

**ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д999.003.02**

**Повестка дня**

**ЗАЩИТА ДИССЕРТАЦИИ Шульгиным Алексеем Николаевичем  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ  
НАУК**

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

Специальность:

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

**Официальные оппоненты:**

**Реченко Денис Сергеевич** – д.т.н., доцент  
ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», кафедра  
«Металлорежущие станки и инструменты»

**Рычков Даниил Александрович** – к.т.н., доцент  
ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», кафедра «Машино-  
строение и транспорт»

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ), г. Пермь



Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Итак, начинаем заседание. В начале хотелось бы поздороваться с новыми членами диссертационного совета. В этом году проведена ротация и у нас два новых профессора, доктора технических наук из Чувашского государственного университета: Янюшкин Александр Сергеевич, работы которого мы все с Вами хорошо знаем, и Лобанов Дмитрий Владимирович. Давайте работать. У нас сегодня три заседания. Два заседания связаны с защитой диссертаций и одно заседание – прием к рассмотрению диссертации. Первое заседание – защита диссертации Шульгиным Алексеем Николаевичем на тему «Повышение эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита», специальность 05.02.07. Официальные оппоненты Реченко Денис Сергеевич и Рычков Даниил Александрович, ведущая организация «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». На втором заседании мы с Вами рассмотрим защиту диссертации Сизовым Сергеем Валерьевичем на тему «Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента путем импульсной лазерной обработки многослойного покрытия», специальность 05.02.07. Официальные оппоненты: Мигранов Марс Шарифуллович и Зинина Елена Петровна. Ведущая организация «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». И третье заседание – это прием диссертации к рассмотрению соискателя Мухиной из Саратовского государственного технического университета. Вот такие три заседания. Если нет вопросов, то начинаем.

Как я уже говорил, первая защита – защита диссертации Шульгиным Алексеем Николаевичем на тему «Повышение эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита», специальность 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки». Официальные оппоненты: Реченко Денис Сергеевич, д.т.н., доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета и Рычков Даниил Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и транспорт» Братского государственного университета. Ведущая организация – «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Работа выполнена в Снежинском физико-техническом институте – филиале федерального государственном автономном образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СФТИ НИЯУ МИФИ). На заседании присутствует из 20 человек

– 16 человек, из них по специальности 05.02.07 – 7 докторов наук, значит наше с Вами заседание правомочно.

Объявляется защита диссертации Шульгина Алексея Николаевича на тему «Повышение эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита». Работа выполнена в Снежинском физико-техническом институте – филиале федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Научный руководитель – д.т.н., доцент Дьяконов Александр Анатольевич, проректор по научной работе Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ). Официальные оппоненты Реченко Денис Сергеевич, д.т.н., доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Омского государственного технического университета и Рычков Даниил Александрович, к.т.н., доцент кафедры «Машиностроение и транспорт» Братского государственного университета. На заседании присутствуют Реченко Денис Сергеевич и Рычков Даниил Александрович. Письма с согласиями оппонирования диссертации от них были своевременно получены. Ведущая организация «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Слово предоставляется ученому секретарю совета Николаю Ивановичу Веткасову для оглашения документов из личного дела соискателя.

Ученый секретарь – д.т.н., доцент Веткасов Н.И.

Уважаемые коллеги у соискателя имеются следующие документы: личная карточка работника, из которой следует, что Шульгин Алексей Николаевич, 1983 года рождения, закончил СФТИ НИЯУ МИФИ по специальности «Технология машиностроения» в 2013 году, закончил аспирантуру в 2018 году по специальности «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в СФТИ НИЯУ МИФИ. В настоящее время работает преподавателем в СФТИ НИЯУ МИФИ. Имеется выписка из расширенного заседания Ученого совета СФТИ НИЯУ МИФИ, в которой указывается личное участие автора, степень обоснованности научных положений, степень научной ценности и дается заключение, что диссертация Шульгина А.Н. соответствует специальности 05.02.07. К делу приложены копии дипломов об окончании СФТИ НИЯУ МИФИ и ЮУрГУ. Имеются удостоверения о сдаче кандидатских экзаменов со следующими оценками: английский язык и история и философия науки – «отлично», экзамен по специальности технология и оборудование механической и физико-технической обработки с оценкой «хорошо». У соискателя 22 опубликованные работы, в т.ч. 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, одна статья в

научной базе «Scopus». Имеется заявление, которое было представлено в диссертационный совет и завизировано Председателем совета, протокол заседания приема диссертации к предварительному рассмотрению, заключение экспертной комиссии в составе профессоров Унянина А.Н., Киселева Е.С. и Денисенко А.Ф. о возможности защиты в совете и о соответствии автореферата и диссертации требованиям ВАК по изложению материала и соответствию работы данной специальности. Имеется отзыв научного руководителя, протокол о приеме диссертации к защите, имеется список рассылки авторефератов в 67 адресов, по которым были направлены авторефераты. Содержатся сведения о ведущей организации, положительные отзывы ведущей организации и официальных оппонентов. Кроме того, было представлено 11 положительных отзывов на автореферат. Все необходимые документы вовремя опубликованы на сайте Университета и в сети Интернет и соответствуют требованиям процедуры заседания для рассмотрения диссертации.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Так, вопросы к Николаю Ивановичу есть? Или к Алексею Николаевичу? Нет вопросов? Слово предоставляется Алексею Николаевичу для изложения аттестационной работы. Регламент Вы знаете: 20 минут.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Здравствуйте, уважаемые члены диссертационного совета. Производство печатных плат занимает одно из ключевых мест в приборостроении и радиоаппаратостроении. Основным базовым материалом для производства печатных плат выступает фольгированный стеклотекстолит различных марок и производителей. В условиях серийного многономенклатурного производства основным методом получения отверстий на печатных платах является их сверление на станках с числовым программным управлением твердосплавным инструментом. Необходимо отметить, что сверлением создается микрошероховатость поверхности, которая улучшает условия адсорбирования микрокаталитических частиц палладия для процесса последующего меднения. Сверление отверстий, особенно подлежащих металлизации является одной из важнейших операций при изготовлении печатной платы, поскольку от ее выполнения зависит точность металлизации и точность выполнения конечного изделия. Поэтому исследование процесса сверления печатных плат из фольгированного стеклотекстолита является актуальной задачей.

Постоянное стремление к миниатюризации в сборке, увеличение количества отверстий на печатной плате, слоистая структура композиционного

материала и высокое абразивное действие стеклоткани, на основе которой изготовлен материал, нередко приводят к ряду дефектов.

Осложняющим фактором выступает то, что оцениваемыми выходными параметрами на производстве после проведения операции сверления являются только качество обработанной поверхности, которое определяется визуально по наличию заусенцев медной фольги. Фактически же о качестве обработанных отверстий можно судить только после проведения последующей химико-гальванической обработки и проведения замеров толщины покрытия.

Соблюдение общепринятых рекомендаций не может гарантировать бездефектную обработку. Основными технологическими критериями, влияющими на качество сверления отверстий, выступают правильная геометрия режущего инструмента и грамотное назначение режимов резания. И если геометрические параметры сверл и их влияние на качество обработки изучено предметно, то при назначении режимов резания имеют место существенные трудности.

Рекомендуемые производителями базовых материалов и твердосплавных сверл параметры обработки существенно разнятся между собой и отличаются от режимов резания, приведенных в отраслевом стандарте, который, нужно отметить, разработан еще в советское время. Поэтому на реальном производстве, как правило, режимы резания назначаются инженером технологом исходя из его производственного опыта практическим путем с дополнительной проверкой на 10 – 20 заготовках и подкорректировкой.

Это приводит к повышенному расходу режущего инструмента, частым остановкам оборудования и повышенному технологическому отходу материала на настройку.

Особенно остро вопрос выбора режимов резания и определении геометрии заточки режущего инструмента (переточка больших заделов сверл) стоял на предприятии АО «Радий» в 2013 – 2014 годах при переходе на линейку импортных твердосплавных сверл и внедрении новых марок стеклотекстолита для оптимизации работ на предприятии.

На слайде представлены исследования сверления композитов с точки зрения влияния силовых факторов и теоретического моделирования. По влиянию силовых факторов необходимо отметить, что большинство работ по тематике влияния силовых факторов на процесс сверления посвящено обработке пластика, армированного углеродным волокном. Силовые модели, полученные авторами, для обработки фольгированного стеклотекстолита принципиально не подходят. В качестве критерия оценки при назначении режимов резания принимается величина осевой силы резания  $P_0$ , поэтому режимы

с максимально действующей осевой составляющей силой резания авторы принимали за наихудшие, а режимы резания с  $P_{0min}$  за наилучшими.

Общей особенностью при создании конечно-элементных моделей процесса сверления является сложность построения модели заготовки. Поэтому ни один из авторов при проектировании модели материала не учел его слоистую структуру, ограничившись введением коэффициента неоднородности. Процесс симуляции сверления композиционного материала (КМ) достаточно длительный. Поэтому в работах количество выполненных экспериментов не превышает трех, что недостаточно для полного и качественного анализа процесса сверления материала.

Таким образом, с одной стороны в рамках постоянной миниатюризации печатных плат и уменьшения диаметров отверстий с увеличением их общего количества и, с другой стороны, необходимость повышения производительности обработки отверстий при одновременном снижении количества дефектов, с другой стороны, создают реальные предпосылки для повышения эффективности сверления печатных плат.

Анализ работ, посвященных обработке КМ, показал, что процесс сверления фольгированного стеклотекстолита практически не изучен, имеются лишь исследования авторов в смежных областях.

Исследование направлено на достижение следующей цели: Увеличить производительность и качество обработки отверстий на печатных платах на основе расчетного определения режимов резания.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

Во-первых: сформировать комплекс технологических решений для улучшения обработки фольгированного стеклотекстолита, учитывающий бездефектность обработки. Во-вторых, разработать силовую модель резания КМ в привязке к слоистой структуре и анизотропности свойств стеклотекстолита. В-третьих, разработать методику расчетного определения режимов резания с учетом технологических ограничений на процесс сверления стеклотекстолита. И, наконец, разработать технологические рекомендации, обеспечивающие заданную производительность сверления и качество отверстий в фольгированном стеклотекстолите.

На производстве назначение параметров обработки производится эмпирически. Для повышения эффективности проектирования принято решение использовать CAE-системы с предварительным построением модели. Базовым пакетом для создания модели процесса сверления после проведения предварительного анализа принят «ANSYS». Программа позволяет постро-

ить все основные параметры обработки КМ и имеет возможность работы с предварительно разработанным командным файлом для возможности быстрого изменения параметров. В качестве решателя выбран пакет «LS-DYNA», который может работать с файлами, подготовленными в «ANSYS». Основное преимущество постпроцессора «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.

3 D модель сверла предварительно подготовлена в «T-Flex CAD» и сконвертирована в x\_t, который принимает «ANSYS». Разработан командный файл ввода данных, в котором заданы параметры режущего инструмента и композитной заготовки, размер сетки КЭ, режимы резания, граничные условия и пр. В пост-процессор «LS-DYNA» встроен графический построитель ASCII с возможностью построения выходного параметра, например, результирующей осевой силы (Z-force). Имеется возможность воспроизведения эквивалентных напряжений (Stress) в процессе резания и выбор функции плоского сечения (SPlane).

