 мм

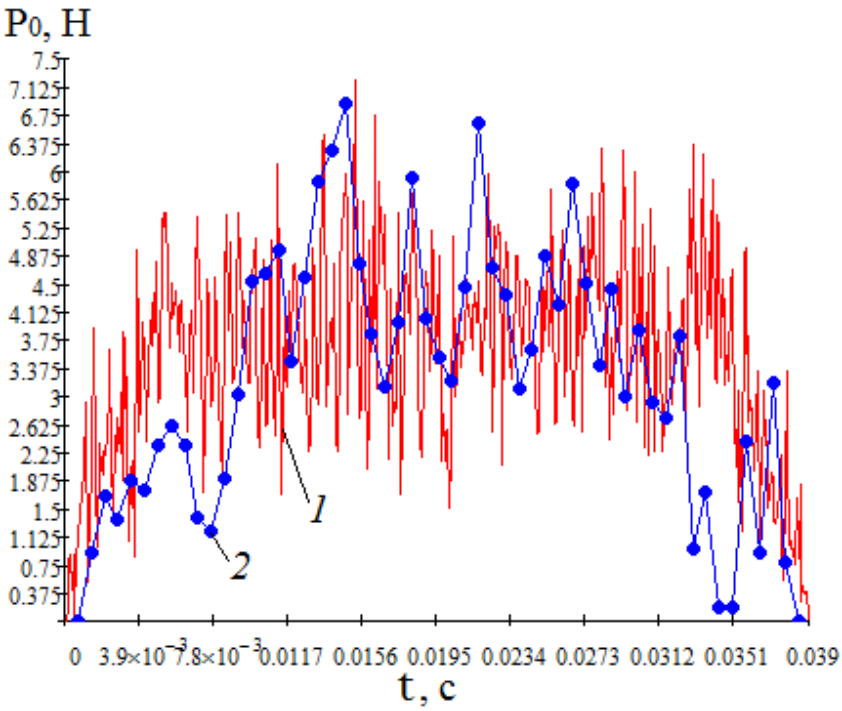


Рис. 3.6 P_0 на режимах n=36000 об/мин, S=2700 мм/мин
1 – размер сетки КЭ 0,05 мм; *2* – размер сетки КЭ 0,2 мм

Согласно совмещенных выходных данных осевой составляющей силы резания P_0 (рис. 3.2…3.5) видим, что структура, форма, характер и предельные значения по P_0 графиков похожи. Для проведения дальнейшего анализа с помощью функции mean(x) найдены усредненные значения осевой составляющей силы резания, рис.3.7.

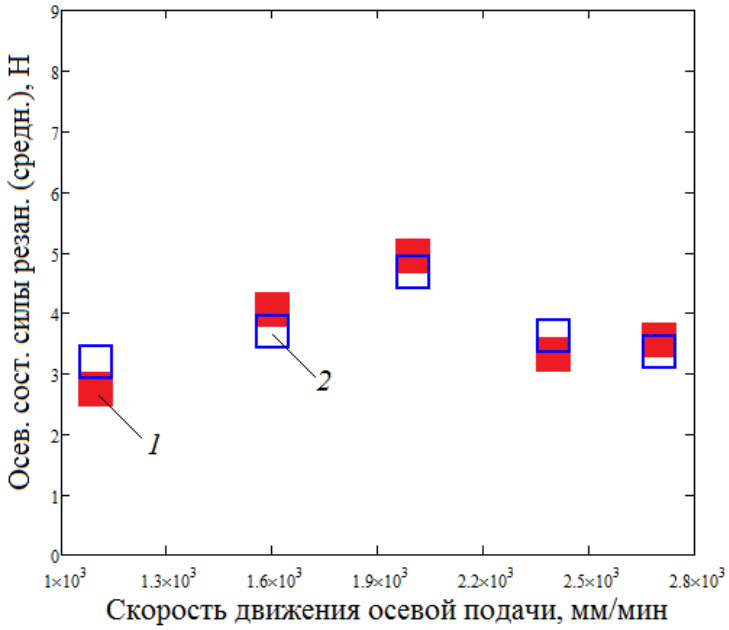


Рис. 3.7 Сравнение усредненных значений P_0, Н
1 – размер сетки КЭ 0,05 мм; *2* – размер сетки КЭ 0,2 мм

Результирующие значения усредненных данных, средние отклонения и среднее абсолютное отклонение теоретических и экспериментальных данных представлены в табл. 20.

Таблица 20

Сравнение усредненных данных

№	Число об. шпин., об/мин	Подача, мм/мин	Осевая составляющая силы резания, Н		
			Размер сетки 0,05 мм	Размер сетки 0,2 мм	% отклон.
1.	36000	1100	2,726	3,313	9,720
2.		1600	4,049	3,521	6,975
3.		2000	4,932	4,522	4,340
4.		2400	3,304	3,657	4,342
5.		2700	3,539	3,312	3,313

Таким образом, среднее абсолютное отклонение данных, полученных в результате моделирования процесса сверления с сеткой КЭ 0,05–0.2 мм составляет не более 10%. Очевидно, что наличие ошибок обусловлено увеличением сетки КЭ и уменьшением количества конечных элементов в 4 раза. Тем не менее, сходимость данных очевидна и находится в пределах погрешности построения конечно-элементных моделей. Для дальнейшего анализа проведена статистическая оценка работоспособности адаптированной модели для выше описанных режимов резания.

3.2 Статистическая оценка работоспособности адаптированной модели

В главе 2 с использованием непараметрической гипотезы критерия знаков проведен подробный статистический анализ схождения теоретических и экспериментальных данных.

Основной сложностью при применении данного критерия выступает неоднородность выборок, т.е. различное количество экспериментальных точек-дискрет на одном временном интервале. Для применения данного критерия необходимо предварительно сопоставить количество измерений и временные интервалы для выходных данных с размером конечно-элементной сетки 0,05 мм и 0,2 мм соответственно. Для реализации однородности выборок была разработана программа MatrixString.exe, которая позволяет выполнять обработку массива данных и компоновать каждое четвертое значение выходной величины (рис.3.8).

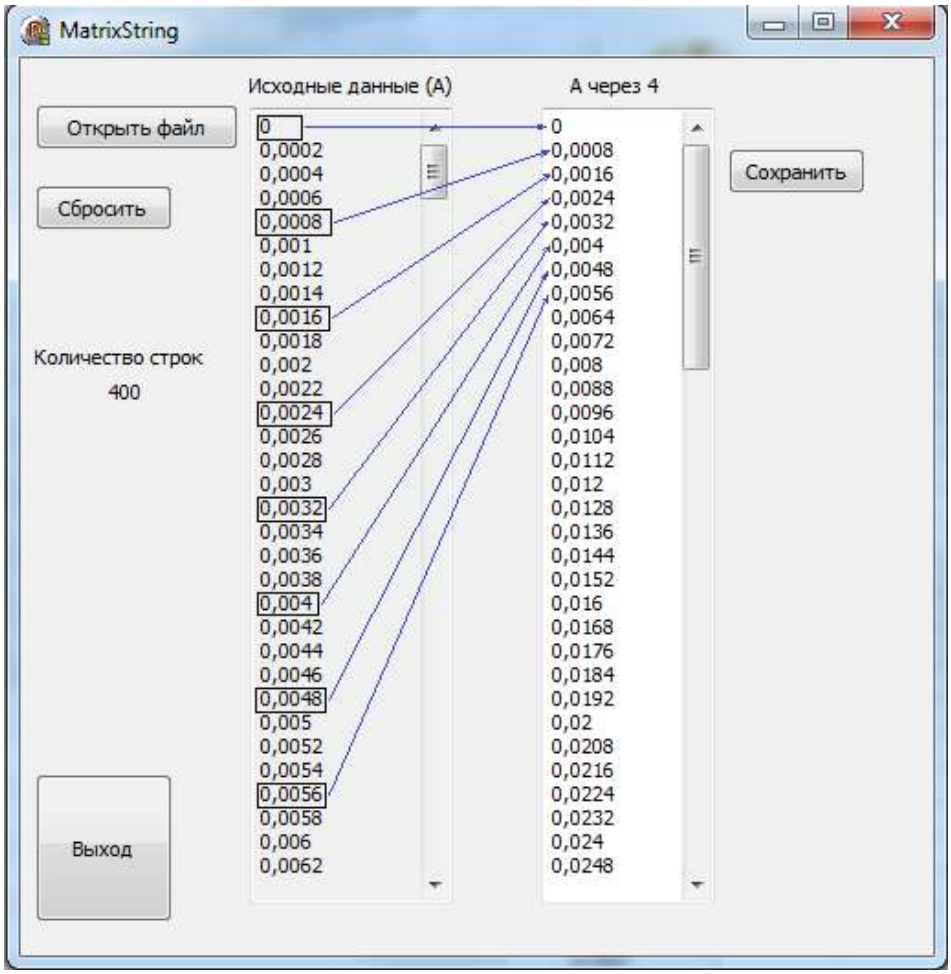


Рис. 3.8 Работа программы MatrixString по обработке массива данных

Таким образом, из 400 точек значений осевой составляющей силы резания при конечно-элементной сетке размером 0,05 получим 100 точек, аналогично КЭ сетке 0,2 мм, рис.3.8.

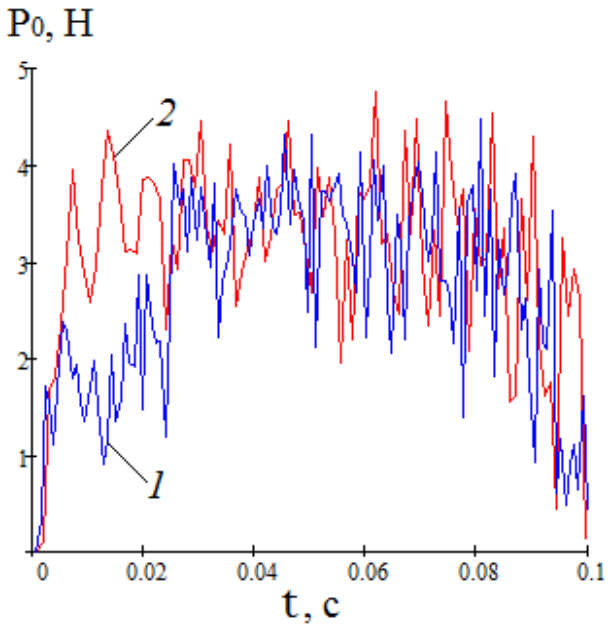


Рис. 3.8 Осевая составляющая силы резания
1 – размер сетки КЭ 0,05 мм; *2* – размер сетки КЭ 0,2 мм

Остальные выкладки статистической обработки проведены согласно главы 2, результаты обработки представлены в табл. 21.

Таблица 21

Результаты статистической обработки данных

№ п/п	Режим обработки	$\frac{k^+}{n^* - k^+ + 1}$
1.	n = 36 000 об/мин S = 1100 мм/мин	1,4215
2.	n = 36 000 об/мин S = 1600 мм/мин	1,1254
3.	n = 36 000 об/мин S = 2000 мм/мин	1,3481
4.	n = 36 000 об/мин S = 2400 мм/мин	1,2576
5.	n = 36 000 об/мин S = 2700 мм/мин	0,9328
Табличное значение		< 1,836

Таким образом, согласно проведенной статистической обработке установлено схождение теоретических данных на всех режимах обработки для компьютерной имитационной модели с разным количеством конечных элементов сетки, а увеличение размера ячеек сетки для сокращения время расчетов считаем прием-

лемым. Рассматриваемые выборки статистически принадлежат к одной генеральной совокупности.

3.3 Определение механических свойств базовых материалов

Как было указано выше, стеклотекстолит представляет собой листовой композиционный слоистый пластик, изготовленный на основе стеклянной ткани и полимерного связующего. 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 высокому сроку службы [116].

Применительно к задаче теоретического исследования процесса сверления печатных плат, основной проблемой выступает отсутствие данных по механическим свойствам исследуемых материалов. Так, согласно нормативной документации на материал известны только: интервал рабочих температур, удельное объемное электрическое сопротивление, тангенс угла диэлектрических потерь, сопротивление изоляции, пробивное напряжение и пр. электрические характеристики. Из механических свойств известна только плотность.

Поэтому на базе лаборатории «Сопротивления материалов» Южно-Уральского государственного университета проделан ряд практических работ по определению модуля Юнга и коэффициента Пуассона – данных, необходимых для формирования командного файла при исследовании процесса сверления, поскольку коэффициент Пуассона в совокупности с модулем Юнга являются характеристикой упругих свойств материала.

Предварительно, согласно требованиям ГОСТ 25.601-80 «Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (компо-

зитов)» [11] подготовлены образцы по типу черт. 4 для композиционных материалов с неоднонаправленной арматурой (рис. 3.9).



Рис. 3.9. Внешний вид образцов для механических испытаний

В общей сложности подготовлено 20 образцов – по 5 образцов материала FR-4 СФ-2, производства «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова и FR-4 GEM производства «Shanghai Global Electronic», КНР по основе и утку соответственно. Испытания проводили на разрывной машине Instron 5882 производства США со стандартным набором захватов. Внешний вид оборудования представлен на рис. 3.10.

Измерения модуля Юнга проводились со скорость движения захвата 10 мм/мин и использованием стандартного контактного навесного экстензометра (рис.3.10). Необходимо отметить, что измерения проводились как на образцах со слоем медной фольги толщиной 18 мкм так и без нее. Разница в конечных результатах на образцах с фольгой и без не превысила 0,2 %, т.е. находится в пределах погрешности метода измерения, влияние наличия фольги на образцах не существенно.

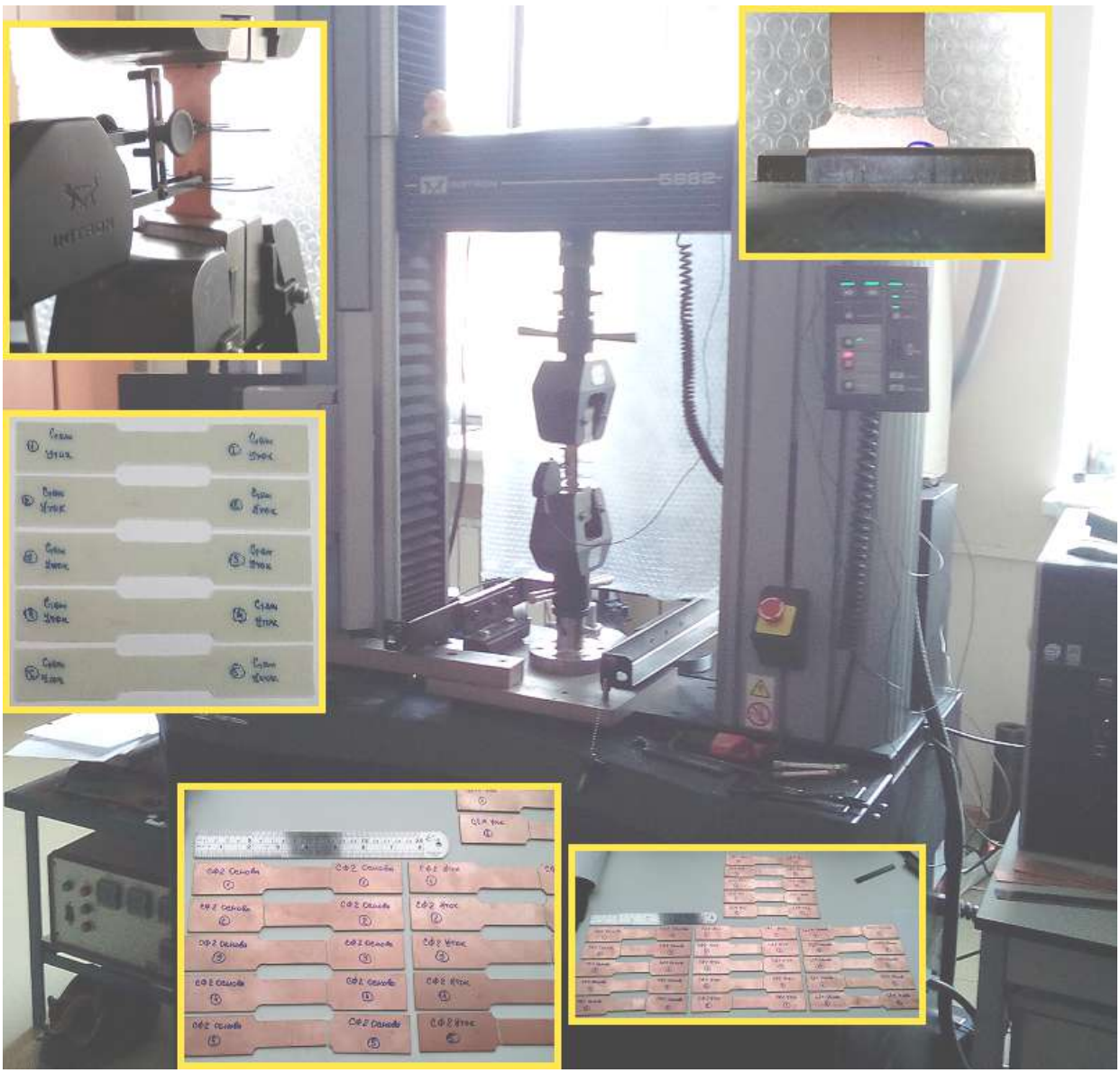


Рис. 3.10 Оборудование для проведения механических испытаний

Пример окна выходных процесса измерения для материала СФ-2 по утку приведено на рис. 3.11. Необходимо отметить, что при проведении измерений коэффициент вариации для всех типов материалов не превысил 3%, т.е. проведенные измерения получились однородными.

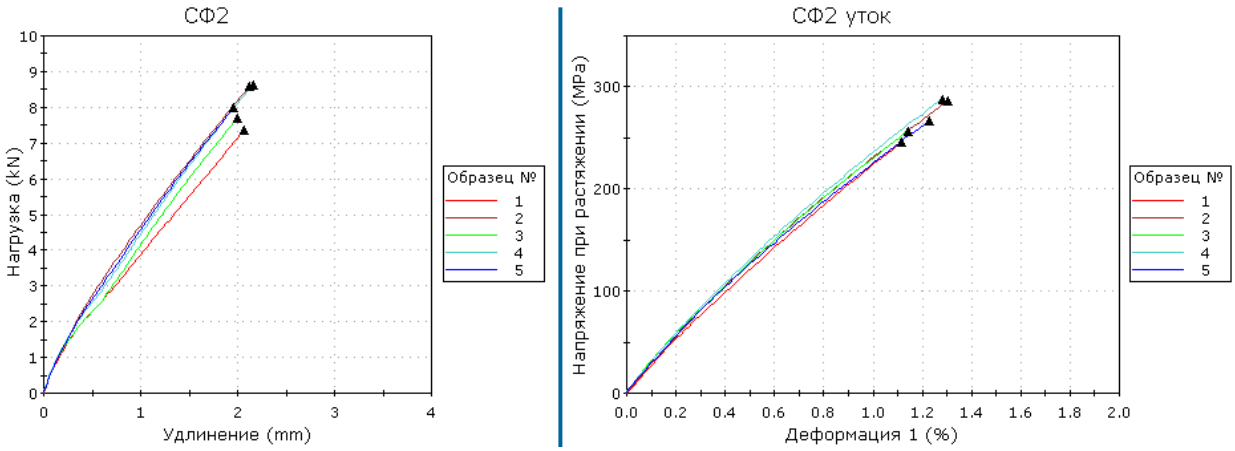


Рис. 3.11 Окно выходных данных процесса измерения коэф. Пуассона

Для измерения коэффициента Пуассона проведена подготовка опытных образцов в количестве 12 штук. Основной сложностью было получение пакета образцов, поскольку в состоянии поставки толщина материала не превышает 1,5 мм, а для проведения эксперимента требуются образцы с толщиной не менее 4 мм. Для получения пакета использован метод склеивания с использованием эпоксидного клея ВК-9 по ОСТ 107.460007.009-02 на основе эпоксидных и полиамидных смол, модифицированных кремнийорганическими соединениями и минеральными наполнителями. Предварительно с поверхности заготовок химическим способом стравлена медная фольга для лучшего закрепления в захватах. Для улучшения адгезии клея к ламинату проведена зачистка поверхности наждачной бумагой. Внешний вид заготовок представлен на рис. 3.12.



Рис. 3.12 Заготовки для сборки пакета

Измерения коэффициента Пуассона проводились со скоростью движения захвата – 10 мм/мин и использованием специального контактного навесного экстензометра (рис.3.13).



Рис. 3.13 Измерение коэффициента Пуассона

Основной сложностью при проведении измерений оказалось правильное укрепление экстензометра и исключение его проскальзывания относительно торца заготовки. Окно выходных процесса измерения приведено на рис. 3.14

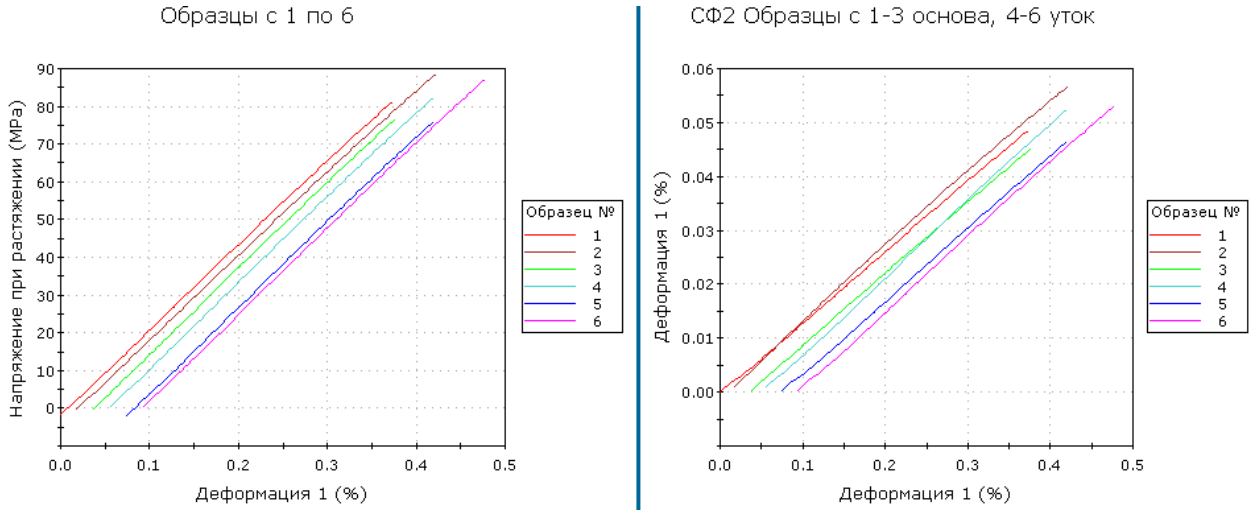


Рис. 3.14. Окно выходных данных процесса измерения коэф. Пуассона

Измерение плотности ламината образцов материала СФ-2 производства «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова и FR-4 и Gem производства «Shanghai Global Electronic», КНР проводились простым взвешиванием и пересчетом через массу и объем образцов. Результаты выполненных замеров сведены в табл. 22. Для наглядности отличия в механических свойствах материалов в таблице дополнительно прописаны свойства материала Isola

Таблица 22

Механические свойства базовых материалов

Материал	Модуль Юнга, МПа		Коэф. Пуассона		Плотн. ламината, г/см^3
	Основа	Уток	Основа	Уток	
СФ-2, Молдова	29000	27000	0,17	0,16	2,1
Isola, Германия	28000	25000	0,19	0,15	1,8
Gem, КНР	26000	21000	0,17	0,15	1,4

Таким образом, согласно проведенных исследований и замеров, получены механические характеристики исходных базовых материалов. Для данных базовых материалов Модуль Юнга находится в пределах 29000...26000 МПа по основе и 27000...21000 МПа по утку, коэффициент Пуассона составляет 0,19...0,17 по основе и 0,16...0,15 по утку соответственно.

На основании полученных результатов очевидно, что наиболее упругим из представленных базовых материалов является стеклотекстолит СФ-2 производства р. Молдова, г. Мариуполь, а наиболее мягким материал Gem производства КНР; Isola имеет средние показатели. На основании полученных данных можно сделать предварительный вывод о характере обрабатываемости материалов: Gem будет иметь лучшие показатели обрабатываемости и меньшие значения осевой составляющей силы резания, СФ-2 – худшие, а Isola займет между ними промежуточное положение.

3.4 Общее описание эксперимента: формулировка задачи

Таким образом, с проведенными выше работами по определению механических характеристик материалов, определены и известны их значения для всей номенклатуры базовых материалов, используемых на предприятии. С другой стороны доказано, что среднее абсолютное отклонение данных, полученных в результате моделирования процесса сверления с сеткой КЭ 0,05-02 мм не превышает 10 % и уменьшение количества конечных элементов в 4 раза дает приемлемое для проведения дальнейших исследований время расчета.

В продолжении работ [95, 96, 97] было принято решение определения осевой составляющей силы резания с помощью ранее разработанной компьютерной имитационной модели согласно алгоритма (рис.3.15).

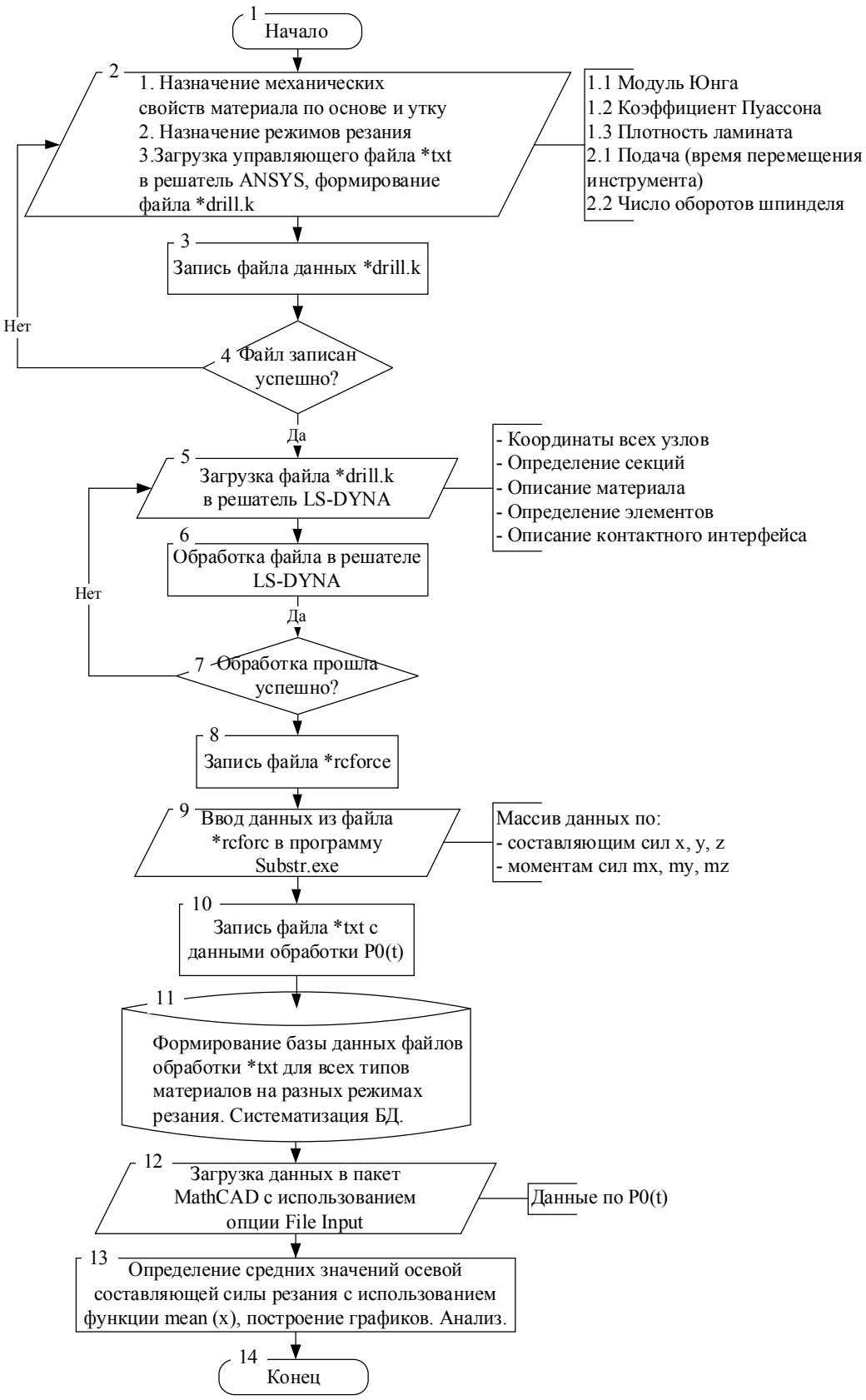


Рис.3.15 Алгоритм теоретического определения P_0

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. В дальнейшем 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 [3]. 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 [69] для сверл Ø1 мм; 43000 об./мин – согласно рекомендаций компании Isola [44] при сверлении стеклотекстолита сверлами Ø1 мм; 48000 об./мин – предмаксимальная частота вращения шпинделя станка СМ-600Ф4 (ввиду ограничения пневмосети предприятия).

Результаты обработки данных для режима n = 36000 об./мин; S = 1100, 1300, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700 мм/мин для сверла ф 1 мм для материала Isola приведены на рис. 3.16. Определе-

ние усредненных значений осевой составляющей силы резания P_0 проведено в пакете MathCAD с использованием встроенной функции mean(x).

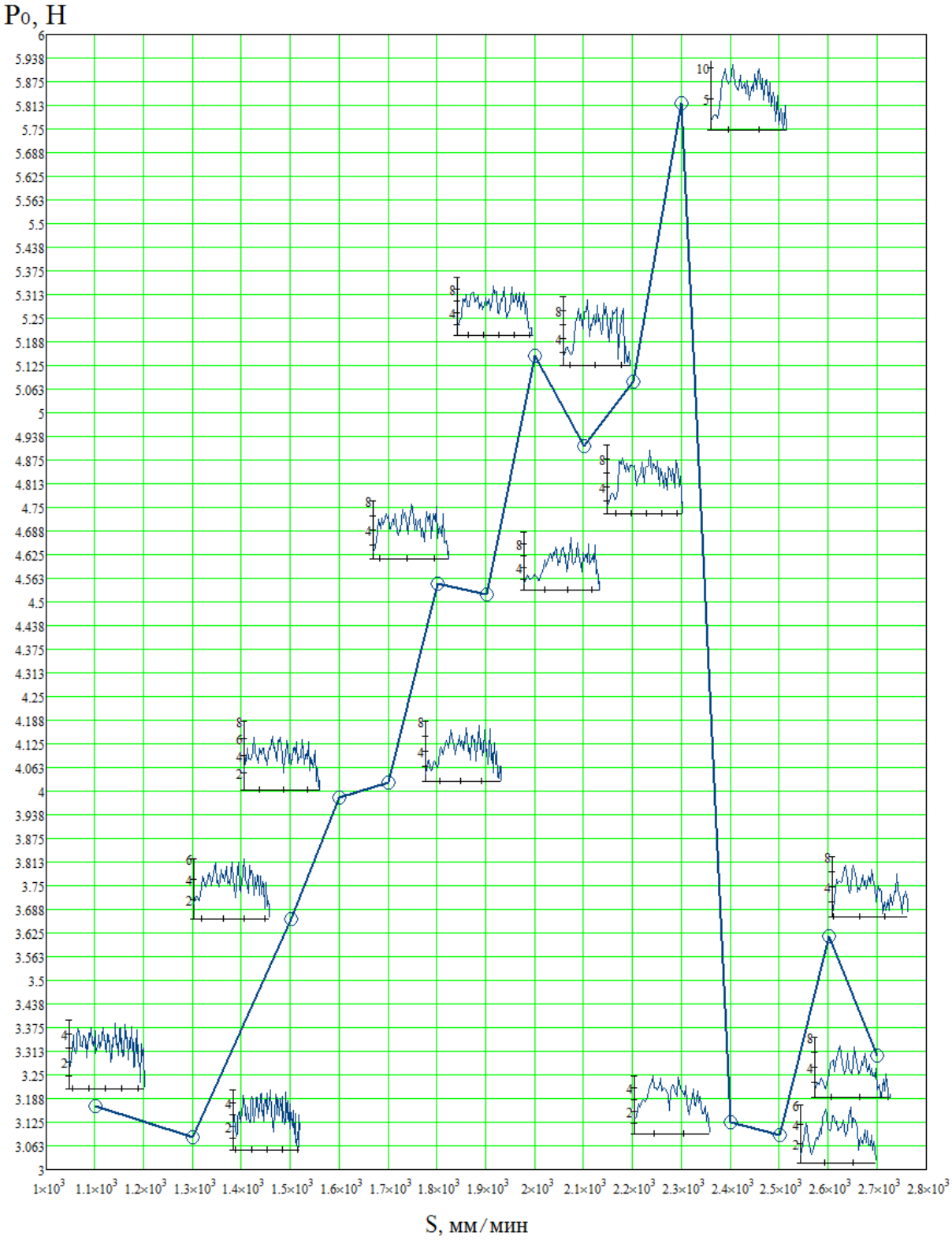


Рис. 3.16 Результат обработки теоретических данных

3.5 Многофакторное определение осевой составляющей силы резания

Аналогичным образом, согласно алгоритму (см. рис. 3.11) проведены измерения и обработка результатов осевой составляющей силы резания для остальных режимов, согласно описанию, приведенному выше (режимы резания: число оборотов шпинделя: 36000, 43000, 48000 об/мин; подача: 1100, 1300, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600, 2700 мм/мин). 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 на предприятии. В качестве входных данных касательно режущего инструмента использованы 3D модели сверл диаметрами 1,0 мм, 1,5 мм и 2,0 мм.

Для получения усредненных данных и выполнения последующего анализа с помощью функции mean(x) пакета MathCAD далее выполнялось нахождение средних значений осевой составляющей силы резания для режима в целом. Результаты обработки выходных данных представлены в табл. 23.

Таблица 23

Результаты обработки выходных данных при определении усредненных значений осевой составляющей силы резания, Н

Обороты, об/мин	36000			43000			48000		
Материал	Isola	Gem	СФ-2	Isola	Gem	СФ-2	Isola	Gem	СФ-2
Подача, мм/мин	Сверло Ø1 мм								
1100	3,167	1,73	4,367	2,995	2,126	4,447	4,059	2,947	5,458
1300	3,085	2,29	4,095	3,958	2,348	5,102	4,369	3,015	5,66
1500	3,661	2,424	4,602	4,039	2,649	5,446	4,286	3,727	5,409
1600	3,984	3,165	5,194	4,527	3,223	4,817	2,726	1,929	3,918
1700	4,021	3,456	4,818	4,063	2,986	5,197	2,966	2,148	4,11
1800	4,549	3,839	5,753	4,769	3,767	5,471	3,46	1,943	4,991
1900	4,519	4,018	6,106	5,022	3,577	6,016	3,37	2,265	4,899
2000	5,149	4,231	6,169	5,545	4,543	6,377	3,713	2,914	4,629
2100	4,911	4,461	6,695	3,585	2,14	4,415	3,8	2,679	5,206
2200	5,081	4,947	7,403	3,253	2,771	4,506	4,294	2,978	5,375
2300	5,817	5,495	7,533	3,972	2,923	4,919	3,863	3,625	4,901
2400	3,126	2,241	3,914	3,536	3,457	4,567	3,855	3,636	5,471

Окончание табл. 23

Обороты, об/мин	36000			43000			48000		
Материал	Isola	Gem	СФ-2	Isola	Gem	СФ-2	Isola	Gem	СФ-2
2500	3,092	2,21	4,55	4,227	3,432	4,676	4,922	4,079	5,671
2600	3,616	2,154	5,021	4,551	4,275	5,864	5,219	4,383	4,666
2700	3,302	2,938	4,644	4,637	3,831	5,871	4,555	4,217	5,208
Сверло Ø1,5 мм									
1100	2,891	2,485	2,024	3,136	2,957	2,55	4,632	3,881	3,405
1300	3,059	3,003	2,259	3,509	3,642	3,051	4,272	4,286	3,742
1500	3,231	3,325	2,336	4,122	3,287	2,96	4,886	5,276	4,217
1600	4,207	3,922	3,508	4,247	3,751	3,64	2,33	2,825	2,007
1700	3,793	4,076	3,605	4,423	3,525	3,361	2,613	2,713	2,173
1800	4,936	4,933	4,689	4,802	3,892	3,829	2,84	2,981	2,543
1900	5,31	5,227	4,774	5,374	4,653	4,251	2,971	2,724	2,387
2000	5,075	5,881	5,061	5,601	5,316	4,689	3,671	3,122	3,058
2100	5,916	5,69	5,478	3,01	3,013	2,017	3,16	3,35	3,399
2200	6,025	6,362	5,787	3,322	3,367	2,204	3,899	3,836	3,922
2300	6,438	6,478	6,051	3,628	3,619	2,719	4,377	4,051	4,339
2400	2,83	2,764	1,822	4,152	4,285	3,631	5,377	3,765	3,954
2500	2,67	2,989	2,653	4,715	4,792	3,37	5,13	4,519	4,685
2600	3,632	3,477	2,597	5,392	5,463	3,905	4,715	5,46	4,6
2700	3,662	3,169	3,426	5,485	4,813	5,227	5,408	5,543	5,128
	Сверло Ø2 мм								
1100	2,339	3,063	2,337	4,174	3,534	4,051	6,074	7,341	5,884
1300	3,729	3,626	2,971	4,429	4,438	4,335	6,453	5,209	6,821
1500	3,677	3,589	3,688	4,736	4,476	5,086	7,682	6,526	7,425
1600	5,007	4,284	4,617	5,621	5,462	5,684	2,976	6,962	3,135
1700	5,003	5,055	4,851	5,489	5,711	6,059	3,481	3,379	3,678
1800	6,201	5,428	6,401	6,739	5,864	7,177	3,552	3776	3,759
1900	7,233	6,224	7,202	7,329	6,823	6,652	3,901	4,342	4,452
2000	8,128	6,328	8,609	7,598	7,541	7,994	4,805	4,257	5,032
2100	8,04	7,914	8,462	3,518	3,834	3,224	4,709	4,601	5,032
2200	8,978	8,888	10,095	3,629	4,278	3,503	5,552	5,242	5,438
2300	8,627	8,976	10,288	4,461	3,986	4,736	6,106	5,069	6,941
2400	3,068	2,974	3,684	5,01	5,543	5,922	5,783	6,337	6,3
2500	3,444	3,667	4,186	5,871	6,239	6,33	6,752	5,608	7,274
2600	3,797	3,94	3,907	6,896	6,408	7,546	7,004	6,496	7,484
2700	4,376	3,083	4,661	7,407	5,368	7,223	7,71	7,425	8,349

Таким образом, проведены измерения и обработка результатов осевой составляющей силы резания для выше описанных 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. Как было установлено ранее,

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, сохраняется и прослеживается 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. Для проведения дальнейшего анализа и определения общих закономерностей построены графики зависимости среднего значения осевой составляющей силы резания от скорости движения осевой подачи.

3.6 Построение графических зависимостей осевой составляющей силы от подачи

На основании полученных результатов построены функциональные зависимости осевой составляющей силы резания от скорости движения осевой подачи (рис. 3.17–3.19). Для упрощенного понимания и наглядности графические зависимости сгруппированы по числу оборотов шпинделя, а внутри графика – по марке материала и диаметру сверла.

