

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертацию **Шульгина Алексея Николаевича**

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

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Сверление отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита сопряжено с рядом трудностей, связанных с высоким абразивным воздействием упрочняющего компонента на режущий инструмент, анизотропностью стеклотекстолита, высокими упругими свойствами связующего компонента и т.п. Это приводит к ухудшению качества обработанных поверхностей, уменьшению периода стойкости сверлильного инструмента и снижению производительности обработки. Для достижения высокой эффективности обработки требуется учитывать весь комплекс принципиальных особенностей обработки полимерных композиционных материалов, включая физико-механические свойства стеклотекстолита, геометрию режущего инструмента и режимы резания.

Поэтому повышение производительности и качества обработки отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита на основе расчетного определения режимов резания является весьма актуальным.

Для решения этих проблем автором проведены следующие мероприятия, составляющие научную новизну работы:

- 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.

- разработана методика назначения эффективных режимов резания с учетом комплекса технологических ограничений на сверление фольгированного стеклотекстолита.

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

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

Результаты исследований имеют практическую значимость и представлены в виде технологических рекомендаций для бездефектной обработки фольгированного стеклотекстолита и алгоритма назначения рациональных режимов резания при сверлении отверстий на печатных платах с применением специально разработанной программы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов по работе, библиографического списка и приложений. Основной текст содержит 222 страницы, 34 таблицы, 95 рисунков, 188 наименований библиографических источников и 6 приложений.

В первой главе автор провел анализ отечественных и зарубежных научных работ в области сверления композиционных пластиков, методов моделирования и оптимизации процессов резания. В результате анализа автор пришел к выводу, что для рассматриваемого технологического процесса отсутствуют единые рекомендации по режимам резания и геометрии режущего инструмента для сверления фольгированного стеклотекстолита, причем основное количество трудов посвящено пластикам, армированным углеродным волокном, а при мо-

делировании процессов обработки не учитывается слоистая структура композиционных материалов.

Глубокое изучение состояния исследований в этой области позволили автору обоснованно и четко сформулировать задачи исследования.

Во второй главе представлено теоретическое исследование сверления отверстий в фольгированном стеклотекстолите, для чего проведена численная реализация определения осевой составляющей силы резания методом конечных элементов в программах ANSYS Workbench и LS-DYNA. В отличие от известных методов моделирования процессов резания автор учитывает слоистую структуру композиционного материала за счет послойного формирования модели обрабатываемой заготовки.

Весьма эффективной и оправданной оказывается разработанная компьютерная имитационная модель сверления отверстий в слоистой системе, обеспечивающая возможность расчета возникающих усилий и напряжений. Экспериментальная оценка работоспособности этой модели показывает высокую сходимость результатов.

В третьей главе проведено теоретическое исследование процесса сверления печатных плат. Автор приводит убедительные доводы целесообразности снижения точности конечно-элементного моделирования в пределах 10% для сокращения времени расчета осевой составляющей силы резания. По результатам теоретического определения этой силы в адаптированной компьютерной имитационной модели автору удалось провести полиномиальную аппроксимацию графических данных и получить зависимости осевой составляющей силы резания от подачи для исследуемых материалов.

Четвертая глава посвящена определению рациональных факторов обработки фольгированного стеклотекстолита. Анализ значений осевой составляющей силы резания, полученных в компьютерной модели, позволил автору выстроить зависимости между подачей и частотой вращения шпинделя и между диаметром сверла и подачей. По полученным зависимостям автору удалось создать алгоритм и программное обеспечение по назначению рациональных

режимов резания в зависимости от применяемых материалов и инструментов. Проведенные исследования процесса стружкообразования при сверлении и качества обработанных поверхностей позволили автору установить общие закономерности влияния режимов резания на сверление фольгированного стекло-текстолита. В частности, установлен механизм разрушения материала при резании и зафиксирован момент появления дефектов. По результатам исследований автор дает рекомендации по оптимальным с точки зрения качества и производительности параметрам технологического процесса.

В пятой главе проведена экспериментальная проверка и экономическое обоснование методики назначения оптимальных режимов резания, где показан существенный экономический эффект от внедрения результатов работы в производство. Для автоматизации расчетов и компоновки карт наладки оборудования разработан ряд специальных программ, позволяющий сократить время подготовки производственного процесса и исключить человеческий фактор.

Диссертация написана технически грамотным языком, стиль изложения - научный. Иллюстративный материал выполнен на высоком оформительском уровне и дает наглядное представление об использованных методах измерений и обработки данных, установленных закономерностях. Содержание работы, ее основные результаты и научные положения в достаточной степени отражены в публикациях соискателя, включая издания, рекомендованные ВАК РФ и МБ SCOPUS (7 статей), а также прошли широкую апробацию на научных форумах различного уровня. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации и дает достаточно полное представление о структуре, научной новизне и практической значимости работы.

Вместе с тем при ознакомлении с текстом диссертации и ее авторефератом возникли некоторые вопросы и замечания:

1. При создании конечно-элементной модели заготовки в подразделе 2.2.1 диссертации автор стремится учесть неоднородность композиционного материала, однако впоследствии слои программно склеиваются и заготовка становится сплошной. Далее всей заготовке присваиваются механические свойства

стеклотекстолита. В работе не освещено, с какой целью сделана послойная разбивка и каким образом в программе Ansys учитывалась анизотропия свойств композиционного материала.

2. Во второй главе представлена экспериментальная часть работы для оценки работоспособности имитационной модели. При этом в диссертации отсутствует четкое планирование эксперимента и обоснование режимов обработки.

3. По результатам проведенных автором диссертации исследований, очевидно, что бездефектная обработка отверстий в стеклотекстолите невозможна. Даже на рекомендуемых автором режимах резания дефект в виде заусенца на выходе сверла присутствует в той или иной степени (таблица 29 диссертации). Поэтому утверждение автора о найденном решении в определении бездефектных условий сверления ошибочно и следует говорить о минимизации дефектов.

4. В подразделе 4.4 при исследовании процесса стружкообразования наблюдается резкое падение осевой составляющей силы резания и размеров фракции стружки (рис. 4.7) при увеличении осевой подачи. Аналогичные явления резкого изменения характеристик происходят при исследовании шероховатости (рис. 4.11), усадки (рис. 4.12), величины заусенцев фольги (рис. 4.13) и периода стойкости сверл (рис. 4.14). Данное явление в работе не объясняется.

5. На стр. 154 диссертации автор указывает на существенную деструкцию полимерного связующего. Однако в работе нет убедительных доказательств наличия деструкции в данном эксперименте, например, по результатам рентгеноструктурного анализа.

6. В п. 3 общих выводов говорится об установлении влияния геометрии сверла на значение осевой составляющей силы резания, однако в исследованиях, представленных в подразделе 4.5, указано, что сверла подвергались стандартной заточке и их геометрия не изменялась.

7. Из диссертации и автореферата неясно, каким образом проводилась оптимизация режимов обработки по двум параметрам: качеству обработанной поверхности и производительности сверления.