Для экспериментальной проверки работоспособности модели принято решение измерения осевой составляющей силы резания с использованием пятикомпонентного пьезоэлектрического динамометра Kistler Mini Dyn 9256C2. Для экономии рабочего времени и материала использовалась одна заготовка 100\*100 мм для различных режимов резания (до 45 отв.). На слайде № 7 в круглой области выделен полезный сигнал, необходимый для выделения и дальнейшего анализа. В общей сложности просверлено более 1000 отверстий на разных режимах резания для 3-х базовых материалов. Согласно проведенной статистической обработке с помощью непараметрического критерия знаков, установлено, что выборки, полученные в результате определения осевой составляющей силы резания, принадлежат к одной генеральной совокупности, а среднее абсолютное отклонение составило не более 12 %. В качестве имеющихся решений задачи сверления КМ, схожих по структуре и строению со стеклонаполненным слоистым текстолитом, взяты зависимости, представленные на слайде № 7. В уже разработанных моделях сверления КМ имеет место постепенное нелинейное увеличение осевой составляющей силы резания при увеличении подачи. При сопоставлении очевидно, что ни одна из ранее разработанных моделей сверления не годится для моделирования обработки стеклотекстолита.

Решена задача КЭ моделирования процесса сверления стеклотекстолита средствами ANSYS-LS-DYNA. Модель позволяет определять результирующую осевую составляющую силы резания  $P_0$  для проведения графического



построения и дальнейшего анализа. Работоспособность модели процесса сверления доказана проведением ряда практических экспериментов с использованием динамометра Kistler 9256C2 и проведенным статистическим анализом. Проведен анализ сопрягаемости модели с имеющимися решениями. Установлено, что ни одна из ранее разработанных моделей сверления композиционного материала не годится для обработки стеклотекстолита. Моделирование процесса сверления композита методом КЭ оказалось достаточно длительным. Для подробного анализа требуется гораздо большее число экспериментов с уменьшением шага по подаче, на разных оборотах шпинделя, с использованием сверл разного диаметра и различных материалах. Принято решение увеличить размер ячеек сетки для сокращения времени расчетов с проведением дополнительного анализа адекватности полученных результатов.

Проведено увеличение размеров КЭ с 0,05 до 0,2 мм. Среднее отклонение результатов расчета составляет не более 10,0 %. Проведена статистическая обработка данных. В предложенном варианте время расчета каждого режима в решателе «LS-DYNA» сократилось в среднем до 1,5 часов. Дальнейшее моделирование операции сверления проводили с использованием сверл диаметрами 1,0; 1,5; 2,0 мм. Всего проведено более 1000 экспериментов. Определение усредненных значений  $P_0$  проведено в пакете MathCAD. При моделировании общая тенденция по постепенному возрастанию осевого усилия с резким спадом при достижении рациональных значений режима резания (подача-частота вращения шпинделя) при увеличении подачи, сохраняется и прослеживается в каждом эксперименте. Граница оптимального режима (наименьшие значения осевой составляющей силы резания при максимальной подаче) в каждом отдельном случае сдвигается в ту или другую сторону.

Согласно ранее определенного алгоритма проведены измерения и обработка результатов осевой составляющей силы резания для всех режимов. Для получения усредненных данных и выполнения последующего анализа с помощью функции  $\text{mean}(x)$  пакета «MathCAD» находили средние значения осевой составляющей силы резания для режима в целом. На основании полученных результатов построены функциональные зависимости осевой составляющей силы резания от подачи (слайд № 10). Для упрощенного понимания и наглядности графические зависимости сгруппированы по частоте вращения шпинделя, а внутри графика – по марке материала и диаметру сверла. Необходимо отметить, что все получившиеся зависимости имеют об-

ласти рациональных режимов резания. На графиках она обозначена штриховой линией.

На основании предыдущего слайда разработаны математические и графические зависимости. По  $n(S)$ : используя области рациональных режимов резания, можно получить графические и математические зависимости, приведенные на слайде. Имеем нелинейные функции второго порядка. Отличительной особенностью зависимостей является схождение графиков по всем 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 КМ не существенны. Однако, данные режимы резания менее производительны, обработка фольгированного стеклотекстолита на данных режимах менее предпочтительна. По  $S(D)$ : при использовании материалов разных марок есть необходимость в корректировке скорости движения осевой подачи с учетом механических свойств самого ламината для получения оптимальной производительности при минимальной осевой нагрузке на сверло и максимального периода стойкости сверл.

Настоящий и последующие слайды носят прикладной характер

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

Окно выходных данных работы программы представлено на слайде №12. При качественном предварительном наборе файлов статистики Regime.exe позволяет существенно сократить время назначения рациональных режимов резания и ускорить технологическую подготовку производства. Для дополнительного анализа влияния режимов резания на процесс сверления проведен ряд дополнительных экспериментов на материале СФ-2, в результате проведения которых установлено: с увеличением  $S$  имеет место постепенное нелинейное увеличение  $P_0$  вплоть до значений свыше 10 Н. При этом, происходит увеличение фракции стружки от 0,045 мм до значений 0,23 мм. На режимах 4...6 имеют место дефекты в виде посветлений материала на

входе и выходе инструмента, которые прогрессируют с увеличением  $S$  и  $P_0$ . На режиме 6 образуются дефекты в виде выдавливания отдельных недорезанных сегментов материала величиной более 1 мм. На данных режимах обработки сверло уже не режет и ломает волокна, а выдавливает и вырывает базовый материал. При дальнейшем увеличении давления напряжение достигает пороговой величины с образованием опережающих трещин по Критерию Гриффитса. При этом имеет место существенное уменьшение размера элементов стружки (более чем в 10 раз) и связанное с этим снижение (более чем в 3 раза) осевой составляющей силы резания. Далее, наиболее приемлемым с точки зрения создания необходимой шероховатости в отверстиях, являются режимы 1, 7 ( $R_a$  до 1 мкм). Режимы обработки 2 и 3 допустимы, а на режимы 4...6 не годятся. Кроме того, практически установлено, что разброс величин отверстий в пределах  $\pm 0,07$  мм существенно не влияет на назначение диаметров обрабатываемых сверл, поэтому влияние режимов резания на упругое восстановление материала не существенно. Необходимо отметить, что на основании требований стандартов заточка инструмента должна проводиться не чаще 1500 отверстий при допустимой величине заусенцев медной фольги 30 мкм. Таким образом, режимы 1, 2, 3, 7 (величина  $P_0$  до 4,5 Н) соответствуют требованиям нормативной документации и являются работоспособными.

Дополнительно, на трех материалах проведена проверка определения периода стойкости сверл на трех материалах. Сверлили заготовку до появления заусенцев медной фольги свыше 30 мкм. Данные по периоду стойкости сведены в таблицу. Хотелось бы обратить внимание, что режим обработки 7 является наиболее предпочтительным, поскольку увеличение периода стойкости инструмента по отношению к режиму 1 составляет 1,5 раза, по отношению к режиму 2 – 5,5 раз. Режимы 4, 5, 6 для обработки не годятся с точки зрения периода стойкости и, обратите внимание, что на режиме 6 имеет место дополнительное выкрашивание крупных филаментов стеклоткани и заусенцы фольги в самом начале обработки.

На слайде приведены общие закономерности влияния режимов резания 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 (режимы 1, 2, 7) наблюдаются наилучшие условия стружкообразования, имеет место наименьшая шероховатость стенок отверстий после обработки, отмечается наибольший период стойкости инструмента до переточки. Однако, режим 7 является более высокопроизводительным и обеспечивает наибольший период стойкости инструмента до 11000 с одной

переточки. 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. При сверлении на режимах резания с  $P_0$  4,5...7,0 Н (режим 4) помимо ухудшения шероховатости и снижения периода стойкости режущего инструмента отверстий имеют место появление локальных дефектов в виде посветлений материала на входе и выходе инструмента. Обработка на данных режимах не рекомендуется. При увеличении  $P_0$  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  $R_a$  3,2 мкм, что приводит к ухудшению процесса нанесения подслоя палладия и последующей операции меднения. Кроме того, отмечается снижение периода стойкости сверл ниже требований нормативной документации. Сверление на данных режимах резания недопустимо. При превышении значений  $P_0$  свыше 10 Н отмечено выкрашивание материала на выходе сверла. Обработка на данных режимах резания категорически запрещена.

Дополнительно проведены опыты на затупленных сверлах при средней и предмаксимальной величине затупления инструмента. Имеет место увеличение как осевой составляющей силы резания, так и общее ухудшение обрабатываемости поверхности: увеличение фракции стружки, ухудшение шероховатости внутри отверстий. То же самое можно сказать и о заусенцах медной фольги на выходе инструмента. В среднем в 1,3 и 1,7 раза соответственно происходит ухудшение обрабатываемости поверхности.

Далее на базе ранее написанной программы Regim.exe разработана программа для минимизации трудозатрат инженера-технолога AutoKarta (для автоматической компоновки карт наладки оборудования с учетом расчета режимов резания и нормирования трудозатрат). Данная программа в автоматическом режиме выполняет перевод диаметров отверстий, не применяемой на практике номенклатуры сверл в используемую (например 1,15→1,2 мм); перерасчет диаметров сверл в диаметры обрабатываемых отверстий; расчет трудоемкости, включая оперативную норму, штучное время и подготовительно-заключительное время на партию обрабатываемых плат; выбор подкладок (верхних и нижних) и количество плат в пакете в зависимости от толщины используемого базового материала; формирование карт наладки для рабочего (цеховой экземпляр) и комплекта ТД.

По оптимизации работы Группы инструментального хозяйства также разработана специальная программа Sverlo. В автоматическом режиме выполняется расчет необходимого количества сверл (по месяцу, кварталу, го-

ду). Программно предусмотрена работа с остатком сверл на складе с подгрузкой файлов статистической обработки. Далее все расчеты выполняются в автоматическом режиме. Имеет место колоссальное сокращение времени расчетов: с 3-х дней до 10-15 минут.

Техническое и экономическое обоснование представлено на следующем слайде: имеет место повышение как качественных показателей сверления отверстий, так и количественных. Ввиду повышения качества обрабатываемых отверстий было принято решение по исключению операции «Гидроабразивная обработка» из технологического процесса. В общем случае штучное время было снижено на 660 мин/смену, подготовительно-заключительное время – на 340 минут/смену. Общий экономический эффект за 2018 год составил 873 440 руб/год. Необходимо отметить, что стоимость материалов на гидроабразивную обработку и заточку режущего инструмента и связанные с этими затраты электроэнергии в таблице не учтены.

На последнем слайде представлена научная новизна диссертационного исследования. Выводы представлены на слайде, разрешите их не зачитывать. У меня все, спасибо.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Преступим к обсуждению. Пожалуйста, профессор Худобин Леонид Викторович.

Д.т.н., профессор Худобин Л.В.

Алексей Николаевич, уточните, пожалуйста, в начале Вашего доклада, кстати, очень хорошего, говорили о том, что о качестве поверхности отверстий, получаемых во время сверления, можно судить только после выполнения последующей металлизации. Так ли это?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Не совсем так. Смысл в том, что качество обработанных отверстий оценивается по наличию заусенцев медной фольги. Есть специальное приспособление часового типа, с помощью которого измеряется заусенец медной фольги. Практически установлено, что заусенец свыше 40 мкм однозначно приведет к образованию дефектов типа «ободков». Поэтому и рабочий измеряет (у него задана пороговая величина 30 мкм) и контролер ОТК измеряет (у него задана пороговая величина 40 мкм, т.е. имеется небольшой разбег в 10 мкм), а фактически если на данном этапе мы что-то не «отловим», то да, только после металлизации и проведения измерений толщины покрытия.