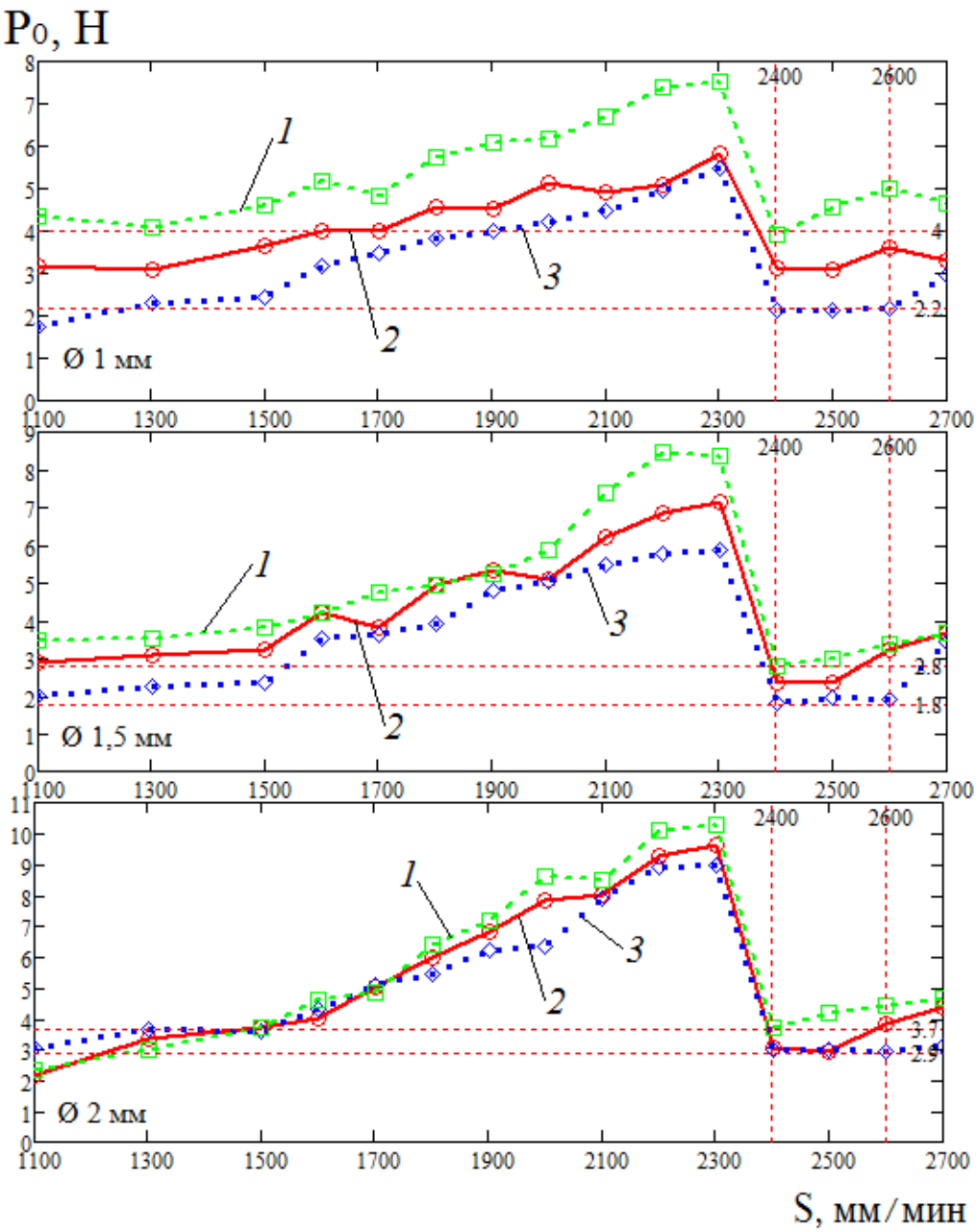


Рис. 3.17 Зависимость $P_{0ср}(S)$ при n= 36000 об/мин
1 – материал СФ-2; *2* – материал Isola; *3* – материал Gem

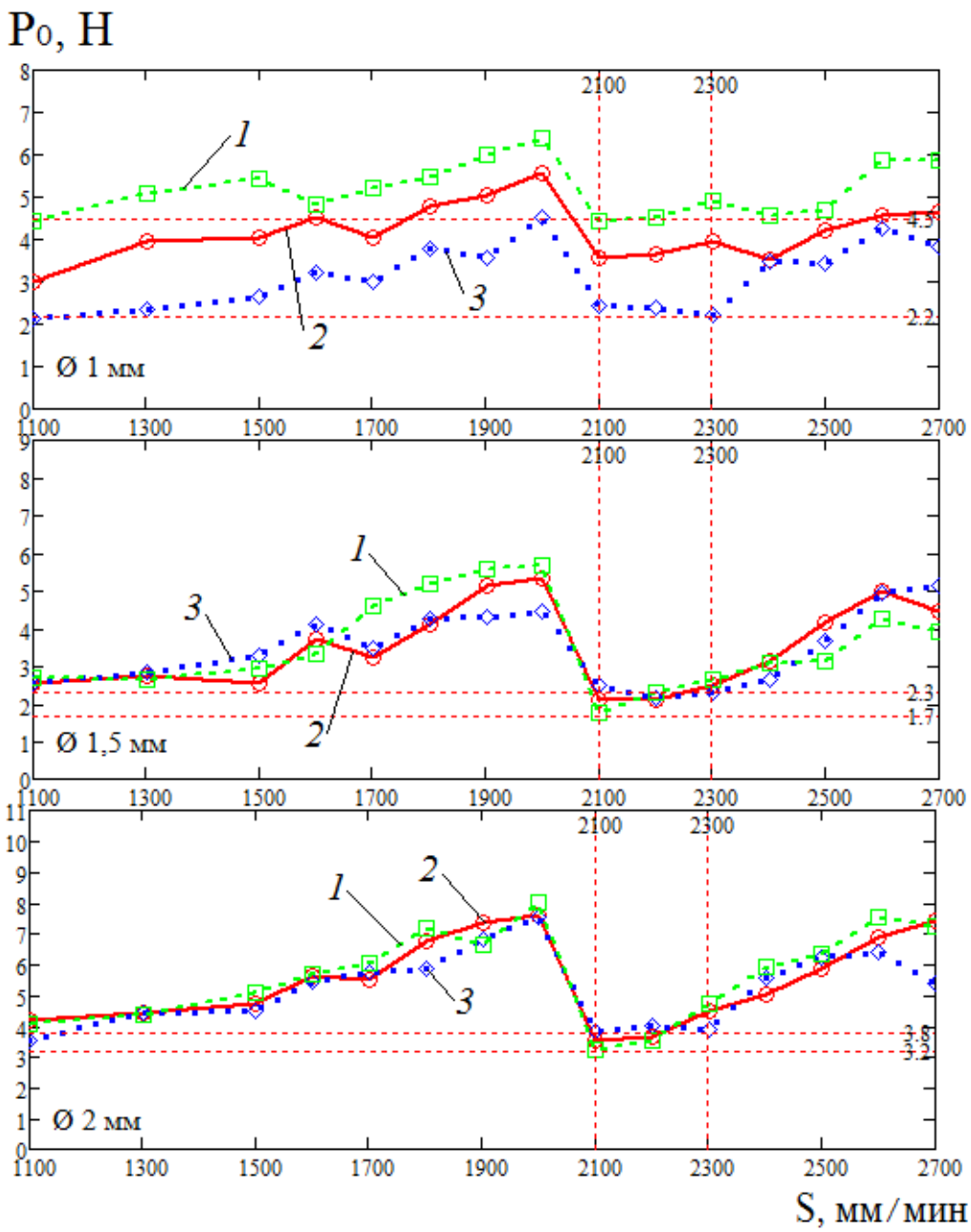


Рис. 3.18 Зависимость $P_{0ср}(S)$ при n= 43000 об/мин
1 – материал СФ-2; *2* – материал Isola; *3* – материал Gem

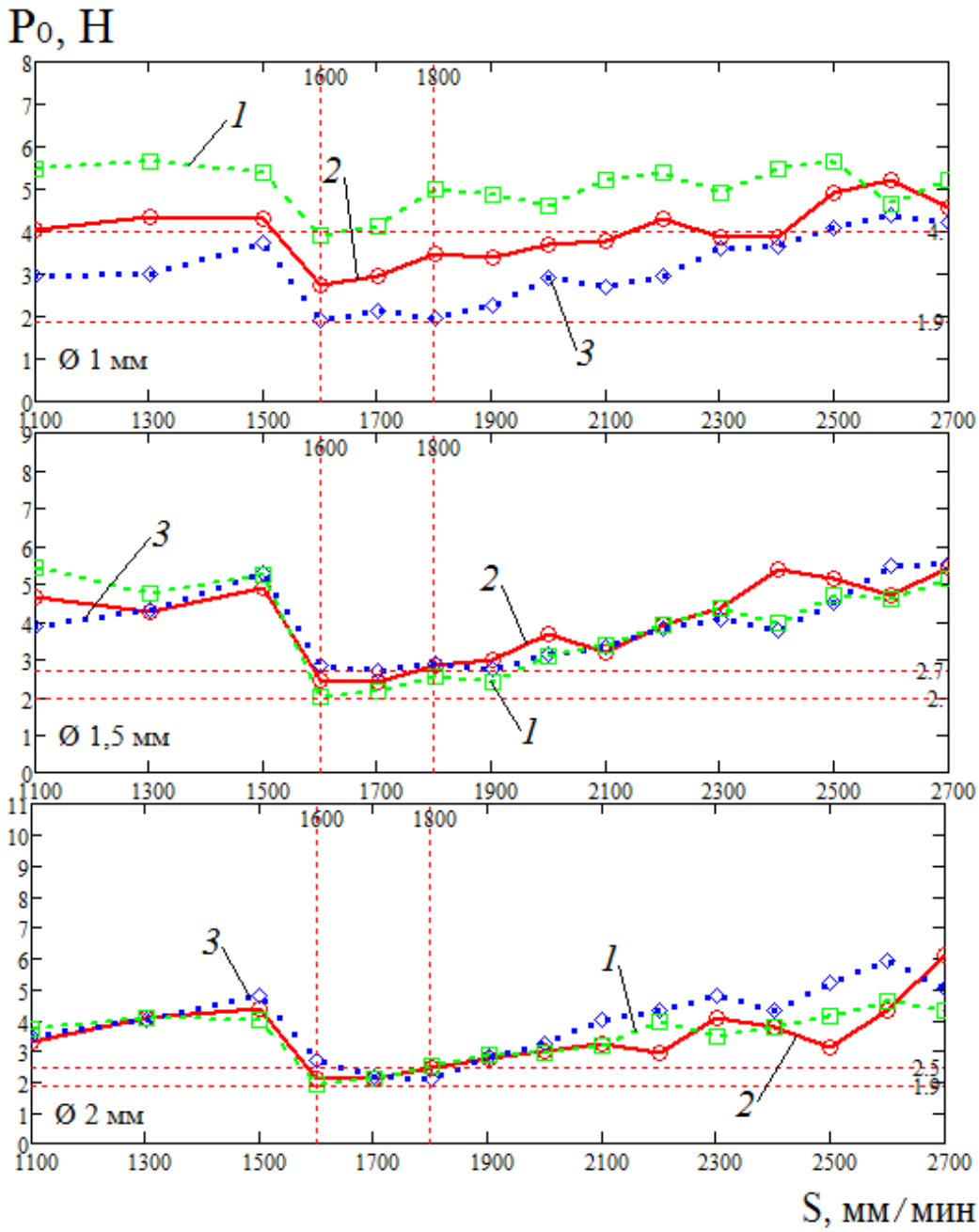


Рис. 3.19 Зависимость $P_{0ср}(S)$ при n= 48000 об/мин
1 – материал СФ-2; *2* – материал Isola; *3* – материал Gem

Необходимо отметить, что все получившиеся зависимости имеют области рациональных режимов резания. На графиках рис. 3.13...3.15 она обозначена штриховой линией. Так, при частоте вращения шпинделя n = 36000 об/мин – это область подач 2400...2600 мм/мин; при частоте вращения шпинделя n = 43000 об/мин – это область подач 2100...2300 мм/мин; при частоте вращения шпинделя n = 48000 об/мин – это область подач 1600...1800 мм/мин. В зависимости от диамет-

ра обрабатывающего инструмента имеется некоторый сдвиг в пределах обозначенных интервалов.

3.7 Проведенные исследования: особенности, специфика

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.

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.

Далее, согласно имеющихся зависимостей построен результирующий график по наименьшим усредненным значениям осевой составляющей силы резания P_0 для частоты вращения шпинделя 36000-43000-48000 об/мин соответственно, рис. 3.20.

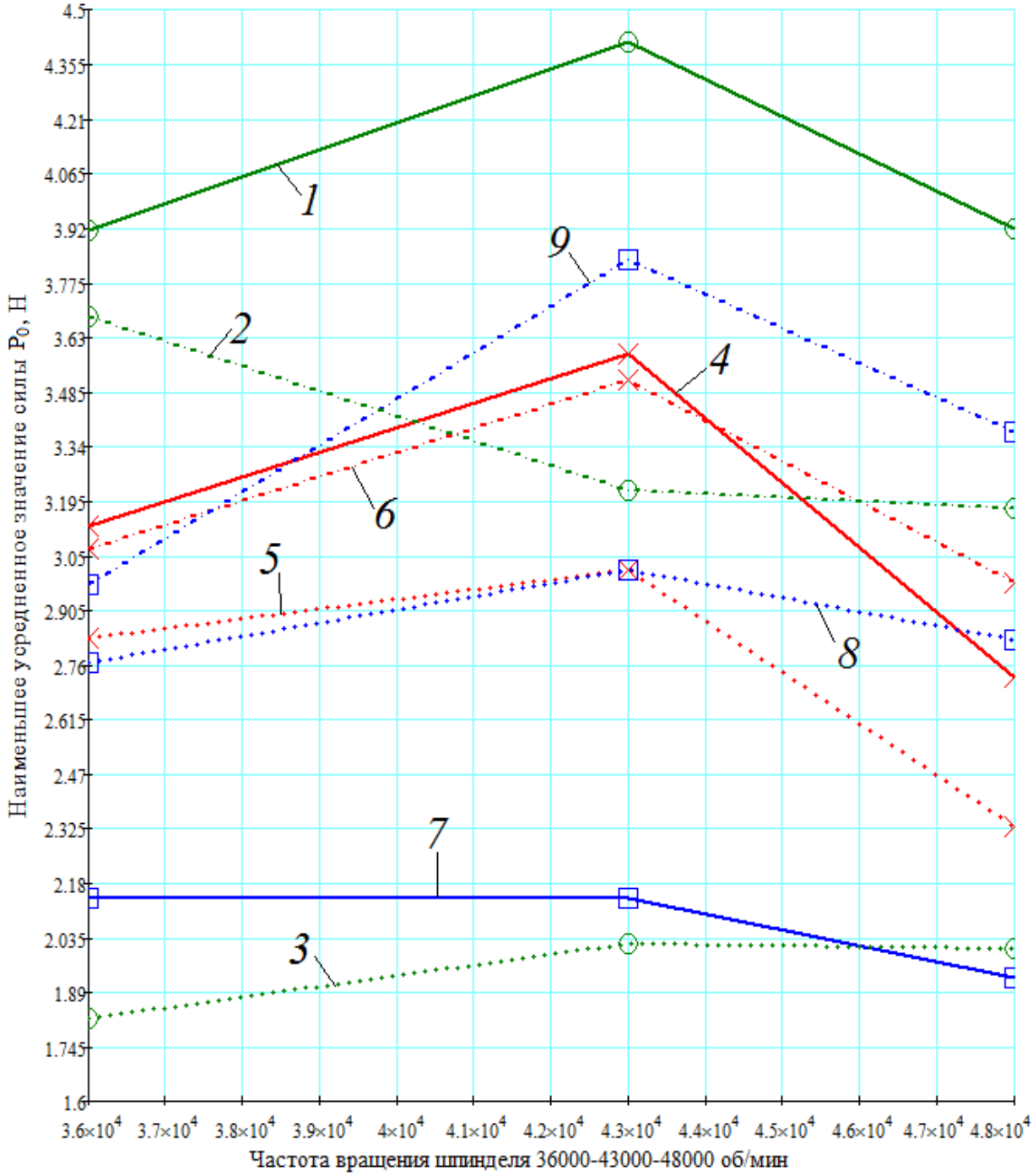


Рис.3.20 Наименьшее усредненное значение P_0
для n = 36000, 43000, 48000 об/мин
1 – СФ-2, сверло Ø1 мм; *2* – СФ-2, сверло Ø1,5 мм; *3* – СФ-2, сверло Ø2 мм;
4 – Isola, сверло Ø1 мм; *5* – Isola, сверло Ø1,5 мм; *6* – Isola, сверло Ø2 мм;
7 – Gem, сверло Ø1 мм; *8* – Gem, сверло Ø1,5 мм; *9* – Gem, сверло Ø2 мм;

Из графика рис.3.20 видна общая закономерность по выбору оптимальных режимов резания (см. рис. 3.20):

– при наименьшей скорости движения осевой подачи S (1600...1800 мм/мин.) среднее значение P_0 (на любом материале и при использовании любого сверла) составляет 2,628 Н;

– при средней S (2100...2300 мм/мин) составляет 2,924 Н;

– при наибольшей S (2400...2600 мм/мин) составляет 2,876 Н.

Разница в среднем усилии не существенная, однако режим 1 (S = 2400 мм/мин на 36000 об/мин) в 1,5 раза производительней режима 3 (S = 1600 мм/мин на 48000 об/мин), что в условиях крупносерийного и массового производства даст существенную экономию в трудозатратах и положительно скажется на стоимости конечной продукции, что немаловажно в условиях конкурентного производства и рыночной экономики.

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 рис.3.13…3.16 и получить зависимости типа $P_{01}=f_1(S)$, $P_{02}=f_2(S)$… $P_{0n}=f_n(S)$, 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).

3.8 Определение формульных зависимостей осевой составляющей силы резания

3.8.1 Методы аппроксимации экспериментальных данных. Метод наименьших квадратов.

Аппроксимация экспериментальных данных – методика, которая основана на замене опытно полученных данных аналитической функцией, которая наибо-

лее близко проходит или совпадает в узловых точках с исходными значениями (получены в ходе проведения эксперимента или опыта). Существует два основных способа для определения аналитической функции:

- построение интерполяционного многочлена n-степени, который проходит непосредственно через все точки заданного массива данных. В данном случае аппроксимирующая функция представляется в виде: интерполяционного многочлена в форме Лагранжа или интерполяционного многочлена в форме Ньютона. [20, 21, 34, 71, 81]

- построение аппроксимирующего многочлена n-степени, который проходит в ближайшей близости от точек из заданного массива данных. Таким образом, аппроксимирующая функция сглаживает все случайные погрешности (или помехи), которые могут возникать при выполнении эксперимента. В исходном случае аппроксимирующая функция определяется по методу наименьших квадратов.

Метод наименьших квадратов (англ. Ordinary Least Squares, OLS) – математический метод, основанный на определении аппроксимирующей функции, которая строится в ближайшей близости от точек из заданного массива экспериментальных данных. Близость исходной и аппроксимирующей функции F(x) определяется числовой мерой, а именно: сумма квадратов отклонений экспериментальных данных от аппроксимирующей кривой F(x) должна быть наименьшей [80].

Аппроксимирующая функция по методу наименьших квадратов определяется из условия минимума суммы квадратов отклонений (ξ_i) расчетной аппроксимирующей функции от заданного массива экспериментальных данных. Данный критерий метода наименьших квадратов записывается в виде следующего выражения:

$$\sum_{i=1}^{N} \xi_i^2 = \sum_{i=1}^{N} \left(F(x_i) - y_i\right)^2 \to \min, \qquad (3.1)$$

где $F(x_i)$ – значения расчетной аппроксимирующей функции в узловых точках x_i; y_i – заданный массив экспериментальных данных в узловых точках x_i.

3.8.2 Анализ зависимости: выбор аппроксимирующей функции

Необходимо отметить, что в некоторых программах для работы с табличными данными, например в MS Excel есть встроенный модуль аппроксимации экспериментальных данных. Возможны следующие варианты функций: линейная, типа $y=ax+b$; полиномиальная, типа $y=a_0+a_1x+a_2x^2+...+a_nx^n$, где до шестого порядка включительно, a_i – константы; логарифмическая, типа $y=a\cdot lnx+b$, где a и b – константы, ln – функция натурального логарифма; степенная типа $y=b\cdot x^a$, где a и b – константы; экспоненциальная, типа $y=b\cdot e^{ax}$, a и b – константы, e – основание натурального логарифма. На рис. 3.21. представлены все вышеописанные виды аппроксимирующих функций.

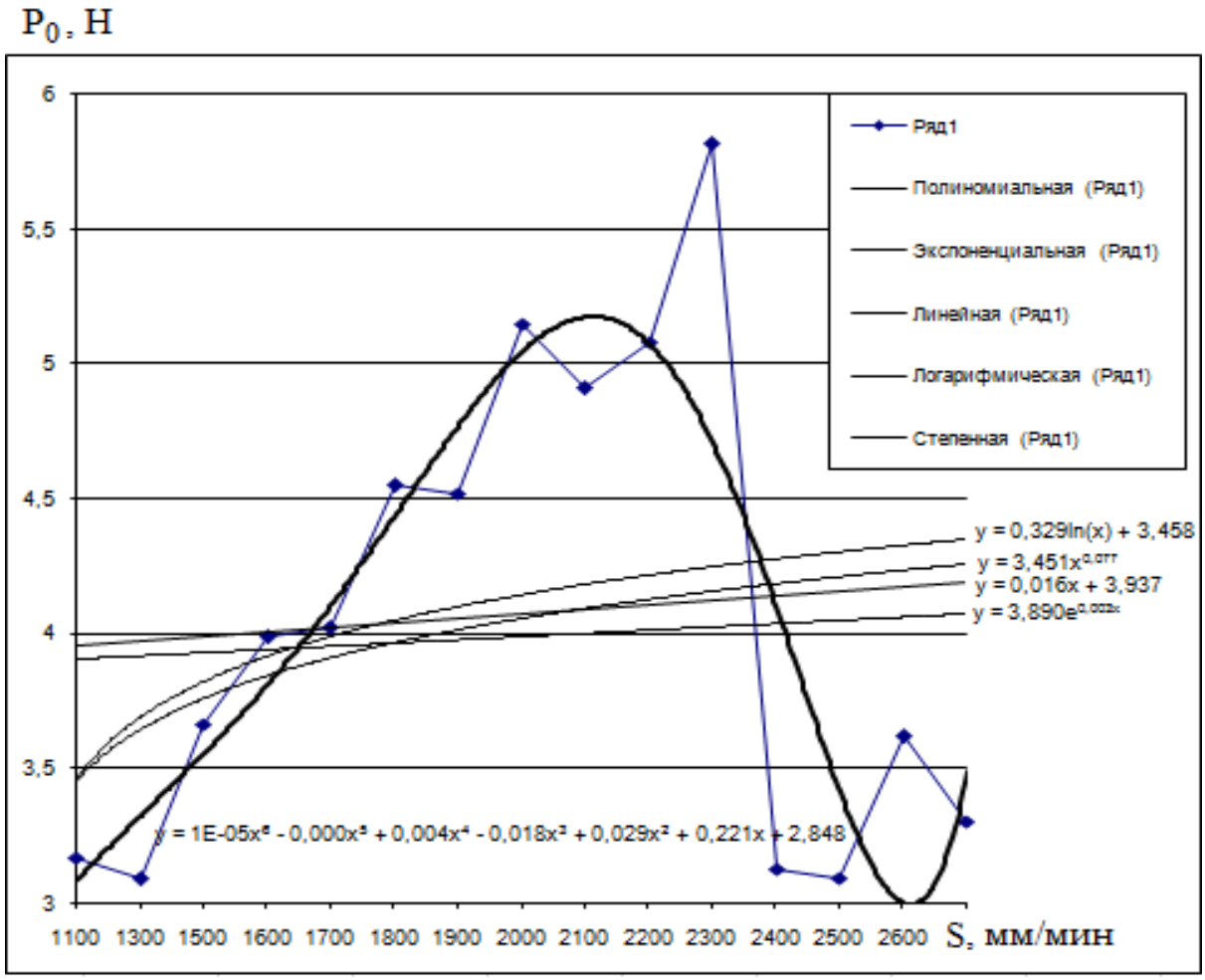


Рис.3.21 Аппроксимация данных в MS Excel

Кроме того, подбор качественной аппроксимирующей зависимости производился с помощью специализированного программного продукта CurveExpert

Professional. Компилятор имеет современный интуитивно понятный интерфейс и позволяет провести подбор функции из широкого ряда нелинейных зависимостей (рис. 3.22).

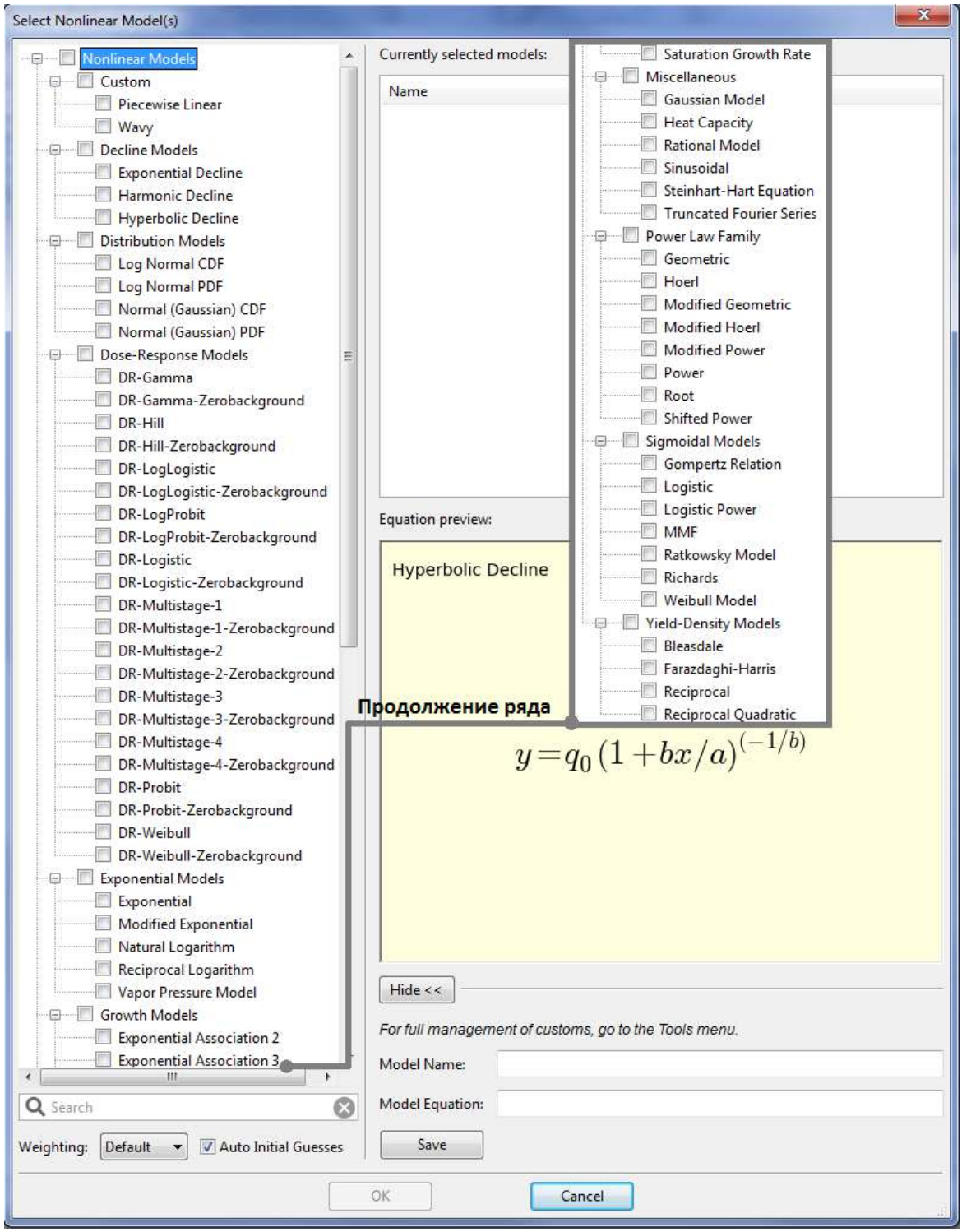


Рис. 3.22 Подбор нелинейных аппроксимирующих зависимостей CurveExpert Professional

Отбор аппроксимирующих функций проводился по принципу количественных показателей – степени совпадения с искомой экспериментальной зависимо-

стью (Score). На рис. 3.23 представлен общий функциональный вид потенциально возможных нелинейных моделей.

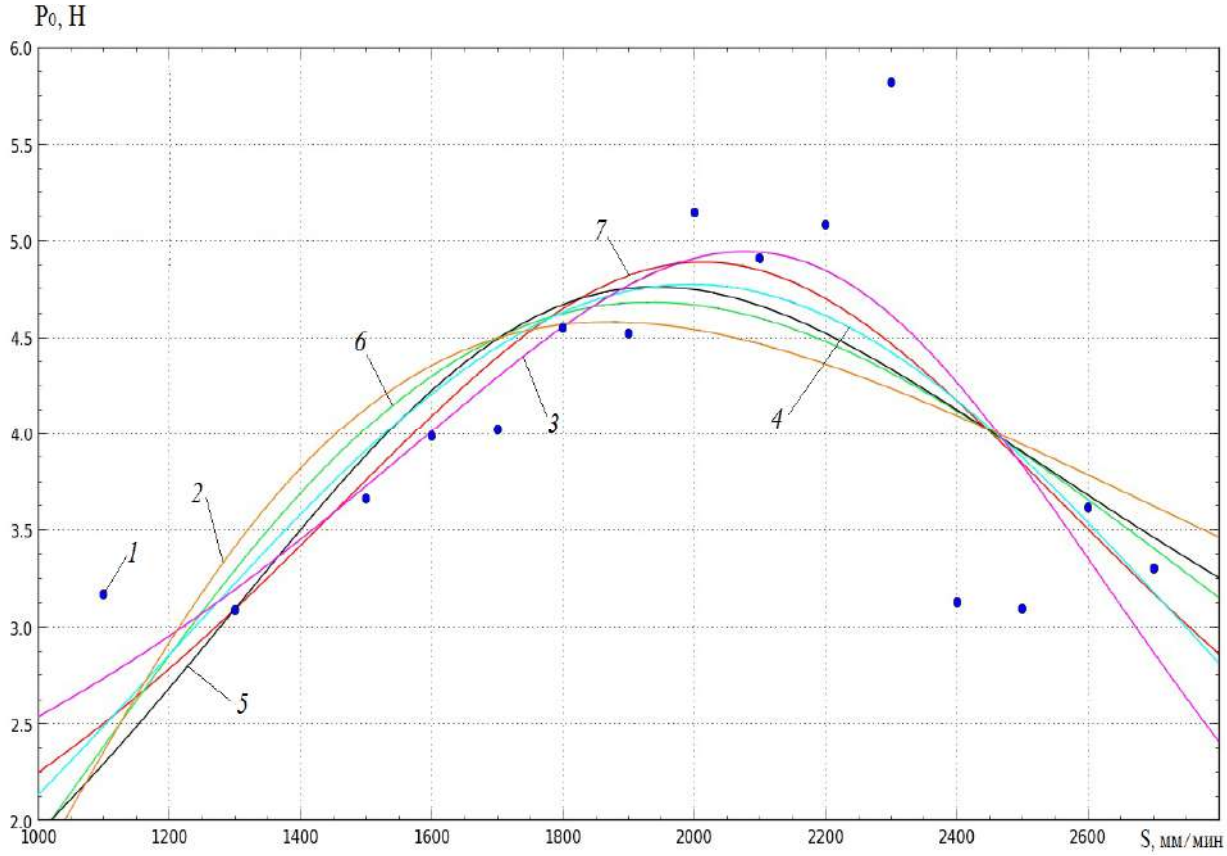


Рис. 3.23 Результат подбора аппроксимирующей зависимости в CurveExpert Professional

1 – исходные данные; *2* – Vapor Pressure Model; *3* – Rational Model; *4* – Gaussian Mogel; *5* – Steinhart-Hart Equation; *6* – Hoerl; *7* – Reciprocal Quadratic

Интуитивно ясно, что в качестве аппроксимирующей функции необходимо выбрать аппроксимацию полиномами, поскольку экспериментальные данные (зависимости осевой составляющей силы резания от скорости движения осевой подачи) несколько раз попеременно возрастают и убывают. Все остальные варианты аппроксимирующих функций для решения конкретной задачи не подходят. Для обработки фольгированного стеклотекстолита не годятся выражения для расчета осевой составляющей силы резания, описанные П.И.Буловским и Н.А.Петровой [4].

3.9 Обработка данных теоретических исследований процесса сверления

На рис. 3.24 приведены примеры полиномиальной аппроксимации 2-й ÷ 6-й степени (материал СФ-2, сверло Ø1 мм, S = 1100...2700 мм/мин).

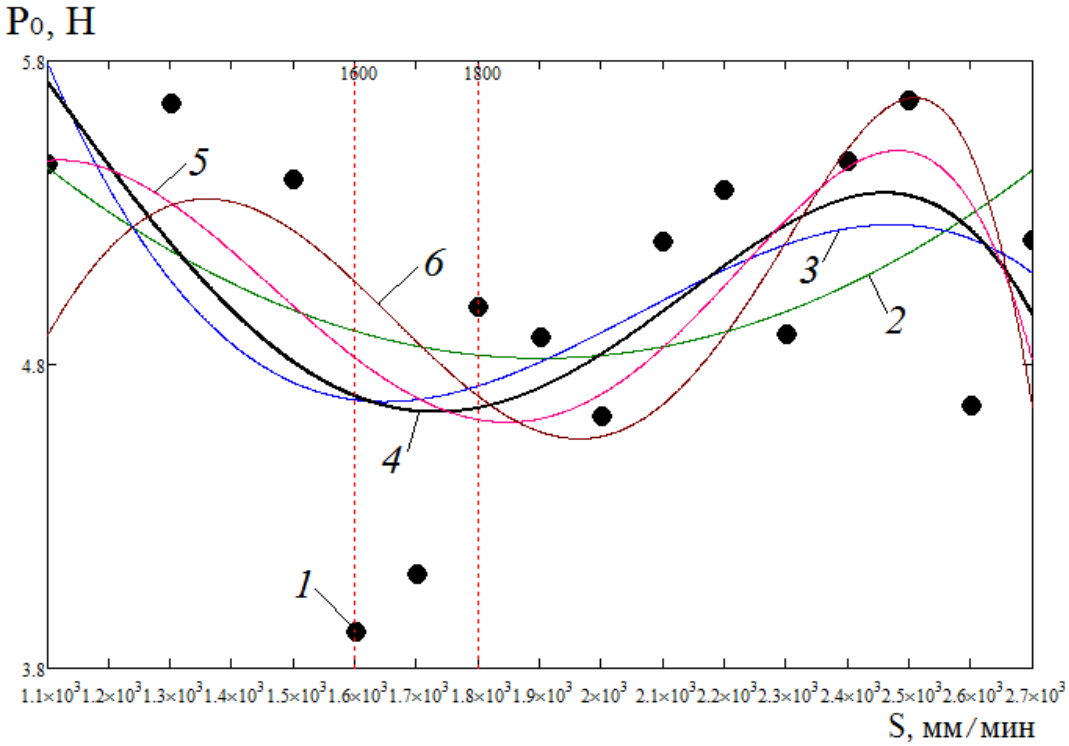


Рис. 3.24 Аппроксимация полиномами
1 – экспериментальные данные; *2* – аппрокс. полиномом 2-й степени;
3 – аппрокс. полиномом 3-й степени; *4* – аппрокс. полиномом 4-й степени;
5 – аппрокс. полиномом 5-й степени; *6* – аппрокс. полиномом 6-й степени;

С увеличением порядка аппроксимации возрастает точность аппроксимации исследуемой функции, однако снижается вычислительная устойчивость. Для повышения вычислительной устойчивости полиномиальной аппроксимации, используются такие методы как регрессия на основе G-обращения, регрессия с использованием сингулярных разложений, регуляризация по Тихонову и пр., но эти средства не являются радикальными. На практике при реализации аппроксимации полиномами стараются подбирать степень полинома путем ее повышения до того значения, когда характеристики погрешности аппроксимации будут согласованы с погрешностями исходных данных. [83]. Согласно ранее полученным данным (см. рис. 3.20) при использовании полинома 4-й...5-й степени имеются отклонения

в области монотонного возрастания функции, однако области экстремумов (min соответствует наиболее оптимальным режимам резания) описываются достаточно четко. При увеличении порядка аппроксимации (6-й порядок полинома и выше) данные факторы гипертрофируются, поэтому принято решение ограничиться полиномом 4-й степени.

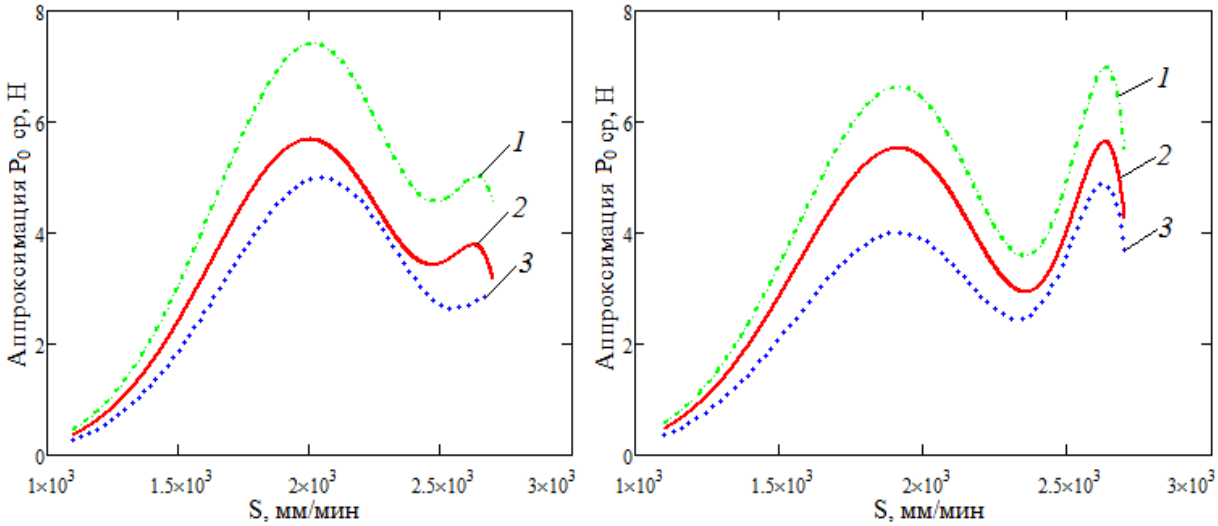


Рис. 3.25 Аппроксимация полиномами 4-й степени
1 – мат. Isola (n = 36000 об/мин, сверло Ø1 мм); *2* – мат. Gem (n = 36000 об/мин, сверло Ø1 мм); *3* – мат. СФ-2 (n = 36000 об/мин, сверло Ø1 мм)

На рис.3.25 представлена аппроксимация полиномом 4-го порядка при использовании сверл Ø1 мм на всех 3-х типах материала, частота вращения шпинделя 36000 об/мин и 43000 об/мин. Графики на остальных режимах представлены в ПРИЛОЖЕНИИ 3. Очевидно, что характер аппроксимационных зависимостей коррелирован, поэтому необходимо получить уравнение для одного режима, который примем за базовый, остальные зависимости будут получены с использованием степенных поправочных коэффициентов. На рис 3.25 приведена аппроксимация для тех же режимов, что и рис. 3.26 с использованием поправочных степенных коэффициентов 1,12; 0,83 и 1,17; 085 для левого и правого изображения соответственно. За базовый принят режим с использованием материала Isola, поскольку данный тип материала наиболее распространен на производстве. Остальные графики представлены в ПРИЛОЖЕНИИ 4.

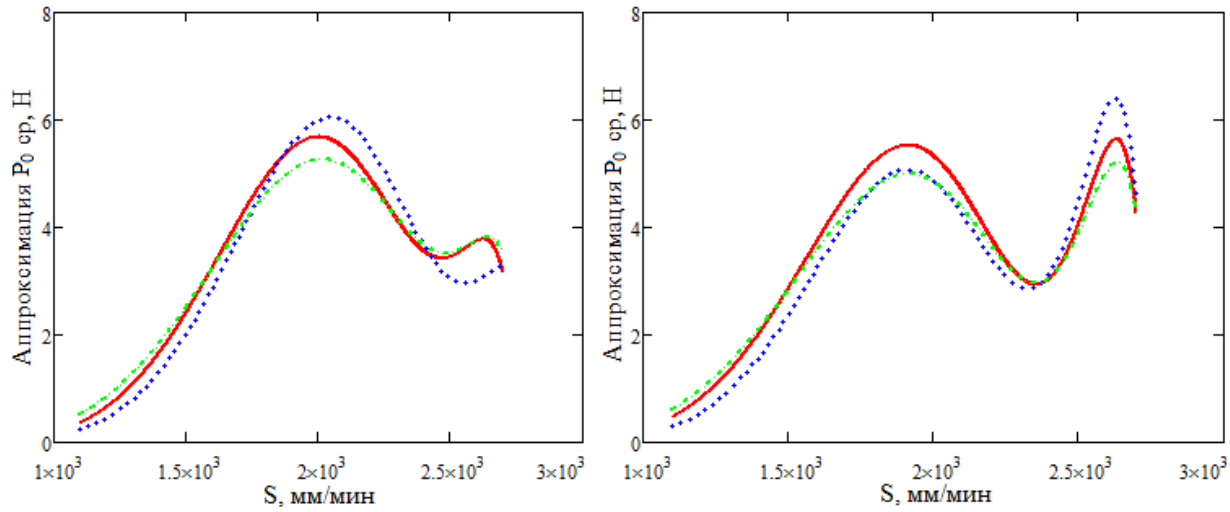


Рис. 3.26. Полиномиальная аппроксимация, режимы с поправочными коэффициентами.

1 – мат. Isola (n = 36000 об/мин, сверло Ø1 мм); *2* – мат. Gem (n = 36000 об/мин, сверло Ø1 мм); *3* – мат. СФ-2 (n = 36000 об/мин, сверло Ø1 мм)

Необходимо отметить, что операция аппроксимации проводилась с использованием математического аппарата MathCAD 14.0 и функции linfit(VX, VY,F), где VX, VY – координаты исходных точек; F – вектор, содержащий функции $f_i(x)$, записанные в символьном виде. Функция linfit еще называется функцией аппроксимации по методу наименьших квадратов. Результатом работы функции является вектор коэффициентов K, при котором среднеквадратичная погрешность приближения исходных точек с координатами VX, VY, минимальна. В табл.24 представлены конечные данные по зависимостям осевой составляющей силы резания P_0 от скорости движения осевой подачи по всем выполненным экспериментам с учетом поправочных коэффициентов, а в табл. 25 константы полиномиального ряда для $P_{0_1}(S)$, $P_{0_1}(S)$, $P_{0_1}(S)$ соответственно.

Таблица 24

Зависимость осевой составляющей силы резания от подачи $P_0(S)$.