Д.т.н., профессор Худобин Л.В.

Так какие же все-таки ограничения по показателям качества? К чему Вы стремились в рамках исследований?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Мы стремились увеличить период стойкости инструмента, повысить качество обработанных отверстий.

Д.т.н., профессор Худобин Л.В.

Вот качество, качество...?

Соискатель, Шульгин А.Н.

То есть, если использовать рациональные режимы резания, о которых я говорил, то, никаких дефектов не образуется. Это доказано опытно-практическим путем, работа вся завершена. Дефектов при обработке не возникает и заусенец медной фольги возникает только при превышении количества просверленных отверстий свыше 11 000, а так дефектов никаких нет.

Д.т.н., профессор Худобин Л.В.

Про заусенцы я понимаю, а вот когда Вы много внимания уделили шероховатости поверхности. О какой шероховатости поверхности идет речь?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Есть пороговое значение, которое практически установлено 3,2 мкм при превышении которого ухудшается осаждение палладия, как подслоя меди. Поэтому для того, чтобы проанализировать режимы резания: к какой шероховатостью в итоге это приведет, проведены дополнительные эксперименты. Шероховатость не меряется. Отверстий слишком малые по диаметру, там физически ничего не померяешь.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

А как измеряли тогда шероховатость?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Шлифы делали. Разделяли заготовку поперек отверстий и проверяли. Предварительно закрывали отверстия специальным легкоотъемным лаком для того, чтобы внутри шероховатость отверстия сохранилась. Шероховатость измеряли профилометром.

Д.т.н., профессор Худобин Л.В.

Алексей Николаевич, я закончу свою серию вопросов. Сформулируйте, пожалуйста, очень кратко научную новизну диссертационного исследования.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Разработана компьютерная имитационная модель, которая позволяет отойти от практики, которой мы раньше занимались, и перейти к теории и, на самом начальном этапе, выполнять грамотное, качественное назначение режимов резания: без использования лишнего базового материала, лишнего обрабатывающего инструмента, без отвлечения цехового рабочего. То есть, вначале необходимо выполнить теоретическую подготовку.

Д.т.н., профессор Худобин Л.В.

И все это позволяет решить модель?

Соискатель, Шульгин А.Н.

В том числе, да.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Все да? Пожалуйста, следующие вопросы, Евгений Степанович Киселев.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Толщина Вашего изделия сколько примерно?

Соискатель, Шульгин А.Н.

1,5 мм

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Как Вы так профилометром можете промерить. Профилометр работает иглой, у него есть базовая длина минимальная. Толщина вашего изделия меньше базовой длины.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Инструментальный прецизионный профилометр позволяет это сделать.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Можно 7 слайд.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Готово.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Вот Ваша теоретическая модель. Тут два перелома. Чем они объясняются?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Это соотнесено с теорией Гриффитса и образованием опережающей трещины. При достижении определенного напряжения происходит не просто отделение филамента стекловолокна, а еще этот элемент разделяется на две или три части. В связи с этим происходит резкое падение осевой составляющей силы резания. И на фракции стружки я вам это все показал.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Ну а почему предшественники Ваши это не обнаружили?

Соискатель, Шульгин А.Н.

У них режимы обработки другие совершенно и диаметры сверл тоже.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Как? Я смотрю на рисунок и подачи те же!

Соискатель, Шульгин А.Н.

Эта графика без привязки к подаче совершенно.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Тогда какое может быть сравнение?

Соискатель, Шульгин А.Н.

По своим режимам сверления я абсолютно ничего не нашел. При высокоскоростной обработке (на 50 000 об/мин) ничего не подходит из базовой теории резания композитов.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Значит, тогда кривые 1...4 ничего не дают, правильно? Ничего!

Соискатель, Шульгин А.Н.

Для моей задачи ничего не дают.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Тогда зачем Вы их нарисовали?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Я хотел показать характер. В имеющихся моделях имеется увеличение осевой составляющей силы резания с увеличением скорости движения осевой подачи, т.е. такого резкого спада (сбега) я не у кого не нашел.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Можно слайд 11. Не понятно, как в режимы резания попала частота. Обычно резание связывается со скоростью подачи и скоростью резания. А Вы почему-то взяли частоту.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Можно пересчитать частоту вращения шпинделя в скорость резания по известной формуле. Я старался по максимуму приблизиться к практике. На нашем базовом предприятии имеется оборудование (сверлильные станки) и в стойку станка вводится именно информация по подаче и частоте вращения шпинделя.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Ну, это понятно. Но у Вас ведь не практическая работа, а научно-теоретическая, поэтому Вы должны апеллировать теми понятиями, которые имеются в теории резания. А в теории резания не частота вращения, а скорость резания. Здесь такая проблема возникает: если вы взяли скорость резания, то зачем брали зависимости подачи от диаметра сверла?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Даже относительно рациональных режимов обработки имеется некоторое смещение в ту или другую сторону, т.е. если на базовом материале Isola я принимаю одну точку, то на материала СФ-2 и на материале Gem это



будут уже соседние точки. То есть имеется некоторый разбег. Я просто учел это математически.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

В данном случае Вы, по моему, поступили неправильно. Можно 11 слайд еще раз. Вот у Вас зависимость частоты вращения шпинделя от скорости осевой подачи. Я не понимаю, как она получилась?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Это простая аппроксимация полиномом 2 степени.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Скорость движения осевой подачи, в каких единицах измеряется?

Соискатель, Шульгин А.Н.

В мм/мин.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

А у Вас: если подставить цифры, то по-моему, не получится. То же самое по частоте. Я не могу понять сути. В каких все единицах?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Скорость движения осевой подачи в мм/мин, частота вращения шпинделя в об/мин.

Д.т.н., профессор Киселев Е.С.

Я не могу понять, как это получилось, величина цифровая?

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Это просто регрессионная зависимость. Значения коэффициентов нивелируются. У вас все? Да? Спасибо. Зибров Петр Федорович, пожалуйста.

Д.т.н., профессор Зибров П.Ф.

Меня немножко опередили по математике. Откуда Вы взяли эти зависимости? Первое: Вы их сами написали? Или где-то взяли и приняли, что они Вам подходят?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Сам, да.

Д.т.н., профессор Зибров П.Ф.

Тогда расчет размерности остается вопросом в обеих моделях. Второй момент, уже сказали, регрессионный анализ. Если Вы написали математическую модель, то обязаны были провести регрессионный анализ. Определить значимость коэффициентов этой модели. Тогда бы Вы доказали адекватность этой модели статистическим данным и вопросов бы не было. Вы проводили регрессионный анализ?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Регрессионный анализ не проводил.

Д.т.н., профессор Зибров П.Ф.

Значит тут написано, что вы использовали программное обеспечение, там это делалось? Если там это делалось, то можно сослаться на программу автоматически. Я еще раз обращаюсь: когда записали математическую зависимость, проверяйте размерность, потому что первая величина  $10^3$  – это три тысячи, вторая величина, если в мм – это одна тысячная. Значит значение этого коэффициента незначительное. А вот когда там квадрат стоит, то это получается одна десятитысячная. То есть эти все величины незначительные. О чем я и говорю. Здесь нужна аккуратность. Если Вы взяли у кого-то, то должны сказать: «Я взял у того-то, мне это подошло». А так, математическая модель требует доработки.

Д.т.н., профессор Носов Н.В.

Цель работы – повышение производительности и качества сверления отверстий. А почему вы ничего не говорите о точности?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Точность позиционирования задается станком. По усадке отверстия: разница в 0,05...0,07 мм для точности изготовления конечного отверстия не критична.

Д.т.н., профессор Носов Н.В.

То есть точность вам не нужна?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Точность задается станком. Станки настроенные и поверенные. Отверстия не разбивает, оно четко центрируется в пакете.

Д.т.н., профессор Носов Н.В.

У вас какой квалитет точности?

Соискатель, Шульгин А.Н.

8-9 квалитет

Д.т.н., профессор Носов Н.В.

Когда есть пружинение, это повлияет на точность отверстия. Слайд 13 можно?

Стружкообразование. Мне не понятен график зависимости стружки от подачи. Это что? Усадка по длине? Потому что ту стружку, которую вы преподносите – это случайная величина. Какая у Вас усадка? Верхний график и нижний. Что с усадкой?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Усадка имеет место быть. По диаметру. Усадка стружи.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Николай Васильевич, я немножко объясню. Тут нужно сказать, что это особенный материал, теория резания которого отличается от классической. Все? Спасибо. Булыжев Евгений Михайлович, пожалуйста.

Д.т.н., доцент Булыжев Е.М.

Вы упоминали теорию Гриффитса. С какой целью Вы ее использовали? Согласно теории, трещина проходит до свободной поверхности. Как же она у Вас потом разделяется-то?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Это стекловолокно. Большое количество волокон. Отдельные слои стекловолокна склеены между собой под углом 90°.

Д.т.н., доцент Булыжев Е.М.

Вы хотели сказать, что трещина в одном волокне начинает рушить другие?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Да, начинают разрушаться вышележащие слои.

Д.т.н., доцент Булыжев Е.М.

Возможно, так и есть.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Все, да? Теперь Лобанов Дмитрий Владимирович.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

Алексей Николаевич, первый вопрос касается Вашей цели. Она касается повышения производительности и качества просверленных отверстий. Однако, глядя на общие выводы и результаты исследования, я не вижу конкретных цифровых параметров, характеризующих увеличение производительности и качества.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Все на слайде представлено. Увеличено среднее количество просверленных отверстий в 1,4 раза относительно старой базовой технологии. Снижено общее количество переналадок в 6 раз. Количество переточек сверл в смену снижено в 5,3 раза. Снижено количество дефектов заготовок (плат) на запуск, технологический отход материала на обработку режимов резания – до 20 раз. Снижено общее количество дефектов (по выходу годных плат) в 16 раз.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

Понятно. В выводах это было бы не лишним отразить. И второй вопрос, касательно модели. Если перейти к Вашему 6 слайду, то при моделировании Вы используете 2 объекта.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Master и Slave, традиционно.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

Совершенно верно. Вы должны понимать, что, моделируя композит, нужно учесть его свойства. Вы учитывали хрупкие свойства или пластичные?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Хрупкие, конечно.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

А почему? У вас есть наполнитель – смола.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Слой наполнителя очень тонкий, микронный, поэтому я в модели этого не учитывал. Отдельные слои стеклоткани просто склеивались между собой программно.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

Вот и я о том же. Тут нужно быть аккуратным, поскольку от этого зависит адекватность модели. Второй вопрос касается геометрии режущего инструмента. Вы геометрию учитывали?

Соискатель, Шульгин А.Н.

По геометрии я ничего нового не придумал. У нас был большой задел российских сверл и схема заточки инструмента определенная, т.е. она известная.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

Вы же понимаете, что при изменении диаметров фактически меняются и геометрические параметры. Как это учтено?

Соискатель, Шульгин А.Н.