Поправочные коэффициенты для режимов

n=36000 об/мин			n=43000 об/мин			n=48000 об/мин		
Isola	GEM	СФ-2	Isola	GEM	СФ-2	Isola	GEM	СФ-2
Ø1 мм	Ø1 мм	Ø1 мм	Ø1 мм	Ø1 мм	Ø1 мм	Ø1 мм	Ø1 мм	Ø1 мм
Ур. $P_{0_1}(S)$	$P_{0_1}(S)^{1,08}$	$P_{0_1}(S)^{0,85}$	Ур. $P_{0_2}(S)$	$P_{0_2}(S)^{1,2}$	$P_{0_2}(S)^{0,87}$	Ур. $P_{0_3}(S)$	$P_{0_3}(S)^{1,16}$	$P_{0_3}(S)^{0,85}$

Окончание табл. 24

n=36000 об/мин			n=43000 об/мин			n=48000 об/мин		
Isola	GEM	СФ-2	Isola	GEM	СФ-2	Isola	GEM	СФ-2
1,5 мм	1,5 мм	1,5 мм	1,5 мм	1,5 мм	1,5 мм	1,5 мм	1,5 мм	1,5 мм
$P0_1 (S)^{0,95}$	$P0_1 (S)^{0,94}$	$P0_1(S)^{0,98}$	$P0_2(S)$	$P0_2(S)$	$P0_2(S)^{1,18}$	$P0_3(S)$	$P0_3(S)$	$P0_3(S)^{0,98}$
2 мм	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм
$P0_1(S)^{0,8}$	$P0_1(S)^{0,84}$	$P0_1(S)^{0,78}$	$P0_2(S)^{0,87}$	$P0_2(S)^{0,82}$	$P0_2(S)^{0,83}$	$P0_3(S)^{0,82}$	$P0_3(S)^{0,82}$	$P0_3(S)^{0,8}$

Таблица 25

Константы полиномиальных рядов

a_i	$F_1(S)$	$F_2(S)$	$F_3(S)$
a_0	$7,8777\cdot10^{-6}$	$-1,5268\cdot10^{-5}$	$5,3407\cdot10^{-5}$
a_1	$7,4843\cdot10^{-3}$	$-6,7533\cdot10^{-3}$	$2,3622\cdot10^{-2}$
a_2	$-2,3047\cdot10^{-6}$	$1,5094\cdot10^{-5}$	$-2,8633\cdot10^{-5}$
a_3	$1,8873\cdot10^{-9}$	$-8,2946\cdot10^{-9}$	$1,3011\cdot10^{-8}$
a_4	$-0,5067\cdot10^{-12}$	$1,4228\cdot10^{-12}$	$-1,9979\cdot10^{-12}$

Зависимости $P_0(S)$ в зависимости от типа применяемого материала примут вид:

$$P_0^{\text{Isola}}(S) = 7,8777\cdot10^{-6}+7,4843\cdot10^{-3}S-2,3047\cdot10^{-6}S^2+1,8873\cdot10^{-9}S^3-0,5067\cdot10^{-12}S^4; \quad (3.2)$$

$$P_0^{\text{GEM}}(S) = -1,5268\cdot10^{-5}-6,7533\cdot10^{-3}S+1,5094\cdot10^{-5}S^2-8,2946\cdot10^{-9}S^3+1,4228\cdot10^{-12}S^4; \quad (3.3)$$

$$P_0^{\text{СФ-2}}(S) = 5,3407\cdot10^{-5}+2,3622\cdot10^{-2}S-2,8633\cdot10^{-5}S^2+1,3011\cdot10^{-8}S^3-1,9979\cdot10^{-12}S^4. \quad (3.4)$$

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, рис.4.21, 4.22. Кроме того, косвенно данный факт говорит о правильности выполненных исследований.

Выявленную особенность достаточно явно можно проследить по аппроксимационным зависимостям, рис.4.21, 4.22, ПРИЛОЖЕНИЯ 3, 4. Это дает возможность для дальнейшего определения зависимости скорости движения осевой подачи от частоты вращения шпинделя и диаметра обрабатываемого отверстия для разных типов обрабатываемых композиционных материалов, используемых на производстве.

3.10 Результаты и выводы

Таким образом, согласно ранее определенной задаче конечно-элементного моделирования процесса сверления стеклотекстолита средствами ANSYS Workbench, LS-DYNA проведена адаптация компьютерной имитационной модели применительно к поставленной задаче. При корректировке командного файла входных данных с увеличением размеры ячейки до 0,2 мм (ранее принятая величина сетки КЭ 0,05 мм) время расчета сократилось в среднем до 1,5 часов/режим, что оказалось приемлемым для дальнейшего выполнения исследований. Установлено, что среднее абсолютное отклонение данных, полученных в результате моделирования процесса сверления с сеткой КЭ 0,05-0,2 мм составляет не более 10 %. Кроме того, проведенная статистическая обработка данных показала схождение теоретических данных на всех режимах обработки.

В дополнение к уже имеющимся данным касательно механических свойств материала Isola, предоставленных компанией «Isola» базе лаборатории «Сопротивления материалов» ЮУрГУ проделан ряд практических работ. Проведено определение модуля Юнга и коэффициента Пуассона – данных, необходимых для формирования командного файла при исследовании процесса сверления FR-4 СФ-2, производства «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова и FR-4 по основе и утку соответственно.

Далее разработан алгоритм теоретического определения осевой составляющей силы резания и проведены работы по определению P_0 с использованием моделей сверл диаметрами: 1,0 мм (наиболее распространенный); 1,5 мм; 2,0 мм на режимах резания: частоты 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. Далее проведено формирование базы данных файлов на всех режимах резания в формате *txt для последующей обработки. Для получения усредненных данных с помощью функции mean(x) пакета MathCAD выполнялось нахождение средних значений осевой составляющей силы резания для режима в целом. На основании полученных результатов 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.

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 проведена полиномиальная аппроксимация (4-го порядка) графических данных и получены зависимости типа $P_{01}=f_1(S)$, $P_{02}=f_2(S)$, $P_{03}=f_3(S)$ для всех типов материалов. Кроме того 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.

Глава 4 Определение рациональных факторов сверления отверстий Физические основы резания стеклотекстолита

4.1 Бездефектное сверление слоистого материала

Как показано в главе 1, основные причины появления дефектов при обработке фольгированного стеклотекстолита связаны с двумя основными факторами от воздействия на заготовку инструмента:

– силовое воздействие;

– термическое воздействие.

Влияние данных факторов имеет место и при обработке изотропных монолитных материалов, однако при обработке многослойных анизотропных систем их влияние гипертрофируется. Основной причиной для этого служит тот факт, что деформационные и теплофизические свойства материалов слоистой системы имеют существенные различия. И если термическое воздействие на процесс обработки нивелируется техническими средствами принудительной вытяжной системы, то силовое воздействие на базовый материал остается и его нужно контролировать.

Основные дефекты, связанные с силовым воздействием на заготовку выражаются в расслоении базового материала на выходе сверла, наличии заусенцев фольги в отверстиях (свыше 40 мкм), посветлениях материала, а также, как постфактум, при последующей гальванической обработке в нарушении металлизации в отверстиях и наличии «ободков» вокруг металлизированного отверстия.

Все эти факторы показывают, насколько важной является разработка обоснованной методики назначения бездефектных режимов обработки композиционного материала, которая бы гарантировала минимальные силовые нагрузки и отсутствие дефектов, описанных выше.

В главах 2, 3 проведено построение компьютерной имитационной модели процесса сверления и определены минимальные (рациональные) и максимальные (критические) значения осевой составляющей силы резания P_0 на разных базовых

материалах, используемых на производстве, при различных вариациях режимов резания и набрана массивная база выходных данных, позволяющая накладывать ограничения на режимы резания.

4.1.1 Ограничения на режимы резания

Следует сказать, что понятие ограничения на режимы используется в нормативной литературе достаточно давно [53]. Так, во всех нормативах по резанию имеются таблицы по проверке режимов резания на отсутствие заусенцев, шероховатости обработанного отверстия и пр., т.е. на отсутствие данного типа дефектов. Если режим резания, согласно данных карт, является дефектным, то он должен подвергнуться корректировке.

Следует подчеркнуть, что до настоящего времени отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору режимов резания фольгированного стеклотекстолита в привязке к системе факторов базовый материал – сверло и подбор режимов производится практически исходя из опыта рабочего персонала, инженеров-технологов и пр.

Необходимо отметить, что если при обработке однородной детали дефекты визуализируются сразу, то при сверлении слоистой системы возможны скрытые дефекты, которые проявятся только при последующей химико-гальванической обработке или, что еще хуже, в эксплуатации в виде разрыва сплошной металлизации внутри отверстия (или «блуждающего» дефекта, который исчезает при нажатии на материал).

«Скрытые» дефекты в металлизации отверстий, вызванные ошибками при сверлении, являются достаточно частым явлением при изготовлении печатных плат. Основная масса отказов обнаруживается на операции «Регулировки» изделия и если переходные отверстия можно отремонтировать согласно методикам, описанным в ГОСТ 27200-87 [12], то платы с браком в металлизированных отверстиях, предназначенных под монтаж навесных элементов, не подлежат восста-

новлению и должны быть списаны окончательно. Естественным является тот факт, что как при выполнении ремонта, так и при окончательном списании заготовок предприятие терпит дополнительные затраты и убытки. Ситуация осложняется при изготовлении многослойных печатных узлов, в которых ремонт металлизированных отверстий может вызвать дефекты в переходных слоях.

Поэтому при проектировании технологии обработки фольгированного стеклотекстолита, предназначенного для изготовления печатных плат крайне важно точно и грамотно назначить рациональные режимы резания, которые будут обеспечивать бездефектную обработку, увеличат ресурс режущего инструмента и сократят стоимость конечного изделия.

4.1.2 Алгоритм бездефектных режимов резания

Исходя из практических соображений и теории механической обработки известно, что величина силового воздействия на технологическую систему от обрабатывающего инструмента, кроме влияния геометрических факторов заточки и пр. в достаточной степени определяется режимами резания. Это влияние можно описать математическими зависимостями. В главах 2, 3 разработана компьютерная имитационная модель и проведены ряд теоретических и практических исследований, что позволяет оценить величину осевой составляющей силы резания при обработке композиционного материала в зависимости от режимов резания. Результаты всех измерений полного факторного эксперимента обработаны по известным методикам с формированием базы данных и дальнейшей статистической обработкой.

На основании априорных данных [78] предварительно принята следующая зависимость:

$$F_0 = C_p D^{Xp} s^{Yp} K_p, \qquad (4.1)$$

где *Ср* – постоянная величина; *D* – диаметр сверла, мм; *s* – подача сверла, мм/об; *Кр* – коэффициент, назначаемый в зависимости от марки материала; *Хр*, *Yp* – показатели степени.

Данное уравнение выступает в виде исследуемой математической модели силовой характеристики. Согласно [40] полным факторным экспериментом называется тот, который реализует все возможные неповторяющиеся комбинации уровней независимых факторов. Задача планирования эксперимента формулируется как: необходимо получить некоторое представление о поверхности отклика от факторов. В общем случае задачу можно представить в виде математической модели:

$M\{y\} = f(x_1, x_2 ... x_k)$, где y – параметр оптимизации;

xi – переменные факторы, которые можно варьировать при постановке эксперимента.

Исходя из постановки задачи алгоритм бездефектной обработки с наложением ограничений примет вид, представленный на рис.4.1

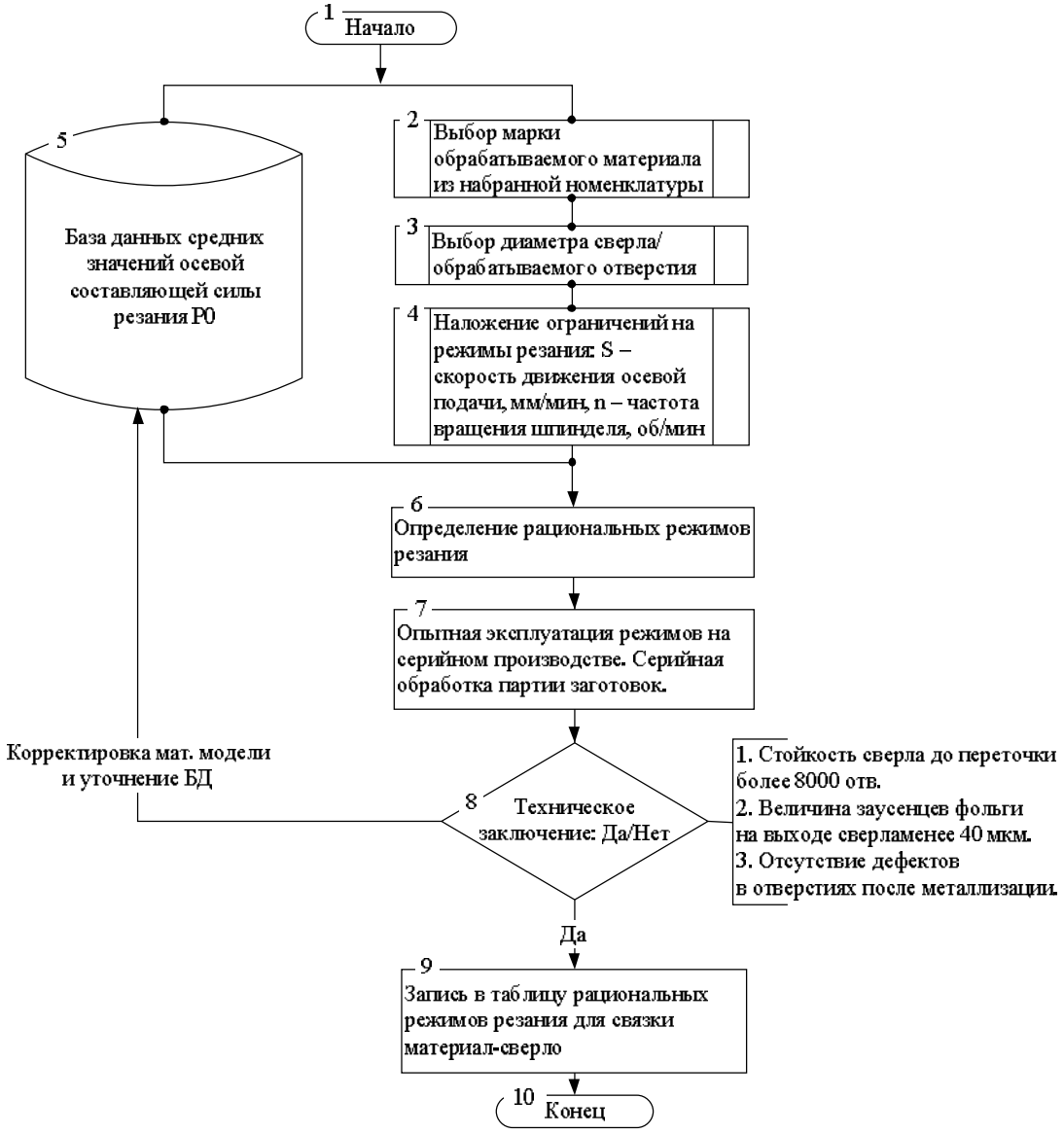


Рис.4.1 Алгоритм бездефектной обработки с наложением ограничений

Необходимо отметить, что база данных средних значений осевой составляющей силы резания P_0 сформирована и области рациональных значений известны. Исходя из имеющейся номенклатуры базовых материалов с различными механическими свойствами и разной обрабатываемостью, необходимо задать режимы резания таким образом, чтобы значение осевой составляющей силы резания было минимальным (при максимальной производительности – значение скорости движения осевой подачи).

Критерием правильности выбора режимов резания будут выступать как прямые, так и косвенные показатели качества выпускаемой продукции. Среди них

необходимо учитывать стойкость сверла до переточки (в количественном отношении – пересчет на число обработанных заготовок с учетом пакета либо количество обработанных отверстий). Критерием устойчивой работы режима (приемлемого периода стойкости инструмента) будет выступать характеристика в минимум 8000 обработанных отверстий до переточки [95, 96, 97, 102, 103, 106], что превышает нормативные требования государственных стандартов [14, 15] в 5 с лишним раза. 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.

4.2 Определение рациональных режимов резания: постановка задачи

Как было отмечено выше, от качества металлизированного отверстия зависит точность и надежность электрических параметров печатной платы [72]. Поэтому к качеству выполнения отверстий изначально предъявляются повышенные требования: отверстия должны быть с гладкими стенками и без заусенцев; предельные отклонения центров отверстий относительно узлов координатной сетки должны составлять ±0,015 мм; разрушение и деструкция диэлектрика в отверстиях, наволакивание смолы по стенкам отверстий не допускаются и пр. Кроме того, при обработке композиционных пластиков заполировка, поджог и засаливание поверхности не допускается. Вместе с тем, при изготовлении многослойных печатных плат нередко встречается дефект чрезмерного наволакивания смолы на торцевые поверхности контактных площадок.

Сверление отверстий в заготовках из стеклотекстолита позволяет получить достаточно точные поверхности. Материал обладает высокой упругостью и достаточно низкой теплопроводностью, что приводит к повышенному трению между сверлом и базовым материалом, поэтому выбор и назначение оптимальных режимов обработки – одна из основных и самых ответственных операций на производ-

стве. Нужно отметить, что систематизированных материалов по обработке фольгированного стеклотекстолита, которые позволяли бы назначать оптимальные режимы резания, практически нет. В [91] есть отдельные технологические рекомендации, однако их недостаточно. В общем виде определение условий обработки сводится к следующей методике:

1. Определение необходимого материала инструмента согласно приведенным рекомендациям;

2. Выбор геометрии режущего инструмента;

3. Определение скорости движения осевой подачи исходя из требуемой шероховатости поверхности обрабатываемого отверстия и отсутствия дефекта типа сколов, ореолов и посветлений;

4. Расчет скорости резания согласно формуле:

$$v = \frac{C_v \cdot D^{X_V}}{T^m \cdot S^{y_V}},$$

где v – скорость резания, м/с; D – диаметр сверла, мм; T – стойкость сверла, мин; C_v – постоянный коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала; S – подача, мм/об; m, x_v, y_v – показатели степени, зависящие от обрабатываемого материала.

К недостаткам предложенного подхода можно отнести:

1. При отсутствии четкой качественной оценки параметров стенки обрабатываемого отверстия: принятые условия обработки могут не обеспечить нужной шероховатости, что в дальнейшем может привести к массовому браку продукции на последующих операциях хим. подготовки;

2. Значения скорости движения осевой подачи согласно рекомендациям разных источников имеют значительный разброс, что затрудняет ее выбор;

3. В формуле для расчета режимов резания отсутствует учет критерия затупления режущего инструмента;

4. В расчете режимов резания упор делается только на период стойкости режущего инструмента, при этом не учитывается оценка других показателей, на-

пример температуры в зоне резания, что так же может привести к массовому браку.

Таким образом, в рамках поставленной задачи необходимо получить ряд зависимостей: частоты вращения шпинделя от скорости движения осевой подачи, подачи от диаметра обрабатываемого отверстия для используемых на производстве базовых материалов с разными механическими свойствами: СФ2-35 ГОСТ10316-78, Isola и GEM (ILM) согласно ранее проведенным экспериментально-теоретическим данным и набранной базе значений осевой составляющей силы резания P_0.

Далее необходимо получить рациональные режимы резания и составить таблицы по обработке для каждого типа базового материала. Считаю, что данные необходимо систематизировать именно в табличном виде для упрощенного восприятия и понимания цеховыми рабочими на местах (производственный мастер, технолог цеха, наладчик станков с ЧПУ и пр.).

Далее необходима разработка четких технических рекомендаций по выбору и назначению оптимальных режимов резания для действующего производства. В качестве упрощения подготовки производства, сокращения ее сроков и нивелирования ошибок ИТР необходимо разработать программу для автоматической компоновки карт наладки оборудования с учетом расчета режимов резания и нормирования трудозатрат.

4.2.1 Определение зависимости частоты вращения шпинделя от скорости движения осевой подачи

В главе 1 дано детальное описание фольгированного стеклотекстолита и подробно рассмотрено его строение и слоистая структура. В главе 2 приводится подробная характеристика используемых на предприятии базовых материалов, а также понятие распределения филаментов стекловолокна [58] и стеклонаполненности волокон [37]. Оба фактора непосредственным образом влияют на обрабаты-

ваемость материла и его твердость. Измерение твердости для большинства композиционных материалов проводится по Шору (ГОСТ 263-75), при этом для жестких материалов – смола, волокно, пластики измерения выполняются по шкале D. Самым простым и мобильным прибором для определения твердости служит тестер ТШ-Ц компании «Новотест», рис. 4.2 а. Однако, для предварительной оценки типа: более жесткая стеклотекстолитовая основа – менее жесткая основа, можно использовать тестер T-UD3, рис. 4.2. б с выполнением замеров по методу Бриннеля.



а) б)

Рис. 4.2 Твердомеры фирмы «Новотест»

В привязке к используемым базовым материалам предварительно проводились замеры твердости по Шору и Бриннелю с использованием твердомеров рис. 4.2 а, б. Результаты замеров сведены в табл. 26.

Таблица 26

Значения твердости материалов

	Материал		
Материал	СФ (МИ)	Isola	GEM
Средн. тверд. по Шору D, ед.	82,6	80,4	78,5
Средн. тверд. по Бриннелю, ед.	160	157	151

Необходимо отметить, что материал Gem является более мягким, а материал СФ более твердым; материал Isola занимает промежуточные значения. Достаточно удобным является то, что выполнение замеров для дальнейшей оценки параметров и характеристик резания можно выполнять прямо на складе, не выполняя предварительных работ по заготовке материала. Для уточненных измерений необходимо зачистить фольгу на торце листа (замер твердости выполняется именно на ламинате).

Выполняя анализ получившихся зависимостей (ПРИЛОЖЕНИЕ 2) достаточно легко можно получить график, представленный на рис. 4.3.

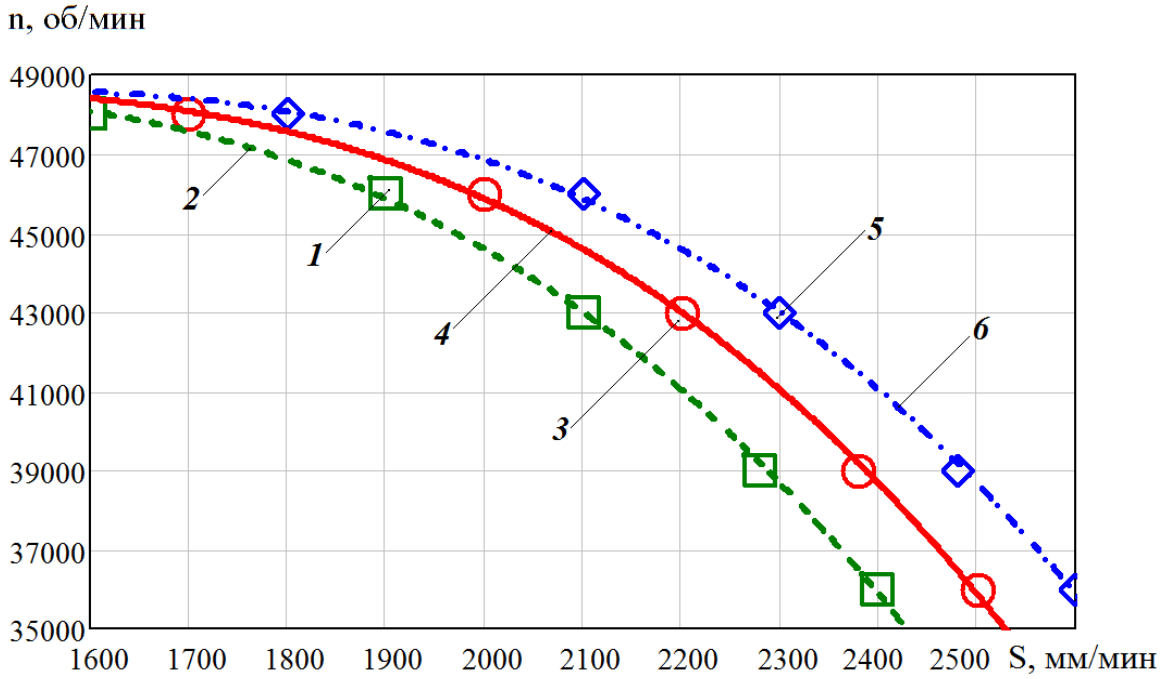


Рис. 4.3 Зависимость подачи от частоты вращения шпинделя
1 – теоретические точки, мат. СФ-2; *2* – аппрокс. полин. 2-й ст., мат. СФ-2;
3 – теоретические точки, мат. Isola; *4* – аппрокс. полин. 2-й ст., мат. Isola;
5 – теоретические точки, мат. Gem; *6* – аппрокс. полин. 2-й ст., мат. Gem

Получившиеся математические зависимости будут иметь вид:

$$n^{СФ-2}(S) = 3{,}034 \cdot 10^4 + 29{,}309 \cdot S - 0{,}011 \cdot S^2, \quad (4.2)$$

$$n^{ISOLA}(S) = 3{,}044 \cdot 10^4 + 28{,}494 \cdot S - 0{,}01 \cdot S^2, \quad (4.3)$$

$$n^{GEM}(S) = 3{,}056 \cdot 10^4 + 27{,}735 \cdot S - 0{,}0098 \cdot S^2, \quad (4.4)$$

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

Таким образом, при определении зависимости частоты вращения шпинделя от скорости движения осевой подачи имеем нелинейные функции второго порядка. Отличительной особенностью полученных зависимостей является схождение графиков по всем трем типам материалов на высоких частотах оборотов шпинделя (свыше значений 49 000 об/мин) на малых подачах (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 обработка фольгированного стеклотекстолита на данных режимах менее предпочтительна и величину подачи следует максимально сдвигать к правой границе графика.

4.2.2 Определение зависимости скорости движения осевой подачи от диаметра обрабатывающего инструмента

Согласно выше приведенных зависимостей n(S) можно задавать рациональные режимы резания без привязки к диаметру сверла. Однако при использовании на производстве фольгированного стеклотекстолита разных марок есть необходимость в некоторой корректировке скорости движения осевой подачи относительно механических свойств самого ламината для получения требуемой производительности при минимальных значениях осевой составляющей силы резания и, следовательно, максимального периода стойкости режущего инструмента. Так, для сверл Ø1 мм и наиболее качественного материала производства Isola, который используется в т.ч. при изготовлении ответственных узлов наиболее рациональным с точки зрения производительности режимом резания будет S=2500 мм/мин (36000 об/мин). Для более мягкого материала Gem лучше использовать S = 2600 мм/мин (на 36000 оборотов), поскольку на повышенной скорости движения осевой подачи значения осевой составляющей силы резания начинают возрастать. Для более жесткого материала (СФ) следует выбирать S = 2400 мм/мин (на 36000 об/мин).

При работе на сверлах Ø1,5 мм для более твердого материала СФ наиболее рациональным режимом резания с точки зрения производительности и минимальным значениям осевой составляющей силы резания остается S = 2100 мм/мин (43000). Это справедливо и для более мягкого материала Gem – 2300 мм/мин. При использовании Isola рациональней использовать подачу 2200 мм/мин (43000 об/мин), как наиболее оптимальную по производительности и наименьшей нагрузке.

С повышением диаметра обрабатываемого отверстия и диаметра сверла, а, следовательно на высоких скоростях движения осевой подачи возрастает осевая составляющая силы резания. Более наглядно это выражается на примере материала СФ. Кроме того, средне-номенклатурное количество отверстий большого диаметра на печатных узлах сравнительно не велико (на 2 порядка меньше относительно сверл диаметра 1 мм), поэтому скорость движения осевой подачи можно выбирать 1600 мм/мин для материала СФ, 1700 мм/мин для Isola и 1800 мм/мин для материала Gem на 48000 об/мин.

Таким образом, обработку отверстий малого диаметра необходимо выполнять на повышенных режимах 2600–2400 мм/мин. При увеличении диаметра сверла подачу следует несколько снижать до 1600–1700 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). Результаты анализа сведены в табл. 27.

Таблица 27

Производительность обработки отверстий в привязке к диаметрам сверл и маркам материалов.

Марка материала		Диаметр сверла		
		Ø 1,0 мм	Ø 1,5 мм	Ø 2,0 мм
Gem (КНР)	Подача, мм/мин	2600	2300	1800
Isola (Дюрен, Германия)		2500	2200	1700
СФ (Молдав Изолит)		2400	2100	1600

На основании данных табл. 30 получены графические зависимости подачи от диаметра сверла, рис.4.4.

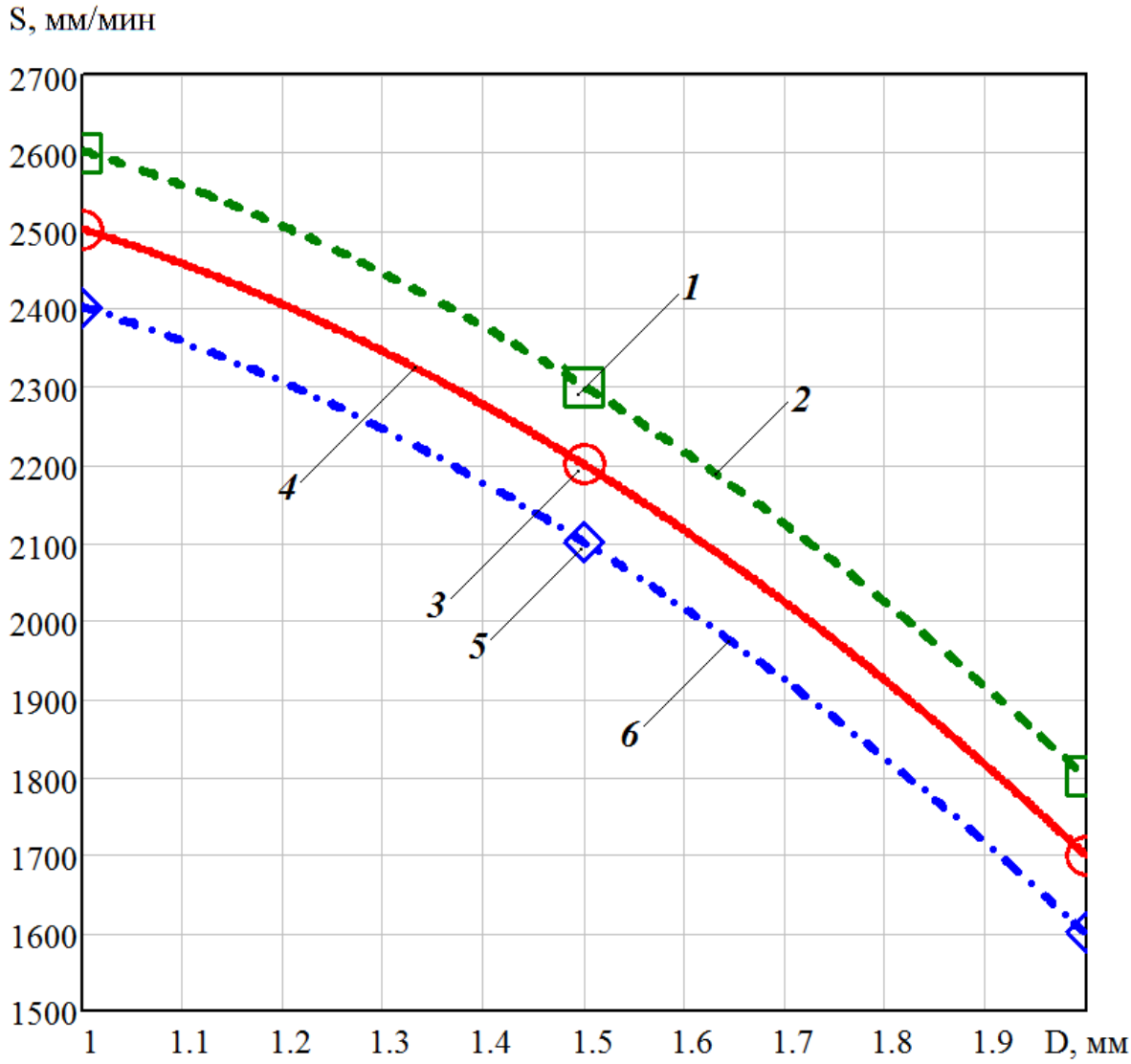


Рис. 4.4 Зависимость подачи от диаметра обрабатывающего инструмента
1 – теоретические точки, мат. СФ-2; *2* – аппрокс. полин. 2-й ст., мат. СФ-2;
3 – теоретические точки, мат. Isola; *4* – аппрокс. полин. 2-й ст., мат. Isola;
5 – теоретические точки, мат. Gem; *6* – аппрокс. полин. 2-й ст., мат. Gem

Получившиеся математические зависимости будет иметь вид:

$$S^{СФ-2}(D) = 3{,}605 \cdot 10^3 + 396{,}097 \cdot D - 399{,}858 \cdot D^2, \quad (4.5)$$

$$S^{ISOLA}(D) = 2{,}505 \cdot 10^3 + 396{,}097 \cdot D - 399{,}858 \cdot D^2, \quad (4.6)$$

$$S^{GEM}(D) = 2{,}405 \cdot 10^3 + 396{,}097 \cdot D - 399{,}858 \cdot D^2, \quad (4.7)$$

где *S(D)* – подача, мм/мин; *D* – диаметр сверла, мм.

Согласно полученной экспериментальной зависимости возможно получить рациональные значения скорости движения осевой подачи для всех типов базо-

вых материалов и всей номенклатуры сверл, используемых на предприятии от 0,8 до 2,0 мм. Величину частоты вращения шпинделя можно определить согласно зависимости рис. 4.4.

4.3 Определение рациональных режимов резания

При расчете режимов резания, гарантирующих качественную, бездефектную обработку отверстий нужно предупредить дефектообразование. Следовательно, при назначении режимов сверления фольгированного стеклотекстолита необходимо учесть все ограничения, предопределяющие все возможные дефекты. В нашем случае – это использование рациональных режимов резания ($S_{рац}$, $n_{рац}$). Выбор нужных режимов резания базируется на набранной базе данных осевой составляющей силы резания P_0 и подбору режимов резания по схеме минимальные значения по P_0 – максимальная производительность.

Найденное решение и построенные графические зависимости скорости движения осевой подачи от частоты вращения шпинделя и подачи от диаметра обрабатывающего инструмента предусматривают непосредственное участие технолога в определении бездефектных условий обработки. Для упрощения работы с полученными данными получена табл. 28, которая позволяет назначать режимы резания без излишнего привлечения высококвалифицированного технического персонала. Значения скорости движения осевой подачи $S_{рац}$ и частоты вращения шпинделя $n_{рац}$ округлены.

Таблица 28

Рациональные режимы резания

Материал	Диаметр сверла, мм	Частота вращения, об./мин (n)	Подача/оборот, мм/об	Ск. дв. осевой подачи, мм/мин
СФ2-35 «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова, г. Мариуполь	1,0	34000	0,077	2600
	1,1	35000	0,073	2560
	1,2	36400	0,069	2500
	1,3	37800	0,065	2440
	1,4	39300	0,06	2370
	1,5	40700	0,056	2300
	1,6	43400	0,052	2210
	1,7	43000	0,048	2120
	1,8	45100	0,044	2000
	1,9	47000	0,041	1910
	2,0	48000	0,037	1800
Isola, Германия, г. Дюрен	1,0	36400	0,069	2500
	1,1	37300	0,066	2460
	1,2	38600	0,062	2400
	1,3	40000	0,059	2340
	1,4	41000	0,055	2270
	1,5	42600	0,052	2200
	1,6	44000	0,048	2110
	1,7	45500	0,044	2020
	1,8	46800	0,041	1920
	1,9	48000	0,038	1810
	2,0	49000	0,034	1690

Окончание табл. 28

Материал	Диаметр сверла, мм	Частота вращения, об./мин (n)	Подача/оборот, мм/об	Ск. дв. осевой подачи, мм/мин
GEM (ILM), КНР	1,0	38600	0,062	2400
	1,1	39800	0,059	2350
	1,2	40100	0,056	2300
	1,3	41900	0,053	2240
	1,4	43000	0,05	2170
	1,5	44300	0,047	2100
	1,6	45600	0,044	2010
	1,7	46800	0,041	1920
	1,8	47900	0,038	1820
	1,9	48900	0,035	1710
	2,0	49600	0,032	1600

Таким образом, предварительно получены оптимальные режимы резания при обработке фольгированного стеклотекстолита для всей номенклатуры базовых материалов, используемых на предприятии: СФ2-35 «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова, г. Мариуполь; Isola, Германия, г. Дюрен; GEM (ILM) производства КНР и всей номенклатуры сверл диаметрами от 1,0 до 2,0 мм. Для максимального упрощения работы с режимами резания они дополнительно затабулированы.

Для более надежного расчета и освобождения от негативного влияния человеческого фактора при подготовке производства, предлагается провести автоматизацию расчетов с разработкой программной среды, которая позволяет по принципу задания предварительных входных данных выполнить назначение режимов резания и ввод данных в стойку управления станком.

4.4 Дополнительные особенности сверления отверстий

Особенности обработки печатных плат подробно рассмотрены в Главе 1. Для наиболее полного анализа процесса резания композиционного стеклотекстолита необходимо отметить ряд дополнительных особенностей, сопутствующих обработке:

Во-первых, материал обладает высокими упругими свойствами, что определяет особенности процесса резания. В первую очередь имеют место большие площадки контакта на задних поверхностях сверла. Ввиду упругих характеристик стеклотекстолита происходит упругое восстановление слоя обрабатываемого материала, лежащего над поверхностью резания. Это приводит к повышенным значениям сил резания на задней поверхности, следовательно, износ инструмента происходит в основном по задней поверхности и путем округления режущей кромки.

Во-вторых, анизотропная структура стеклотекстолита и высокие упругие свойства наполнителя, предопределяют хрупкий характер разрушения материала и специфический характер стружкообразования. Как правило, имеет место мелкая пылевидная фракция стружки.

Приведенные особенности показывают, что для достижения требуемого качества обработанной поверхности, необходимой производительности и оптимизации процесса резания нужно дополнительно исследовать процесс стружкообразования и износа сверл в привязке к действующим силам резания.

4.4.1 Процесс стружкообразования при сверлении

Процесс стружкообразования значительно влияет на механическую обработку печатной платы. В частности, от стружкообразования зависит сила резания, качественные показатели обработки отверстий и условия износа сверл. Стеклотекстолит представляет собой анизотропную композицию армирующих волокон и

полимерного связующего. При этом прочность и твердость волокон намного выше полимерного связующего (на несколько порядков).

Необходимым условием процесса стружкообразования выступает доведение основного материала до разрушения, которое имеет место после преодоления предела упругости. Процесс стружкообразования схематично показан на рис.4.5.

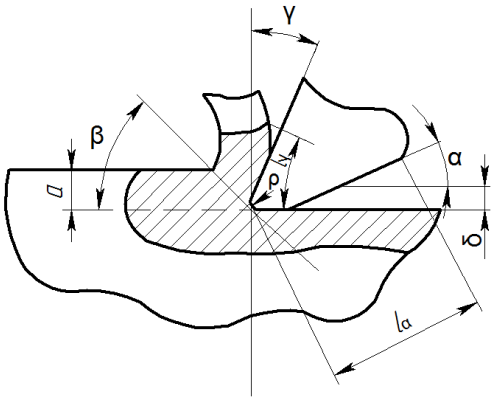


Рис.4.5 Схема стружкообразования

В начальный момент внедрения режущей части сверла происходит сжатие обрабатываемого материала, что приводит к сжатию контактных слоев и увеличению площади контакта инструмента. При дальнейшем увеличении контактной нагрузки сначала происходит хрупкое разрушение полимерной матрицы и образование опережающей трещины. Появляется зона сдвига (плоскость скалывания), которая расположена под углом β к направлению режущей части инструмента. Одновременно происходит разрушение адгезионных связей между армирующей и полимерной матрицей и разрыв волокон. Образуется фрагмент стружки, который перемещается по передней поверхности и вдоль плоскости сдвига. После смещения элемента стружки происходит дальнейшее сжатие обрабатываемого материала и образование нового фрагмента стружки, который отделяется в момент, когда сила, действующая на режущую часть сверла, превысит силу внутреннего сцепления. При этом разрушение происходит почти мгновенно за счет образования трещин и сколов.

Природа резания и разрушения материала обусловлена хрупким цепным передавливанием и надламыванием волокон. Чем меньше будет дискретный фрагмент отделяемой стружки, тем меньше нужно затратить энергии на отделение стружки. При обработке стеклотекстолита процесс дробления и измельчения

стружки представляет существенную сложность. Исследования зоны резания [22] показывают, что вблизи режущей кромки материал испытывает деформации растяжения, перпендикулярные направлению резания и деформации сжатия, направленные вдоль резания.

Контакт режущей кромки с обрабатываемым материалом осуществляется как по передней, так и по задней поверхностям (рис.4.5). По переродней поверхности l_γ длина контакта сравнительно не большая и приближенно может быть приравнена в толщине среза *a*, основные же контактные напряжения возникают на задней поверхности режущей кромки сверла, поэтому площадь контакта по задней поверхности называется фактической площадью контакта [24]. Длина контакта по задней поверхности определяется как:

$$l_\alpha = h_з \cdot (\cos\alpha + \delta) \cdot \sin\alpha - r_\alpha \qquad (4.8)$$

где $h_з$ – износ резца по задней поверхности; δ – упругое восстановление материала; r_α – радиальный износ, принимаемый за радиус скругления режущей кромки.

Упругое восстановление материала зависит от его упругих свойств и не и геометрически сверла и определяется как:

$$\delta_0 = \left\{ \left[\rho \cdot \left(\frac{1}{tg(\beta/2)} - 1 \right) + l_\alpha \right] \cdot \sin\alpha - \rho \cdot \left[\frac{\sin(\beta/2 + \alpha)}{\sin(\beta/2)} - 1 \right] \right\} \cdot k \qquad (4.9)$$

где β – угол заострения; k – коэффициент, учитывающий обрабатываемый материал; ρ – радиус скругления режущей кромки.

По мере изнашивания инструмента из-за более интенсивных процессов разрушения полимерного связующего снижается упругое восстановление материала, которое определяется как:

$$\delta_h = \delta_0 - n \cdot h_з \qquad (4.10)$$

где n зависит от свойств обрабатываемого материала. Наличие эффекта упругого восстановления искажает толщину среза, которая может отличаться от но-

минальной на 25 – 40%, что существенно влияет на качество обработки и усложняет назначение диаметров обрабатываемых сверл.

Таким образом, фактическая толщина среза будет определяться как:

$$a_{ф} = a - \delta_h \qquad (4.11)$$

4.4.2 Влияние режимов резания на процесс стружкообразования

Конечный вид и фракция получающейся стружки напрямую зависит от самого композиционного материала, геометрии и степени износа инструмента, а также режимов резания.

Для установления влияния режимов резания на характер стружкообразования были проанализированы образцы стружки, полученной после обработки стеклотекстолита марки СФ-2 производства ЗАО «Молдавизолит» при обработке сверлом производства Ham Ø 2 мм со стандартной схемой заточки на режимах резания: S = 1100; 1500; 1700; 1900; 2100; 2300; 2400 мм/мин при фиксированном n = 36000 об/мин. Режимы резания выбраны исходя из разных значений осевой составляющей силы резания, измеренных при проведении экспериментов:

1. n = 36000 об/мин; S = 1100 мм/мин; P_0 = 2,5Н;
2. n = 36000 об/мин; S = 1500 мм/мин; P_0 = 3,5Н;
3. n = 36000 об/мин; S = 1700 мм/мин; P_0 = 4,5Н;
4. n = 36000 об/мин; S = 1900 мм/мин; P_0 = 7,1Н;
5. n = 36000 об/мин; S = 2100 мм/мин; P_0 = 8,5Н;
6. n = 36000 об/мин; S = 2300 мм/мин; P_0 = 10,3Н;
7. n = 36000 об/мин; S = 2400 мм/мин; P_0 = 3,4Н.

Измерения фракции стружки проводились с помощью прецизионного инструментального микроскопа с 45-кратным увеличением ИМЦЛ 100х50А ГОСТ8074 с преобразователем линейных перемещений ПЛФ-3 и цифровым отсчетным устройством УЦО 201С с ценой деления 0,1 мкм, рис.4.6.



Рис.4.6 Измерение фракции стружки с помощью микроскопа

Для набора требуемого объема стружки на каждом режиме резания обработано не менее 1000 отверстий. Обработка заготовок выполнялась на сверлильном многошпиндельном станке СМ-600. Для исключения паразитного влияния включений медной фольги в процессе анализа, она предварительно была химически стравлена. Дополнительно демонтирован фиксирующий прижим и отключена принудительная вытяжная вентиляция и воздушный обдув зоны резания.

В результате проведения измерений установлено, что с увеличением скорости движения осевой подачи и осевой составляющей силы резания размер стружки увеличивается. Так, для ранее определенных режимов обработки размер фракции стружки $L_{СТР}$ (средний размер, измеренный по диагонали) составил:

1. n = 36000 об/мин; S = 1100 мм/мин; P_0 = 2,5Н; $L_{СТР}$ = 0,04...0,05 мм;
2. n = 36000 об/мин; S = 1500 мм/мин; P_0 = 3,5Н; $L_{СТР}$ = 0,06...0,08 мм;
3. n = 36000 об/мин; S = 1700 мм/мин; P_0 = 4,5Н; $L_{СТР}$ = 0,08...0,12 мм;
4. n = 36000 об/мин; S = 1900 мм/мин; P_0 = 7,1Н; $L_{СТР}$ = 0,12...0,15 мм;
5. n = 36000 об/мин; S = 2100 мм/мин; P_0 = 8,5Н; $L_{СТР}$ = 0,15...0,19 мм;
6. n = 36000 об/мин; S = 2300 мм/мин; P_0 = 10,3Н; $L_{СТР}$ = 0,18...0,28 мм;
7. n = 36000 об/мин; S = 2400 мм/мин; P_0 = 3,4Н; $L_{СТР}$ = 0,02...0,03 мм.

Результаты измерений сведены в график, рис.4.7.

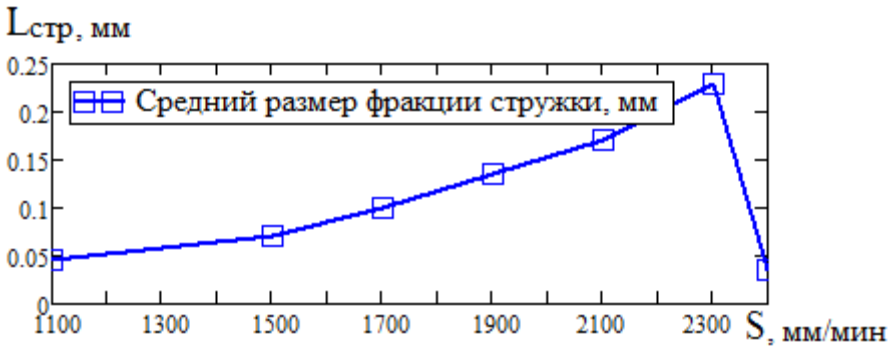


Рис.4.7 Влияние режимов резания на фракцию стружки

Дополнительно обнаружено, что на режиме 5 стружка начинает спрессовываться с образованием некоего подобия «гранул». На режиме 6 (при превышении осевой составляющей силы резания 10 Н) возможны дефекты на выходе инструмента в виде отслоения и выдавливания отдельных крупных (более 1 мм) фрагментов стеклоткани. Наименьший размер стружки получен на режиме 7 при среднем значении осевой составляющей силы резания 3,4 Н. Интересным является тот факт, что на режимах 1 и 2, когда значения P_0 сравнима или меньше P_0 на режиме 7 имеем меньшую (почти в 2 раза) фракцию стружки. Размер стружки представлен на рис.4.8.

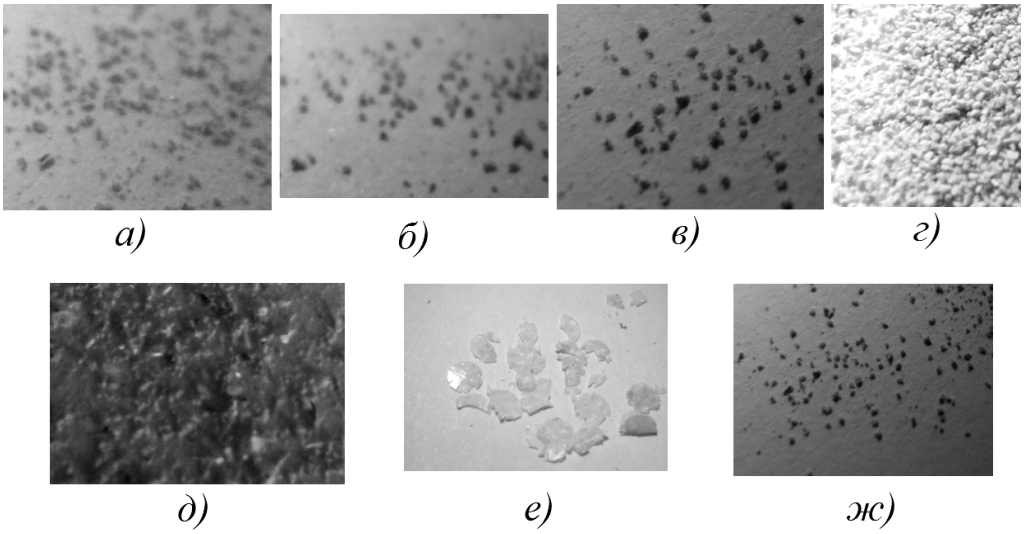


Рис.4.8 Размер стружки при 50-кратном увеличении:
а) – $L_{СТР}$ = 0,04...0,05 мм; *б)* – $L_{СТР}$ = 0,06...0,08 мм; *в)* – $L_{СТР}$ = 0,08...0,12 мм; *г)* – $L_{СТР}$ = 0,12...0,15 мм; *д)* – $L_{СТР}$ = 0,15...0,19 мм; *е)* – $L_{СТР}$ = 0,18...0,28 мм (отслоение отдельных крупных фрагментов); *ж)* – $L_{СТР}$ = 0,02...0,03 мм

Таким образом, наилучшим с точки зрения процесса устойчивого стружкообразования с наименьшей фракцией стружки при наименьшем значении осевой составляющей силы резания является режим 7. При постепенном увеличении скорости движения осевой подачи (режимы 1...4) размер стружки постепенно увеличивается со значений 0,04 мм до 0,15 мм вплоть до режимов 5, 6, где имеет место существенная деструкция полимерного связующего с образованием дефектов в виде выдавливания отдельных «недорезанных» фрагментов стеклоткани. То есть, на данных режимах сверло скорее не режет и надламывает волокна стеклоткани, а давит и вырывает материал. Для доказательства последнего утверждения проведен дальнейший анализ шероховатости стенки отверстий и упругого восстановления материала после обработки (усадки отверстия в диаметральном направлении).

4.4.3 Влияние режимов резания на качество отверстий и шероховатость

Одним из основных параметров качества поверхности является шероховатость стенок отверстия, поскольку она обуславливает хорошие условия для адсорбирования каталитических частиц палладия и соответственно последующее качественное меднение. Практически установлено, что наиболее качественная металлизация в отверстиях имеет место при значениях микрошероховатости до Ra1,6 мкм. При превышении шероховатости отверстия свыше Ra3,2 мкм ухудшается процесс нанесения подслоя палладия и последующие операции меднения.

Для определения шероховатости стенок отверстия при разных режимах резания с использованием специальных форм и компаунда холодного отверждения АСТ-Т предварительно подготовлены образцы материала с обработанными отверстиями (сошлифы), рис.4.9.



Рис.4.9 образцы шероховатости отверстий

Определение шероховатости стенок отверстий выполнялось с помощью инструментального профилометра TR-200, рис.4.10. Наибольшей сложностью при выполнении замеров оказалась сравнительно короткая, ограниченная толщиной материала, площадка – внутренняя стенка отверстия, которая ограничивала количество ходов измерительной иглы. Для предотвращения заливки внутренней полости отверстий они предварительно предохранялись легкосъемным латексным резистом LDM. Процесс проведения измерений с помощью профилометра и вид профилограмм приведен на рис.4.10



Рис.4.10 Проведение измерений шероховатости отверстий

Выполненные измерения приведены ниже

1. n = 36000 об/мин; S = 1100 мм/мин; P_0 = 2,5Н; Ra = 0,83...1,21 мкм;
2. n = 36000 об/мин; S = 1500 мм/мин; P_0 = 3,5Н; Ra = 1,13...2,26 мкм;

3. n = 36000 об/мин; S = 1700 мм/мин; P_0 = 4,5Н; Ra = 2,34...3,12 мкм;
4. n = 36000 об/мин; S = 1900 мм/мин; P_0 = 7,1Н; Ra = 3,14...4,59 мкм;
5. n = 36000 об/мин; S = 2100 мм/мин; P_0 = 8,5Н; Ra = 4,28...6,27 мкм;
6. n = 36000 об/мин; S = 2300 мм/мин; P_0 = 10,3Н; Ra = 5,93...12,54 мкм;
7. n = 36000 об/мин; S = 2400 мм/мин; P_0 = 3,4Н; Ra = 0,6...0,8 мкм.

Результаты измерений сведены в график, рис.4.11

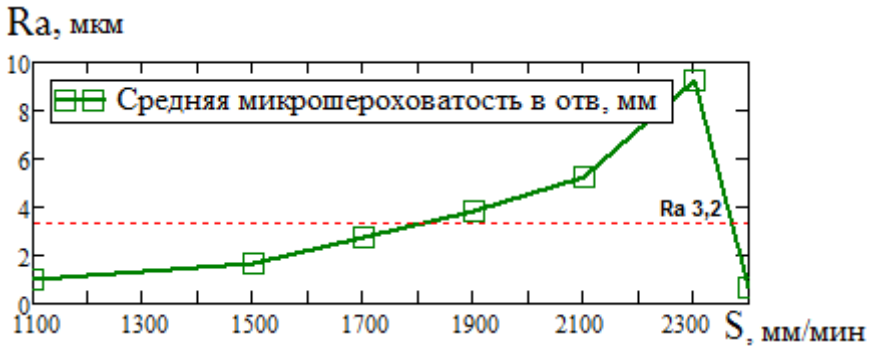


Рис. 4.11 Влияние режимов резания на шероховатость Ra в отверстии

Таким образом, наиболее приемлемым с точки зрения создания необходимой микрошероховатости в отверстиях являются режимы 1, 7 (Ra = 0,6...1,21 мкм). При постепенном увеличении скорости движения осевой подачи шероховатость в отверстии увеличивается до значений 2,26 мкм (режим 2). Параллельно с увеличением подачи и осевой составляющей силы резания появляются дефекты при обработке. Установлено, что на режимах 4...6 имеют место дефекты в виде посветлений материала на входе и выходе инструмента, которые прогрессируют с увеличением скорости движения осевой подачи (и осевой составляющей силы резания), а на режиме 6 дополнительно отмечено выкрашивание материала на выходе сверла. Следовательно, режимы 4...6 не могут быть использованы для сверления отверстий ввиду наличия дефектов при обработке.

4.4.4 Влияние режимов резания на упругое восстановление материала

Наличие упругого восстановления базового материала после обработки искажает толщину среза, которая фактически не будет равна номинальной и отличается от нее на 25 – 40% [77, 78]. Естественно, что данный факт усложняет назначение диаметров обрабатываемых сверл. Величина упругого восстановления зависит от упругих свойств самого материала и геометрических параметров инструмента и определяется согласно формуле (4.9).

Для определения влияния режимов резания на упругое восстановление материала после проведения сверления на предварительно подготовленных образцах проведен ряд дополнительных измерений и помощью прецизионного инструментального микроскопа ИМЦЛ 100х50А.

Результаты измерений приведены ниже

1. n = 36000 об/мин; S = 1100 мм/мин; P_0 = 2,5Н; Ø 1,98...2,0 мм;
2. n = 36000 об/мин; S = 1500 мм/мин; P_0 = 3,5Н; Ø 1,97...1,99 мм;
3. n = 36000 об/мин; S = 1700 мм/мин; P_0 = 4,5Н; Ø 1,96...1,99 мм;
4. n = 36000 об/мин; S = 1900 мм/мин; P_0 = 7,1Н; Ø 1,95...1,98 мм;
5. n = 36000 об/мин; S = 2100 мм/мин; P_0 = 8,5Н; Ø 1,93...1,97 мм;
6. n = 36000 об/мин; S = 2300 мм/мин; P_0 = 10,3Н; Ø 1,92...1,96 мм;
7. n = 36000 об/мин; S = 2400 мм/мин; P_0 = 3,4Н; Ø 1,99...2,01 мм.

Результаты измерений сведены в график, рис.4.12



Рис.4.12 Влияние режимов резания на упругое восстановление материала

Согласно проведенных измерений выявлено, что имеет место не значительное упругое восстановление материала после выполнения обработки на всех режимах резания. С увеличением скорости движения осевой подачи фактор упругого восстановления прогрессирует вплоть до величины 0,08 мм на диаметр 2 мм (4% от номинального значения). Однако, практически установлено, что разброс величин отверстий в пределах ± 0,07 мм существенно не влияет на назначение диаметров обрабатываемых сверл. Таким образом, влияние режимов резания на упругое восстановление материала не существенное.

4.4.5 Влияние режимов резания на наличие заусенцев фольги в отверстии

В своих исследованиях Степанов А.А. [77, 78] в качестве основного критерия износа режущего инструмента при сверлении предложил использовать технологический критерий, поскольку механическая обработка печатных плат выполняется микросверлами диаметрами 0,8 мм и менее и выполнять постоянную оценку затупления режущего инструмента, тем более с остановкой оборудования, затруднительно.

На реальном производстве используется критерий появления недопустимой величины заусенцев медной фольги в отверстиях печатной платы. На основании требований ГОСТ 23664-79 величина заусенца не должна превышать величины 40 мкм. Согласно внутренних руководящих документов и типовых технологических процессов максимальный порог допустимой величины заусенца сдвинут до 30 мкм, поскольку в результате последующей механической и химико-гальванической обработки имеют место дефекты в виде частичные отсутствия металлизации в отверстиях. Печатные узлы с величиной заусенца медной фольги в отверстиях более 30 мкм бракуются в установленном порядке и подвергаются дополнительной механической и гидроабразивной обработке, а в исключительных случаях – дополнительному химической подготовке поверхности.

Процесс образования заусенцев фольги, причины появления, способы минимизации и варианты их удаления подробно рассмотрены в Главе 1. Механизм образования заусенца на выходе из базового материала связывают с выдавливанием обрабатываемого материала под действием осевой составляющей силы резания [51]. Для оценки влияния режимов резания на наличие заусенцев фольги после обработки на предварительно подготовленных образцах проведен ряд дополнительных экспериментов.

При обработке использован стеклотекстолит марки СФ-2 производства ЗАО «Молдавизолит». Сверление заготовок выполнялось новыми сверлами производства Ham Ø 2 мм (со стандартной схемой заточки). Режимы резания при обработке: S = 1100; 1500; 1700; 1900; 2100; 2300; 2400 мм/мин при фиксированном n = 36000 об/мин (далее Режимы 1...7). В общей сложности каждым сверлом обработано 1500 отверстий (по 1 заготовка на каждый режим). После обработки специальным приспособлением с использованием индикатора часового типа проведены замеры заусенцев $H_З$ на последних рядах обработанных отверстий. Результаты замеров приведены ниже:

1. n = 36000 об/мин; S = 1100 мм/мин; P_0 = 2,5Н; $H_З$ = до 10 мкм;
2. n = 36000 об/мин; S = 1500 мм/мин; P_0 = 3,5Н; $H_З$ = 10...20 мкм;
3. n = 36000 об/мин; S = 1700 мм/мин; P_0 = 4,5Н; $H_З$ = 20...30 мкм;
4. n = 36000 об/мин; S = 1900 мм/мин; P_0 = 7,1Н; $H_З$ = 30...40 мкм;
5. n = 36000 об/мин; S = 2100 мм/мин; P_0 = 8,5Н; $H_З$ = 40...50 мкм;
6. n = 36000 об/мин; S = 2300 мм/мин; P_0 = 10,3Н; $H_З$ = более 50 мкм;
7. n = 36000 об/мин; S = 2400 мм/мин; P_0 = 3,4Н; $H_З$ = до 5 мкм.

Результаты измерений сведены в график, рис.4.13

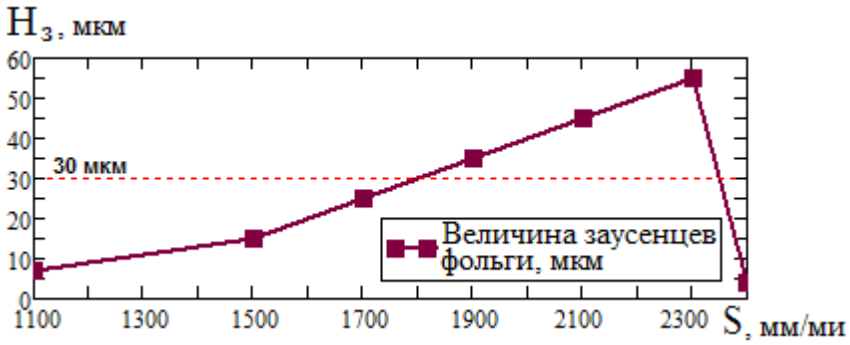
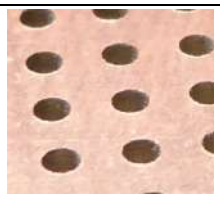
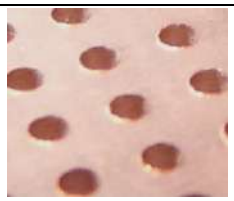
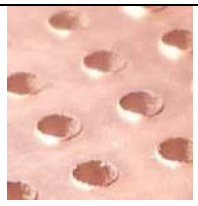
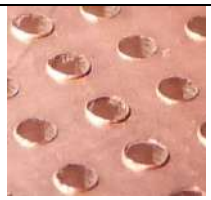
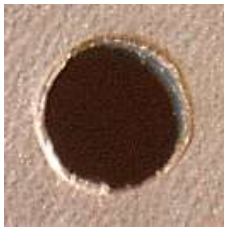


Рис.4.13 Величина заусенцев фольги при обработке 1500 отверстий

В табл. 29 приведен внешний вид обработанных отверстий с наличием заусенцев разной величины в отверстии, которые качественно характеризуют процесс сверления. Необходимо отметить, что на Режиме 4 заусенцы величиной 30 мкм отмечены после обработки 600 отверстий, на Режиме 5 – после 200, а на Режиме 6 – с первого обработанного отверстия.

Таблица 29

Внешний вид обработанных отверстий

Заусенец	Менее 10 мкм	10...20 мкм	30...40 мкм	Более 50 мкм
Вид группы отверстий				
Вид единичного отверстия				

На основании требований стандартов (ГОСТ.23664-79, ОСТ 107.460092.004.01-86, ОСТ 107.460092.004.02-86) заточка инструмента должна проводиться каждые 1000...1500 отверстий при допустимой величине заусенцев медной фольги 30 мкм. Таким образом Режимы 1, 2, 3, 7 (с величиной P_0 до 4,5 Н) соответствуют требованиям нормативной документации и являются работоспо-

собными. Для установления периода стойкости режущего инструмента на режимах резания 1, 2, 3, 7 проведена дополнительная обработка партии серийно изготавливаемых печатных узлов до появления устойчивых заусенцев медной фольги, превышающих 30 мкм. Результаты обработки сведены в табл. 30.

Таблица 30

Период стойкости режущего инструмента

	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5	Режим 6	Режим 7
Период стойк., отв.	7210	5320	2500	970	450	10	10980

Для набора статистики и установления периода стойкости сверл при обработке разных типов базовых материалов проведена дополнительная обработка серийно изготавляваемых печатных узлов на материале Isola и Gem. Сверление заготовок выполнялось новыми сверлами производства Ham Ø 2 мм (со стандартной схемой заточки). Обработка выполнялась на тех же режимах резания с проведением дополнительных замеров заусенцев медной фольги приспособлением индикатора часового типа. Сверление заготовок проводилось до появления устойчивых заусенцев медной фольги, превышающих 30 мкм. Результаты обработки сведены в табл. 31.

Таблица 31

Период стойкости режущего инструмента для разных типов материалов

	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4	Режим 5	Режим 6	Режим 7
Пер. ст-ти, отв., СФ-2	7210	5320	2500	970	450	0	10980
Пер. ст-ти, отв., Isola	6170	4280	1950	820	310	0	9100
Пер. ст-ти, отв., Gem	4070	2800	1550	680	240	0	7300

На основании проведенных экспериментов построены зависимости, рис.4.14.

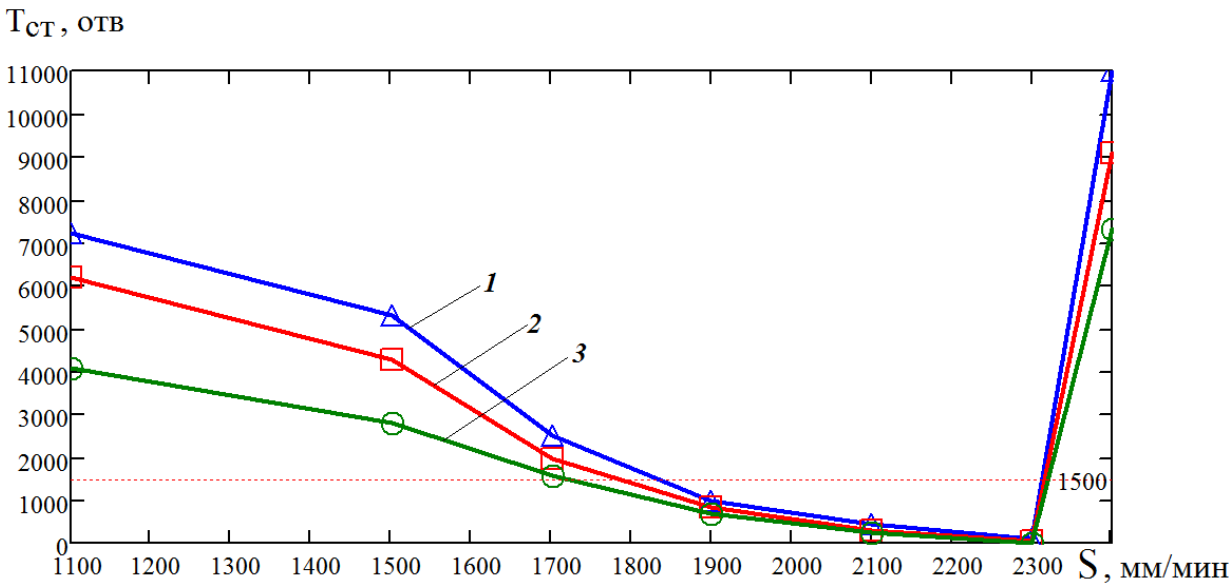


Рис.4.14 Фактический период стойкости сверл
1 – период стойкости реж. инстр., мат. Gem;
2 – период стойкости реж. инстр., мат. Isola;
3 – период стойкости реж. инстр., мат. СФ-2;

Таким образом, установлено, что на Режиме 6 (максимальные значения осевой составляющей силы резания P_0 для всех типов обрабатываемых материалов) заусенцы медной фольги имеют место уже в самом начале обработки и с увеличением количества обработанных отверстий величина заусенцев возрастает. Наиболее предпочтительным с точки зрения периода стойкости режущего инструмента при наибольшей производительности процесса сверления для всех типов обрабатываемых материалов является Режим 7 (минимальные значения P_0). Режимы 1, 2, 3 для всех типов стеклотекстолита удовлетворяют требованиям нормативной документации [10, 14, 15, 68, 69, 70], однако период стойкости сверл на данных режимах в 1,5... 5 раз ниже. Обработка на Режимах 4, 5, 6 с точки зрения периода стойкости режущего инструмента не приемлема, поскольку между переточками обрабатывается количество отверстий менее 1500 [10, 14, 15, 68, 69, 70].

4.4.6 Общие закономерности влияния режимов резания на сверление

При резании стеклотекстолита в начальный момент времени происходит сжатие обрабатываемого материала, что приводит к сжатию контактных слоев и увеличению площади контакта, в основном, по задней поверхности. С дальнейшим ростом контактной нагрузки происходит хрупкое разрушение полимерной матрицы с образованием опережающей трещины и появляется плоскость скалывания. Одновременно происходит разрушение адгезионных связей между армирующей и полимерной матрицей и разрыв волокон. Образуется фрагмент стружки, который перемещается по передней поверхности и вдоль плоскости сдвига. После смещения элемента стружки происходит дальнейшее сжатие обрабатываемого материала и образование нового фрагмента стружки, который отделяется в момент когда сила, действующая на режущую часть сверла превысит силу внутреннего сцепления.

При этом разрушение происходит мгновенно за счет образования трещин и сколов. Таким образом, природа резания и разрушения материала обусловлена хрупким цепным передавливанием и надламыванием волокон. Чем меньше будет дискретный фрагмент отделяемой стружки, тем меньше нужно затратить энергии на отделение стружки.

Для исследования влияния режимов резания на процесс стружкообразования, качество и шероховатость стенок обработанных отверстий, а также упругое восстановление материала после сверления проведен ряд экспериментов. В качестве материала использован стеклотекстолит марки СФ-2 производства ЗАО «Молдавизолит» и сверло Ø 2 мм. Обработка выполнялась при фиксированном n = 36000 об/мин и значениях скорости движения осевой подачи: S = 1100 (режим 1); 1500 (режим 2); 1700 (режим 3); 1900 (режим 4); 2100 (режим 5); 2300 (режим 6); 2400 мм/мин (режим 7).

Установлено, что с увеличением подачи и осевой составляющей силы резания размер фракции стружки постепенно возрастает. При значениях скорости движения осевой подачи S = 2100...2300 мм/мин (P_0 = 8,5…10,3 Н), где имеет ме-

сто существенная деструкция полимерного связующего с образованием дефектов в виде выдавливания отдельных «недорезанных» фрагментов стеклоткани. То есть, на данных режимах сверло скорее не режет и надламывает волокна стеклоткани, а давит и вырывает материал. Для доказательства последнего утверждения проведен дальнейший анализ шероховатости отверстий и упругого восстановления материала после обработки (усадки отверстия в диаметральном направлении).

При постепенном увеличении скорости движения осевой подачи шероховатость в отверстии увеличивается до значений 2,26 мкм (режим 2). Параллельно с увеличением подачи и осевой составляющей силы резания появляются дефекты при обработке. Установлено, что на режимах 4...6 имеют место дефекты в виде посветлений материала на входе и выходе инструмента, которые прогрессируют с увеличением скорости движения осевой подачи (и осевой составляющей силы резания), а на режиме 6 дополнительно отмечено выкрашивание материала на выходе сверла. выявлено, что имеет место не значительное упругое восстановление материала после выполнения обработки на всех режимах резания. При анализе влияния режимов резания на упругое восстановление материала выявлено, что с увеличением скорости движения осевой подачи фактор упругого восстановления прогрессирует вплоть до величины 0,08 мм на диаметр 2 мм (4% от номинального значения). Однако, практически установлено, что разброс величин отверстий в пределах ± 0,07 мм существенно не влияет на назначение диаметров обрабатываемых сверл. Таким образом, влияние режимов резания на упругое восстановление материала не существенное.

Таким образом, наиболее оптимальными с точки зрения процесса устойчивого стружкообразования, создания оптимальной микрошероховатости в отверстии и отсутствия дефектов при обработке являются режимы 1, 2, 3, 7 со средними значениями осевой составляющей силы резания до 3,5 Н. Однако, режим 7, помимо этого, является еще и более высокопроизводительным (в 1,6...2,2 раза). Режимы 4...6 не могут быть использованы при обработке ввиду наличия внешних дефектов в виде посветлений материала на входе и выходе сверла и излишней

шероховатости в отверстиях. А на режимах 5, 6 дополнительно обнаружены дефекты в виде выдавливания отдельных «недорезанных» фрагментов стеклоткани.

С другой стороны проведено изучение влияния режимов резания на наличие заусенцев фольги в отверстии и период стойкости режущего инструмента. Установлено, что наиболее предпочтительным по периоду стойкости режущего инструмента при наибольшей производительности процесса сверления для всех типов обрабатываемых материалов является Режим 7 (минимальные значения P_0). Режимы 1, 2, 3 (средние значения P_0 до 4,5 Н) для всех типов стеклотекстолита удовлетворяют требованиям нормативной документации [10, 14, 15, 68, 69, 70], однако период стойкости сверл на данных режимах в 1,5... 5 раз ниже. Обработка на Режимах 4, 5, 6 (средние значения P_0 свыше 7,0 Н) с точки зрения периода стойкости режущего инструмента не приемлема, поскольку между переточками обрабатывается количество отверстий менее 1500 [10, 14, 15, 68, 69, 70].

Общие закономерности влияния режимов резания на процесс обработки стеклотекстолита сведены в график, рис.4.15.



Рис.4.15 Влияние режимов резания на процесс обработки

Таким образом, установлено влияние режимов резания и действующей осевой составляющей силы резания P_0 на процесс обработки. Доказано, что наиболее предпочтительными для обработки отверстий являются режимы резания со средними значениями P_0 до 3,5 Н. На данных режимах (Режим 1, 2, 7) наблюдаются наилучшие условия стружкообразования, имеет место наименьшая шероховатость стенок отверстий после обработки (до Ra 2,26 мкм), отмечается наибольший период стойкости инструмента до переточки (2800...10980 в зависимости режима обработки и базового материала). Однако, Режим 7 является более высокопроизводительным (в 1,6...2,2 раза) и обеспечивает наибольший период стойкости инструмента до 11000 с одной переточки, что

Режимы резания со значениями P_0 3,5...4,5 Н (Режим 3) годятся для обработки отверстий, хотя и отмечается некоторое ухудшение шероховатости стенок отверстий и снижение периода стойкости инструмента до 1550...2500 отверстий до переточки. При сверлении на режимах резания с P_0 4,5...7,0 Н (Режим 4) помимо ухудшения шероховатости и снижения периода стойкости режущего инструмента до 680...970 отверстий имеют место появление локальных дефектов в виде посветлений материала на входе и выходе инструмента, которые прогрессируют с увеличением скорости движения осевой подачи (и осевой составляющей силы резания). Обработка на данных режимах не рекомендуется.

При увеличении осевой составляющей силы резания свыше значений 7,0 Н (Режим 5) дефекты в виде посветлений материала на входе и выходе инструмента принимают регулярный характер, отмечается увеличение шероховатости свыше значений Ra 3,2 мкм, что приводит к ухудшению процесса нанесения подслоя палладия и последующие операции меднения. Кроме того, отмечается снижение периода стойкости сверл ниже 240...450 отверстий до переточки, что не соответствует требованиям ГОСТ нормативной документации [10, 14, 15, 68, 69, 70]. Дополнительно на данных режимах имеет место усадка отверстий после обработки. Сверление на данных режимах резания не допустимо. Пре превышении значений осевой составляющей силы резания значения 10 Н отмечено выкрашивание материала на выходе сверла обработка на данных режимах резания категорически за-

прещена. Аналогичные выводы сделаны для остальной номенклатуры сверл при промышленной отработке результатов внедрения на программно изготавливаемых печатных узлах.

4.5 Влияние затупления инструмента на значение осевой составляющей силы резания и процесс сверления

На основании выводов, полученных в Главе 2, установлено, что на механизм сверления отверстий значительное влияние оказывает отношение радиуса закругления режущей кромки r_β к толщине срезаемого слоя. Отношение r_β / h – это параметр, который оказывает влияние на удельные силы резания. Когда это значение меньше 1, и далее уменьшается, имеет место значительное и нелинейное увеличение удельной силы резания, что описывается как масштабный или размерный эффект [23, 110]. При микросверлении материал удаляется вдоль закругления режущей кромки, поэтому врезание или врубание также возникает вдоль этой кромки.

Для оценки влияния геометрии режущего инструмента и параметров заточки на значение осевой составляющей силы резания P_0 проведен ряд дополнительных экспериментов. С использованием пяти компонентного пьезоэлектрического динамометра Kistler Mini Dyn 9256C2 выполнена обработка отверстий на материале СФ-2 производства ЗАО «Молдавизолит» на одних и тех же режимах резания (n = 36000 об/мин; S = 1100, 1500, 1700 мм/мин: Режим 1, Режим 2, Режим 3 соответственно) с использованием сверл Ø2 мм. Для определения влияния радиуса закругления режущей кромки и степени затупления инструмента на процесс резания, в эксперименте использованы рабочие сверла разной степени затупления. Всего обработано 6 предварительно подготовленных заготовок (по одной на каждый режим резания; 1500 отверстий на каждом режиме) с дополнительным измерением размера стружки, микрошероховатости и заусенцев медной фольги на выходе отверстий. Измерения фракции стружки (L_{CTP}) проводились с помощью

прецизионного инструментального микроскопа ИМЦЛ 100х50А ГОСТ8074, определение шероховатости стенок отверстий (Ra) выполнялось с помощью инструментального профилометра TR-200, измерение величины заусенцев медной фольги ($H_З$) – специальным приспособлением с использованием индикатора часового типа.

В эксперименте использованы сверла фирмы «Ham» со стандартной схемой заточки [104]. Практически установлено, что для инструмента Ø2 мм критическим с точки зрения образования дефектов при обработке является радиус закругления режущей кромки $r_\beta = 0{,}034$ мм. Поэтому при отработке использованы затупленные сверла с $r_\beta = 0{,}03$ мм (предмаксимальная величина затупления) и $r_\beta = 0{,}016$ мм (средняя величина затупления). Внешний вид и геометрические параметры используемого обрабатывающего инструмента представлен на рис.4.16, 4.17

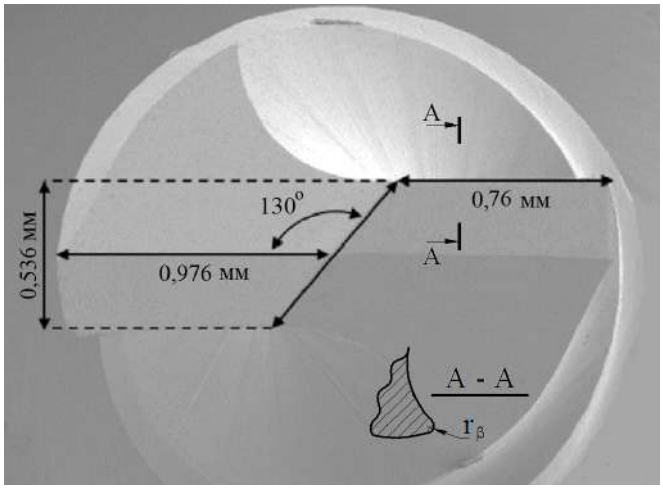


Рис. 4.16 Внешний вид используемых сверл

Используемый затупленный инструмент представлен на рис. 2: а) $r_\beta = 0{,}016$ мм; б) $r_\beta = 0{,}03$ мм

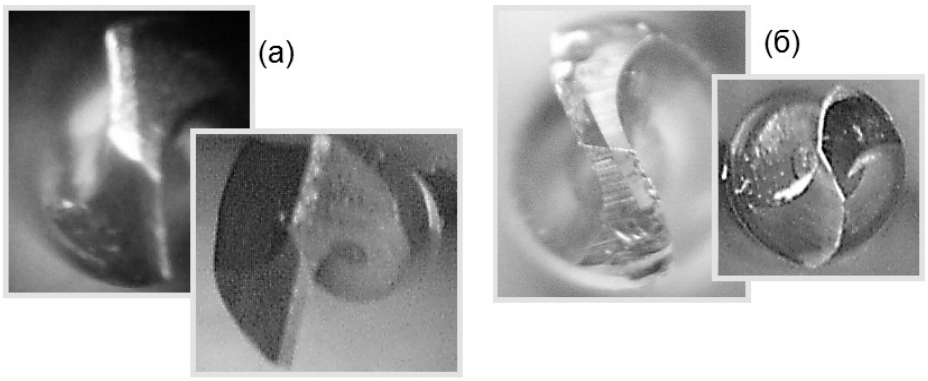
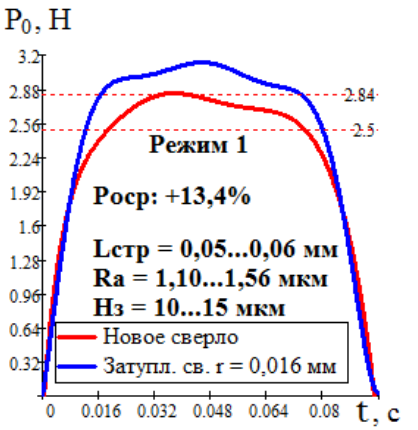
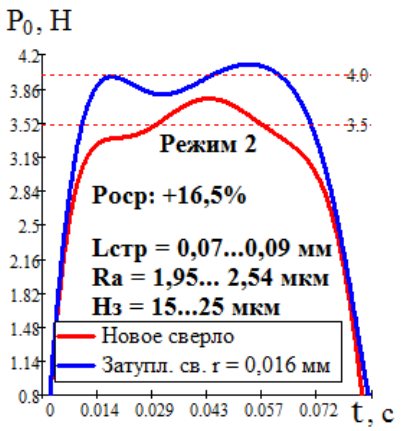
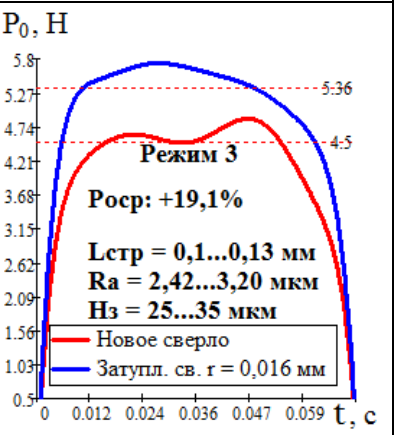


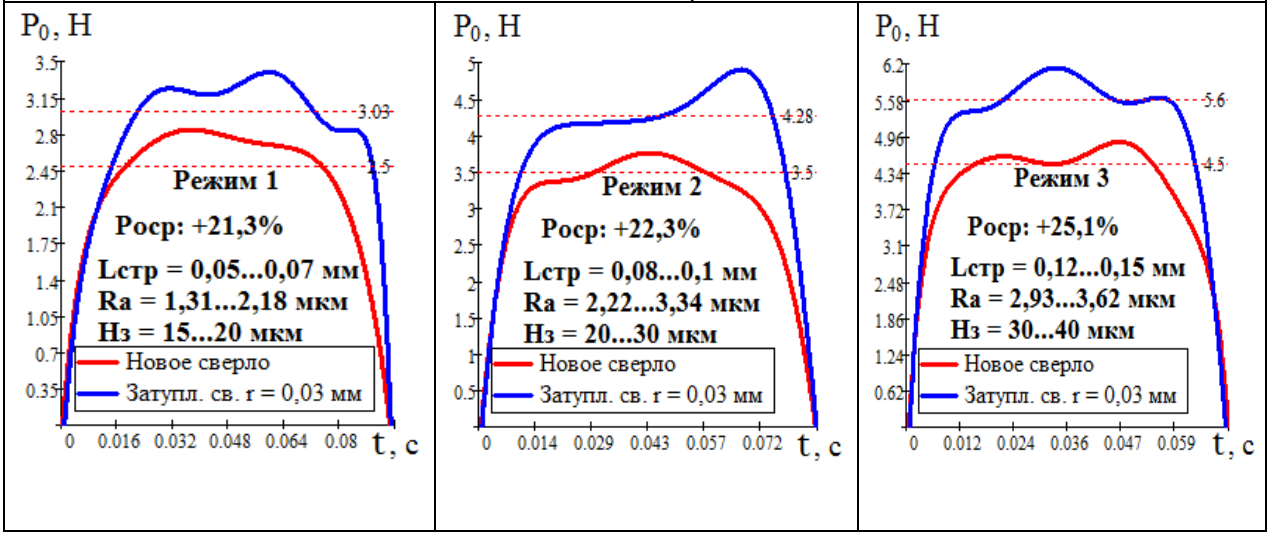
Рис. 4.17 Внешний вид острых и затупленных сверл

Результаты эксперимента сведены в табл.32. Необходимо отметить, что ввиду загруженности графики вместо реальных выходных данных представлены аппроксимационные зависимости $P_0(t)$, полученные с помощью аппроксимации полиномами 5-го порядка. Степень полинома подобрана путем ее повышения, начиная от 2-й. Практически установлено, что повышение степени полинома свыше пятой визуально не увеличивает точности аппроксимируемой функции, повышая лишь время выполнения расчетов и снижая вычислительную устойчивость.