У нас применяется основная номенклатура сверл диаметром 1 мм. И мы все подстроили под нее.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

Т.е. настройка на один диаметр?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Все верно, на один диаметр.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

Хорошо. Третий вопрос: Вы сказали, что посчитав конечно-элементную сетку, Вы взяли и увеличили ее размер в 4 раза. Зачем это делать во всем массиве. Ведь у вас стрессовая зона, которая имеет самое большое нагружение, располагается вблизи режущей кромки. Почему бы там не оставить мелкую сетку, а остальные элементы увеличить? Ведь Вы при этом заметно снизили адекватность модели.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Я понял, что Вы имеете ввиду. Я долгое время занимался в пакете De-Form, где есть возможность программного сгущения сетки конечных элементов в зоне резания. Потом меня научный руководитель переключил на Ansys. В этом пакете получается длительный расчет при сгущении сетки в зоне обработки.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

Вот как раз можно было оставить сгущение в зоне резания. А Вы заведомо говорите, что увеличили сетку и это «хорошо».

Соискатель, Шульгин А.Н.

Смысл в том, что я занимался моделированием порядка двух лет. При уменьшении размера конечных элементов в зоне резания прозанимался бы не менее четырех. Я по максимуму пытался сократить время расчета.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

То есть вы сократили время расчета и снизили адекватность вашей модели?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Несколько. Для установления адекватности модели проведена статистическое сравнение данных. Установлена сходимость данных с разбросом не более 10 %.

Д.т.н., профессор Салов П.М.

Вы использовали 5-ти компонентный динамометр, что конкретно Вы зафиксировали? Крутящий момент или температуру? Другой вопрос: занимались ли геометрией самого сверла?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Геометрия сверла взята с типовой схемы заточки немецких производителей. Переточен задел сверл по данной схеме. Дело в том, что геометрия заточки импортных сверл в справочниках не приводится, есть только информация по заточке российских сверл.

Д.т.н., профессор Салов П.М.

Брали партию сверл и сами мерили углы? Какая разница между российской и импортной заточкой сверл?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Во-первых, угол при вершине несколько разный 110° и 130° для российских и импортных сверл соответственно.

Д.т.н., профессор Салов П.М.

Температуру измеряли?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Температуру не измеряли.

Д.т.н., профессор Салов П.М.

Тогда что входит в эти пять компонентов?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Пять компонентов с точки зрения возможности проведения измерений.

Измерялась фактически осевая составляющая силы резания.

Д.т.н., профессор Носов Н.В.

Минимальная сила какая была измерена?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Средняя? Порядка 1,5...2 Н на материале Gem.

Д.т.н., профессор Носов Н.В.

С какой погрешностью?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Согласно паспортных данных на динамометр. Нужно уточнить.

Д.т.н., профессор Салов П.М.

Каким образом контролировали частоту вращения?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Задавалась станком по заранее разработанной программе.

Д.т.н., профессор Салов П.М.

У меня больше нет вопросов.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Бобровский Николай Михайлович, пожалуйста.

Д.т.н., профессор Бобровский Н.М.

Как я понимаю, стеклотекстолит представляет собой трехслойную пластину?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Пятислойную

Д.т.н., профессор Бобровский Н.М.

Каждый раз 5-6 слоев, это сколько меди?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Если с учетом слоев меди, то 7 слоев.

Д.т.н., профессор Бобровский Н.М.

Тогда можно сказать, что объект представляет собой сэндвич, состоящий из крайних медных слоев, посередине которого основной материал? У этих материалов есть какие-то физико-механические свойства? Как-то бы их сравнить между собой. Например, чем отличается материал СФ-2 от материала Isola. Пока мы не можем их оценить. Есть они у Вас?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Да, есть, данные по механическим свойствам, которые сведены в таблицу. В диссертации все это отражено, прописано. Могу показать.

Д.т.н., профессор Бобровский Н.М.

Хорошо. Толщина меди у Вас сколько?

Соискатель, Шульгин А.Н.

18 мкм. Под прецизионные печатные платы для Специальной техники используется материал с толщиной слоя фольги 35 мкм.

Д.т.н., профессор Бобровский Н.М.

Вы делали все на одной толщине?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Да, все на толщине 1,5 мм

Д.т.н., профессор Бобровский Н.М.

И еще мне не понятно...палладий. Он какую там роль играет?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Внутри отверстий, используется как подслоя для дальнейшего осаждения химической меди, потом гальванической меди.

Д.т.н., профессор Бобровский Н.М.

Все спасибо.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Олег Владимирович Захаров, пожалуйста.

Д.т.н., доцент Захаров О.В.

Алексей Николаевич, у Вас в качестве цели записано повышение производительности. С точки зрения экономики это период стойкости инструмента. В математической модели у Вас используется осевая составляющая силы резания. Как соотносятся все эти величины? Если графически представить их в одной системе координат. Т.е. это будут одинаковые закономерности, одинаковые кривые?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Я не совсем понял вопрос, если честно...

Д.т.н., доцент Захаров О.В.

Эти величины как-то коррелируются? Период стойкости, режимы резания и осевая сила.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Прямая корреляция. Практически их можно уложить в один график.

Д.т.н., доцент Захаров О.В.

У меня все, спасибо.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Еще вопросы. Александр Николаевич, пожалуйста.

Д.т.н., доцент Унянин А.Н.

Вы еще про температуру сказали, что не мерили. Нет опасения, что температура в процессе обработки превышена?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Почему я не завязывал температуру: я пытался максимально приблизить исследования к производству. Используются специальные станки с использованием устройства по отводу стружки с одновременным обдувом-охлаждением зоны обработки. Поэтому никакого термовоздействия в зоне резания нет, соответственно я измерений температуры не проводил. Хотя возможность скорректировать модель резания и учесть температуру имеется. Но в настоящий момент мне бы это ничего не дало.

Д.т.н., доцент Унянин А.Н.

То есть температура никак не влияет?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Влияет. Если эту систему на станке отключить, то будут присутствовать дефекты в виде засаливания, заполировки и наволакивания смолы на сверло. А при использовании обдува и экстрактора стружки в зоне резания таких дефектов нет.

Д.т.н., доцент Унянин А.Н.

У Вас тут на графиках зависимости осевой составляющей силы резания изгиб наблюдается с увеличением подачи. 10-й слайд, на всех графиках. Как Вы его объясните?

Соискатель, Шульгин А.Н.

Я привязал это к теории Гриффитса, теории опережающей трещины, когда фрагмент стружки распадается на несколько элементов.

Д.т.н., доцент Унянин А.Н.

А почему не связали с температурой? Увеличивается температура – уменьшается напряжение?

Соискатель, Шульгин А.Н.

На станках с работающим обдувом и вытяжкой нет термовоздействия.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Так хорошо. Есть еще вопросы? Тогда ладно. Алексей Николаевич, пока присаживайтесь. Будем делать технический перерыв? Нет? Хорошо, тогда продолжаем. Слово предоставляется научному руководителю, доктору технических наук Дьяконову Александру Анатольевичу.



Д.т.н., доцент Дьяконов А.А.

Уважаемые члены диссертационного совета, разрешите, я зачитаю отзыв на диссертацию и на соискателя Шульгина Алексея Николаевича и добавлю от себя несколько слов. Алексей Николаевич имеет два высших технических образования. В сентябре 2013 года он зачислен в аспирантуру Снежинского филиала НИЯУ МИФИ. За время обучения в аспирантуре неоднократно награждался грамотами и дипломами за участие в научной работе. Также хочу отметить, что Алексей Николаевич показал себя целеустремленным исследователем, способным самостоятельно ставить и решать научно-исследовательские задачи. В своей диссертационной работе Шульгин А.Н., основываясь на системном подходе и применении современных методов исследований, решил актуальную задачу повышения производительности обработки отверстий с одновременной минимизацией количества дефектов в отверстиях и обеспечением требуемого периода стойкости режущего инструмента. Основные результаты работы Шульгина А.Н. достаточно полно отражены в 22 научных публикациях, из них 6 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 в периодическом издании с цитированием в научной базе данных Scopus. Проведено промышленное внедрение научно-исследовательской работы на двух предприятиях Уральского Федерального округа. Учитывая большую научную и практическую значимость результатов диссертационного исследования Шульгина А.Н., считаю, что Шульгин А.Н. достоин присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

От себя я хотел бы добавить, что Алексей Николаевич показал себя как молодой ученый, способный ставить и решать задачи, которые шли именно от производства. Все это сделано его руками. Полностью овладел методами и математического моделирования и статистической обработкой данных и самое главное, что все эти результаты внедрены в реально действующее производство, где он занимает должность инженера. И все эти мероприятия привели к повышению производительности и качества обработки отверстий на специфических материалах. Тут много было вопросов по сверлению этих материалов. От себя добавлю, что да, действительно, материалы эти новые, совсем другая физика резания и физико-механические свойства этих материалов, поэтому я думаю, что в этом направлении еще надо много сделать и работать, но это было одно из начал работы в этом направлении. Я думаю, что в дальнейшем в своих работах Алексей Николаевич и другие ученые более

детально разберутся в этом направлении и получают соответствующий необходимый результат.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Слово предоставляется Ученому секретарю ученого совета Веткасову Николаю Ивановичу для оглашения заключения организации, где работает соискатель, и отзыва ведущей организации.

Ученый секретарь – д.т.н., доцент Веткасов Н.И.

Итак, заключение Снежинского физико-технического института – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Диссертация А.Н. Шульгина «Повышение эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, выполнена на кафедре «Технология машиностроения» СФТИ НИЯУ МИФИ. В период подготовки диссертации соискатель Шульгин Алексей Николаевич работал в СФТИ НИЯУ МИФИ в должностях преподавателя факультета СПО, старшего преподавателя. В 2013 году окончил СФТИ НИЯУ МИФИ по специальности «Технология машиностроения», ему присуждена квалификация инженера. Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов по дисциплинам «Иностранный язык» и «История и философия науки» выдано в 2015 году Снежинским физико-техническим институтом – филиалом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Экзамен по специальной дисциплине «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» сдан на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ульяновский государственный технический университет», выдана справка А/119 от 16.09.19. Научный руководитель – Дьяконов Александр Анатольевич, д.т.н., доцент, проректор по научной работе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

По итогам обсуждения принято следующее заключение: актуальность работы определяется производственной необходимостью повышения эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита, что подразумевает системный подход: увеличение каче-

ственных и количественных показателей обработки. К количественным показателям относятся 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. 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. 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. Это обосновывает актуальность исследований Шульгина А.Н., направленных на повышение эффективности механической обработки печатных плат.

Степень достоверности 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.

Научная новизна полученных в диссертации результатов теоретических и экспериментальных исследований определяется рядом новых научных положений и выводов, важнейшие из которых получены лично соискателем:

1. Компьютерная имитационная модель
2. Методика назначения эффективных режимов резания с учетом комплекса технологических ограничений на сверление фольгированного стеклотекстолита.
3. Значения осевой со-

ставляющей силы резания, при которых обеспечиваются лучшие условия резания материала 4. 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.

Практическими результатами диссертационной работы являются:

1. Экспериментальная проверка правильности назначения рациональных режимов резания при сверлении отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита. Доказано повышение эффективности обработки, как с точки зрения количественных, так и качественных показателей.
2. Оптимизация работ на предприятии, занимающемся изготовлением печатных плат посредством автоматизации расчетов режимов резания. Проведено обучение технического и производственного персонала с оформлением сопроводительных документов.
3. Внедрение результатов научно-технических и технологических работ на двух предприятиях УрФО, занимающихся изготовлением печатных плат с оформлением актов внедрения и промышленного использования. Программа SverloProg.exe передана в производственную эксплуатацию.
4. Экономическое обоснование от внедрения результатов работы.

Результаты работы внедрены на двух специализированных предприятиях Уральского региона. 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 годах. Результаты работы прошли промышленную апробацию. Основные положения диссертационной работы в достаточной мере отражены в многочисленных публикациях (22 наименования). Автореферат отражает основное содержание диссертации. Диссертация Шульгина А.Н. написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, является целостной и завершенной научно-квалификационной работой, посвященной решению актуальных научно-технических задач, и соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней и званий. Поставленные в работе задачи раскрыты достаточно, полно и последовательно, выводы и рекомендации обоснованы. Работа Шульгина А.Н. соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

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

Николаевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07. Заключение принято на совместном Ученом совете. Присутствовали на заседании 7 сотрудников СФТИ НИЯУ МИФИ, в том числе 2 доктора технических наук. Результаты голосования: «за» - 7 человек, «против» - нет, «воздержались» - нет. Протокол заседания № 373 от «20» сентября 2019 г. Отзыв составлен Председателем Ученого Совета СФТИ НИЯУ МИФИ Водолагой Б.К. и Ученым секретарем Ученого Совета СФТИ НИЯУ МИФИ Орловым А.А. и утвержден и.о. руководителя СФТИ НИЯУ МИФИ Румянцевым П.О. 30.09.2019 г.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Вопросы будут к Николаю Ивановичу? Тогда отзыв ведущей организации.

Ученый секретарь – д.т.н., доцент Веткасов Н.И.

С небольшими сокращениями. Отзыв ведущей организации на диссертационную работу Шульгина Алексея Николаевича, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Актуальность темы диссертационной работы.

Сверление фольгированного стеклотекстолита имеет ряд особенностей, выражающихся в повышенных требованиях, предъявляемых к качеству обработки отверстий – отсутствию характерных дефектов: ореолов и осветлений диэлектрика, больших заусенцев и отслаивания фольги на выходе сверла, заполировке и засаливанию поверхности отверстий, расслаивании материала, «гвоздевом эффекте» и пр. На реальном производстве данные требования обеспечиваются соответствующим выбором параметров процесса, однако, общих технологических рекомендаций по их назначению нет. Рекомендуемые производителями базовых материалов и твердосплавных сверл параметры обработки существенно разнятся между собой и отличаются от режимов резания, приведенных в ОСТе, который разработан еще в советское время. Поэтому на производстве, как правило, режимы резания назначаются инженером-технологом, исходя из его производственного опыта, что часто приводит к повышенному расходу режущего инструмента, частым остановкам оборудования, переналадкам и повышенному технологическому отходу материала на настройку, что связано с затратами времени и средств. Поэтому исследование процесса сверления отверстий и повышение его эффективности на печатных платах из стеклотекстолита является актуальной проблемой.

Структура и основное содержание диссертационной работы.

Работа содержит введение, пять основных глав, заключение, общие результаты и выводы, список используемых источников и шесть приложений. Диссертационная работа состоит из 238 страниц машинописного текста, включает 95 поясняющих рисунков и 34 таблицы. Выполняется анализ по каждой главе диссертации и в заключении приводятся основные выводы и результаты диссертационной работы. Далее приводится характеристика научной новизны диссертационной работы. В частности указано, что: 1. Разработана компьютерная имитационная модель; 2. Разработана методика назначения эффективных режимов резания; 3. Определены значения осевой составляющей силы резания; 4. Установлено влияние режимов резания материала на процесс образования стружки, качество отверстий и шероховатость стенок отверстий, упругое восстановление материала и наличие заусенцев фольги в отверстиях после обработки.

Апробация работы и публикации.

Приводится характеристика апробации работы на двух предприятиях Уральского региона. Периодически результаты исследования докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры «Технология машиностроения» СФТИ НИЯУ МИФИ и докладывались на научных семинарах ВУЗа в 2014-2018 гг. По теме диссертации 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.

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации

Обоснованность полученных результатов и выводов, сформулированных в работе, обеспечивается применением современных методик исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения и т.д.

Соответствие диссертации автореферату и паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует специальности 05.02.07. Автореферат диссертационной работы полностью отражает содержание, результаты, положения и полученные выводы работы.

Значимость результатов для науки и производства

1. Выполнена экспериментальная проверка правильности назначения рациональных режимов резания при сверлении отверстий; 2. Проведена оптимизация работ на предприятии, занимающемся изготовлением печатных плат; 3. Результаты научно-технических и технологических работ внедрены на двух предприятиях УрФО; 4. Проведено экономическое обоснование от внедрения результатов работы.

## Замечания по диссертационной работе

1. В главе 2 и далее при проведении теоретических и экспериментальных исследований скорость движения осевой подачи  $S$  задается в мм/мин. Возможно удобней для восприятия и проведения анализа работы использовать единицы измерения мм/об, как наиболее референтные в технологии машиностроения. 2. В тексте работы неоднократно указывается, что основные дефекты, связанные с силовым воздействием на заготовку, выражаются в наличии заусенцев фольги в отверстиях, которые при дальнейшей химико-гальванической обработке печатной платы будут выражены в форме «ободков» вокруг металлизированного отверстия, что категорически не допустимо. Однако в тексте встречается максимальное значение заусенца медной фольги 40 мкм (как, например, на странице 132, 137, 158) и 30 мкм (как на странице 33, 158, 160, 161). Какое на самом деле допустимое значение заусенца фольги, 30 или 40 мкм? 3. При описании методики определения фракции стружки на стр. 151 диссертационной работы отмечено, что измерения проводились с помощью прецизионного инструментального микроскопа с 45-кратным увеличением. На странице 153 приводится вид стружки стеклотекстолита только при 10-кратном увеличении. Более наглядно структуру полученной стружки можно было бы наблюдать при максимальном увеличении, рисунок не приведен. 4. Автоматизированные программы для оптимизации работы группы инструментального хозяйства (SverloProg.exe), определения рациональных режимов резания (Regime.exe), автоматической компоновки карт наладки оборудования с учетом расчета режимов резания и нормирования трудозатрат (AutoKarta.exe) представляют практическую ценность. Полезным будет закрепить авторские права на программные продукты за разработчиком.

Выше обозначенные замечания не снижают ни практической, ни научной ценности работы.

В заключении сказано, что диссертация Шульгина Алексея Николаевича «Повышение эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита» выполнена на высоком научном и техническом уровне, является логически построенной и законченной самостоятельной комплексной работой, которая имеет важное значение для производства и выпуска радиоэлектронной аппаратуры. Считаю, что диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а ее автор Шульгин Алексей Николаевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07. Отзыв обсужден на

расширенном заседании кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Протокол №3 от 31.10.19. Отзыв составлен Макаровым Владимиром Федоровичем, доктором технических наук, профессором кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и утвержден проректором по науке и инновациям, профессором Коротаевым В.Н. 20.11.2019 г. Отзыв прилагается.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Вопросы есть к Николаю Ивановичу? Нет вопросов? Тогда продолжаем. Отзывы на автореферат диссертации. Всего пришло 11 отзывов. Все они положительные. Далее предложение, если никто из членов диссертационного совета не возражает, не будем зачитывать отзывы полностью, а только замечания. Вся информация в раздаточном материале у Вас есть. Пожалуйста, Николай Иванович.

Ученый секретарь – д.т.н., доцент Веткасов Н.И.

Всего поступило 11 отзывов. Все отзывы положительные. Первый отзыв из Брянского государственного технического университета. Подписан к.т.н., доцентом Ю.В. Василенко. Замечания: 1. При производстве печатных плат из фольгированного стеклотекстолита определение износа режущего инструмента выполняется по косвенному критерию – наличию заусенцев медной фольги на выходе сверла более 40 мкм, что отражено на стр.11 автореферата. Механизм образования заусенцев в работе не рассмотрен. 2. Не понятно, из каких соображений для моделирования процесса сверления использован программный комплекс «Ansys», тогда как существует программный комплекс «DEFORM-3D», который является наиболее оптимальным для моделирования процесса сверления, поскольку разработан для технологов и не требует глубоких знаний по сопротивлению материалов и пр. В данной программе нет инструмента для создания композитов, однако есть возможность введения в модель заготовки коэффициента Ланкфорда (неоднородности). 3. Рис. 4 автореферата плохо читается.

Второй отзыв из Иркутского национального исследовательского технического университета. Составлен д.т.н., профессор, заведующим кафедрой машиностроительных технологий и материалов С.А. Зайдесом. Замечания: 1. При проведении анализа основных методов получения отверстий на печатных платах в описании оборудования для лазерной обработки не указано, что методика малопродуктивна для диаметра отверстий свыше 1 мм. 2. Поскольку изготовление и производство печатных плат из фольгированного



стеклотекстолита – достаточно трудоемкий и сложный процесс, включающий в себя множество операций и переходов, который, кроме того, имеет низкую рентабельность, было бы полезно выполнить анализ рациональности предприятия содержать собственный участок печатных плат. 3. При выполнении подбора нелинейных аппроксимирующих зависимостей использован специализированный программный продукт «CurveExpert Professional». Проведен излишне подробный анализ подбора аппроксимирующей функции из широкого ряда нелинейных зависимостей, когда интуитивно понятно, что с имеющимся «размахом» полученных экспериментальных точек наиболее рационально использовать полиномиальную аппроксимацию, а вопрос стоит только в определении степени полинома. 4. В тексте автореферата и диссертации встречаются понятия «прижоги», «засаливание», «заполировка» отверстий. Описания данного типа дефектов, причин их появления и способов устранения в работе не приводится.

Третий отзыв из Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Составлен д.т.н., доцент-консультант Б.Я. Мокрицким. Замечания: 1. Излишне подробно приводится описание работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных обработке композиционных материалов. 2. Не раскрыта работа алгоритма по назначению рациональных режимов резания, представленному на рис.7. Нет расшифровки сокращений, приведенных в алгоритме: ПП, ДПП, ОПП и пр. 3. На стр.10 автореферата указано, что наиболее предпочтительными для обработки отверстий являются режимы резания со средними значениями осевой составляющей силы резания до 3,5 Н. Не понятно, из чего это следует.

Четвертый отзыв из Московского политехнического университета. Составлен д.т.н., профессором кафедры «Технология и оборудование машиностроения» Ю.В. Максимовым. Замечания: 1. На странице 3 автореферата указан стандарт ОСТ 107.460092.004.02-86. Далее автор указал, что более современной нормативной документации в настоящий момент нет. Возможно, следовало провести анализ иностранных стандартов, типа ASME, DIN или IPC и, при наличии, привести данные касательно режимов обработки печатных плат. 2. В автореферате употребляется выражение «Реальное производство». Для исключения разночтений, автору следовало бы пояснить значение этого выражения. 3. В разделе «Методология» указано, что практические исследования выполнены на исправном, действующем промышленном оборудовании. Возможно, автору следовало указать год выпуска оборудования или дату проведения его проверки на технологическую точность. 4. На странице 9 автореферата указано: «а среднее абсолютное отклонение составило не более 12 %».

Считаю, что автору требуется пояснить примененные методы планирования и анализа результатов экспериментов. 5. В автореферате имеются опечатки, например, стр.9, четвертый абзац сверху «...с увеличением сетки конечных в 4 раза...».