Таблица 32

Влияние скругления режущей кромки сверла на процесс обработки

Вид графика при r_β = 0,016 мм		
		

Вид графика при r_β = 0,03 мм


Таким образом установлено, что использование «подношенных» сверл с радиусом закругления режущей кромки r_β = 0,016 мм, увеличивает нагрузку P_0 на 13...19 % относительно новых сверл с острозаточенными режущими кромками. При затуплении инструмента до предмаксимального значения с r_β = 0,03 мм, осевая составляющая силы резания увеличивается на 20...25 % относительно значений, полученных при обработке острым инструментом. Кроме того, с увеличением скорости движения осевой подачи, влияние износа режущего инструмента возрастает. При этом существенно меняются условия резания базового материала. Так при r_β = 0,016 мм имеем увеличение фракции стружки в 1,2 раза в зависимости от режима резания, при r_β = 0,03 мм – в 1,35 раза. В 1,3 (при r_β = 0,016 мм) и 1,7 (при r_β = 0,03 мм) раза увеличивается микрошероховатость в отверстиях; до 1,3 и 1,75 раза (при r_β = 0,016 и 0,03 мм соответственно) увеличивается величина заусенцев фольги на выходе отверстий.

Необходимо отметить, что с увеличением затупления инструмента помимо увеличения осевой составляющей силы резания P_0 и ухудшения условий резания возрастает количество дефектов при обработке отверстий. Так, при r_β = 0,016 мм на Режиме 3 (S = 1700 мм/мин; P_0 = 4,5 Н) возрастает до критических значений 3,2 мкм шероховатость в отверстии; тогда как при r_β = 0,03 мм этот показатель пре-

вышает допустимые значения уже на Режиме 2 (S = 1700 мм/мин; P_0 = 4,5 Н); при обработке острозаточенным инструментом микрошероховатость отверстия достигает значений Ra 3,2 мкм только при S = 1900 мм/мин; P_0 = 7,1Н. Дополнительно установлено, что на Режиме 3 при r_β = 0,03 мм имеют место локальные дефекты в виде посветлений материала на входе и выходе отверстий. Для установления этого факта медная фольга с заготовок печатных плат была дополнительно удалена химическим способом.

4.6 Автоматизация расчетов

Большинство программ автоматического проектирования электронных средств имеют возможность формирования файлов статистики, в которых сформированы данные по количеству электрорадиоэлементов (Components), числу контактных площадок (Total Pads), в т.ч. площадок металлизированных отверстий (Thru Hole Pads) и апертур под установку элементов поверхностного монтажа на верхней и нижней сторонах платы (Top SMT Pads и Bottom SMT Pads соответственно).

Кроме того, файл содержит информацию о слоях (Board Layer и All Layers), ширине проводников (Line Widths Used). Достаточно полезной является информация касательно отверстий на печатной плате. Сформированный файл содержит количество и диаметры отверстий (Hole Diameters and Quantities), а также возможность определить какие отверстия подлежат дальнейшему процессу металлизации (Plated/Nonplated) рис.4.18.

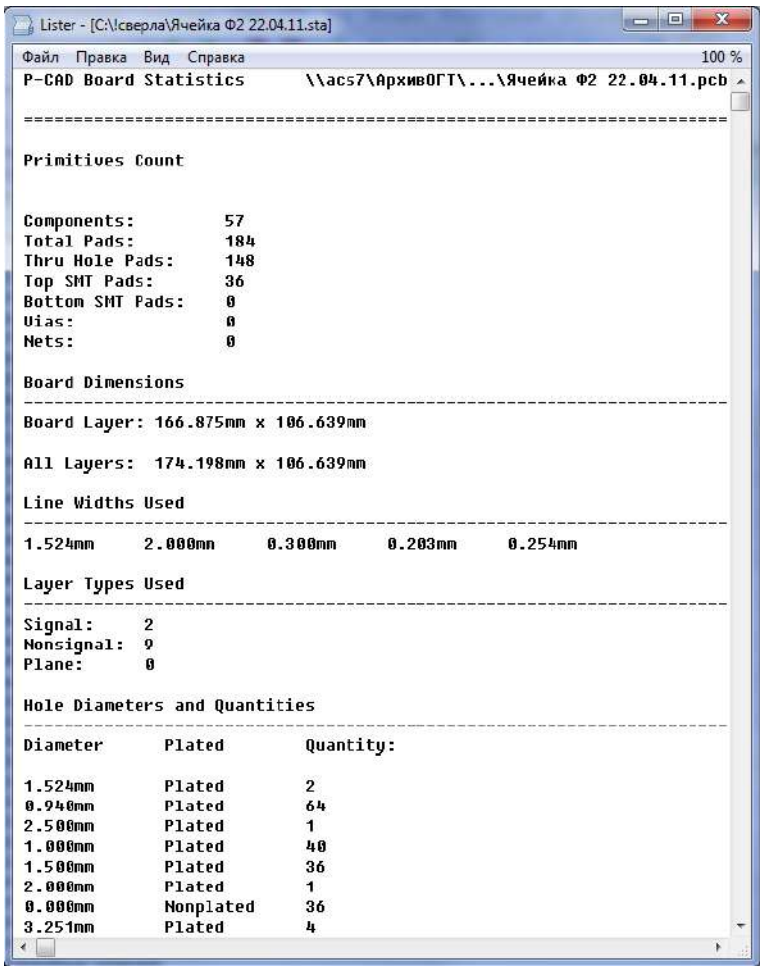


Рис.4.18 Файл статистических данных печатной платы

Для минимизации трудозатрат инженера-технолога по назначению оптимальных режимов резания разработана программа для автоматического назначения режимов **Regime.exe**.

Для корректной работы программы 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). Выбор режимов резания – согласно рекомендаций и выводов, полученных в Главе 3. На рис. 4.19–4.21 представлены режимы резания в привязке к диаметрам обрабатываемых отверстий.

СФ (МИ)

Код	Диаметр сверла	Количество оборотов , об/мин	Поперечная подача, мм/мин	Добавить поле
1	0,8	32300	2660	
2	0,9	32900	2640	
3	1	34000	2600	
4	1,1	35000	2560	
5	1,2	36400	2500	
6	1,3	37800	2440	
7	1,4	39300	2370	
8	1,5	40700	2300	
9	1,6	43400	2210	
10	1,7	43000	2120	
11	1,8	45100	2000	
12	1,9	47000	1910	
13	2	48000	1800	
(№)				

Рис. 4.19 Режимы резания, материал СФ (МИ)

Изола

Код	Диаметр сверла	Количество оборотов , об/мин	Поперечная подача, мм/мин	Добавить поле
1	0,8	34700	2570	
2	0,9	35400	2540	
3	1	36400	2500	
4	1,1	37300	2460	
5	1,2	38600	2400	
6	1,3	40000	2340	
7	1,4	41000	2270	
8	1,5	42600	2200	
9	1,6	44000	2110	
10	1,7	45500	2020	
11	1,8	46800	1920	
12	1,9	48000	1810	
13	2	49000	1690	
(№)				

Рис. 4.20 Режимы резания, материал Изола

Gem (ILM)

Код	Диаметр сверла	Количество оборотов , об/мин	Поперечная подача, мм/мин
1	0,8	37000	2460
2	0,9	37800	2440
3	1	38600	2400
4	1,1	39800	2350
5	1,2	40100	2300
6	1,3	41900	2240
7	1,4	43000	2170
8	1,5	44300	2100
9	1,6	45600	2010
10	1,7	46800	1920
11	1,8	47900	1820
12	1,9	48900	1710
13	2	49600	1600
(№)			

Рис. 4.21 Режимы резания, материал Gem (ILM)

Работа программы Regime.exe предусматривает использование файлов статистических данных, сформированных программами автоматического проектирования электронных средств (P-Cad, Altium и пр.). В данном случае, используются данные количестве и диаметрах отверстий (в том числе и тех которые подлежат/не подлежат металлизации), размерах заготовки и толщине печатной платы.

Программа снабжена простым логически понятным интерфейсом и интуитивно понятна в использовании (рис. 4.22). Разработанный алгоритм реализован в программной среде Delphi. Программа предусматривает работу с предварительно созданной базой данных статистики.

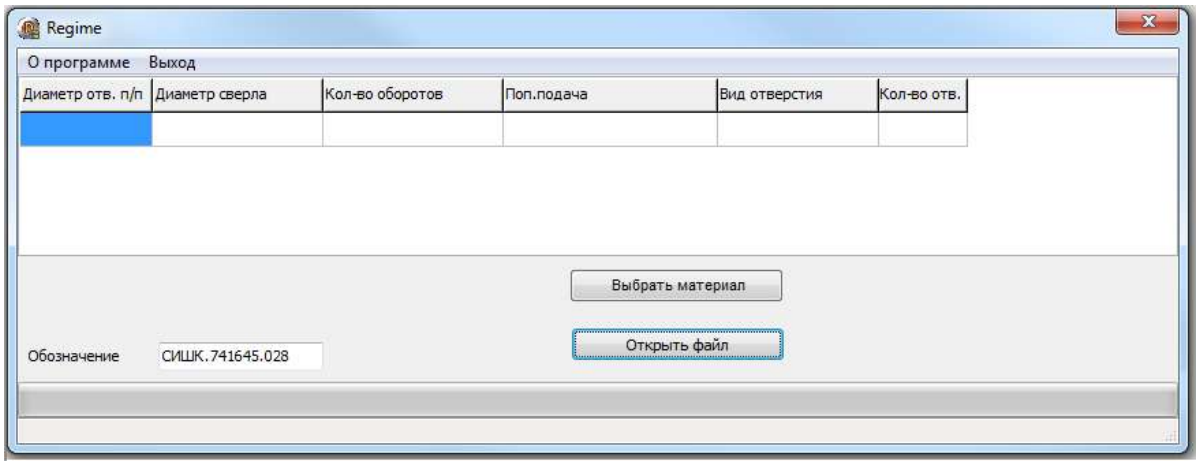


Рис. 4.22 Интерфейс программы Regime

Для автоматического определения режимов резания в программный модуль включено:

1. Обозначение печатной платы (децимальный номер). Поскольку файлы статистических данных не содержат каких-либо удобочитаемых данных о номере платы/заготовки, кроме литеры-исполнения, то это поле заполняется в ручную;

2. Поле выбора базового материала дает возможность выбора из трех основных материалов, используемых на предприятии: GEM (ILM), производства КНР; Isola, производства Германии, г. Дюрен; СФ2-35 «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова, г. Мариуполь. При расширении номенклатуры обрабатываемых материалов программа может быть дополнена/изменена.

При нажатии клавиши «Открыть файл» программа предлагает выбрать путь к необходимому файлу статистических данных (рис.4.23). Далее автоматически

оформляется окно с выходными данными о количестве и диаметрах отверстий на печатной плате, диаметре используемых сверл, наличии металлизации внутри отверстия (говорит о необходимости дополнительного рассверливания после выполнения гальванической подготовки плат) и режимах резания (рис. 4.24).

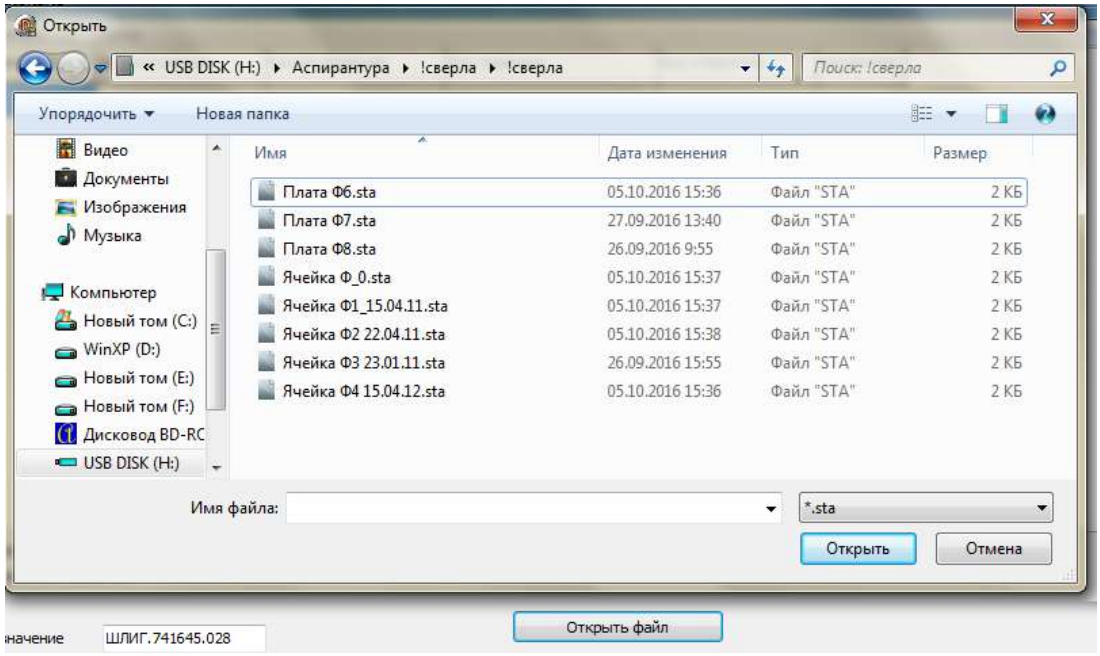


Рис. 4.23 Меню открытия файла статистических данных

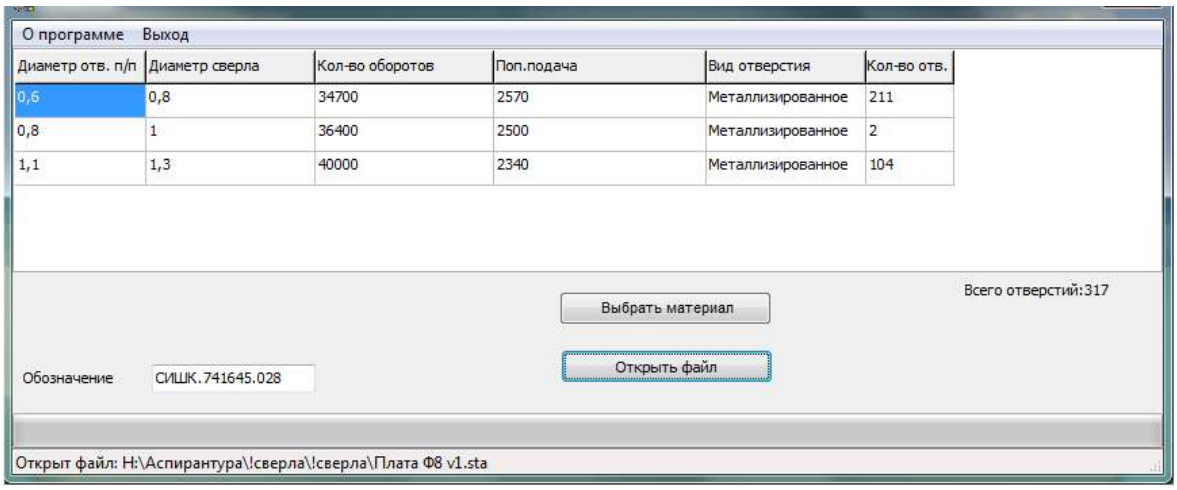


Рис. 4.24 Окно выходных данных

После выбора необходимого файла, выходные данные по рациональным режимам обработки будут сгенерированы в автоматическом режиме. Так, на рис.4.11 видим, что печатная плата содержит 317 металлизированных отверстий, из которых 211 диаметром 0,8 мм, 2 отверстия диаметром 1 мм и 104 отверстия

диаметром 1,3 мм. Режимы обработки составляют: 34700 об/мин – 2570 мм/мин; 36400 об/мин – 2500 мм/мин и 40000 об/мин – 2340 мм/мин соответственно. Разработанная программная среда позволяет исключить человеческий фактор при назначении режимов резания при подготовке производства и разгрузить высококвалифицированный технический персонал от излишнего привлечения.

4.7 Результаты и выводы

Таким образом, определены рациональные факторы обработки фольгированного стеклотекстолита. Выявлены основные причины появления дефектов на материале: силовое и термическое воздействие. Поскольку термовоздействие на процесс обработки нивелируется средствами принудительной вытяжной системы сверлильного оборудования, то силовое воздействие на базовый материал необходимо учитывать. В рамках решения поставленной задачи разработан алгоритм бездефектных режимов обработки и на режимы резания наложены ограничения. Согласно предварительно набранной базе данных по усредненным значениям осевой составляющей силы резания построены графические зависимости подачи от частоты вращения шпинделя и подачи от диаметра обрабатывающего инструмента и найдены математические зависимости, которые позволяют назначать рациональные режимы резания для всех типов базовых материалов, используемых на производстве: СФ2 ГОСТ10316-78, Isola и GEM (ILM).

Найденное решение и построенные графические зависимости скорости движения осевой подачи от частоты вращения шпинделя и подачи от диаметра обрабатывающего инструмента предусматривают непосредственное участие технолога в определении бездефектных условий обработки. Для упрощения работы с полученными выходными данными разработана Таблица рациональных режимов резания, которая позволяет назначать режимы резания без излишнего привлечения высококвалифицированного технического персонала.

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 $P0_{ср}$ до 3,5 Н.

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. Автоматизированная программа работает с выходными файлами статистических данных 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 [8...12, 52...56] под дальнейшую гальваническую обработку и металлизацию. При качественном предварительном наборе файлов статистики Regime.exe позволяет существенно сократить время назначения рациональных режимов резания и ускорить технологическую подготовку производства.

В продолжении работ по автоматизации на базе программы Regime.exe разработана программа для автоматической компоновки карт наладки оборудования с учетом расчета режимов резания и нормирования трудозатрат. Для оптимизации работы ГИХ (группа инструментального хозяйства) разработана автоматизированная программа для расчета необходимого количества сверл работа с учетом остатка сверл на складе, что позволяет производить расчет с достаточной степенью точности, существенно экономить время на заказ и приобретение инструмента и грамотно распоряжаться бюджетом отдела и организации в целом. Кроме того, разработаны технологические рекомендации, устанавливающие основные факторы, влияющие на качество и производительность обработки отверстий.

Глава 5 Практическое использование и внедрение результатов работы

5.1 Подтверждение адекватности методики по назначению режимов резания

На основании методики назначения бездефектных режимов резания разработан соответствующий алгоритм (рис. 4.1) с учетом наложения технологических ограничений при обработке. При разработке алгоритма учтено, что база теоретических данных средних значений осевой составляющей силы резания P_0 сформирована и области оптимальных значений известны. Тем не менее, для подтверждения адекватности методики по назначению режимов резания необходима опытная эксплуатация режимов на серийном производстве: серийная обработка партии заготовок.

5.1.1 Экспериментальная проверка: техническое обоснование

Разработанные рекомендации по назначению эффективных режимов обработки на операциях сверления фольгированного стеклотекстолита оформлены в виде руководящих технических материалов, которые внедрены и используются на ряде предприятий Уральского региона. Экспериментальная проверка проводилась на базе АО «Радий» при переходе на линейку импортных твердосплавных сверл и внедрении новых базовых материалов для изготовления печатных плат.

Как было описано выше, повышение эффективности сверления отверстий на базовом материале выполнялось параллельно по количественным и качественным показателям обработки. К количественным показателям относится увеличение производительности обработки в привязке к максимальному числу отверстий, обработанных с одной установки сверла. Показатели влияют на время, затрачиваемое на переналадку оборудования, заточку режущего инструмента, количество приобретаемых твердосплавных сверл и конечную стоимость изделий. К

основным качественным показателям можно отнести минимизацию дефектов при сверлении, связанных со слоистой структурой композиционного материала и высоким абразивным действием стеклоткани, на основе которой изготавливается стеклотекстолит. Дефекты при обработке отверстий связаны с возникновением ореолов и осветлений диэлектрика, большими заусенцами и отслаиванием фольги на выходе сверла, заполировкой и засаливанием поверхности отверстия, расслаиванием материала, «гвоздевым эффектом» и пр. Дополнительно необходимо добиться снижения количества технологического отхода материала на отработку режимов резания.

Промышленная отработка режимов резания проводилась на сверлильных станках для обработки печатных плат из фольгированного стеклотекстолита СМ-600 с использованием сверл Ø 1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,7; 2,0 мм на серийно изготавливаемых печатных платах на всех типах базовых материалах, используемых на предприятии: GEM (ILM), производства КНР; Isola, производства Германии, г. Дюрен; СФ2-35 «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова.

В общей сложности перед внедрением методики назначения эффективных режимов резания обработано более 10 000 шт. программных заготовок по каждому типу материала. Небольшие отклонения порядка 1...1,5 % без необходимости последующей подкорректировки по скорости движения осевой подачи и частоте вращения шпинделя отмечены лишь на материале GEM (ILM), производства КНР на различных партиях материала. Технические критерии оценки от внедрения методики по назначению эффективных режимов резания приведены в табл.33.

Таблица 33

Технические критерии оценки от внедрения методики по назначению эффективных режимов резания

Критерий повышения эффективности сверления	Базовая техн. сверления	Предлагаемая техн. сверления	Повышение эффективности от внедрения
Значение скорости движения осевой подачи для сверла Ø1 мм, материал Isola	1100	2500	2,3 раза

Окончание табл. 33

Критерий повышения эффективности сверления	Базовая техн. сверления	Предлагаемая техн. сверления	Повышение эффективности от внедрения
Среднее количество просверленных отверстий/час	27000	38000	1,4 раза
Количество переналадок станков/смену	120…140	20…24	6 раз
Количество переточек сверл/смену	48	9	5,3 раза
Среднее количество дефектных заготовок/запуск, плат/запуск	10…20 80…2000	До 1 До 100	До 20 раз
Тех. отход материала на отработку режимов резания, $м^2$	1,8	0,09	До 20 раз
Снижение дефектов при сверлении, % от годных плат	3…5%	0,25%	16 раз

Таким образом, экспериментальная проверка методики назначения эффективных режимов резания проведена успешно. Отмечено увеличение количественных показателей эффективности: на 1400 отверстий по значению поперечной подачи (в 2,3 раза), на 11000 по количеству обработанных отверстий в час (1,4 раза). Со значений 120…140 до 20…24 (в 6 раз) снижено количество ежесменных переналадок оборудования при пятикратном ежесменном уменьшении количества переточек сверл. С другой стороны отмечено увеличение качественных показателей эффективности обработки. Так, с 10…20 до одной (в 20 раз) снижено количество дефектных заготовок на запуск и отработку режимов резания. Технологический отход материала на отработку режимов резания снижен до значения 0,09 $м^2$ (в 20 раз). Кроме того, в 16 раз снижено количество дефектов при обработке печатных плат (с 3…5 до 0,25%). В связи с уменьшением величины заусенцев фольги и общим повышением качества обработанных отверстий, принято решение по удалению из технологического процесса операции гидроабразивной обработки.

5.1.2 Экономическое обоснование внедрения методики

Отмеченные технические и технологические улучшения от повышения показателей эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита привели к значительному снижению трудоемкости (Тшт) при выполнении технологического процесса изготовления печатных узлов и повышению рентабельности конечной продукции. Так, в табл. 34 приведены экономические критерии оценки от внедрения методики по назначению эффективных режимов резания.

Таблица 34

Экономическое обоснование от внедрения методики по назначению эффективных режимов резания

Критерий повышения эффективности сверления	Значение
Снижение Тшт на оп. механической обработки, мин/смену	360
Снижение Тшт на гидроабразивную обработку, мин/смену	300
Снижение трудоемкости на переналадку станков, мин/смену	250
Снижение трудоемкости на заточку инструмента, мин/смену	80
На отработку режимов резания, мин/смену	10
Итого, мин/смену	1000
Итого, руб/год	728000
Снижение технологического отхода материала на отработку режимов резания, руб/мес	6920
Снижение затрат на покупку нового инструмента, руб/мес	5200
Итого, руб/месяц	12120
Итого, руб/год	145440
Экономическая эффективность (при 1 см. работе), руб/год	**873440**

Таким образом, отмечены следующие технические преимущества: снижение основного времени механической обработки отверстий на печатных платах на 660 мин/смену; уменьшение подготовительно-заключительного времени на переналадку станков и заточку режущего инструмента на 340 мин/смену. Имеет место снижение затрат на приобретение нового обрабатывающего инструмента и базового материала на отработку режимов резания. Необходимо отметить, что стоимость материалов на гидроабразивную обработку и заточку режущего инструмента и связанные с этими затраты электроэнергии в табл. 29 не учтены.

Таким образом, внедрение достигнутых технических результатов не только приводит к повышению эффективности обработки отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита, но и существенно экономит бюджет предприятия. Кроме этого, комплекс внедряемых мероприятий увеличит пропускную способность оборудования и позволит привлечь на предприятие новые заказы. Промышленное внедрение результатов исследований на АО «Радий» г.Касли позволило повысить производительность операций сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита. С учетом снижения затрат на покупку новых сверл, общий экономический эффект от внедрения составит 873 440 руб/год при односменной работе участка.

5.2. Автоматизированная программа для оптимизации работы ГИХ (группы инструментального хозяйства)

Работа инженера по инструменту (инженер ГИХ) сопряжена с организацией работы по обеспечению подразделений предприятия необходимым инструментом, технологической оснасткой, их своевременным ремонтом. При решении вопросов по поставке инструмента необходимо проведение расчетов его количества в зависимости от месячного (либо квартального) плана-задания загрузки производственных подразделений предприятия.

Касательно механической обработки печатных плат проведение такого расчета осложнено широкой номенклатурой выпускаемых изделий и большим количеством режущего инструмента. Кроме того, в зависимости от диаметров обрабатываемых отверстий и количества отверстий на плате, а так же от качества базового материала расход сверла до его очередной переточки будет варьироваться.

Задача достаточно сложная и трудоемкая, поэтому расчет сверл обычно сводится к оценке сверху, инструмент приобретается с запасом и «ложится» на склад. Для разгрузки инженера ГИХ и оптимизации его работы совместно с инженером-программистом АО «Радий» Тарасевичем А.Е. была разработана программа

SverloProg.exe для автоматического расчета количества сверл. Аналогично работе программы Regime.exe настоящая программа работает с данными файлов статистики касающимися диаметров отверстий (Hole Diameters and Quantities) и наличием металлизации в отверстиях (Plated/Nonplated). Различия между этими отверстиями заключаются в том, что отверстия под металлизацию необходимо выполнять заведомо большими размерами, чем не металлизированные отверстия. Алгоритм работы программы для расчета необходимого количества сверл представлен на рис. 5.1.

Разработанный алгоритм реализован в программной среде Delphi. Программа предусматривает работу с предварительно созданной базой данных, которая обеспечивает:

1. Накопление и хранение данных о видах обрабатываемых плат;

2. Накопление и хранение данных по обрабатываемым материалам;

3. Хранение данных о количествах обрабатываемых отверстий в привязке к диаметрам сверл;

4. Хранение данных относительно топологии печатной платы;

5. Привязку обрабатываемой печатной платы к конкретному заказу, что позволяет сделать выборку номенклатуры изделий в рамках определенного заказа.

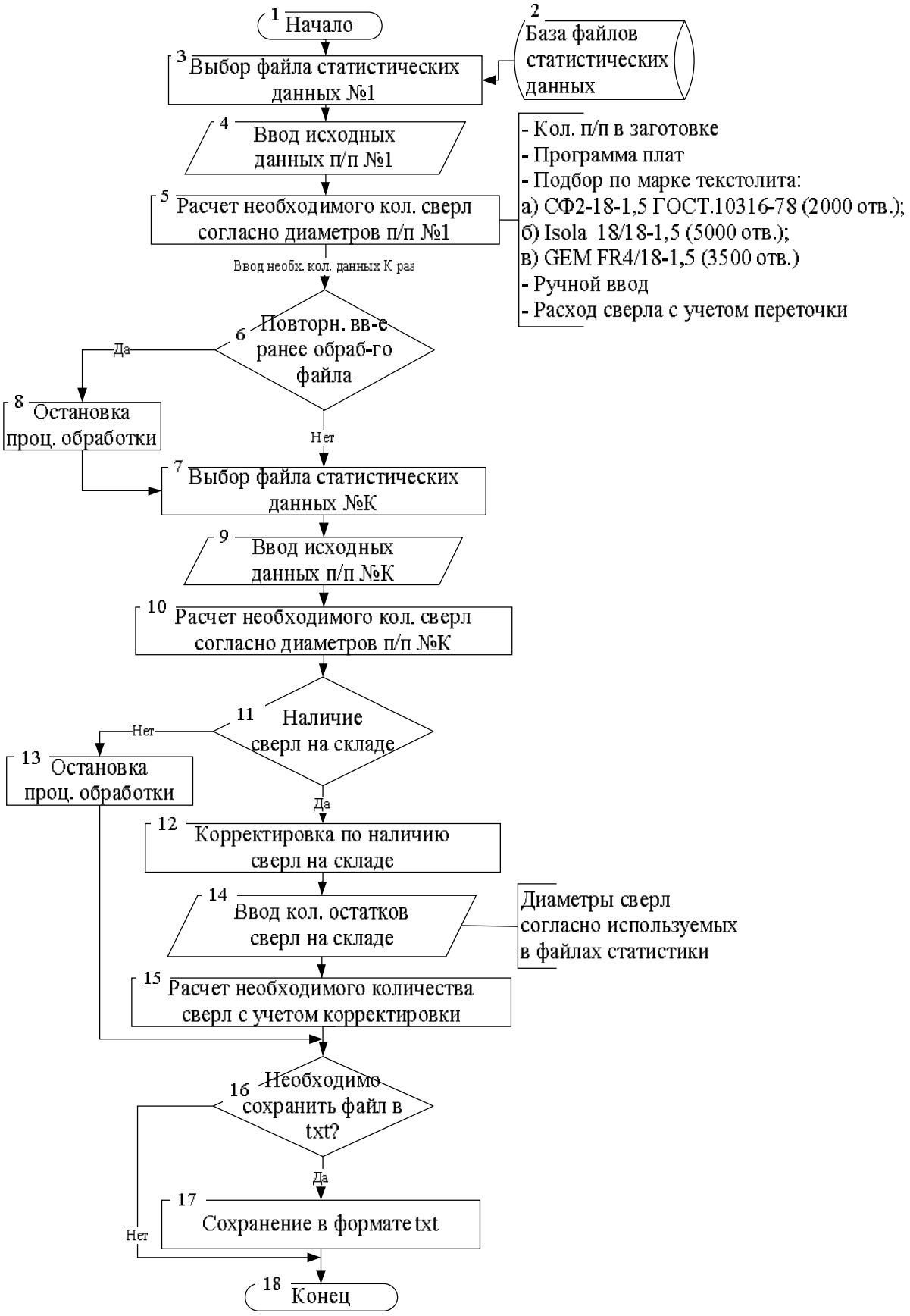


Рис 5.1 Алгоритм работы программы для расчета количества сверл

Необходимо отметить, что программа снабжена простым интерфейсом, интуитивно проста и понятна в работе. Позволяет провести качественную и количественную оценку необходимого количества сверл в производстве. Работа программы заключается в следующем: после загрузки файла SverloProg v2.0.2.exe появляется диалоговое окно. После нажатия клавиши «Открыть» выбираем необходимый файл статистических данных рис.5.2.

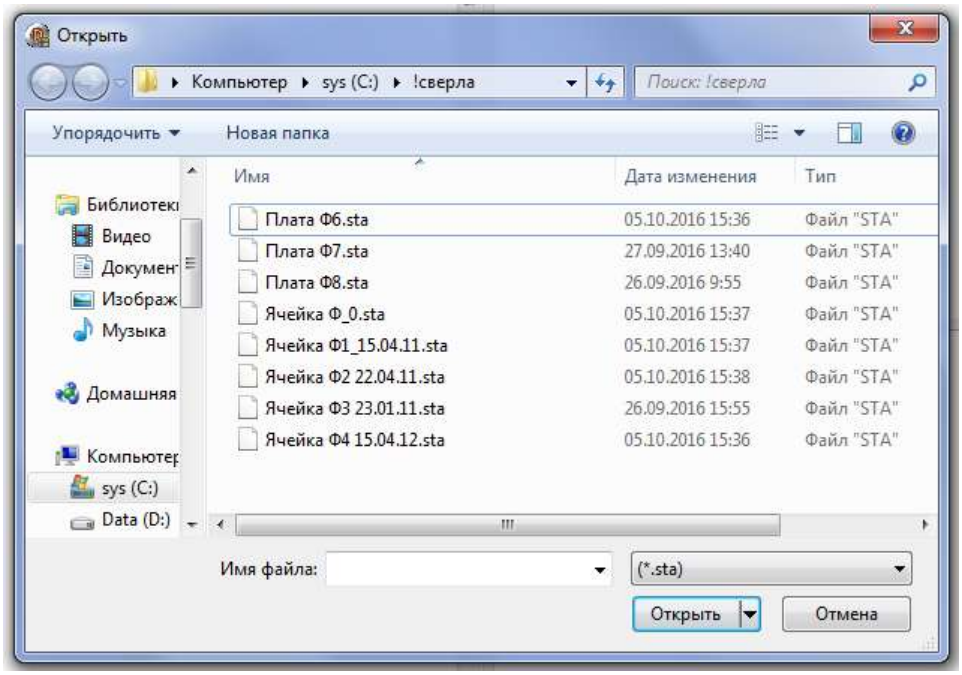


Рис.5.2 Открытие файлов статистических данных

Далее программа запрашивает исходные данные по количеству плат в заготовке, программе плат, расходу сверла в привязке к количеству обрабатываемых отверстий [13...16, 37, 68...72] (согласно ОСТ 107.460092.004.01-86 базово установлено 1500 отверстий до переточки). Программно установлено 3 типа базовых материала: фольгированный стеклотекстолит марки СФ (МИ) производства ЗАО "Завод «Молдавизолит»", P96 марки Isola производства Германии и GEM производства КНР. Именно эти марки базового материала применяются на предприятии в массовом порядке. Соответствие материал – количество обработанных отверстий до переточки установлено в привязке: 5000 отверстий для материала Isola, 3500 отверстий для материала GEM, 2000 отверстий для материала СФ [96,

186, 187]. Кроме того, возможен ручной ввод просверленных отверстий с учетом переточки.

На рис.5.3 в качестве исходных данных выбран стеклотекстолит марки Isola, одиночная заготовка печатной платы и программа плат, состоящая из 50 изделий.

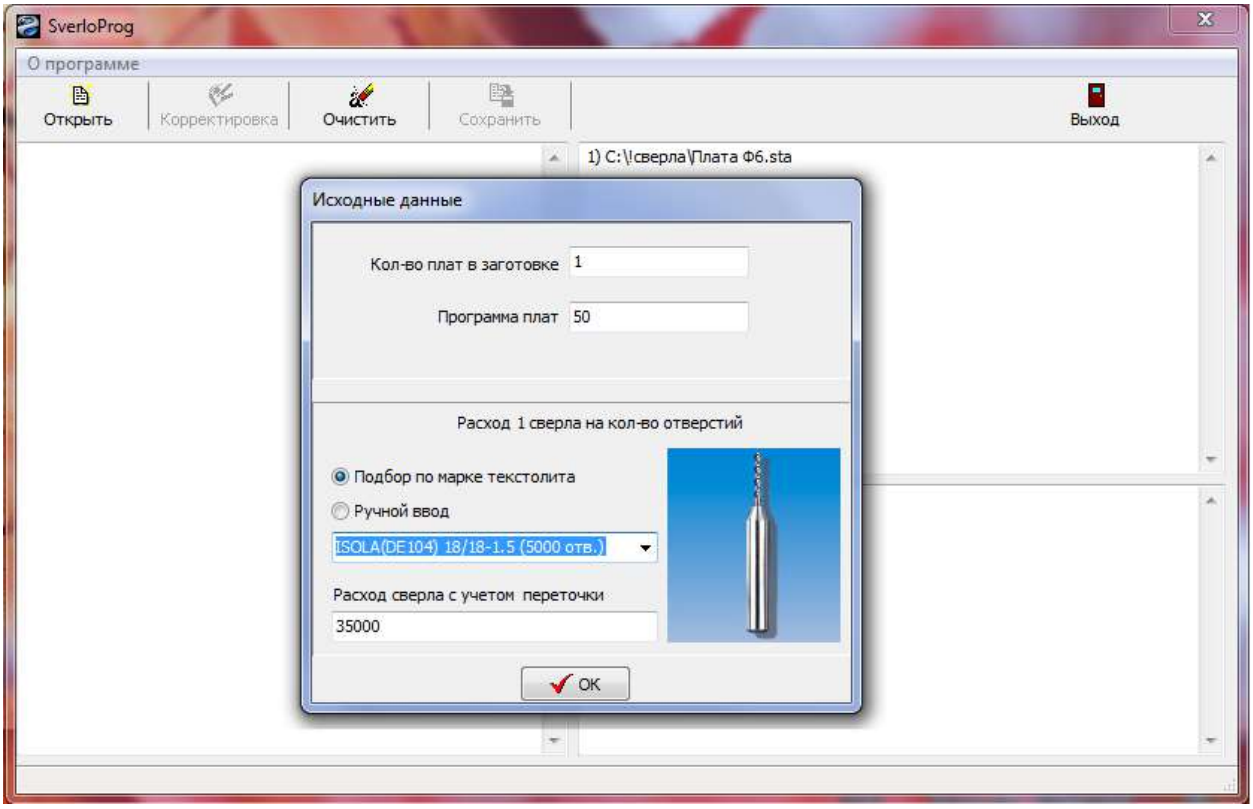


Рис.5.3 Ввод исходных данных в программу

После введения исходных данных программа производит расчет необходимого количества сверл с учетом применяемой номенклатуры режущего инструмента. При написании программного обеспечения учтен перевод диаметров обрабатываемых отверстий в диаметры сверл с учетом необходимого зазора [13...16, 68...72], применяемых типоразмеров режущего инструмента и шестикратной переточки сверла (рис.5.4).

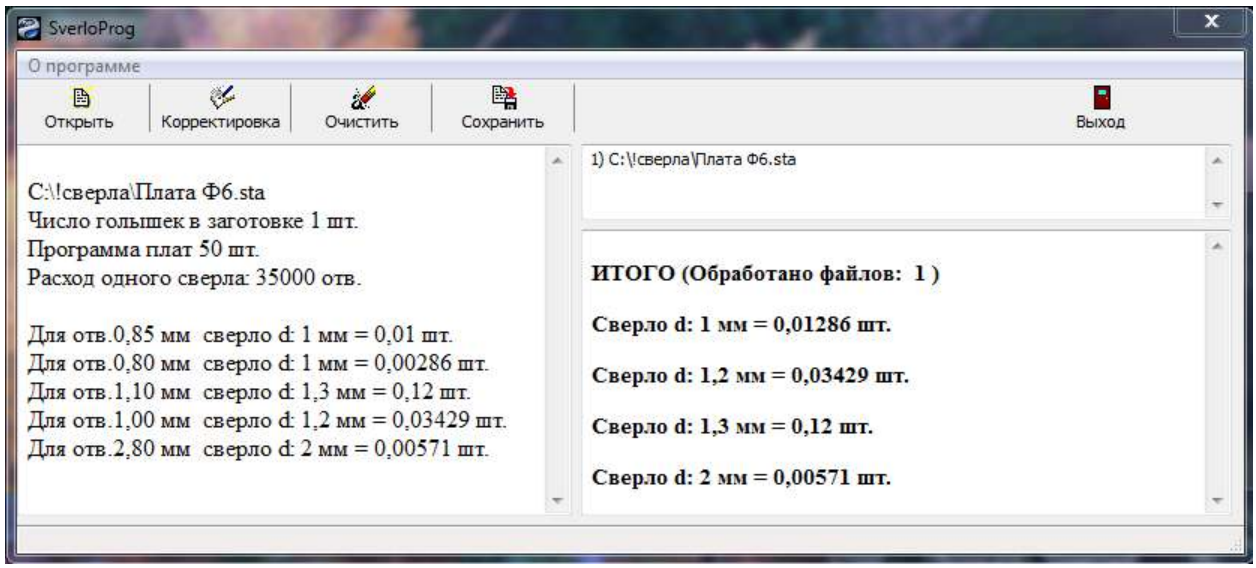


Рис.5.4 Обработка файла статистических данных

Далее процедура повторяется необходимое количество раз в зависимости от производственного плана загрузки. Результатом работы программы является общее количество сверл, необходимых для приобретения (правое нижнее окно). Кроме того, программа снабжена модулем блокировки идентичных файлов для предотвращения случаев повторного ввода уже имеющейся информации и блокировкой на введение символов рис.5.5.