Пятый отзыв из Юго-Западного государственного университета. Составлен к.т.н., доцентом кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» В.В. Малыхиным. Замечания: 1. На стр. 8 автореферата указано, что для определения сопрягаемости модели сверления с имеющимися решениями схожих по структуре и строению со стеклонаполненным слоистым текстолитом проанализированы зависимости М. Фернандес, К. Кука, И. Рахматуллы, М.К. Шунмугама, К.К. Цао, Х. Хоченга и Р. Ананда, К. Патры. Установлено, что ни одна из ранее разработанных моделей сверления композиционного материала не годится для обработки стеклотекстолита. Самих зависимостей и моделей не приведено. 2. В автореферате приводится понятие «Шероховатость поверхности отверстий», как одного из основных критериев качественной обработки отверстий. Оптимальные и «пороговые» значения шероховатости в отверстиях не приведены.

Шестой отзыв из МГТУ им. Н.Э. Баумана. Составлен д.т.н., профессором кафедры «Технология машиностроения» А.И. Кондаковым. Замечания: 1. На стр. 10 автореферата написано «Предварительно разработан алгоритм назначения бездефектных режимов резания...». Где он представлен и в чем он заключается? Далее в следующем абзаце не понятно, каким образом от рис. 4 перешли к рис. 5, на котором построили точки и кривые второго порядка? 2. На рис. 7 (стр. 13 автореферата) блок 2 имеет один вход и два выхода, что противоречит правилам построения блок-схем и алгоритмов, приведенных в ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов, программ, данных и систем».

Седьмой отзыв из Омского государственного технического. Составлен д.т.н., профессором кафедры «Технология машиностроения» А.П. Моргуновым. Замечания: 1. Среди упомянутых работ в исследуемой области не нашли отражения работы Штучного Бориса Петровича, который еще в 60-е годы прошлого столетия проводил исследования по обработке стеклотекстолита и опубликовал справочник, где содержатся режимы обработки при сверлении отверстий. 2. Не отмечена особенность стеклотекстолита при сверлении отверстий, когда диаметр последних уменьшается по окончании сверления.

Восьмой отзыв из Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Составлен с.н.с. О.Г. Латыповым и д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Машины и технологии обработки давлением и машиностроение» С.И. Платовым. Замечания: 1. Из автореферата не

понятно, почему не проводилось моделирование операций сверления с использованием сверл диаметром меньше 1 мм. 2. В списке работ автора приведена только половина из 22 работ автора диссертации.

Девятый отзыв из Саратовского государственного технического университета им. Ю.А. Гагарина. Составлен д.т.н., профессором кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» А.А. Игнатьевым. Замечания: 1. В общей характеристике работы (с. 3) отсутствует степень проработки темы с указанием исследователей и недостатков наиболее близких работ, хотя в главе 1 сведения имеются. 2. Не уточнено, как используется модель, приведенная на рис. 2. 3. Не указаны отличительные особенности графиков на рис. 4. 4. Не приведены какие-либо данные, подтверждающие повышение стойкости сверл в 6...8 раз (с.16).

Десятый отзыв из Белорусского национального технического университета. Составлен к.т.н., доцентом кафедры «Технология машиностроения» П.Г. Сухоцким и д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Технология машиностроения» В.К. Шелегом. Замечания: 1. Название диссертации следовало бы начинать со слова «Технология». 2. Целесообразно было бы более подробно исследовать зависимости режимов резания от материала режущего инструмента.

И последний отзыв из Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Составлен к.т.н., доцентом кафедры «Технология машиностроения» В.Н. Некрасовым и к.т.н., заведующим кафедрой «Технология машиностроения» А.В. Балашовым. Замечания: 1. Из автореферата не совсем ясно, как решение задачи 1 нашло отражение в общих выводах.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Так, Алексей Николаевич, пожалуйста, ответьте на замечания ведущей организации и отзывы на авторефераты.

Соискатель, Шульгин А.Н.

По замечаниям ведущей организации. По первому замечанию. При проведении наладочных работ на сверлильном многошпиндельном станке СМ-600 в стойку по каждому диаметру отверстия вводятся данные по режимам обработки. Это скорость движения осевой подачи  $S$  [мм/мин] и частота вращения шпинделя  $n$  [об/мин]. Поскольку на выходе, для оптимизации работ на предприятии, были разработаны специализированные программы для упрощения программирования и «минимизации человеческого фактора», то скорость движения осевой подачи задана именно в мм/мин, в тех единицах измерения, которые «понимает» станок. Пересчет в мм/об может быть легко осуществлен по известной формуле. В таблице 28 диссертации приведены

значения подачи  $S$  как в мм/мин, так и в мм/об. По второму замечанию. В типовом технологическом процессе, разработанном на основе нормативной документации, указано, что «пороговая» величина заусенца медной фольги составляет не более 40 мкм. Эта величина указана, как предельная для «Контрольных» операций ОТК. Для операции «Сверлильная ЧПУ», для рабочего, указана величина 30 мкм, что гарантированно исключает наличие последующих дефектов при дальнейшей химико-гальванической обработке, т.е. при появлении на платах заусенцев медной фольги близких к значению 30 мкм, рабочим производится замена изношенных сверл на новые или заточенные. Именно значение заусенцев фольги 30 мкм считается «пороговым» при производстве, хотя фактически по нормативной базе разрешены значения до 40 мкм. С третьим замечанием я согласен. По четвертому замечанию. Программы готовятся к регистрации через отдел «Техническая информация, стандартизация и патентная работа» АО «Радий».

По замечаниям на авторефераты, если члены диссертационной комиссии не возражают, буду отвечать в том порядке, в каком они приходили мне по электронной почте. Для экономии рабочего времени, если не возражаете, зачитаю только то, что требует пояснения. С чем согласен и тем, что содержится в тексте диссертации, я упущу.

#### Брянский государственный технический университет

По второму замечанию: подробный анализ выбора варианта CAE-системы для моделирования процесса сверления стеклотекстолита приведен в главе 2, п.2.2 диссертации. 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 свойств. Применительно к обработке фольгированного стеклотекстолита пакет DEFORM годится лишь для усредненных вычислений.

#### Иркутский национальный исследовательский технический университет

Первое замечание: методики получения отверстий в фольгированном стеклотекстолите, включая лазерную обработку, обработку гибридным лазером, штамповку, сверление отверстий с указанием достоинств и недостатков, а также особенностей обработки приведены в главе 2 п. 1.2 диссертации. В автореферате не приведены ввиду ограничения по объему.

Здесь же, второе замечание: замечание воспринято как пожелание в дальнейшей работе. Вопрос рентабельности участка печатных плат неоднократно поднимался руководством «АО Радий». Техническим отделом проведен анализ с необходимыми техническими и экономическими выкладками.

Отказ от собственного изготовления печатных плат приведет к увеличению стоимости изготовления, дополнительным затратам на подготовку производства при каждом запуске в производство, дополнительным расходам на доставку продукции, а самое главное – существенно сдвинется срок изготовления: минимум на 20 рабочих дней, что может пагубно сказаться на контрактных обязательствах.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

Третье замечание: данный факт установлен опытно-практическим путем. Общие закономерности влияния режимов резания на процесс сверления отверстий рассмотрены в главе 4 диссертации п. 4. На странице 165 приведен общий сводный график.

Московский политехнический университет

Первое замечание: при проведении анализа иностранной нормативной документации рекомендаций по выбору режимов для сверления фольгированного стеклотекстолита не обнаружено. Поэтому они не приведены в основной части диссертации и не упоминаются в автореферате.

Здесь же, второе замечание: имелось ввиду промышленное предприятие с наличием участка или цеха по изготовлению печатных плат.

Омский государственный технический университет

По второму замечанию: согласно проведенных экспериментов выявлено, что имеет место не значительное упругое восстановление материала после выполнения обработки на всех режимах резания. С увеличением скорости 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  $\pm 0,07$  мм существенно не влияет на назначение диаметров обрабатываемых сверл. Таким образом, влияние режимов резания на упругое восстановление материала не существенно.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

По первому замечанию: номенклатура сверл  $\varnothing$  менее 1 мм используется на АО «Радий» крайне редко ввиду ограничения в технологическом процессе по нанесению подслоя медного покрытия. Сверла  $\varnothing$  менее 0,8 мм не используются совсем. В рамках поставленной задачи обработка фольгированного стеклотекстолита сверлами  $\varnothing$  менее 1 мм не ставилась.

По второму замечанию: на рис. 2 в качестве примера приведен график осевой составляющей силы резания. Моделирование операции сверления проводили с использованием сверл диаметрами: 1,0 мм; 1,5 мм; 2,0 мм по предварительно разработанным 3D – моделям. Режимы резания: частота вращения шпинделя – 36000 об/мин...48000 об/мин; скорость осевой подачи: 1100...2700 мм/мин. Далее выполняли нахождение средних значений осевых составляющих силы резания  $P_{0,ср}$  для режима в целом. Функциональные зависимости средних значений  $P_{0,ср}(S)$  приведены на рис. 4. Анализ полученных зависимостей позволил определить области рациональных режимов резания:  $S = 2400...2600$  (для  $n = 36000$  об/мин.);  $2100...2300$  (для  $n = 43000$  об/мин);  $1600...1800$  мм/мин (для  $n = 48000$  об/мин).

Наверное, по замечаниям у меня все.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Слово предоставляется официальному оппоненту Реченко Денису Сергеевичу, слушаем Вас.

Д.т.н., доцент Реченко Д.С.

Уважаемые члены диссертационного совета, разрешите, я не буду зачитывать полностью, озвучу основные моменты, впечатление о работе и замечания, которые отметил. Хочется сказать, что данная работа является достаточно передовой, потому что автором сделана попытка перейти на «Цифровые двойники», что сегодня является достаточно серьезной мировой тенденцией. Сделана попытка смоделировать процесс сверления именно с этих подходов и попытаться спрогнозировать те результаты, которые сложно получить при обработке достаточно сложных КМ. При этом, на мой взгляд, автор несколько ограничил свою работу, применив ее только к приборостроению. Мне кажется, что работа имеет серьезные перспективы и в авиастроении и в автомобилестроении, потому как обработка КМ и все, что связано с обработкой отверстий без дефектов, которые он представил здесь, также является там актуальным. Но это пожелание на будущее. По работе: работа имеет очень хороший прикладной характер, есть несколько внедрений. На мой взгляд, это очень сильно повышает ценность данной работы, при этом хоть и не затрагивалась тема по конструкции сверла, тем не менее в диссертационной работе у него есть вопросы, связанные с остротой лезвия инструмента, что может быть здесь, на презентации не было достаточно отражено, но в диссертации очень хорошо представлено и эти моменты он тоже учел при моделировании, при обработке КМ. Сегодня на производстве, казалось

бы, можно иметь очень хорошее оборудование, хороший инструмент и, как было здесь отмечено, режимы обработки назначаются технологом. Но не всегда они являются эффективными и не всегда позволяют повысить производительность, поэтому тот подход, который здесь представлен и те гипотезы, которыми он попытался описать процесс обработки этих сложных материалов, на мой взгляд, достаточно удачный. При этом, конечно же, красит работу то, что применены современные методы моделирования.

Тем не менее по работе возникло несколько замечаний, их пять: 1. На странице 20, в таблице 2, применяются понятия «Некачественное сверление...», «Отсутствие шероховатости...», «Неправильная заточка...», «Правильные режимы...», также в тексте встречается термин «Наиболее оптимальные...» и «Оптимальные режимы резания», при этом не представлена функция оптимизации, а представлены рациональные решения. 2. В диссертационной работе излишне подробно описаны общеизвестные понятия и положения, используемые для решения той или иной задачи (метод конечных элементов, метод наименьших квадратов). Изложение подобного материала в форме конспекта усложняет восприятие результатов, полученных диссертантом. 3. В диссертационной работе не приведены рекомендации к технологическому оборудованию, позволяющему производить сверление с требуемыми качественными параметрами, что значительно повысило бы практическую значимость работы. 4. Автор приводит в качестве основного материала сверл для обработки композиционного стеклотекстолита – твердый сплав марок ВК8 или ВК6М, однако на мой взгляд выбор именно этих марок недостаточно обоснован. 5. Во второй главе при моделировании процесса сверления приведены общие принципы моделирования, но не представлено граничных условий, однако их влияние может значительно изменить конечный результат.

Заключение: диссертация Шульгина Алексея Николаевича является самостоятельной, завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне, в которой содержится решение научной задачи, имеющее существенное значение для машиностроения, приборостроения и радиоаппаратостроения. Считаю, что по актуальности, научной новизне, практическому значению и объёму полученных результатов диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор Шульгин Алексей Николаевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. Отзыв прилагается.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Так, Алексей Николаевич, ответьте на замечания.

Соискатель, Шульгин А.Н.

По первому замечанию: с первой частью замечания касательно использования терминологии я согласен. По второй части, касательно использования понятия «оптимальные режимы резания»: данное замечание звучало на предварительной защите. Проведена замена по тексту с «оптимальные» на «рациональные» в автореферате и тексте диссертации. Если где-то осталось, то для связки слов или исключения повторений слов в предложении. Так, все верно: оптимальные = рациональные. Со вторым и третьим замечанием я согласен. По четвертому замечанию: основное количество серийно выпускаемых зарубежных и отечественных твердосплавных сверл в т.ч. фирм «Union tool», «Ham», приобретаемых предприятием для обработки фольгированного стеклотекстолита, выполнено из сплава карбида вольфрама и кобальта марок ВК6 и ВК8. Более подробного анализа не проводилось. По пятому замечанию: сверло предварительно задано, как недеформируемый материал, у которого забрано 4 степени свободы, оставлено только перемещение по оси z и возможность вращения. Заделка заготовки выполнена по периметру, по каждому слою, она обездвижена. Движение инструмента задано тремя массивами: перемещение – 1,8 мм для гарантированного выхода сверла из зоны резания; время перемещения 0,09...0,04 с (в зависимости от режима резания 1100 мм/мин...2700 мм/мин соответственно) – скорость осевой подачи; частота вращения инструмента 3600\*rads...4800\*rads (в зависимости от режима резания 36000 об/мин...48000 об/мин) – частота вращения шпинделя. Начальное расстояние от инструмента до заготовки 0,01 мм. Вся эта информация в диссертации прописана.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Слово предоставляется официальному оппоненту, к.т.н., доценту Рычкову Даниилу Александровичу.

К.т.н., доцент Рычков Д.А.

Уважаемые члены диссертационного совета. С Вашего позволения я тоже не буду зачитывать все, остановлюсь только на основных моментах и замечаниях. Работа, на мой взгляд, несомненно, актуальна, поскольку обработка стеклотекстолита значительно отличается от обработки традиционных материалов, поскольку его основной наполнитель (упрочняющий компонент – стеклоткань) оказывает большое влияние на износ инструмента, на его интенсивность и качество поверхности при этом часто бывает не удовлетворительным. Это зависит от многих параметров, в частности, от режимов реза-



ния, геометрии инструмента и т.д. На сегодняшний день существует достаточно много рекомендаций по обработке этого материала, но они часто отличаются друг от друга довольно сильно, а иногда и противоречат друг другу. Поэтому работа является актуальной. Работа обладает, несомненно, и научной новизной. С этой точки зрения наиболее интересной является компьютерная имитационная модель, поскольку она позволяет на этапе теоретической подготовки производства назначить оптимальные режимы без проведения каких-то дополнительных исследований. По практической части работы, я думаю, что это технологические рекомендации по сверлению, которые внедрены непосредственно уже в действующее производство. Диссертация содержит все необходимые разделы. В первой главе, в частности, представлен достаточно полный обзор научной литературы. В результате чего соискатель сделал выводы, поставил цели, задачи, которые в последствии и выполнил в своей работе. Ну и по всем остальным главам: диссертация содержит все основные разделы для полного раскрытия темы.

В тоже время возникли замечания, которые я считаю: 1. При создании конечно-элементной модели заготовки в подразделе 2.2.1 диссертации автор стремится учесть неоднородность КМ, 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 КМ. 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 поли-

мерного 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.

Отмеченные замечания и недостатки не снижают общую значимость работы и ее актуальность для развития обрабатывающей промышленности. Считаю, что диссертация Шульгина Алексея Николаевича отвечает п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», является научно-квалифицированной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические разработки и технологические решения, имеющие существенное значение для развития машиностроительной отрасли России. Ее автор – Шульгин Алексей Николаевич - заслуживает присуждения научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. Спасибо. Отзыв прилагается.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Алексей Николаевич, прошу ответить на замечания оппонента. С чем согласны – опускаете, что хотите пояснить – расскажите. Пожалуйста.

Соискатель, Шульгин А.Н.

По первому замечанию: материал набран послойно с заданием плотности ламината, модуля упругости, коэффициента Пуассона и пр. отдельно по каждому слою. Далее, действительно, набранные слои склеены (команда vglue), поскольку в программе «Ansys» 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. Со вторым, третьим и четвертым замечаниями я согласен. По пятому замечанию: понятие деструкции полимерного связующего увязано с образованием дефектов в виде выдавливания отдельных «недорезанных» фрагментов стеклоткани. В данном контексте его следует понимать как отсутствие адгезии между слоями стеклоткани. С шестым замечанием я согласен. По седьмому: при определении рациональных режимов резания применены те, которые дают максимальную производительность сверления и период стойкости режущего инструмента при минимальной действующей осевой состав-

ляющей силе резания. Экспериментально установлено, что обработка отверстий на данных режимах резания существенно снижает дефекты при сверлении с обеспечением качественных и количественных показателей. У меня все, спасибо большое.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Переходим к дискуссии, пожалуйста. Кто у нас? Пожалуйста, Бобровский Н.М.

Д.т.н., профессор Бобровский Н.М.

В своей работе Алексей Николаевич затронул главную тему, очень актуальную. Это обработка печатных плат из фольгированного стеклотекстолита. Хотелось бы обратить внимание на то, что данная продукция является критической для отечественного машиностроения и для оборонной промышленности и для импортозамещения эта тема очень актуальна. Я считаю, что в своем докладе, к сожалению, было где-то 1/3 от того массива данных, которые есть в диссертации, в том числе, по режущему инструменту, оснастке, заусенцу. Кстати, было бы очень интересно посмотреть на приспособление, как я понял, оно было создано эмпирическим путем на предприятии. Ну а в целом, я считаю, объем материала переработанный соискателем соответствует специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки. Технология обработки есть – это сверление; оборудование есть – это станки для сверления; исследование режимов – есть! А сам соискатель заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по данной специальности. Спасибо.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Кто следующий, пожалуйста? Дмитрий Владимирович Лобанов.

Д.т.н., доцент Лобанов Д.В.

Уважаемые коллеги! Хочется отметить, что данная диссертация на самом деле достаточно актуальна и не просто актуальна, а приоритетна на сегодняшнюю тематику. Производство изделий из композитов – одно из приоритетных направлений нашей промышленности на сегодняшний день. И сама диссертация обладает всеми основными структурными составляющими, что характеризует ее как современную научную работу, направленную на реализацию новых направлений промышленности, новых направлений в науке. В связи с этим, хочется отметить, что несмотря на то, что в ней присутствуют некие недостатки, которые отмечались во время дискуссии и ответов оппонентам; несмотря на это, эти недостатки могут быть интерпретированы как возможности для дальнейшей реализации этой работы. Например, то, что было отмечено при моделировании: те недостатки и ограничения, которые

имеются в модели, развитие этих ограничений позволит раскрыть в дальнейшем работу, сделать ее шире, сделать ее более интересной. И тем самым, в действительности, эта работа сейчас цельная, потому что в ней присутствует минимально необходимый на сегодняшний день теоретический материал, достаточный материал практический. Более того, что ценно в этой работе – она направлена на практическую реализацию и имеет внедрение на производстве. Поэтому в целом, как диссертация, так и соискатель, удовлетворяют требованиям ВАК к научно-квалификационной работе и я поддерживаю эту работу. У меня все, спасибо!

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Кто следующий, пожалуйста? Носов Николай Васильевич.

Д.т.н., профессор Носов Н.В.

Мне понравилась практическая часть работы. Чувствуется, что диссертант во многом работает над тем, чтобы внедрять новые технологии и процессы на производстве. Большая экспериментальная часть: проделана работа, связанная с экспериментами по режимам обработки, борьбой с заусенцами и со всеми недостатками, которые были на производстве до него. Работа хорошая. Есть замечания, без замечаний нельзя выполнить работу. Но я бы хотел, что бы в работе были поняты вопросы точности изготовления, точности размеров. Поэтому если это все объединить в параметры качества, у него уже есть наработки в этом направлении. Я буду голосовать за эту работу. Все, спасибо!

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Есть еще желающие? Нет? Тогда, давайте, дадим слово Алексею Николаевичу. Вам ответное слово членам диссертационного совета.

Соискатель, Шульгин А.Н.

Уважаемые члены диссертационного совета, большое спасибо за проделанную большую работу. Огромное спасибо научному руководителю и оппонентам. Спасибо!

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Так, переходим к голосованию. Состав счетной комиссии: профессора Клячкин В.Н., Киселев Е.С. и Захаров О.В. Возражения есть? Прошу голосовать. Единогласно. Приступаем к голосованию

*Счетная комиссия организует тайное голосование.*

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Продолжаем нашу работу. Слово предоставляется председателю счетной комиссии Захарову Олегу Владимировичу.

Д.т.н., профессор Захаров О.В.

Протокол № 1 заседания счетной комиссии, избранной диссертационным советом Д 999.003.02 от 19 декабря 2019 г. Состав комиссии для подсчета голосов при тайном голосовании по диссертации Шульгина А.Н. на соискание ученой степени кандидата технических наук: Захаров О.В., Клячкин В.Н., Киселев Е.С.

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 20 человек приказом Министерства образования и науки РФ № 123/нк от 17.02.15 на период действия номенклатуры специальностей научных работников. В состав диссертационного совета дополнительно введено 0 человек, присутствовало на заседании 16 членов совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации 7 человек, роздано бюллетеней 16, не роздано 4. В урне оказалось 16. Результаты тайного голосования: «За» – 16; «Против» – нет; недействительных – нет.

Председатель заседания – д.т.н., профессор Табаков В.П.