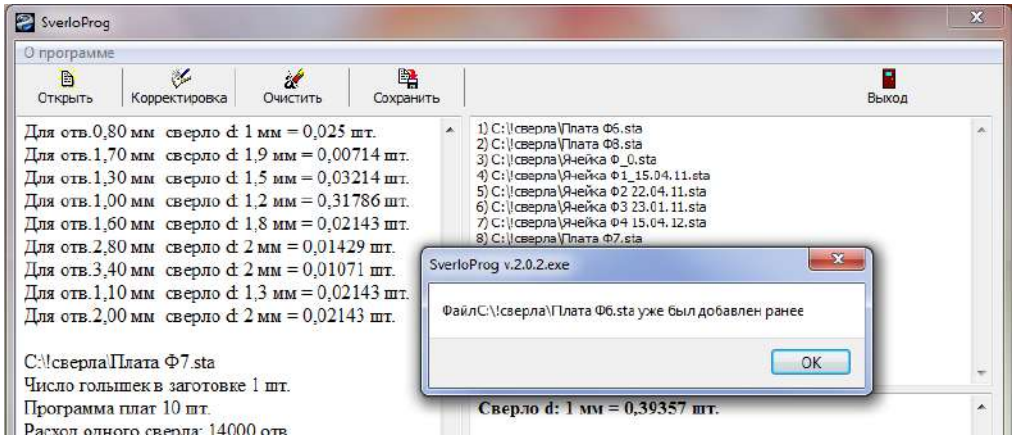


Рис. 5.5 Итоговые данные и блокировка идентичных файлов

Таким образом, 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.5.6).

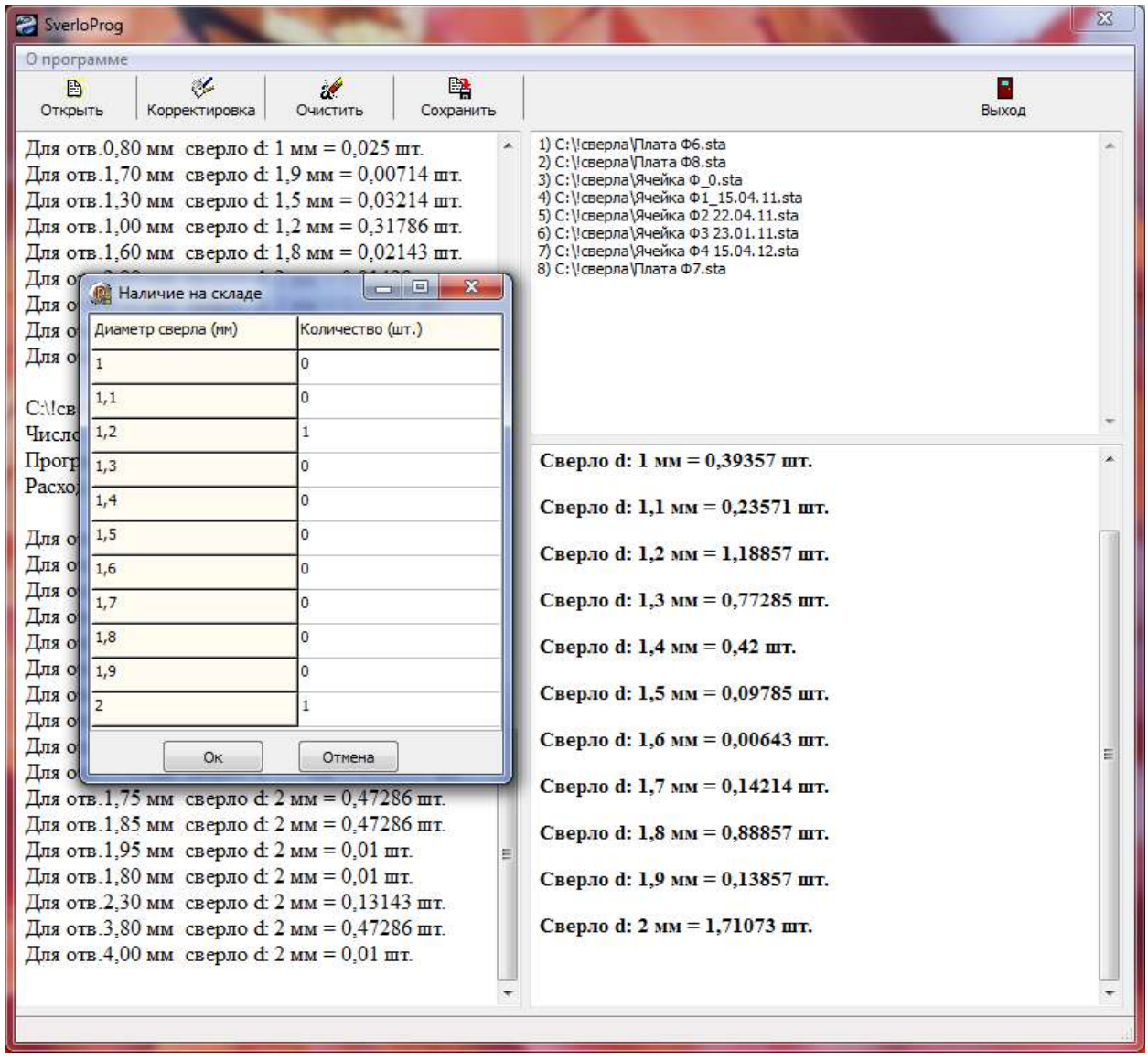


Рис. 5.6 Учет остатка сверл на складе

Остаток режущего инструмента вводится с помощью кнопки «Корректировка», ввод данных по количеству сверл производится в ручную. Результатом работы программы будут данные с учетом корректирующего остатка режущего инструмента (рис. 5.7).

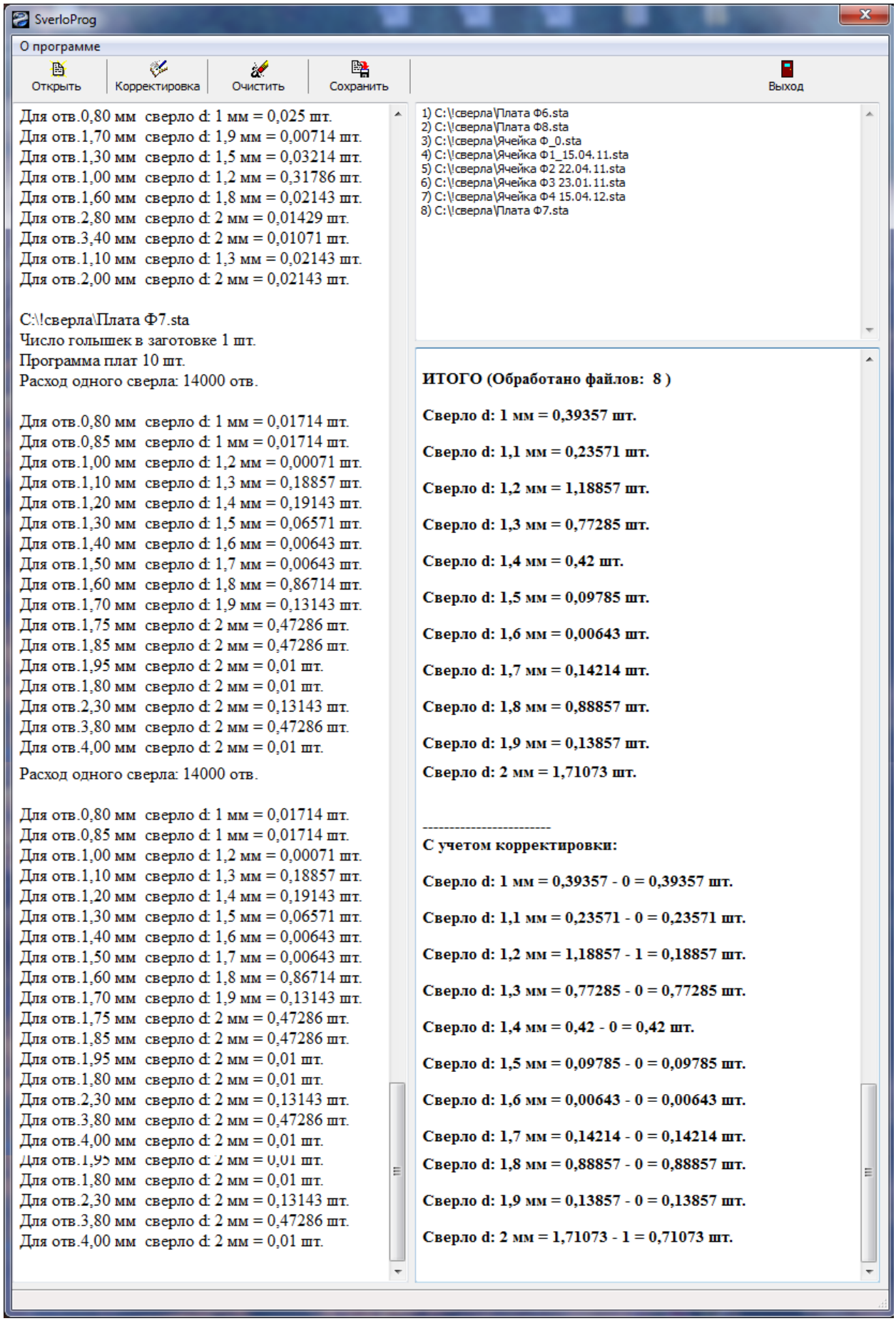


Рис. 5.7 Скорректированные данные с учетом остатка сверл на складе

5.3 Программа для автоматической компоновки карт наладки оборудования с учетом расчета режимов резания и нормирования трудозатрат

На реальном многономенклатурном производстве при непрерывной работе на станках с ЧПУ для механической обработки печатных плат фактически не реально запомнить все технологические подробности и нюансы работы с той или иной программой. Оператор или наладчик оборудования всегда должен представлять, что делает конкретная управляющая программа (далее УП), и обладать определенной информацией для настройки станка на работу. Например, где находится нулевая точка программы, какие режущие инструменты используются, на каких режимах производится обработка и пр. В настоящее время эта информация фиксируется двумя основными способами: с помощью комментариев в программе и карты наладки оборудования.

Комментарии представляют собой обычные предложения, при помощи которых наладчик-программист доводит до оператора станка определенную технологическую информацию. Обычно комментарии содержат следующие данные:

1. Дату и время создания УП;
2. Децимальный номер чертежа;
3. Используемый материал заготовки;
4. Необходимые данные о рабочей системе координат и нулевой точке;
5. Используемый инструмент и пр.;

При работе на станках с ЧПУ могут использоваться следующие выходные виды технологической документации [13]: операционная карта (ОК), карта кодирования информации (ККИ), карта наладки (КН), карта эскизов (КЭ) и пр. В настоящее время, ввиду ограниченных сроков подготовки производства, большинство российских предприятий используют несколько формальный подход к применению подобной стандартизованной документации и используют карту наладки произвольной формы. Однако, согласно [13] КН – документ, предназначенный для указания дополнительной информации к технологическим процессам по на-

ладке средств технологического оснащения. Исходя из этого, можно сказать, что КН – документ, содержащий всю необходимую технологическую информацию для настройки станка на определенную работу, включая эскиз детали и приспособления, описание режущего инструмента, положения нулевой точки программы, режимов резания и времени обработки заготовки. Такая карта помогает хранить информацию о том, как нужно обрабатывать ту или иную деталь спустя определенное время. Следует отметить, что комментарии в УП и карта наладки не заменяют друг друга, а используются совместно.

Проведение расчетов времени обработки деталей является достаточно сложной и кропотливой операцией, поскольку нужно учесть достаточно большое количество переходов:

1. Зачистка заусенцев, базовых отверстий, полученных после операции штампование;

2. Установка-снятие заготовок со станка, сборка пакета печатных плат с верхними и нижними подкладками из гетинакса;

3. Выставление базовых штифтов, фиксирующих прижимов;

4. Наладка станка, установка зажимных цанг в магазин, установка инструмента согласно диаметру с регулировкой вылета сверл в приспособлении;

5. Включение станка и запись управляющей программы с корректировкой режимов сверления;

6. Проведение пробного сверления на технологической подкладке для определения нулевой точки и проверки глубины сверления (выполняется одной цангой сверлом Ø 2 мм.);

7. Заточка инструмента каждые 1500 отв. (согласно ОСТ 107.460092.004.01-86, ОСТ 107.460092.004.02-86);

8. Механическая зачистка заготовок после сверления;

9. Замеры заусенцев фольги в процессе сверления; по каждому номиналу отверстия – смотрятся отверстия в самом конце процесса обработки;

10. Уборка станка после работы.

В общем случае техническое нормирование представляет собой установление технически обоснованных норм расхода производственных ресурсов [13]. Расчет именно технически обоснованной нормы времени определяют в общем случае по формуле:

$$T_{шт}=T_{о}+T_{всп}+T_{то}+T_{орг.о}+T_{пер},$$

(5.1)

где $T_{о}$ – основное (технологическое) время; $T_{всп}$ – вспомогательное время; $T_{то}$ – время технического обслуживания рабочего места; $T_{орг.о}$ – время организационного обслуживания; $T_{пер}$ – время перерывов.

Основное время представляет собой время, в течение которого непосредственно осуществляется технологический процесс обработки деталей.

Вспомогательным называется время, которое затрачивается рабочим на различные вспомогательные манипуляции, обеспечивающие выполнение основной.

Подготовительно-заключительным называют время, затрачиваемое на ознакомление с чертежом, подготовку и наладку станка, приспособлений и инструмента и снятие их с оборудования по окончании работ. Естественным является тот факт, что $T_{пз}$ рассчитывается на партию деталей [6].

Руководствуясь вышеперечисленными данными, можно отметить, что к норме штучного времени ($T_{шт}$) относятся п.1, 2, 8, 9, частично п.7; к норме подготовительно-заключительного времени ($T_{пз}$) – п.3, 4, 5, 6, 10.

Согласно общепроизводственным методикам, различают три основных способа нормирования:

1. Расчет по элементным нормам;

2. Расчет по укрупненным нормативам;

3. Установление норм на основе изучения затрат рабочего времени.

Нужно отметить, что первая методика является более точной, учитывает специфику производства, но расчет получается более длительным и трудозатратным. Вторая методика расчета более грубая, но позволяет в достаточной степени

сэкономить время технического нормирования и в условиях единичного и мелкосерийного производства является наиболее оптимальной. Третий метод основывается на практическом исследовании рабочего процесса и проведении хронометражей. Наиболее трудозатратный, но в то же время самый точный способ определения нормы времени. Однако, из практического опыта установлено, что после прохождения промежутка времени в 1–3 месяца, рабочие преобретают определенный опыт в работе и выработка, изначально планируемая при нормировании работ, опережается на 30–50%.

Для технического нормирования операций механической обработки деталей разработано достаточно много справочной литературы [3, 8, 18, 53]. Общие сведения о тормировании операций механической обработки деталей приведены в [65]. Однако, касательно нормирования обработки фольгированного стеклотекстолита, рабочей литературы практически нет; основные методики приведены в [65], примеры нормирования обработки отверстий на сверлильных станках приведены в [3].

Составление и компоновка карт наладки станков с ЧПУ всегда сопряжена с рядом сложностей:

1. Необходимость расчетов режимов резания для каждого инструмента в отдельности;

2. Внесение информации по каждому инструменту в отдельности (в нашем случае по каждой позиции сверла – цанги, зажимные патроны, режущий инструмент);

3. Отрисовка схемы базирования заготовки с указанием диаметра и расположения штифтов и фиксирующих прижимов;

4. Расчет трудоемкости операции сверления, который включает расчет основного и вспомогательного времени, нормирование подготовительно заключительного времени и пр.

Для минимизации трудозатрат инженера-технолога на базе ранее разработанной программы Regim.exe разработана программа **AutoKarta.exe** для автома-

тической компоновки карт наладки оборудования с учетом расчета режимов резания и нормирования трудозатрат.

Для корректной работы программы 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). Выбор режимов резания – согласно рекомендаций и выводов, полученных в Главе 4.

Работа программы AutoKarta.exe (аналогично SverloProg.exe и Regime.exe) предусматривает использование файлов статистических данных, сформированных программами автоматического проектирования электронных средств (P-Cad, Altium и пр.). Файлы статистики содержат информацию по количеству электрорадиоэлементов, числу контактных площадок, апертур под установку элементов поверхностного монтажа на верхней и нижней сторонах платы, а также информацию о слоях, ширине проводников и пр. В данном случае, используются данные количестве и диаметрах отверстий (в том числе и тех которые подлежат/не подлежат металлизации), размерах печатной заготовки и толщине печатной платы.

Программа снабжена простым логически понятным интерфейсом и интуитивно понятна в использовании (рис. 5.8). Разработанный алгоритм реализован в программной среде Delphi (алгоритм диалога аналогичен представленному на рис.5.1). Программа предусматривает работу с предварительно созданной базой данных статистики.

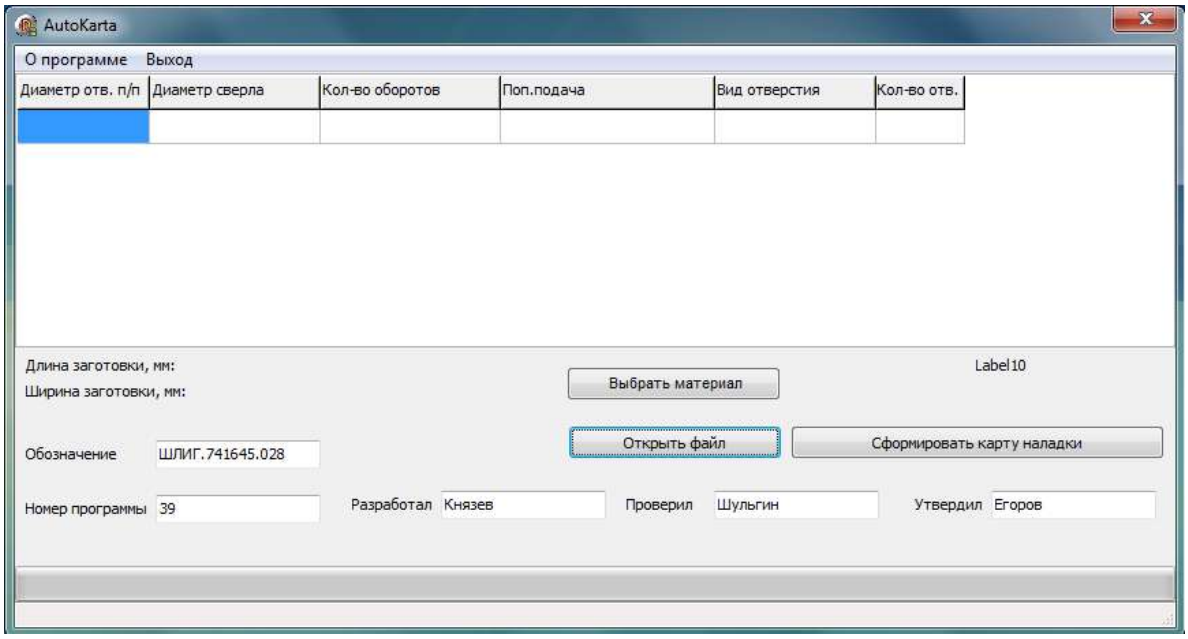


Рис. 5.8 Интерфейс программы AutoKarta

Для автоматической компоновки карты наладки оборудования в программный модуль включено:

1. Обозначение печатной платы (децимальный номер). Поскольку файлы статистических данных не содержат каких-либо удобочитаемых данных о номере платы/заготовки, кроме литеры-исполнения, то данное поле заполняется в ручную;

2. Номер программы, фиксируемый в журнале наладчика станка с ЧПУ. Заполняется в ручную;

3. Для формирования рамки-поля Разработал/Проверил/Утвердил изначально введены фамилии инженера-технолога, начальника технологического бюро и главного технолога. Поля могут быть откорректированы в ручную;

4. Поле выбора базового материала дает возможность выбора из трех основных материалов, используемых на предприятии: GEM (ILM), производства КНР; Isola, производства Германии, г. Дюрен; СФ2-35 «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова, г. Мариуполь. При расширении номенклатуры обрабатываемых материалов программа может быть дополнена/изменена.

При нажатии клавиши «Открыть файл» программа предлагает выбрать путь к необходимому файлу статистических данных, рис.5.9. Далее автоматически

оформляется окно с выходными данными о количестве и диаметрах отверстий на печатной плате, диаметре используемых сверл, наличии металлизации внутри отверстия (говорит о необходимости дополнительного рассверливания после выполнения гальванической подготовки плат) и режимах резания (рис. 5.10).

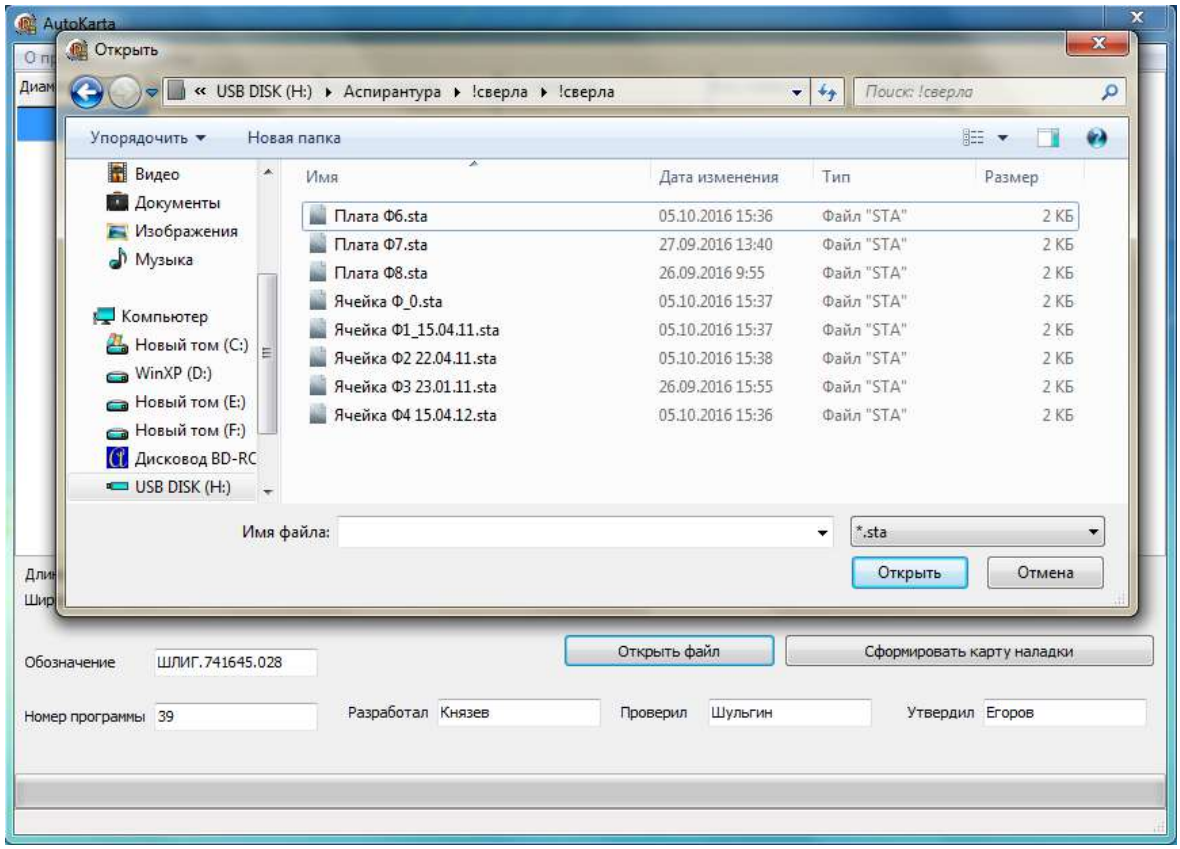


Рис. 5.9 Меню открытия файла статистических данных

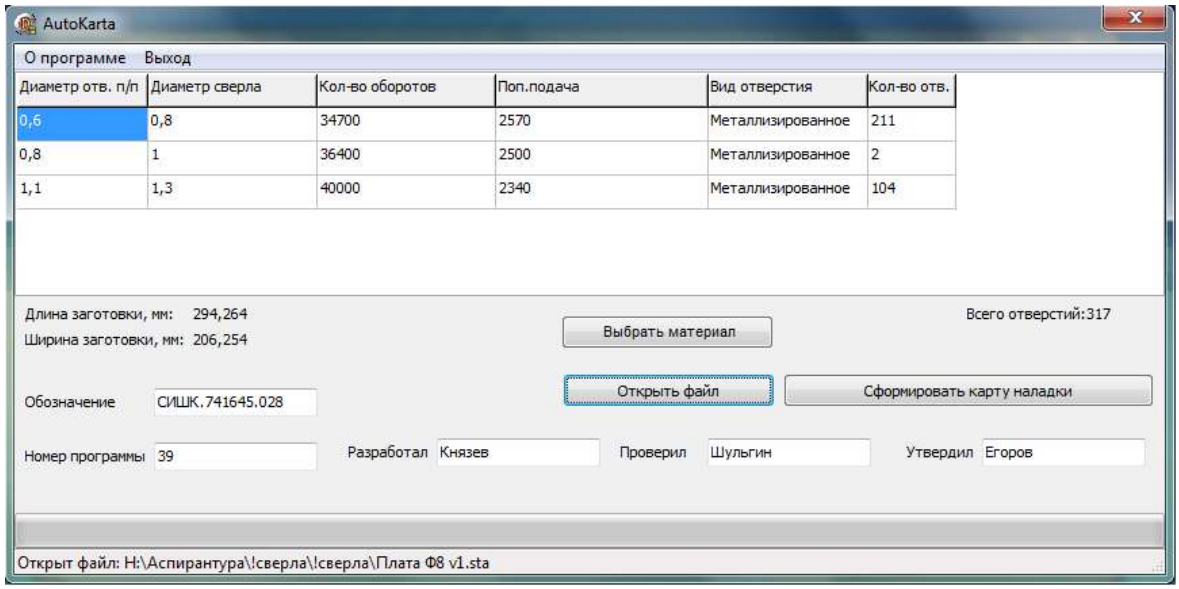
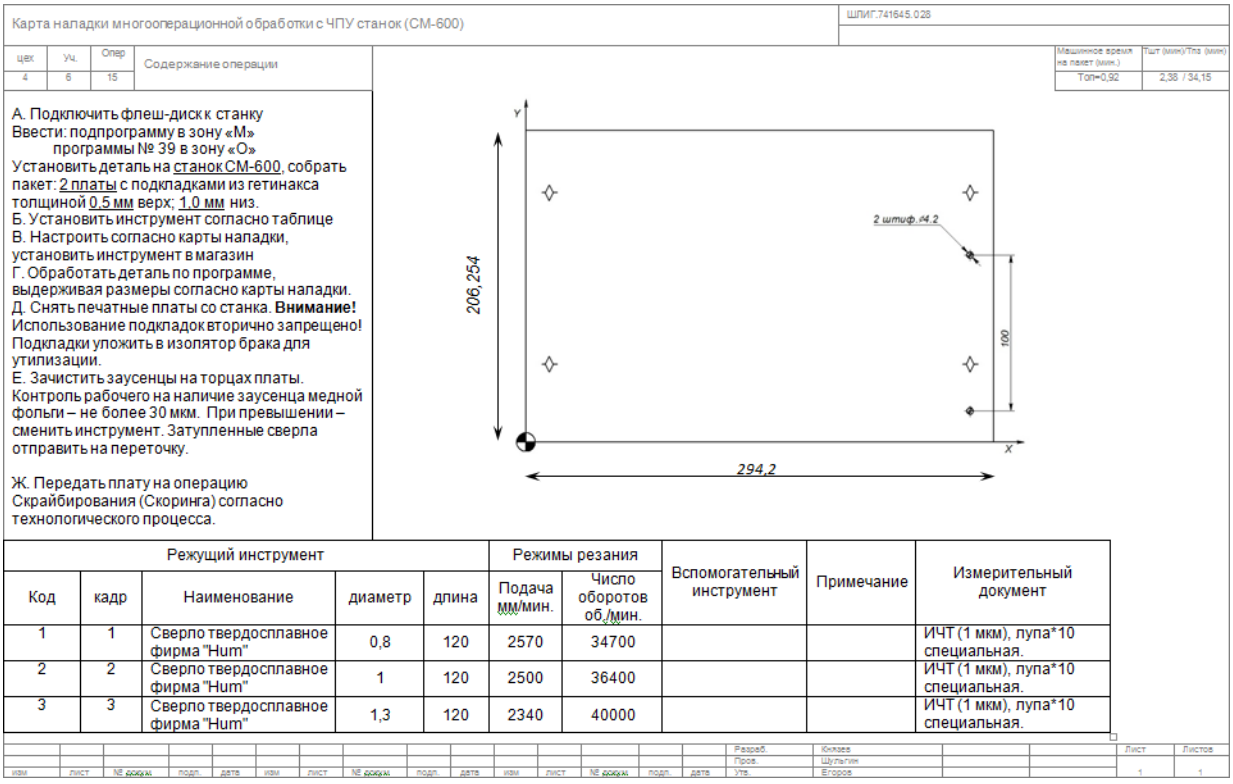


Рис. 5.10 Окно выходных данных

После выбора необходимого файла требуется нажать клавишу «Сформировать карту наладки» и документ будет сгенерирован в автоматическом режиме (рис.5.11). Более подробно карта наладки представлена в ПРИЛОЖЕНИИ 5.



Карта наладки многооперационной обработки с ЧПУ станок (СМ-600)

ШПИГ.741645.028

цех	Уч.	Опер	Содержание операции
4	6	15	

Машинное время на пакет (мин.)	Тшт (мин)/Тпз (мин)
Тол=0,92	2,38 / 34,15

А. Подключить флеш-диск к станку
Ввести: подпрограмму в зону «М»
программы № 39 в зону «О»
Установить деталь на станок СМ-600, собрать пакет: 2 платы с подкладками из гетинакса толщиной 0,5 мм верх; 1,0 мм низ.
Б. Установить инструмент согласно таблице
В. Настроить согласно карты наладки, установить инструмент в магазин
Г. Обработать деталь по программе, выдерживая размеры согласно карты наладки.
Д. Снять печатные платы со станка. **Внимание!** Использование подкладок вторично запрещено! Подкладки уложить в изолятор брака для утилизации.
Е. Зачистить заусенцы на торцах платы. Контроль рабочего на наличие заусенца медной фольги – не более 30 мкм. При превышении – сменить инструмент. Затупленные сверла отправить на переточку.

Ж. Передать плату на операцию Скрайбирования (Скоринга) согласно технологического процесса.

Режущий инструмент					Режимы резания		Вспомогательный инструмент	Примечание	Измерительный документ
Код	кадр	Наименование	диаметр	длина	Подача мм/мин.	Число оборотов об./мин.			
1	1	Сверло твердосплавное фирма "Hum"	0,8	120	2570	34700			ИЧТ (1 мкм), лупа*10 специальная.
2	2	Сверло твердосплавное фирма "Hum"	1	120	2500	36400			ИЧТ (1 мкм), лупа*10 специальная.
3	3	Сверло твердосплавное фирма "Hum"	1,3	120	2340	40000			ИЧТ (1 мкм), лупа*10 специальная.

																	Разраб.	Князев				Лист	Листов
																	Пров.	Шульгин					
изм	лист	№ докум.	подп.	дата	изм	лист	№ докум.	подп.	дата	изм	лист	№ докум.	подп.	дата			Утв.	Егоров				1	1

Рис. 5.11 Карта наладки

Необходимо отметить, что программа выполняет:

– автоматический перевод отверстий, не применяемой номенклатуры сверл в используемую (например 1,15→1,2 мм);

– автоматический перерасчет диаметров обрабатываемых сверл в диаметры обрабатывающих отверстий: +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);

– автоматический расчет трудоемкости, включая оперативную (машинное время на обработку) норму, штучное (оплатное) время и подготовительно-заключительное время на партию обрабатываемых плат. Важно подчеркнуть, что машинное время достаточно удобно для проведения дальнейшего анализа (стан-

кочасы, выработка сверловщика и пр.). Расчет штучного времени (Тшт) выполняется, в т.ч. с пересчетом на одиночную плату (если заготовка групповая);

– автоматический, программный выбор подкладок (верхних и нижних) и количество плат в пакете в зависимости от толщины используемого базового материала (информация берется из файлов статистических данных);

– автоматическое формирование карт наладки для рабочего (цеховый рабочий экземпляр) и комплекта технологической документации (ТД).

5.4 Разработка технологических рекомендаций

Фольгированный стеклотекстолит представляет собой слоистый композиционный материал, который обладает высокими прочностными характеристиками и поддается любому виду механической обработки. Как было установлено выше, ввиду внутреннего строения базового материала при этом возникает ряд трудностей. Основные из которых связаны с ярко выраженной анизотропией свойств, высокой упругостью и, как следствие, сравнительно малой прочностью и хрупкостью, абразивным воздействием на режущий инструмент, приводящий к его ускоренному износу, низкой теплопроводностью и теплостойкостью, выделением при резании взвеси летучих и токсичных веществ и пр.

Разработанные рекомендации по повышению эффективности обработки отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита на операциях сверления оформлены в виде руководящих технических материалов. Методика заточки сверл оформлена в виде руководящей инструкции (РИ). В РИ вошли не только методика и геометрия заточки режущего инструмента, но и рекомендации по выбору правильных режимов резания в зависимости от диаметра инструмента и используемых базовых материалов. Кроме того, методический документ включает основные правила и приемы, необходимые для бездефектной обработки печатных плат, такие как:

1. Обязательное использование принудительной вытяжной системы, как комплекс мер для удаления отработанного воздуха, взвеси летучих и токсичных

веществ из непосредственной зоны резания. Необходимо уточнить, что вместе с воздушными примесями и стружкой, вытяжная вентиляция значительно уменьшает количество тепла в зоне резания, формирование правильной стенки обрабатываемого отверстия для последующей химической обработки и значительно исключает уход сверла и его поломку. Работа на оборудовании при неработающей централизованной или местной вытяжной вентиляции строго запрещается;

2. Использование прижимного устройства при сверлении заготовок совместно с вытяжной вентиляцией, основным назначением которого является прижим и удержание пакета заготовок. Действие прижима при обработке отверстия должно быть постоянным, поскольку в противном случае, это отрицательно сказывается на процессе удаления продуктов резания и пыли, образующейся при механической обработке, влияет на уход сверла, расслоение базового материала и наличие заусенец фольги;

3. Применение верхних и нижних прокладок при обработке пакета, как осуществление защиты поверхности заготовок, уменьшения заусенцев на входе и выходе сверла (приводит к образованию «ободков» при последующей хим. подготовке) и очистке канавок в зоне резания. Основные материалы для подкладок: верхние – алюминий 0,18–0,24 мм, гетинакс 0,5 мм; нижние – древесина с покрытием толщиной 2,0–2,4 мм, гетинакс толщиной до 1,5 мм. Помимо всего прочего, нижние подкладки уменьшают износ инструмента и защищают стол станка от повреждений;

4. Использование качественных базовых материалов при изготовлении печатных узлов, с предварительной оценкой качества на внешней приемке предприятия. Основным критерием, при выборе марки стеклотекстолита является качество исходной фольги, текстолита (распределение филаментов стекловолокна, содержание стекла в базовом материале) и связки. Доказано, что в материале с низкой плотностью укладки волокон (число нитей 120 на длине 100 мм) величина заусецев фольги после обработки 2500 отверстий сверлом Ø1 мм в 4,5 раза ниже по сравнению с материалом с высокой плотностью укладки волокон (число нитей 210 на длине 100 мм). Оптимальное содержание стекловолокна в базовом мате-

риале не должно превышать 30–40 %. Такое содержание стекловолокна позволит снизить концентрацию напряжений в 3–4 раза по сравнению с материалом, в котором содержится 70-80 % стекловолокна;

5. правильное назначение рабочих режимов резания, как основной фактор производительности труда, периода стойкости сверл и стоимости конечного продукта. Теоретически и экспериментально установлена зависимость и рациональные режимы резания в привязке к диаметрам обрабатывающего инструмента и типам используемого базового материала, которые сведены в табл. 28. Для исключения человеческого фактора при проведении технологической подготовки производства, разработаны автоматизированные программы по назначению бездефектных режимов резания. Согласно наработанному материалу возможно получить оптимальное значение скорости движения осевой подачи и частоты вращения шпинделя, а также автоматически сформировать карту наладки обработки для всех типов базовых материалов и всей номенклатуры сверл, используемых на предприятии.

6. использование режущего инструмента с наиболее рациональным конструктивом, как основной фактор, влияющий на период стойкости и качество обрабатываемых деталей: улучшение качества стенок отверстий уменьшение заусенцев на входе и выходе инструмента; уменьшение ухода и поломок сверл; улучшение эксплуатационных свойств, количества переточек и срока жизни сверл. Экспериментально установлено, что оптимальной геометрией обладают сверла с α (главный задний угол) $=20^{o}$, β (вспомогательный задний угол) $=25^{o}$, углом при вершине $= 110^{o}$, углом наклона винтовой канавки $= 40^{o}$ и дополнительным заострением вершины сверла.

Проведенные эксперименты доказали, что комплекс мер п.п. 1-6 для качественной бездефектной обработки фольгированного стеклотекстолита напрямую влияют на износ сверла, качество обработки материала, и производительность изготовления. Руководящая инструкция внедрена и используются на ряде предприятий Уральского региона. Экспериментальная проверка проводилась на базе АО «Радий» при переходе на линейку импортных твердосплавных сверл и внедрении

новых базовых материалов для изготовления печатных плат. При внедрении введены корректирующие поправки в настройку заточного оборудования и проведено обучение рабочего состава.

5.5 Результаты и выводы.

Программы достаточно просты в использовании, имеют дружественный интерфейс, интуитивно понятны в использовании. Единственным, и, пожалуй, основным недостатком в работе программ AutoKarta и SverloProg является необходимость предварительной подготовки базы данных файлов статистических данных (конвертируются с пакетов программ для разводки печатных плат). В дальнейшем они экономят до 90 % времени инженера ГИХ и инженера-технолога на ручной расчет количества используемых и необходимых к приобретению сверл и ручную компоновку карт наладки и расчетов режимов резания. Необходимо отметить, что разработанные программные продукты AutoKarta и SverloProg и показанная в главе 4 программа Regime используют одни и теже статистические данные, поэтому базу статистических данных придется формировать единожды, что также достаточно удобно и практично с точки зрения производства.

Кроме того, в формировании штучного времени при работе в программе AutoKarta не учтен фактор многостаночности (одновременная работа на 2-х и более станках). Данные по трудоемкости усреднены из расчета работы одновременной на 2-х станках (8 шпинделей).

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. Увеличены значения поперечной подачи в 2,2–2,4 раза;

2. В 1,4 раза увеличена производительность механической обработки;

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

4. 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;

5. Сведены до 0,1% дефекты, возникающие при обработке отверстий;

6. Минимизирован с 3–5% до 0,25% технологический отход материала на отработку режимов резания;

7. До 20 раз снижено количество дефектных заготовок на отработку 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.

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 обработ-

ки. 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 требуемого периода 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 более чем в 2 раза 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 односменном режиме работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белецкий, Е.Н. Обеспечение заданной точности и качества поверхности на операциях сверления антифрикционных углепластиков на основе результатов моделирования процесса резания: дис. канд. тех. наук: 05.02.07 // Е.Н. Белецкий; Санкт – Петербургский институт машиностроения; науч. рук. В.М. Петров. – Саратов, 2010. – 131 с.

2. Билибин, К.И., Власов, А.И., Журавлева, Л.В. и др. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры. Учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В., Журавлева. Под общ. ред. В.А. Шахнова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.

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

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

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

6. Виноградов, В.М. Технология машиностроения: Введение в специальность: учеб. Пособие для студ. высш. учеб. заведений / В.М. Виноградов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 176 с.

7. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. М.: Мир, 1984. – 428 с.

8. Гальцов, А.Д. (ред.). Справочник нормировщика-машиностроителя. Том 1. Основы технического нормирования В 4-х томах / А.Д.Гальцов. — М.: Машгиз, 1959. – 677с.

9. Горбунов, И.В. Ефременков, В.Л. Леонтьев, Гисметулин, А.Р. Особенности моделирования процессов механической обработки в CAE системах / Горбунов, И.В. Ефременков, В.Л. Леонтьев, А.Р. Гисметулин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т. 15, №4(4). – 2013. С. 846-853.

10. ГОСТ 23664-79. Печатные платы. Получение монтажных и подлежащих металлизации отверстий. Требования к типовым технологическим процессам. М. : Изд-во стандартов, 1981. – 34с.
11. ГОСТ 25.601-80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). М. : Изд-во стандартов, 1980. – 9с.
12. ГОСТ 27200-87. Печатные платы. Правила ремонта. М.: Издательство стандартов, 1987. 8с.
13. ГОСТ 3.1102-81 Стадии разработки и виды документов. М: Изд-во стандартов, 1981. – 10с.
14. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартинформ, 2010. – 8с
15. ГОСТ Р 53432-2009. Платы печатные. Общие технические требования к производству. М.: Стандартинформ, 2010. – 15с.
16. ГОСТ РД50-708-91 Инструкция. Платы печатные. Требования к конструированию. М. : Изд-во стандартов, 1991. – 40с.
17. Громов, Л. Лазерная обработка – выбор оптимального решения. / Л. Громов // Производство электроники 2013. №5. С.130-133.
18. Гришин, Р.Г., Лысенко, Н.В., Носов, Н.В. Нормирование станочных работ. Определение вспомогательного времени при механической обработке заготовок / Р.Г.Гришин, Н.В.Лысенко, Н.В.Носов. – Самара, 2008. — 143 с.
19. Гультяев, А. В. Визуальное моделирование в среде MATLAB : учебный курс / А. В. Гультяев. – СПб. : Питер, 2000. – 432 с.
20. Демидович,Б.П., Марон, И.А. .Основы вычислительной математики / Б. П.Демидович, И. А.Марон. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1966.
21. Демидович, Б. П., Марон, И. А., Шувалова, Э. З. Численные методы анализа / Б. П.Демидович, И. А.Марон, Э. З.Шувалова. – М.: Наука. Физматгиз, 1962.
22. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика,1986. — 366 с.

23. Дрожжин, В.И., Кравченко, Л.С. Износостойкость инструментальных материалов при сверлении слоистых пластмасс / В.И. Дрожжин, Л.С. Кравченко // Резание и инструмент, Харьков. – 1974. – Вып. 11. – С. 41 – 45.
24. Дрожжин, В.И., Кравченко, Л.С. Силы резания при сверлении слоистых пластмасс / В.И. Дрожжин, Л.С. Кравченко // Резание и инструмент, Харьков. – 1972. Вып. 5. С.
25. Дрожжин, В.И. О контакте поверхности инструмента с пластмассой при резании / В.И. Дрожжин // Резание и инструмент, Харьков. – 1970. – Вып. 2. – С. 59 – 66.
26. Дрожжин, В.И. Физические особенности и закономерности процесса резания слоистых пластмасс. Автореф. д-ра техн. наук / В.И. Дрожжин // Харьков: ХПИ. – 1982. – 32 с.
27. Дударев, А.С. Повышение эффективности и качества обработки отверстий на основе стабилизации процесса сверления изделий из полимерных композиционных материалов: дис. канд. тех. наук: 05.02.08 // А.С. Дударев; Пермский государственный технический университет; науч. рук. В.И. Свирщев. – Пермь, 2009. – 170 с.
28. 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.
29. 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.
30. 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.

31. Егоров, С.В. Обработка резанием конструкционных пластмасс С.В. Егоров. – М.: Оборонгиз, 1955. – 115 с.
32. Егоров, С.В. Силы резания при обработке конструкционных пластмасс / С.В. Егоров // Обработка металлов и пластмасс резанием. – М.: Машгиз, 1955. – С. 35–44.
33. Ерохин А.А. Обработка резанием стеклопластиков / А.А. Ерохин // Высокопроизводительное резание в машиностроении. – М.: Наука, 1966. – С. 48-54.
34. Заварыкин В. М., Житомирский В. Г., Лапчик М. П. Численные методы: Учеб. пособие для студентов физ.-мат. спец. пед. ин-тов. – М.; Просвещение, 1990. – 176 с.
35. Зборщик, А.М. Конспект лекций по дисциплине «Новые материалы в металлургии» / А.М. Зборщик . Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2008. – 253 с.
36. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. М.: Мир, 1981. – 304 с.
37. Ильин, В. А.Технология изготовления печатных плат / В. А. Ильин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1984. – 77с.
38. Иноземцев, К.А. / Повышение производительности обработки отверстий малого диаметра в термореактивных пластмассах при сверлении с низкочастотными осевыми колебаниями: дис. канд. тех. наук : 05.23.01 // К.А. Иноземцев; Курский ГТУ; науч. рук. А.И. Барботько. – КГТУ, 2001. – 216 с.
39. Исаев, А.И. Обработка пластических масс резанием / А.И. Исаев // Пластические массы в машиностроении. – М.: Академиздат, – 1955. – С. 178–190.
40. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. / П.Г. Канцев. Изд. 2-е, перер. и доп. М.:Машиностроение, 1974. – 231 с.
41. Капица, М. Подготовка поверхностей в производстве печатных плат / М. Капица// Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 4. – С. 18-21.
42. Каталог режущего инструмента для печатных плат фирмы Ham, Германия: [Электронный ресурс]. URL: http://www.ham-tools.com (дата обращения 12.03.2012).

43. Каталог режущего инструмента для печатных плат фирмы Union Tool, Япония: [Электронный ресурс]. URL: http://www.uniontool.co.jp/en (дата обращения 12.03.2012).
44. Каталог фольгированных ламинатов фирмы Isola , Германия: [Электронный ресурс]. URL: http://www.isola-group.com/ (дата обращения 12.03.2012).
45. Кобаяши, А. Обработка пластмасс резанием / А. Кобаяши. – М.: Машиностроение, 1974. – 192 с.
46. Котов, Е.П., Махмудов, М., Жак, Л.И. Автоматизация процесса прессования многослойных печатных плат./ Е.П. Котов, М. Махмудов, Л.И. Жак. М.: Радио и связь, 1982. – 56 с.
47. Кофанов, Ю.Н. Компьютерные технологии в приборостроении / Ю.Н. Кофанов. - Красноярск.: ИПК СФУ, 2008. – 225 с.
48. Кравченко Л.С. Исследование процесса сверления слоистых пластмасс. Автореф. дис. канд. техн. наук / Л.С. Кравченко // Харьков: ХПИ. – 1973. – 19 с.
49. Крамущенко, В. И. Многоканальные системы передачи информации : конспект лекций / В. И. Крамущенко, Л. Я. Новосельцев, В. Н. Смирнов. – Л. : ЛЭТИ, 1983. – 48 с.
50. Лионе, Ж.Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач / Ж.Л. Лионе. М.: Мир, 1972. – 587 с.
51. Литвак Ю. Н., Панфилов Ю.В. Исследование процесса сверления микроразмерных отверстий печатных плат // Наноинженерия. –2013. – №5. – С.3 – 7.
52. Литвак Ю. Н., Панфилов Ю.В. Исследование процесса сверления микроразмерных отверстий печатных плат // Будущее машиностроения России. Сборник материалов V Всероссийской научно-технической конференции, Москва. – 2012. – С. 133 – 134.
53. Локтев, А.Д., Гущин, И. Ф., Батуев В. А. и др. Справочник - Общемашиностроительные нормативы режимов резания. В 2-х томах / А. Д. Локтев, И. Ф. Гущин, В. А. Батуев. – М.: Машиностроение, 1991. — 640 с.
54. Лунд, П. Прецизионные печатные платы. Конструирование и производство / П. Лунд. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 360с.

55. Львов Б.С., Сагалаев Г.В. Внутренние напряжения в стеклоплатиках при высоком наполнении / Б.С. Львов, Г.В. Сагалаев. – М.:МДНТП, 1968.
56. Материалы X международной конференции «Основные направления развития технологий оборудования и материалов для производства печатных плат», 27-29 мая 2012, г. С-Петербург.
57. Материалы с семинара по производству печатных плат «Конструирование и производство печатных плат высокой плотности компоновки», 11-13 декабря 2013, г. Екатеринбург.
58. Махмудов, М. Механическая обработка печатных плат. / М. Махмудов. – М.: Радио и связь, 1986. – 72 с.
59. Медведев, А.М. Лазерная литография в производстве ПП. / А.М. Медведев // Технологии в электронной промышленности. 2006. №5 С. 22-26.
60. Медведев, А.М. Конструирование и принципы изготовления печатных плат / А.М. Медведев // Технологии в электронной промышленности. 2011. №4. – С. 12-18.
61. Медведев, А.М. Китайское производство своими глазами / А.М. Медведев // Технологии в электронной промышленности. 2007. №3. – С. 4-9.
62. Медведев А.М Современные концепции построения отечественного производства печатных плат // Материалы доклада на международном симпозиуме АСОЛД. Москва, 2009.
63. Медведев А.М Технология печатных плат. Эволюция или революция // Электронные компоненты. 2001. №5. URL. http://www.contractelectronica.ru/articles/pechatnye-platy/14-stati1/bessvintsovye-tekhnologii/99 tekhnologiya-pechatnykh-plat-evolyutsiya-ili-revolyutsiya (дата обращения 19.01.15).
64. Медведев, А.М. Технология производства печатных плат. / А.М. Медведев. – М.: Техносфера, 2005. 360 с.
65. Морозов, И.М., Гузеев, В.И., Фадюшин, С.А. Техническое нормирование операций механической обработки, учебное пособие / И.М.Морозов, В.И.Гузеев, С.А.Фадюшин Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 65с.

66. Никитин А.П. Механическая обработка стеклопластиков алмазным инструментом / А.П. Никитин. – Л.: ЛДНТП, 1968. – 20 с.
67. Огневенко, Е.С. Повышение производительности обработки отверстий путем выбора оптимальных режимов резания на основе анализа динамики процесса сверления: дис. канд. тех. наук: 05.02.08 // Е.С. Огневенко; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; науч. рук. Ю.А. Кряжев. – Барнаул, 2010. – 148 с.
68. ОСТ 107.460092.004.01-86. Платы печатные. Типовые технологические процессы. М. : Изд-во стандартов, 1987. – 297с.
69. ОСТ 107.460092.004.02-86. Платы печатные. Типовые технологические процессы. М. : Изд-во стандартов, 1987. – 42с.
70. ОСТ4.054.060-82. Платы печатные. Типовые технологические процессы. М. : Изд-во стандартов, 1983. – 179с.
71. Ортега Дж., Пул У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений/ Пер. с англ.; Под ред. А. А. Абрамова. – М.: Наука. Гл. физ.-мат. лит., 1986. – 288 с.
72. Пирогова, Е.В. Проектирование и технология печатных плат / Е.В. Пирогова. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2005 – 560 с.
73. Прохоров, Ю.Я. Механическая обработка стеклопластиков и других неметаллических материалов / Ю.Я. Прохоров // Резание труднообрабатываемых и неметаллических материалов. – М.: Наука, 1967. – С. 28–31.
74. Резников, А.Н., Цирулина, Е.А. Силы резания и чистота обработанной поверхности при точении пластмассовых изделий повышенной точности / А.Н. Резников, Е.А. Цирулина // Пластические массы. – 1963. – № 5. – С. 36–40.
75. Руднев, А.В., Королев, А.А. Обработка резанием стеклопластиков / А.В. Руднев, А.А. Королев. – М.: Машиностроение, 1969. – 118 с.
76. Семко, М.Ф., Баскаков, И.Г., Дрожжин, В.И. Механическая обработка пластмасс / М.Ф. Семко, И.Г. Баскаков, В.И. Дрожжин. – М.: Машиностроение, 1965. – 132 с.

77. Степанов, А.А, Карпов, В.Н. Алмазное сверление бороплластика / А.А. Степанов, В.Н. Карпов // Синтетические алмазы. – 1978. – Вьш. 5. – С. 49–52.
78. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А.А. Степанов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
79. Такадзава К. Технология удаления заусенцев / К. Такадзава //Кикай – но – кэкню. – 1978. т.30. – 92. – С.329–332.
80. Тарасевич, Ю. Ю. Численные методы на Mathcad'е. / Ю. Ю.Тарасевич. – Астраханский гос.пед. ун-т: Астрахань, 2000. – 70 с.
81. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 272 с., ил.
82. Терентьев, И.С. Обработка пластмасс, применяемых в машиностроении / И.С. Тереньтьев. –М.–Л.: Машиностроение, 1965. –220 с.
83. Тихомиров, Р.А., Николаев, В.И. Механическая обработка пластмасс / Р.А.Тихомиров, В.И. Николаев. – Л.: Машиностроение, 1975. – 206 с.
84. Торопов, А.А. Прогнозирование и минимизация заусенцев при обработке резанием, моделированием процессов их образования: дис. канд. тех. наук: 05.03.01 // А.А. Торопов; М.:РГБ, 2005 (СПб1999). – 190 с.
85. Файзулаев, Б.Н. Справочник по печатным схемам / Б.Н. Файзулаев, В.Н. Квасницкий. – М.: Советское радио, 1972 – 693с.
86. Фокин, В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твёрдого тела: Учеб. пособие / В.Г. Фокин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 131 с.
87. Харламов, А. DEFORM – программный комплекс для моделирования процессов обработки металлов давлением / А. Харламов, А. Уваров. - Режим доступа: http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7481&iid=304
88. Чигринец, Е.Г. Совершенствование процесса сверления многослойных полимерных композитов типа «стеклопластик-титан» : дис. канд. тех. наук: 05.02.07 // Е.Г. Чигринец; Донской государственный технический университет; науч. рук. С.Н. Шевцов. – Ростов-на-Дону, 2016. – 193 с.

89. Чудновский, А.Р., Кестельман, Н.Я., Ахмечет, Л.С. Изготовление и обработка деталей из пластмасс / А.Р. Чудновский, Н.Я. Кестельман , Л.С. Ахмечет. – М.: Машиностроение, 1967. – 99 с.
90. Шалыгин, А. С. Прикладные методы статистическо го моделирования / А. С. Шалыгин, Ю. И. Палагин. – Л. : Машиностроение, 1986. – 320 с.
91. Штучный, Б.П. Механическая обработка пластмасс: Справочник. / Б.П. Штучный. – М.: Машиностроение, 1987. – 152 с.
92. 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.
93. Шульгин, А.Н., Орлов А.А. Влияние распределения филаментов стекловолокна на качество и производительность обработки отверстий на печатных платах. /А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Сборник научных трудов. Заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии». – 2014. – С. 56 – 60.
94. 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, Том 1.Теоретические и прикладные вопросы механики, технологии и материалов. – 2015. – С. 112 – 117.
95. Шульгин, А.Н., Орлов А.А. Выбор режимов резания и базового материала при обработке отверстий на печатных платах. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Научные чтения СФТИ НИЯУ МИФИ, Том 1.Теоретические и прикладные вопросы механики, технологии и материалов. – 2015. – С. 118 – 124.
96. 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.

97. Шульгин, А.Н., Орлов А.А. Зависимость качественных и количественных показателей обработки отверстий фольгированного стеклотекстолита в зависимости от выбора материала и режимов резания. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // «Технологическое обеспечение машиностроительных производств», по результатам I Международной заочной научно-технической конференции, ЮУрГУ. – 2014 г. - С. 138 – 144.
98. 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.
99. Шульгин, А.Н., Орлов А.А. Контрольное и собственное изготовление печатных плат: вопрос рациональности. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Сборник научных трудов. Заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии». – 2016. – С. 35 – 38.
100. 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.
101. 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.
102. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Особенности обработки композиционных материалов. /А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // «Инновационные ядерные технологии. Технологии замыкания ядерного топливного цикла и водородная безопасность». – 2016. – С. 34 – 35.
103. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Повышение качества и производительности обработки отверстий на печатных платах путем выбора оптимальных факторов и

режимов резания с учетом динамики процесса сверления. /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. 119 – 122.

104. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. 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», по результатам I Международной заочной научно-технической конференции, ЮУрГУ. – 2014 г. - С. 432 – 437.

105. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Подготовка поверхности и отверстий при производстве печатных плат. /А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Сборник научных трудов. Заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии». – 2014. – С. 61 – 64.

106. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Рекомендуемые режимы резания при обработке фольгированного стеклотекстолита. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Сборник научных трудов. Заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии». – 2017. – С. 131 – 136.

107. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Система моделирования технологических процессов DE-FORM. Описание работы программы. // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Сборник научных трудов. Заседание тематических секций по направлению «Инновационные ядерные технологии». – 2017. – С. 136 – 149.

108. Abrate, S., Walton D.A., 1992, Macining of composite materials. Part I: Traditional methods, Composites Manufacturing, 2, pp. 75-82.

109. Adachi K., Norihisa A., Harada S., Okita K., Wakisaka S. [Study on Burr in Low Frequency Vibratory Drilling]. Bull. Jap. Soc. Precis. Eng., 1987, ч.21, №4, pp. 258–264.

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

111. Anand, R.S., Patra, K., Steiner, M., Biermann, D., 2016, Mechanistic Modelling of Micro-Drilling Cutting Forces, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8632-2.
112. Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Petrushin S.I. [The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface]. Applied mechanics and materials, 2013, vol. 379, pp. 124 – 130.
113. Arraiza, A.L. Experimental analysis of drilling damage in carbon-fiberreinforced thermoplastic laminates manufactured by resin transfer molding /A. L. Arraiza [et al.] // Journal of Composite Materials. 46(6), 2011, pp. 717–725.
114. Arola, D., Ramulu, M., 1997, Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: a finite element analysis, Mech. Sci., 39, pp. 597-613.
115. Bhatnagar, N., Jalutharia, M.K., 2008, Prediction of thrust force and torque when drilling composite materials, Int. J. Materials and Product Technology, 32, pp. 213-225.
116. Brinksmeier, E., Fangmann, S., Rentsch, R., 2011, Drilling of Composites and Resulting Surface Integrity, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 60:57–60.
117. Chandrasekharan, V., Kapoor, S.G., DeVor, R.E., 1995, A Mechanistic Approach to Predicting the Cutting Forces in Drilling: With Application to Fibre Reinforced Composite Materials, Journal of Engineering for Industry, 17:559–570.
118. Doomra, V.K., Debnath, K., Singh, I., 2014, Drilling of metal matrix composites:Experimental and finite element analysis, Engineering Manufacture, I-5, pp. 1-5.
119. Durao, L.M. Comparative analysis of drills for composite laminates / L.M.Durao [et al.] // Journal of Composite Materials. 46(14), 2011, pp. 1649–1659.
120. Elhachimi, M., Torbaty, S., Joyot, P., 1999, Mechanical modelling of high speed drilling. 1: predicting torque and thrust, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, pp. 553-568.
121. Elhachimi, M., Torbaty, S., Joyot, P., 1999, Mechanical modelling of high speed drilling. 2: predicted and experimental results, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 39, pp. 569-581.

122. Elhachimi, M., Torbaty, S., Joyot, P., 1999, Mechanical Modelling of High Speed Drilling 1: Predicting Torque and Thrust, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39:553–568.
123. Faraz, A., Biermann, D., Weinert, K., 2009, Cutting Edge Rounding: An Innovative Tool Wear Criterion in Drilling CFRP Composite Laminates, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49:1185–1196.
124. Fernandes, M., Cook, C., 2006, Drilling of carbon composites using a one shot drill bit, Part I: Five stage representation of drilling and factors affecting maximum force and torque, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, pp. 70-75.
125. Fernandes, M., Cook, C., 2006, Drilling of Carbon Composites Using a One Shot Drill Bit. Part II. Empirical Modeling of Maximum Thrust Force, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46:76–79.
126. Ghasemi, F.A. Effects of Drilling Parameters on Delamination of Glass-Epoxy Composites / F.A. Ghasemi [et al.] // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 5(12), 2011, pp. 1433-1440.
127. Gong, Y., Lin, C., Ehmann, K.F., 2005, Dynamics of Initial Penetration in Drilling: Part 1 – Mechanistic Model for Dynamic Forces, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 127:280–288.
128. Gong, G., Lin, C., Ehmann K.F., 2005, Dynamics of Initial Penetration in Drilling: Part 2 – Motion Models for Drill Skidding and Wandering With Experimental Verification, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 127, pp. 289-297.
129. Gong, Y., Ehmann, K.F., 2001, Mechanistic Model for Dynamic Forces in Micro Drilling, Proceeding 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (New York), pp.1–10.
130. Haslinger, J. Curved elements in a mixed finite element method close to the equilibrium model / J. Haslinger, Hlavacek // Apl. Mat.20, 1975, pp. 233 – 252.
131. Haslinger, J. A mixed finite element method close to equilibrium model / J. Haslinger, Hlavacek // Numer. Math. 26, 1976, pp. 85-97.
132. Haslinger, J. A mixed finite element method close to equilibrium model applied to plane elastostatics / J.Haslinger, Hlavacek // Apl. Mat. 21, 1976, pp. 28-42.

133. He, Y., Zhang, G., Xue, J., 2014, Finite Element Analysis on Drilling of Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP), Applied Mechanics and Materials, 455, pp. 228-231
134. Hocheng, H Delamination during drilling in composite laminates / H.Hocheng, C.K.H. Dharan // Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Industry. № 112, 1999, pp. 236–239.
135. Imran, M., Mativenga, P.T., Withers, P.J., 2012, Assessment of Machining Performance Using the Wear Map Approach in Micro-Drilling, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 59:119–126.
136. Jun, M.B.G., Goo, C., Malekian, M., Park, S., 2012, A New Mechanistic Approach for Micro End Milling Force Modeling, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 134. 011006-1-9.
137. Isbilir, O. Delamination and wear in drilling of carbon-fiberreinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coatedtungsten carbide tools / O. Isbilir, E. Ghassemieh // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 31(10), 2012, pp. 717–727.
138. Isbilir, O., Ghassemieh, E., 2012, Finite Element Analysis of Drilling of Carbon Fibre Reinforced Composites, Compos Mater, pp. 637-656.
139. Klocke, F., Gerschwiler, K., Abouridouane, M., 2009, Size Effects of Micro Drilling in Steel, Production Engineering – Research and Development, 3:69–72.
140. Lazar, M., Xirouchakis, P., 2011, Experimental Analysis of Drilling Fibre-Reinforced Composites, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 51:937–946.
141. Lee G. B. [Digital Control for Burr Minimization in Drilling]. Ph. D. Dissertation. – Deptof Mech. Eng., Univ. of California, Berkeley, 1989.
142. Liow, J.L., 2009, Mechanical Micromachining: A Sustainable Micro-Device Manufacturing Approach? Journal of Cleaner Production, 17:662–667.
143. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. [Optimal organization of tools for machining composites]. Russian Engineering Research, 2011, no. 2, pp. 156–157.

144. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. [Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composite]. Russian Engineering Research, 2011, no.3, pp. 236–239.
145. Lui, X., Devor, R.E., Kapoor, S.G., 2006, An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 128:474–481.
146. Khashaba, U.A. Drilling analysis of woven glass fiber-reinforced epoxy composites / U.A. Khashaba [et al.] // Journal of Composite Materials. 47(2), 2012, pp. 191–205.
147. Kilickap, E Analysis and modeling of delamination factor in drilling glass fiber reinforced plastic using response surface methodology / E.Kilickap // Journal of Composite Materials. 45(6), 2010, pp. 727–736.
148. Kilickap, E. Investigation into the effect of drilling parameters on delamination in drilling GFRP / E. Kilickap // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 29(23), 2010, pp. 3498–3503.
149. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Yamnikov A.S. [Cutting and plastic deformation in the shaving and rolling of cylindrical gears with round teeth]. Russian Engineering Research, 2013, no. 6, pp. 363–366.
150. Marques, A.T. Delamination analysis of Carbon Fibre Reinforced Laminates / A.T. Marques [et al.] // 16TH International conference on composite materials, 2007, pp. 1-10.
151. Matolygin A.A., Skripnyak V.A. [Computer simulation of deformation of two-component compacts under liquid-phase sintering]. Russian Physics Journal, 1999, no. 3, pp. 299-303.
152. Mokritskii B.Y., Shpilev A.M. [Effective manufacture of a cutting tool for specific operating conditions]. Russian Engineering Research, 2013, no. 1, pp. 39–45.
153. Mokritskii B.Y., Shpilev A.M., Pustovalov D.A., Sablin P.A., Kirichek A.V. [Acoustic assessment of tool quality]. Russian Engineering Research, 2013, no.2, pp. 74–78.
154. Mokritskii B.Y. [Control of tool performance by means of coatings]. Russian Engineering Research, 2011, no. 2, pp. 164 – 167.

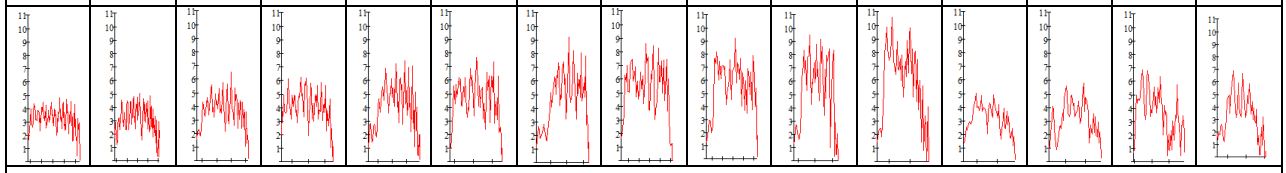
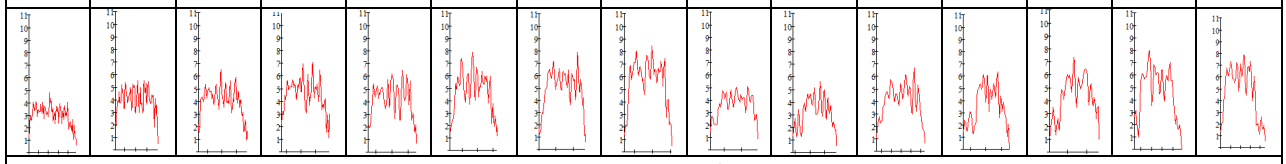
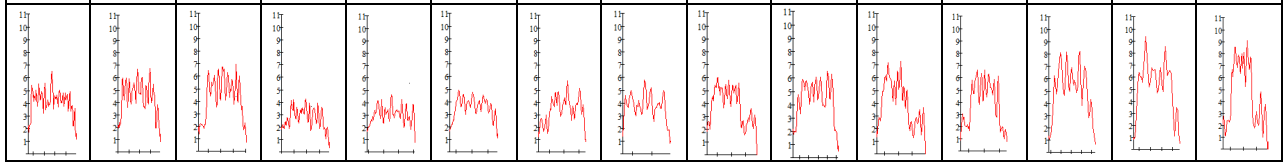
155. Oden, J.T. Some contributions to the mathematical theory of mixed finite element approximation / Oden J.T. //in Theory and Practice in Finite Element Structural Analysis, pp. 3-23, University of Tokyo Press, 1973.
156. Oden, J.T. Some observations on properties of sertain mixed finite element approximations / J.T. Oden, J.N. Reddy // Internat. J. Numer. Methods Engrg. 9, 1975, pp. 933 – 949.
157. Oden, J.T. An introduction to the mathematical theory of finite elements / J.T. Oden, J.N. Reddy // Wiley Interscience, New York, 1976.
158. Oden, J.T. On mixed finite element approximations / J.T. Oden, J.N. Reddy // SIAM J. Numer. Anal. 13, 1976, pp. 393 – 404.
159. 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, 59(2), 2013, pp. 97-105.
160. Pande S.S., Relekar H.P. [Investigation on Burr Formation in Drilling]. Int. J. Mach. Tool Des. and Res., 1986., Vol.26., no.3, pp. 339–348.
161. Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P., 2000, Experimental Analysis of Drilling Damage in Thin Carbon/Epoxy Plate Using Special Drills, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 31:1107–1115.
162. Popov V. Y., Yanyushkin A. S. [Adhesion-Diffusion Interaction of Contact Surfaces with the Treatment Diamond Grinding Wheels]. Eastern European Scientific Journal, 2014, no. 2, pp. 301–310.
163. Pustovalov D.A., Mokritskii B.Y., Vysotskii V.V., Prikhodchenko O.V. [Material specimen loading scheme in evaluating resistance to corrosive action]. Chemical and Petroleum Engeneering, 2012 no. 7, pp. 445–452.
164. Rahamathullah, I., Shunmugam, M.S., 2013, Analyses of Forces and Hole Quality in Micro-Drilling of Carbon Fabric Laminate Composites, Journal of Composite Materials, 47/9: 1129–1140.
165. Rahmatullah, I., Shunmugam, M.S., 2014, Mechanistic approach for prediction of forces in micro-drilling of plain and glass-reinforced epoxy sheets, Int J Adv Manuf Technol, 75, pp. 1177-1187.

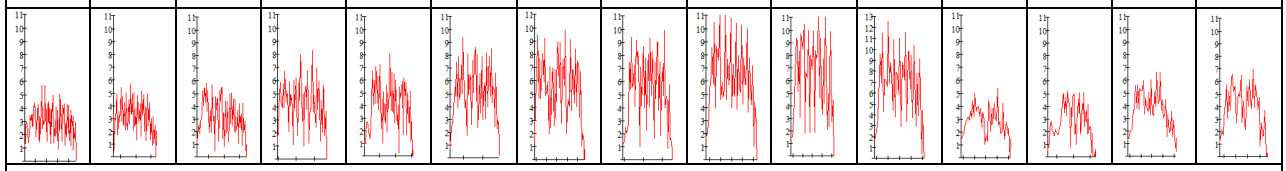
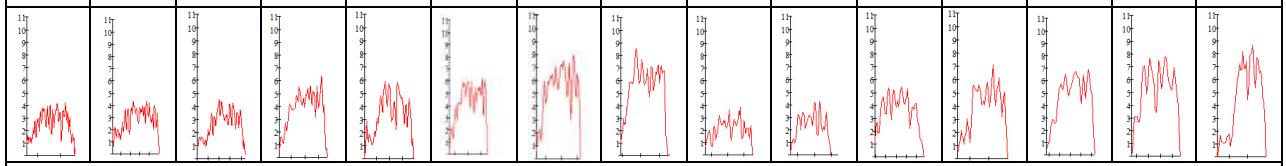
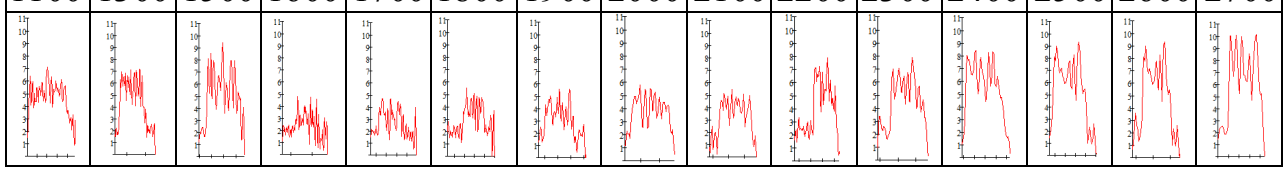
166. Rahamathullah, I., Shunmugam, M.S., 2011, Thrust and torque analyses for different strategies adapted in micro-drilling of glass-fibre reinforced plastics, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 225:505–519.
167. Rakesh, P.K. Drilling of composite laminates with solid and hollow drill point geometries / P.K. I. Rakesh, I. Singh, D. Kumar // Journal of Composite Materials. 46(25), 2012, pp. 3173–3180.
168. Rao, S., Shunmugam, M.S., 2012, Analytical Modeling of Micro Endmilling Forces With Edge Radius and Material Strengthening Effects, Machining Science and Technology, 16/2: 205–227.
169. Rao, G.V.G., Mahajan, P., Bhatnagar, N., 2007, Micro-Mechanical Modeling of Machining of FRP – Cutting Force Analysis, Composites Science and Technology, 67:579–593.
170. Reiter A.E., Brunner B., Ante M., Rechberger J. [Investigation of several PVD coatings for blind hole tapping in austenitic stainless steel]. Surface & Coatings Technology, 2006, no. 200, pp. 5532 – 5541.
171. Scholz, R. Approximation von Sttelpunkten mit finiten Elementen / R. Scholz // Bonn. Math. Schr., 89, 1976, pp. 53 – 66.
172. Scholz, R. Loo-convergence of saddle-point approximations, for second order problems / R. Scholz // Rev. Frangaise Automat. Informant. R,ccherche Operationnelle, Ser. Rouge Anal. Numer. 11, 1977, 2. pp. 209 – 216.
173. Senichev A.N., Kiselev V.N., Yamnikov A.S. [Cutting conditions in deep diamond grinding of aluminum alloys]. Russian Engineering Research, 2011, no. 5, pp. 502–504.
174. Shyha, I.S. The effect of peel ply layer on hole integrity when drilling carbon fibre-reinforced plastic / I. S. Shyha [et al.] // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of Engineering Manufacture. 2011, pp. 1217-1223.
175. Singh, I. Drilling-induced damage in uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates / I. Singh, N. Bhatnagar // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 27, 2006, pp. 877–882.

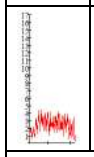
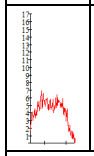
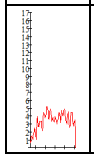
176. Singh, I. Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastic (UDGFRP) composite laminates / I. Singh, N. Bhatnagar // International Journal of Machine Tools and Manufacture, 27, 2006, pp. 870–876.
177. Takazawa K., Xiong S,. Kitajima K . Mivake T., Tanaka Y. [Burr Formation Mechanism in Drilling and its Control]. 3rd International Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology,1994, pp. 232–246.
178. Takazawa K. / 4th International Conference on Precision Surface Finishing and Birr Technology (Bad Nauheim, Germany, 23-24 september, 1996) – Deburring Technology International, Inc., Kansas City, MO, 1996, pp.105-130.
179. Taylor, C. A numerical solution of the Navier-Stokes equations using the finite element technique / C. Taylor, P. Hodd // Computers and Fluids, 1, 1973, pp. 73 – 100.
180. Tsao, C.C., Hoheng, H., 2008, Evaluation of thrust force and surface roughness in drilling composite material using Taguchi analysis and neural network, journal of materials processing technology, 203, pp. 342-348.
181. Tsao, C.C., Hocheng, H., 2007, Parametric Study on Thrust Force of Core Drill, Journal of Materials Processing Technology, 192–193:37–40.
182. Tsao, C.C., 2008, 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, 36:11–18.
183. Usui, E., Hirota, A., Masuko, M., 1978, Analytical Prediction of Three Dimensional Cutting Process, Part I: Basic Cutting Model and Energy Approach, Journal of Engineering for Industry, 100:222–228.
184. Vogler, M.P., DeVor, R.E., Kapoor, S.G., 2003, Microstructure-Level Force Prediction Model for Micro-Milling of Multi-Phase Materials, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 125:202–209.
185. Wang, B. Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks / B. Wang [et al.] // Engineering Manufacture. Vol. 228(7), 2014, pp. 698–706.

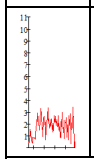
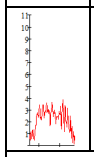
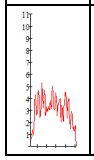
186. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. [Surface quality of the fiberglass composite material after milling]. Applied mechanics and materials, 2014, vol. 682, pp. 183 – 187.
187. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Saprykina N.A. [Mechanism of Protective Membrane Formation on the Surface of Metal-Bonded Diamond Disks]. Applied Mechanics and Materials. Switzerland, 2014, vol. 682, pp. 327–331.
188. Zhang, L.B., Wang, L.J., Liu, X.Y., 2001, A Mechanical Model for Predicting Critical Thrust Forces in Drilling Composite Laminates, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 215:135–146.

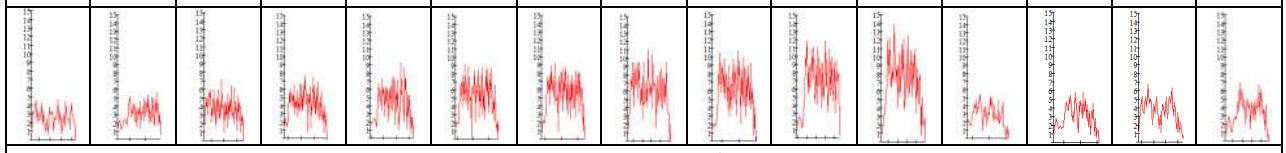
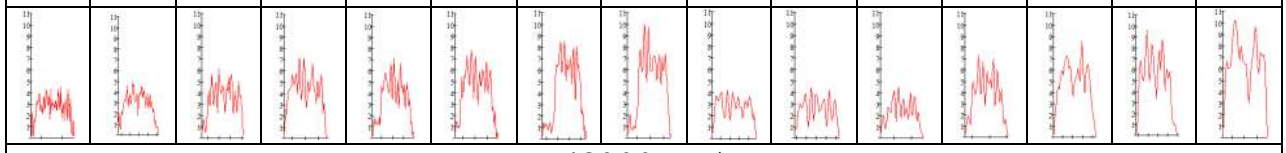
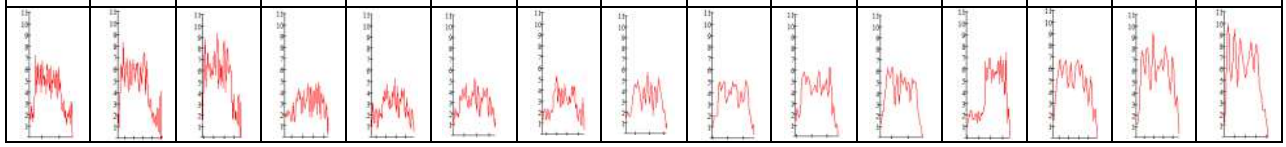
Результаты обработки экспериментальных данных Зависимость $P_0(t)$ на разных поперечных подачах S, мм/мин.

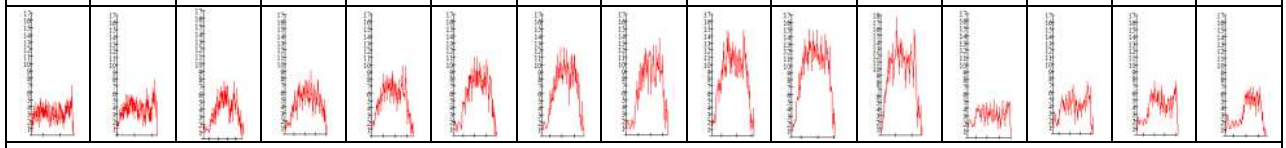
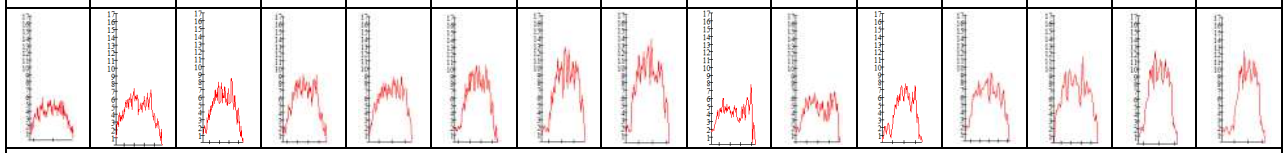
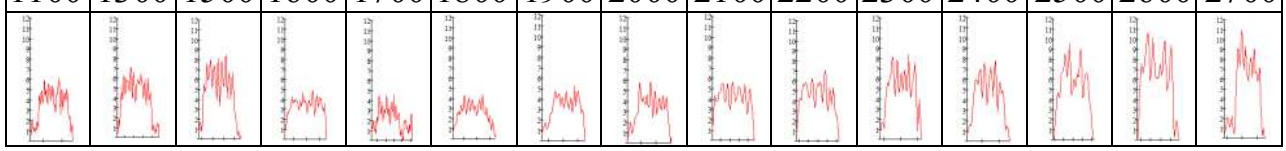
Материал Isola P96, Германия, г. Дюрен. Сверло Ø1мм. n = 36000 об/мин														
Скорость движения осевой подачи, мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 43000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 48000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														

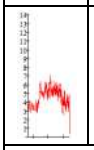
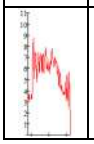
Материал Isola P96, Германия, г. Дюрен. Сверло Ø1,5мм. n = 36000 об/мин														
Скорость движения осевой подачи, мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 43000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 48000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														

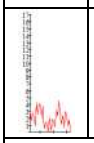
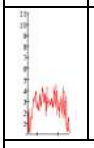
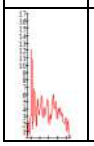
Материал Isola P96, Германия, г. Дюрен. Сверло Ø2мм. n = 36000 об/мин														
Скорость движения осевой подачи, мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 43000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 48000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														

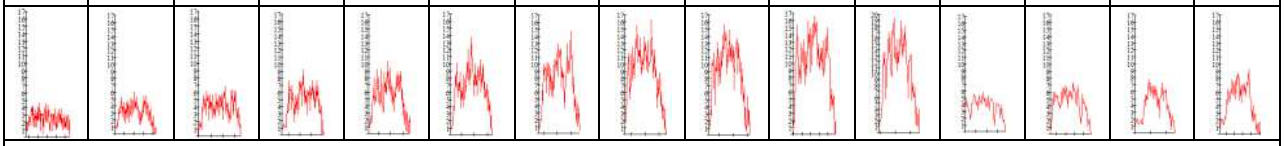
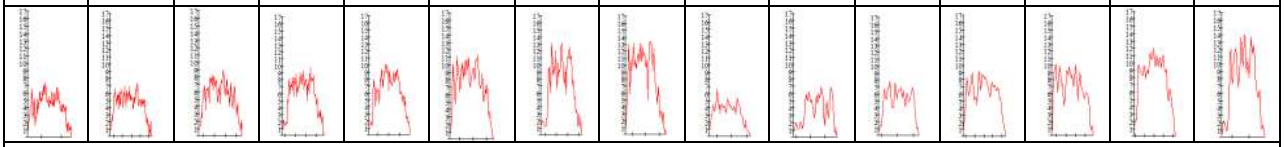
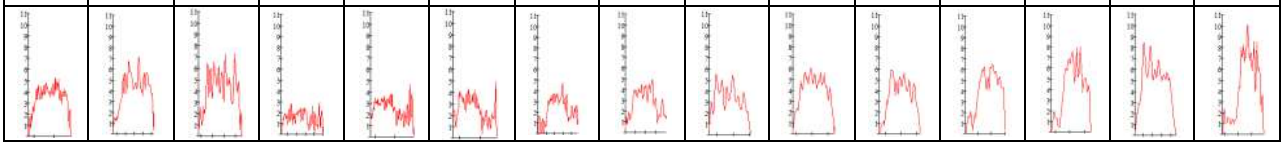
Материал GEM (ILM), КНР/ Сверло Ø1мм. n = 36000 об/мин														
Скорость движения осевой подачи, мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 43000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 48000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														

Материал GEM (ILM), КНР/ Сверло Ø1,5мм. n = 36000 об/мин														
Скорость движения осевой подачи, мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 43000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 48000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														

Материал GEM (ILM), КНР/ Сверло Ø2мм. n = 36000 об/мин														
Скорость движения осевой подачи, мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 43000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 48000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														

Материал СФ2 «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова, г. Мариуполь. Сверло Ø1мм. n = 36000 об/мин														
Скорость движения осевой подачи, мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 43000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 48000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														

Материал СФ2 «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова, г. Мариуполь. Сверло Ø1,5мм. n = 36000 об/мин														
Скорость движения осевой подачи, мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 43000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 48000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														

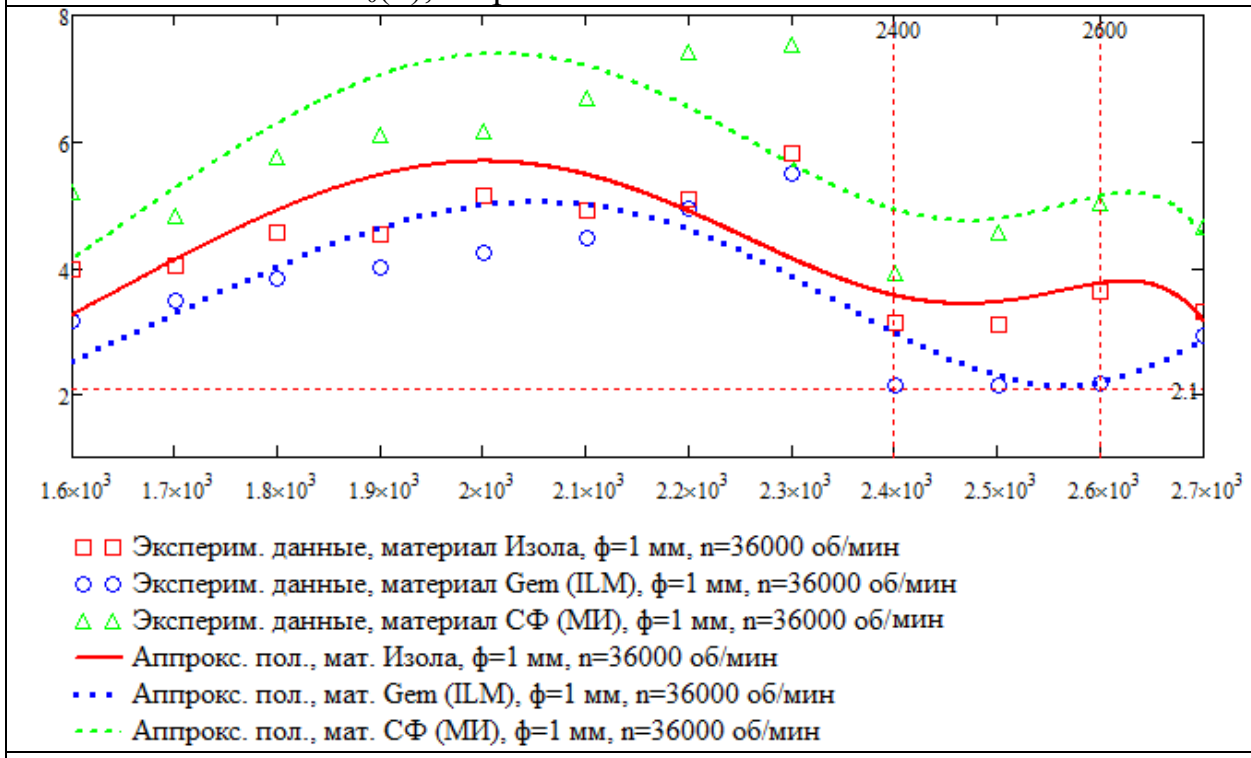
Материал СФ2 «Молдав изолит», ГОСТ10316-78, р. Молдова, г. Мариуполь. Сверло Ø2мм. n = 36000 об/мин														
Скорость движения осевой подачи, мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 43000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														
n = 48000 мм/мин														
1100	1300	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700
														

Приложение 2

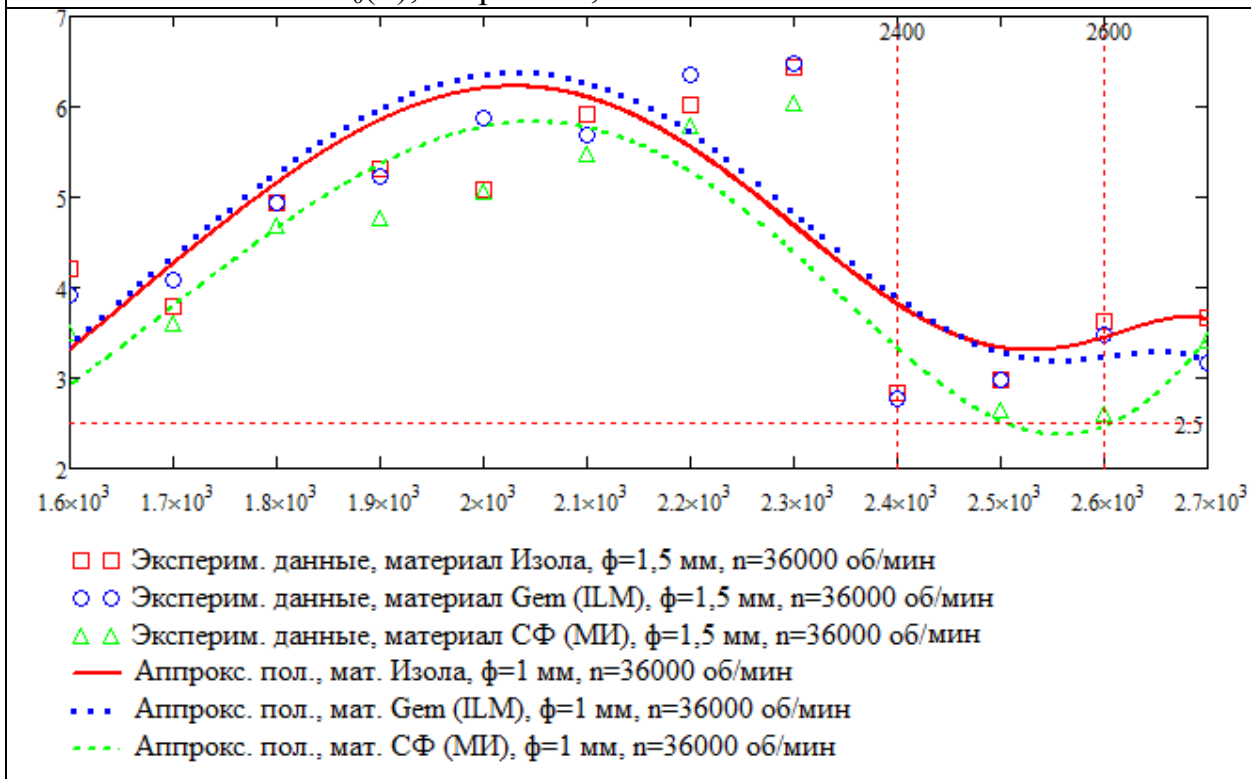
Результаты обработки экспериментальных данных.

Аппроксимация экспериментальных данных полиномом 4-й степени: зависимость усредненных значений осевой составляющей силы резания P_0, Н на разных скоростях движения осевой подачи S, мм/мин.

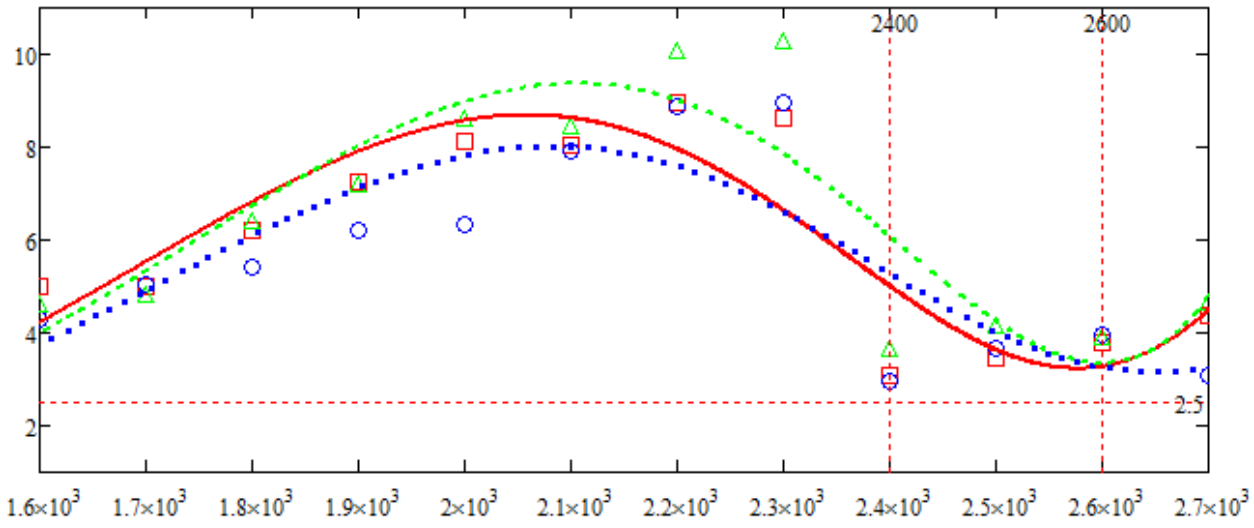
P_0(S), сверло Ø1мм. n = 36000 об/мин



P_0(S), сверло Ø1,5мм. n = 36000 об/мин

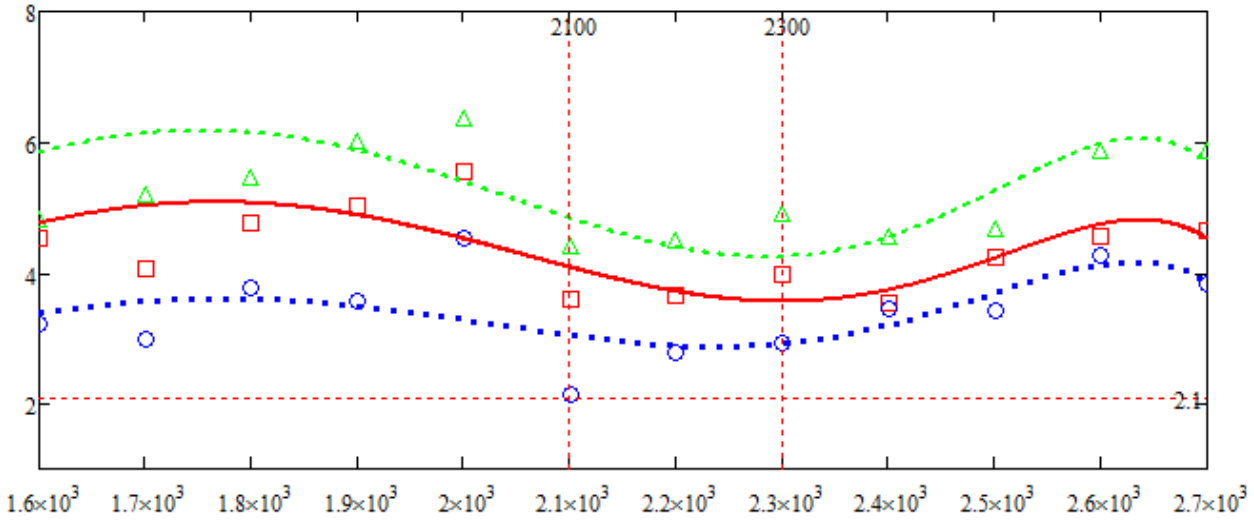


$P_0(S)$, сверло Ø2мм. n = 36000 об/мин



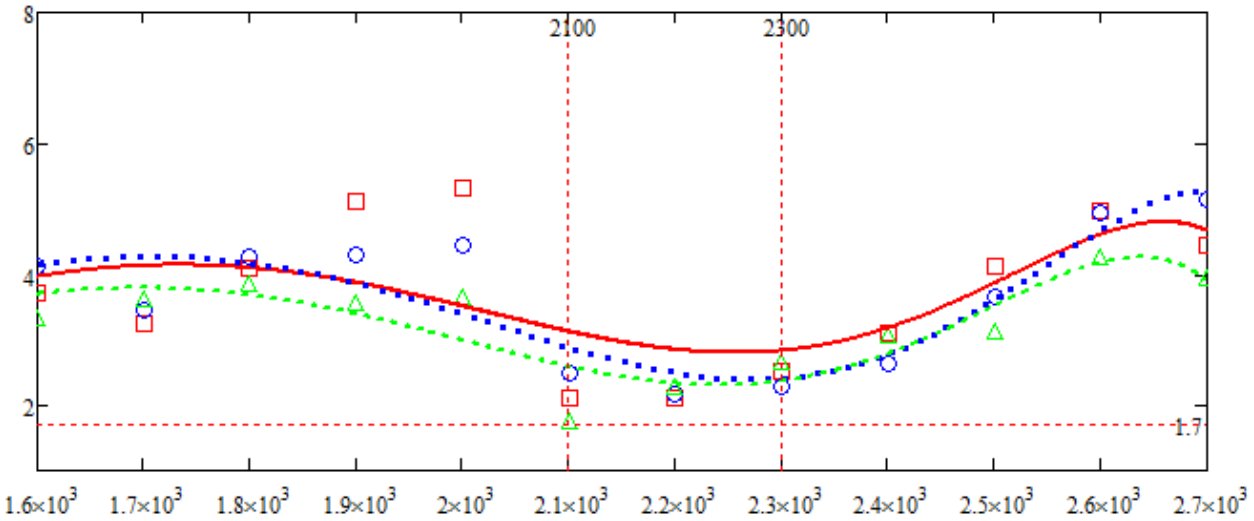
□ □ Эксперим. данные, материал Изола, ф=2 мм, n=36000 об/мин
○ ○ Эксперим. данные, материал Gem (ILM), ф=2 мм, n=36000 об/мин
△ △ Эксперим. данные, материал СФ (МИ), ф=2 мм, n=36000 об/мин
— Аппрокс. пол., мат. Изола, ф=1 мм, n=36000 об/мин
··· Аппрокс. пол., мат. Gem (ILM), ф=1 мм, n=36000 об/мин
- - - Аппрокс. пол., мат. СФ (МИ), ф=1 мм, n=36000 об/мин

$P_0(S)$, сверло Ø1мм. n = 43000 об/мин



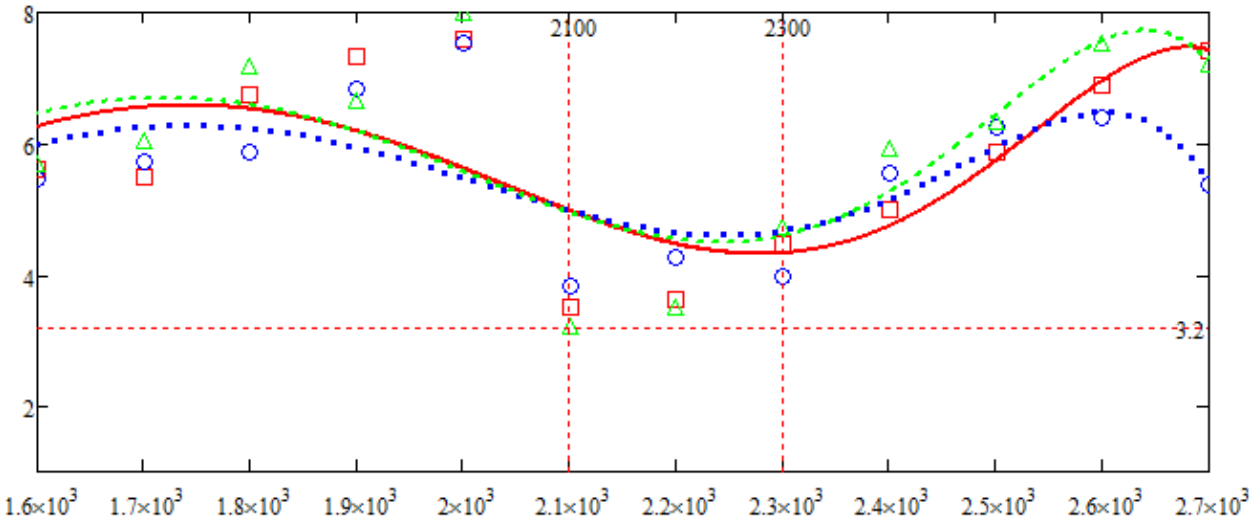
□ □ Эксперим. данные, материал Изола, ф=1 мм, n=43000 об/мин
○ ○ Эксперим. данные, материал Gem (ILM), ф=1 мм, n=43000 об/мин
△ △ Эксперим. данные, материал СФ (МИ), ф=1 мм, n=43000 об/мин
— Аппрокс. пол., мат. Изола, ф=1 мм, n=36000 об/мин
··· Аппрокс. пол., мат. Gem (ILM), ф=1 мм, n=36000 об/мин
- - - Аппрокс. пол., мат. СФ (МИ), ф=1 мм, n=36000 об/мин

$P_0(S)$, сверло Ø1,5 мм. n = 43000 об/мин



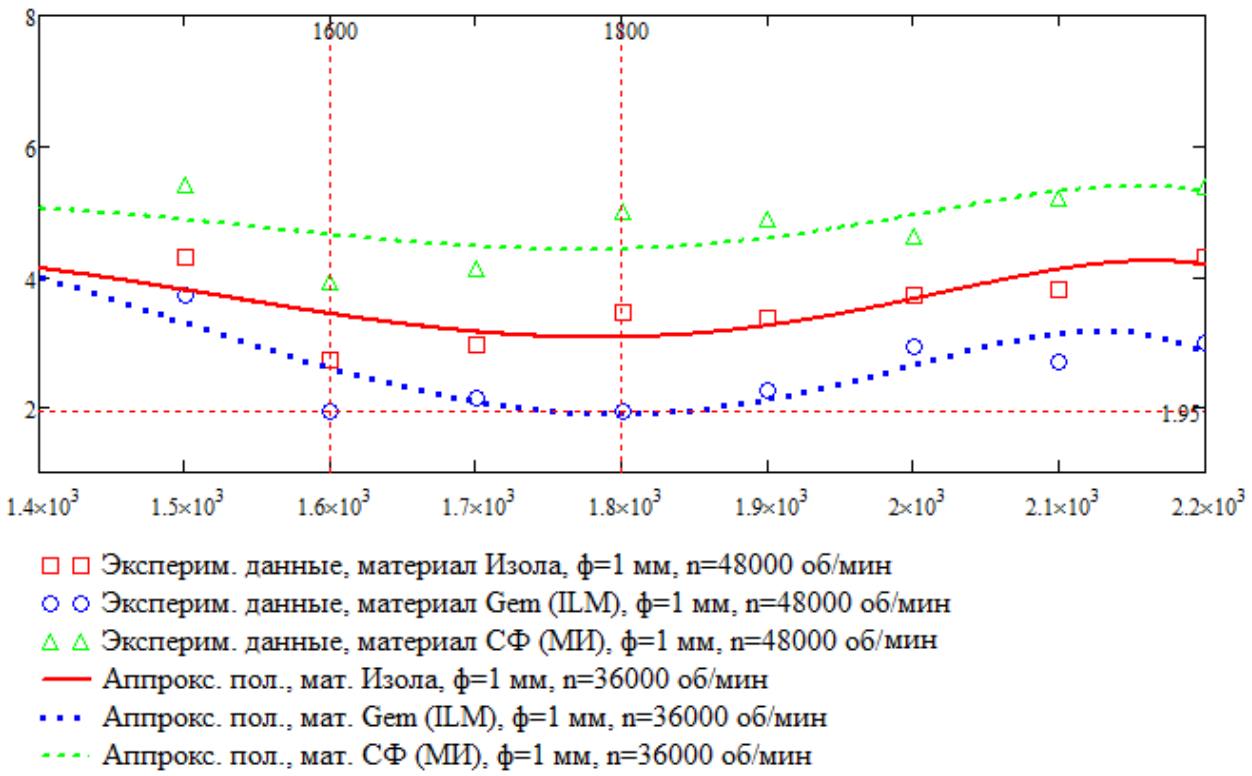
□ □ Эксперим. данные, материал Изола, ф=1,5 мм, n=43000 об/мин
○ ○ Эксперим. данные, материал Gem (ILM), ф=1,5 мм, n=43000 об/мин
△ △ Эксперим. данные, материал СФ (МИ), ф=1,5 мм, n=43000 об/мин
— Аппрокс. пол., мат. Изола, ф=1 мм, n=36000 об/мин
··· Аппрокс. пол., мат. Gem (ILM), ф=1 мм, n=36000 об/мин
- - - Аппрокс. пол., мат. СФ (МИ), ф=1 мм, n=36000 об/мин

$P_0(S)$, сверло Ø2,0 мм. n = 43000 об/мин

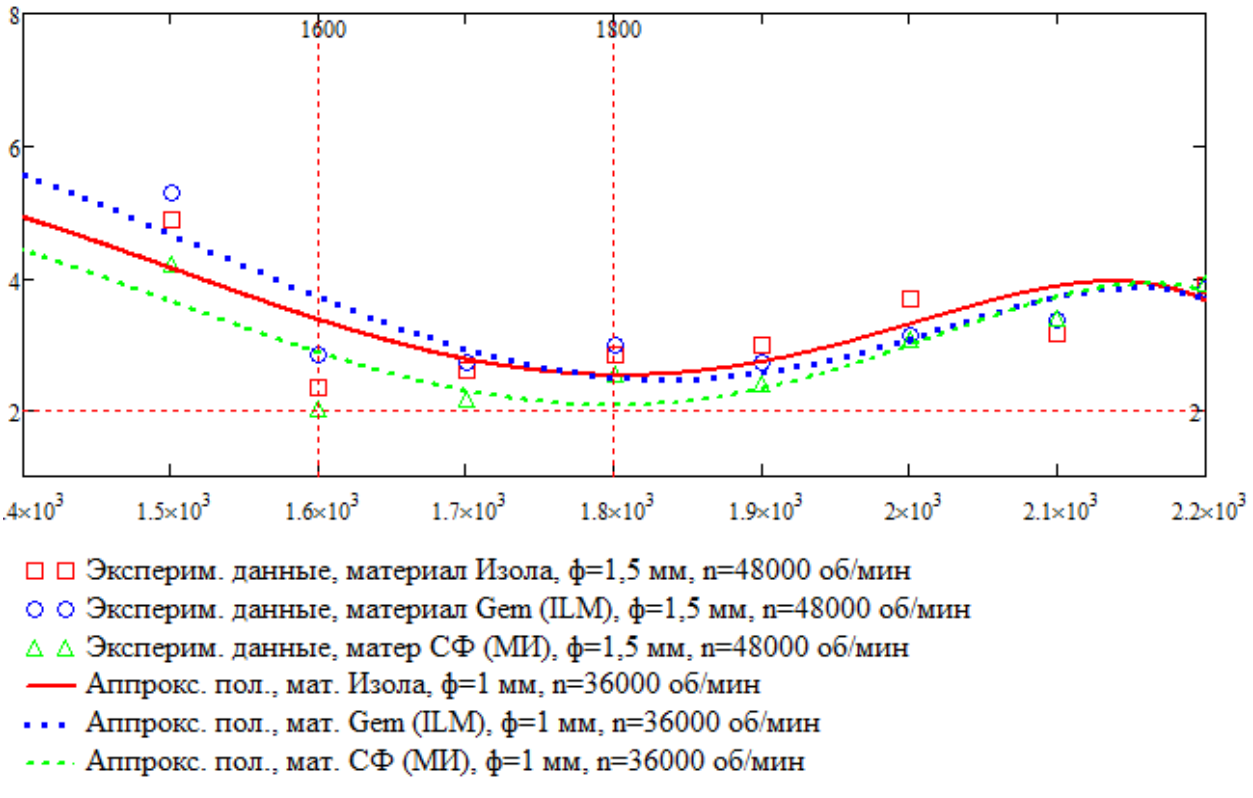


□ □ Эксперим. данные, материал Изола, ф=2 мм, n=43000 об/мин
○ ○ Эксперим. данные, материал Gem (ILM), ф=2 мм, n=43000 об/мин
△ △ Эксперим. данные, материал СФ (МИ), ф=2 мм, n=43000 об/мин
— Аппрокс. пол., мат. Изола, ф=1 мм, n=36000 об/мин
··· Аппрокс. пол., мат. Gem (ILM), ф=1 мм, n=36000 об/мин
- - - Аппрокс. пол., мат. СФ (МИ), ф=1 мм, n=36000 об/мин

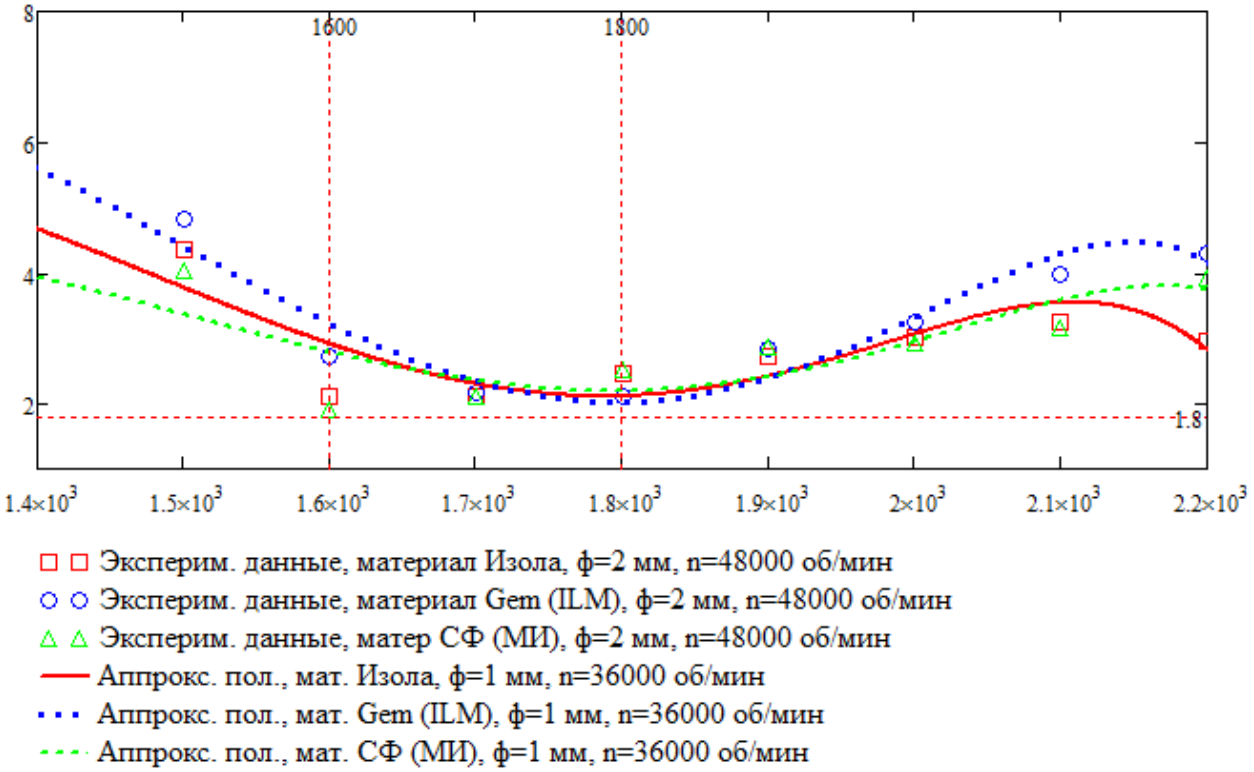
$P_0(S)$, сверло Ø1мм. n = 48000 об/мин



$P_0(S)$, сверло Ø1,5 мм. n = 48000 об/мин



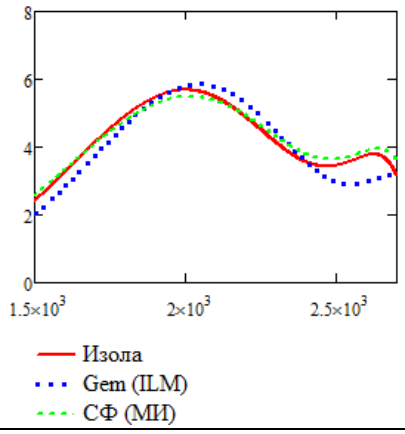
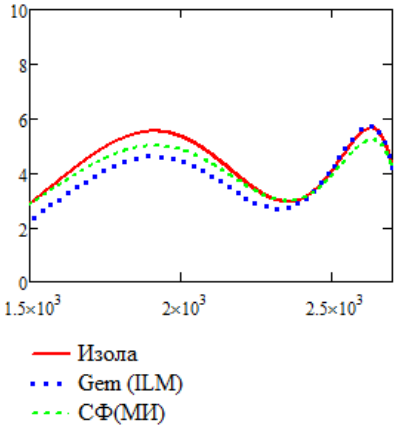
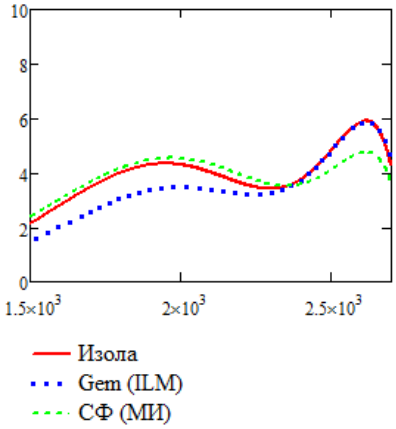
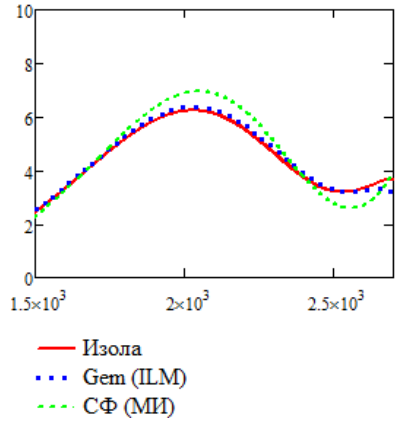
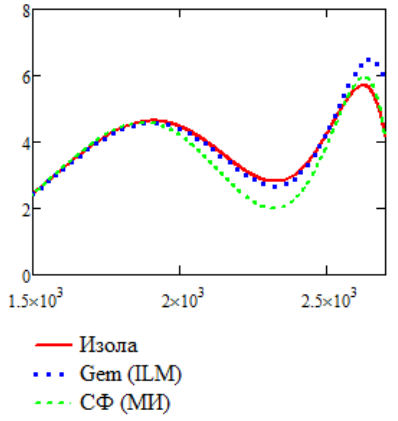
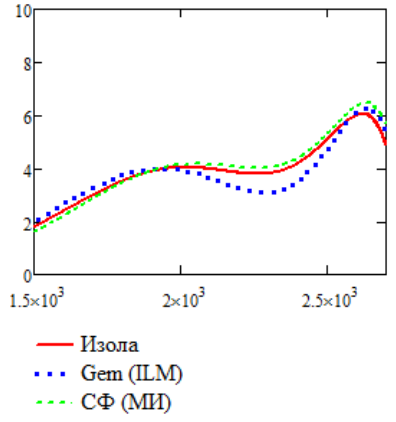
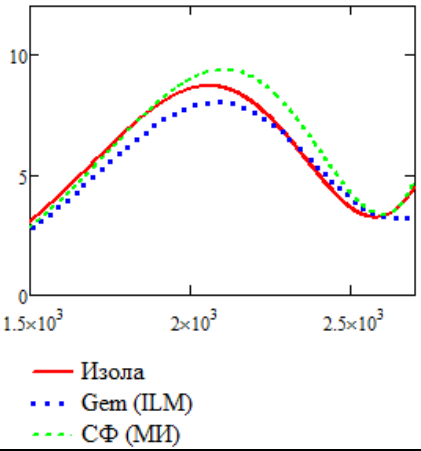
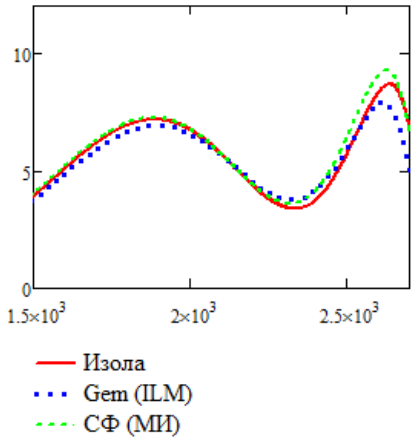
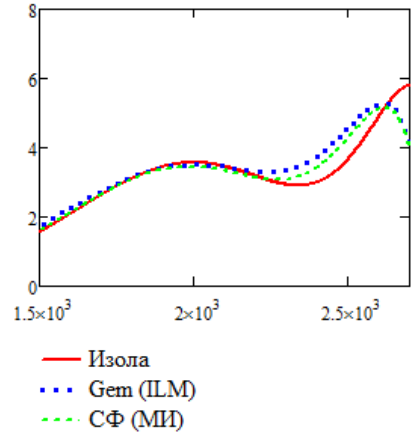
$P_0(S)$, сверло Ø2,0 мм. n = 48000 об/мин



Приложение 3

Результаты обработки экспериментальных данных.

Аппроксимация экспериментальных данных полиномом 4-й степени: зависимость усредненных значений осевой составляющей силы резания P_0, Н на разных скоростях движения осевой подачи S, мм/мин. с поправочными коэффициентами.

Св. Ø1мм. n = 36000 об/мин	Св. Ø1мм. n = 43000 об/мин	Св. Ø1мм. n = 48000 об/мин
		
Св. Ø1,5 мм. n = 36000 об/мин	Св. Ø1,5 мм. n = 43000 об/мин	Св. Ø1,5 мм.n= 48000 об/мин
		
Св. Ø2мм. n = 36000 об/мин	Св. Ø2мм. n = 43000 об/мин	Св. Ø2мм. n = 48000 об/мин
		

Карта наладки многооперационной обработки станка СМ-600

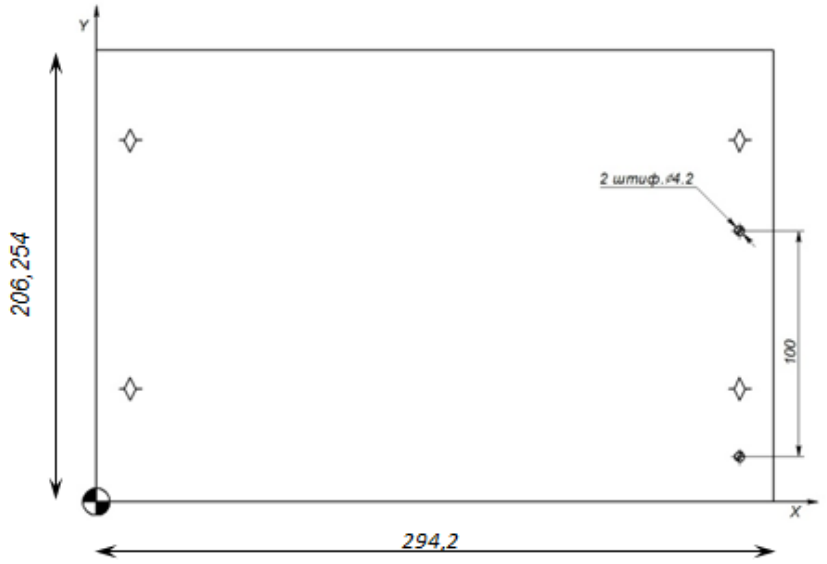
Карта наладки многооперационной обработки с ЧПУ станок (СМ-600) | ШПИГ.741645.028

цех	Уч.	Опер	Содержание операции
4	6	15	

Машинное время на пакет (мин.)	Тшт (мин)/Тпз (мин)
Топ=0,92	2,38 / 34,15

А. Подключить флеш-диск к станку
Ввести: подпрограмму в зону «М»
программы № 39 в зону «О»
Установить деталь на станок СМ-600, собрать пакет: 2 платы с подкладками из гетинакса толщиной 0,5 мм верх; 1,0 мм низ.
Б. Установить инструмент согласно таблице
В. Настроить согласно карты наладки, установить инструмент в магазин
Г. Обработать деталь по программе, выдерживая размеры согласно карты наладки.
Д. Снять печатные платы со станка. **Внимание!** Использование подкладок вторично запрещено! Подкладки уложить в изолятор брака для утилизации.
Е. Зачистить заусенцы на торцах платы. Контроль рабочего на наличие заусенца медной фольги – не более 30 мкм. При превышении – сменить инструмент. Затупленные сверла отправить на переточку.

Ж. Передать плату на операцию Скрайбирования (Скоринга) согласно технологического процесса.



Режущий инструмент					Режимы резания		Вспомогательный инструмент	Примечание	Измерительный документ
Код	кадр	Наименование	диаметр	длина	Подача мм/мин.	Число оборотов об./мин.			
1	1	Сверло твердосплавное фирма "Hum"	0,8	120	2570	34700			ИЧТ (1 мкм), лупа*10 специальная.
2	2	Сверло твердосплавное фирма "Hum"	1	120	2500	36400			ИЧТ (1 мкм), лупа*10 специальная.
3	3	Сверло твердосплавное фирма "Hum"	1,3	120	2340	40000			ИЧТ (1 мкм), лупа*10 специальная.

изм	лист	№ докум.	подп.	дата	изм	лист	№ докум.	подп.	дата	изм	лист	№ докум.	подп.	дата	Разраб.	Князев	Лист	Листов
															Пров.	Шульгин		
															Утв.	Егоров	1	1

Утверждаю

Заместитель директора по техническим вопросам – главный инженер



В.М. Палтусов

«12» марта 2018

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

научно-исследовательской работы

«Повышение эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита»

Настоящий акт составлен в том, что на предприятии АО «Радий» проведено практическое внедрение результатов диссертационных исследований А.Н. Шульгина по повышению эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита.

На основе анализа процесса сверления А.Н. Шульгиным 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. Посредством комплекса технологической автоматизации расчетов режимов резания, составления расчетно-технологических карт наладки и оптимизации работы группы инструментального хозяйства проведена оптимизация работ на предприятии.

В привязке к основным факторам, влияющим на качество и производительность обработки отверстий на фольгированном стеклотекстолите, разра-

ботаны 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:

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

2. для всей номенклатуры сверл, в 6-8 раз увеличен период стойкости инструмента, 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 отработку режимов резания.

При этом отмечены следующие технические преимущества: снижение основного времени механической обработки отверстий на печатных платах, в т.ч. с учетом исключения из технологического процесса операции гидроабразивной обработки на 660 мин/смену; уменьшение подготовительно-заключительного времени на 340 мин/смену.

Общий экономический эффект от внедрения научно-исследовательской работы за 2018 год составил 873 440 рублей при односменном режиме работы участка.

Главный технолог А.А. Егоров

Начальник Ц4 А.Н. Шмаков

Зам. начальника ПЭО Е.В. Закаляпина

Исполнитель А.Н. Шульгин

Приложение 6

АКТ
О ПРОМЫШЛЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

МЕТОДИК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫБОРУ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ИЗ ФОЛЬГИРОВАННОГО СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА

Настоящий акт составлен в том, что на предприятии ООО НИЦ «ЭКО», г. Екатеринбург в условиях серийного производства внедрены режимы обработки фольгированного стеклотекстолита при производстве печатных плат согласно рекомендаций А.Н.Шульгина.

Использование методики по выбору значений поперечной подачи и числа оборотов шпинделя при обработке материала Isola DE104 марки FR-4 более чем в два раза снизило износ твердосплавных сверл, повысило производительность изготовления и качество обработки материала.

Полученные эффективные режимы резания рекомендованы к внедрению.

Генеральный директор ООО НИЦ «ЭКО» Т.Р. Ханипов

Приложение 7

ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

ТЕХНОСВЯЗЬ

Россия, 620014, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта,26, тел./факс (343)-376-46-27, 257-93-40, E-mail: tssavlev@mail.ru
Р/сч. № 40702810716090105691 в Уральский банк ПАО «Сбербанк России», г. Екатеринбург, БИК 046577674,
кор. счет 30101810500000000674, ИНН 6661008360, ОКПО 26430057, КПП 666101001

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ЗАО «Техносвязь»
_____ Е.В. Савлев
«___» _____2018г.

АКТ

приемки к внедрению

режимов резания при сверлении отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита.

Мы, нижеподписавшиеся – комиссия в составе:
начальника технологического бюро Л.В.Худобко, главного механика А.К.Сацукевича, контрольного мастера ОТК А.Н.Бахтиновой составили настоящий акт в том, что в период с 01.11.2018г. по 16.11.2018г. на предприятии ЗАО «Техносвязь» проводилась отработка режимов резания при сверлении отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита, предложенных ст.инженером АО «Радий» А.Н.Шульгиным.

В результате проведенных работ установлено, что использование предлагаемых режимов резания позволило увеличить стойкость режущего инструмента в 2,8 раза, существенно увеличить производительность обработки и качество просверленных отверстий по сравнению с ранее использующимися на предприятии режимами резания.

Заключение комиссии: предложенные режимы резания признаны работоспособными и рекомендуются при сверлении отверстий в фольгированном стеклотекстолите. Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения составляет 180 000 руб.

Начальник ТБ Л.В. Худобко

Главный механик А.К. Сацукевич

Контрольный мастер ОТК А.Н. Бахтинова