Прошу утвердить протокол счетной комиссии. Кто за? 16. Против, воздержавшихся – нет. Все, спасибо большое. Таким образом, результат тайного голосования: «За» – 16; «Против» – нет; недействительных – нет. Объединенный диссертационный совет Д 999.003.02 при Ульяновском государственном техническом университете и Тольяттинском государственном университете признает, что диссертация Шульгина А.Н. содержит решение актуальной задачи повышения эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» и присуждает Шульгину Алексею Николаевичу ученую степень кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

У членов совета есть проект заключения. Есть предложение принять его за основу. Прошу проголосовать. «За» единогласно. Давайте обсудим проект заключения.

#### *Обсуждение заключения*

Если совет не возражает, тогда есть предложение принять проект Заключения в целом с учетом высказанных замечаний. Если нет возражений, прошу голосовать. «За» – единогласно. Тогда мы доводим до Вашего сведения, Алексей Николаевич, заключение в таком виде.

*Заключение диссертационного совета объявляется соискателю*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА  
Д999.003.02, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «УЛЬЯНОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
И ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 19.12.2019 г. № 53

О присуждении Шульгину Алексею Николаевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Повышение эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита», по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, принята к защите 17.10.2019 г., протокол № 51, объединенным диссертационным советом Д999.003.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения (ФГБОУ) высшего образования (ВО) «Ульяновский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Министерства науки и высшего образования РФ, по адресу 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, действующим на основе приказа №123/нк от 17.02.2015 г.

Соискатель Шульгин Алексей Николаевич, 1983 года рождения. Окончил ЮУрГУ (приборостроительный факультет) в 2005 г. По окончании присвоена квалификация инженер по специальности «Радиотехника».

В 2013 году окончил НИЯУ МИФИ (машиностроительный факультет). По окончании присвоена квалификация инженер по специальности «Технология машиностроения». В 2018 году соискатель окончил аспирантуру на базе Снежинского физико-технического института – филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (СФТИ НИЯУ МИФИ). Работает старшим инженером – руководителем технологической группы АО «Радий» (Челябинская область, г.Касли), старшим преподавателем СФТИ НИЯУ МИФИ по совместительству.

Диссертация выполнена в СФТИ НИЯУ МИФИ на кафедре «Технология машиностроения».

Научный руководитель – д-р техн. наук, доцент Дьяконов Александр Анатольевич, проректор по научной работе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

Реченко Денис Сергеевич – д-р техн. наук, доцент кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»;

Рычков Даниил Александрович – к-т техн. наук, доцент кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «Братский государственный университет» дали свои положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, в своем положительном заключении, составленном Макаровым Владимиром Федоровичем, доктором технических наук, профессором кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и утвержденном проректором по науке и инновациям ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский поли-

технический университет», д-ром техн. наук, профессором Коротаевым Владимиром Николаевичем, указала, что диссертация Шульгина Алексея Николаевича «Повышение эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита» выполнена на высоком научном и техническом уровне, является логически построенной и законченной самостоятельной комплексной работой, которая имеет важное значение для производства и выпуска печатных плат. Отмечено, что диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а ее автор Шульгин Алексей Николаевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Соискатель имеет 22 опубликованные работы по теме диссертации, в том числе 6 статей в изданиях из перечня ВАК, 1 статью в изданиях из базы цитирования Scopus. Работы посвящены теоретическим и экспериментальным исследованиям процесса сверления фольгированного стеклотекстолита, повышению эффективности сверления отверстий на печатных платах. Авторский вклад составляет 2,616 п.л., в общем объеме научных изданий 3,747 п.л.

Научные работы соискателя отражают результаты проведенного исследования и раскрывают основные положения, выносимые на защиту. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. Научные труды представлены статьями в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, из базы цитирования Scopus, в материалах научных конференций. Наиболее значимые научные работы соискателя из числа опубликованных в рецензируемых научных изданиях:

1. Дьяконов, А.А., Городкова, А.Е., Шульгин, А.Н. Автоматизированная программа для оптимизации работы группы инструментального хозяйства / А.А. Дьяконов, А.Е. Городкова, А.Н. Шульгин // Автоматизация. Современные технологии. – Том 72.8. – 2018. – С. 346 – 349. – 0,375 п.л. / авт. 0,28 п.л.



2. Дьяконов, А.А., Городкова, А.Е., Шульгин, А.Н. Зависимость качественных и количественных показателей обработки отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита от схемы заточки режущего инструмента. / А.А. Дьяконов, А.Е. Городкова, А.Н. Шульгин // Автоматизация. Современные технологии. – Том 72.9. – 2018. – С. 409 – 413. – 0,469 п.л. / авт. 0,28 п.л.

3. Дьяконов, А.А., Орлов, А.А., Шульгин, А.Н. Разработка имитационной модели сверления стеклотекстолита. / А.А. Дьяконов, А.А. Орлов, А.Н. Шульгин // Естественные и технические науки. – Том 6. – 2019. – С. 166 – 167. – 0,469 п.л. / авт. 0,28 п.л.

4. Дьяконов, А.А., Орлов, А.А., Шульгин, А.Н. Теория механической обработки на станках с ЧПУ. / А.А. Дьяконов, А.А. Орлов, А.Н. Шульгин // Естественные и технические науки. – Том 6. – 2017. – С. 91 – 93. – 0,375 п.л. / авт. 0,28 п.л.

5. Шульгин, А.Н., Дьяконов, А.А., Тверской, М.М., Городкова, А.Е. Определение силы резания при сверлении фольгированного стеклотекстолита. / А.Н. Шульгин, А.А. Дьяконов, М.М. Тверской, А.Е. Городкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – №2. – С. 51–60. – 0,84 п.л. / авт. 0,656 п.л.

6. Шульгин, А.Н., Орлов, А.А. Зависимость качественных и количественных показателей обработки отверстий на печатных платах от выбора фольгированного стеклотекстолита и режимов резания. / А.Н. Шульгин, А.А. Орлов // Вестник ЮУрГУ. Серия «машиностроение». – 2015. – №2. – С. 32–39. – 0,75 п.л. / авт. 0,56 п.л.

7. Shulgin A.N., Dyakonov A.A., Gorodkova A.E. [Influence of the Glassfiber Filaments Distribution on Quality and Performance of Hole Processing on Printboards]. Materials Science Forum, 2019, no. 946, pp. 223-227. 0,469 п.л. / авт. 0,28 п.л.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв ведущей организации – **ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»** составлен Макаровым Владимиром Федоровичем, доктором технических наук, профессором кафедры «Инновационные технологии машиностроения» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», утвержден проректором по науке и инновациям ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», д-ром техн. наук, профессором Коротаяевым Владимиром Николаевичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. В главе 2 и далее при проведении теоретических и экспериментальных исследований скорость движения осевой подачи  $S$  задается в мм/мин. Возможно удобней для восприятия и проведения анализа работы использовать единицы измерения мм/об, как наиболее референтные в технологии машиностроения. 2. В тексте работы неоднократно указывается, что основные дефекты, связанные с силовым воздействием на заготовку, выражаются в наличии заусенцев фольги в отверстиях, которые при дальнейшей химико-гальванической обработке печатной платы будут выражены в форме «ободков» вокруг металлизированного отверстия, что категорически не допустимо. Однако в тексте встречается максимальное значение заусенца медной фольги 40 мкм (как, например, на стр. 132, 137, 158) и 30 мкм (как на стр. 33, 158, 160, 161). Какое на самом деле допустимое значение заусенца фольги, 30 или 40 мкм? 3. При описании методики определения фракции стружки на стр. 151 диссертационной работы отмечено, что измерения проводились с помощью прецизионного инструментального микроскопа с 45-кратным увеличением. На странице 153 приводится вид стружки стеклотекстолита только при 10-кратном увеличении. Более наглядно структуру полученной стружки можно было бы наблюдать при максимальном увеличении, рисунок не приведен. 4. Автоматизированные программы для оптимизации работы группы инструментального хозяйства (SverloProg.exe), определения рациональных режимов резания (Regime.exe), автоматической компоновки карт наладки оборудования с уче-

том расчета режимов резания и нормирования трудозатрат (AutoKarta.exe) представляют практическую ценность. Полезным будет закрепить авторские права на программные продукты за разработчиком.

2. Отзыв официального оппонента – **Реченко Дениса Саргеевича**, д.т.н., доцента кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет». Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. На странице 20 в табл. 2 применяются понятия «Некачественное сверление...», «Отсутствие шероховатости...», «Неправильная заточка...», «Правильные режимы...», также в тексте встречается термин «Наиболее оптимальные...» и «Оптимальные режимы резания», при этом не представлены функции оптимизации, а представлены рациональные решения. 2. В диссертационной работе излишне подробно описаны общеизвестные понятия и положения, используемые для решения той или иной задачи (метод конечных элементов, метод наименьших квадратов). Изложение подобного материала в форме конспекта усложняет восприятие результатов, полученных диссертантом. 3. В диссертационной работе не приведены рекомендации к технологическому оборудованию, позволяющему производить сверление с требуемыми качественными параметрами, что значительно повысило бы практическую значимость работы. 4. Автор приводит в качестве основного материала сверл для обработки композиционного стеклотекстолита – твердый сплав марок ВК8 или ВК6М, однако на мой взгляд выбор именно этих марок недостаточно обоснован. 5. Во второй главе при моделировании процесса сверления приведены общие принципы моделирования, но не представлены граничные условия, однако их влияние может значительно изменить конечный результат.

3. Отзыв официального оппонента – **Рычкова Даниила Александровича**, к.т.н., доцента кафедры «Машиностроение и транспорт» ФГБОУ ВО «Братский государственный университет». Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. При создании конечно-элементной модели заготовки

в подразделе 2.2.1 диссертации автор стремится учесть неоднородность композиционного материала, однако в последствии 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 (табл. 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 оптими-

зация режимов обработки по двум параметрам: качеству обработанной поверхности и производительности сверления.

#### 4. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»**

Составлен к.т.н., доцентом Ю.В. Василенко (научная специальность 05.02.08). Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. При производстве печатных плат из фольгированного стеклотекстолита определение износа режущего инструмента выполняется по косвенному критерию – наличию заусенцев медной фольги на выходе сверла более 40 мкм, что отражено на стр.11 автореферата. Механизм образования заусенцев в работе не рассмотрен. 2. Не понятно, из каких соображений для моделирования процесса сверления использован программный комплекс «Ansys», тогда как существует программный комплекс «DEFORM-3D», который является наиболее оптимальным для моделирования процесса сверления, поскольку разработан для технологов и не требует глубоких знаний по сопротивлению материалов и пр. В данной программе нет инструмента для создания композитов, однако есть возможность введения в модель заготовки коэффициента Ланкфорда (неоднородности). 3. Рис. 4 автореферата плохо читается.

#### 5. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»** . Составлен д.т.н., профессором С.А. Зайдесом (научные специальности 05.02.08; 05.03.01). Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. При проведении анализа основных методов получения отверстий на печатных платах в описании оборудования для лазерной обработки не указано, что методика малопродуктивна для диаметра отверстий свыше 1 мм. 2. Поскольку изготовление и производство печатных плат из фольгированного стеклотекстолита – достаточно трудоемкий и сложный процесс, включающий в себя множество операций и переходов, который, кроме того, имеет низкую рентабельность, было бы полезно выполнить анализ рациональности предприятию содержать собственный участок печатных плат. 3. При выполнении подбора нелинейных аппроксимирующих

зависимостей использован специализированный программный продукт «CurveExpert Professional». Проведен излишне подробный анализ подбора аппроксимирующей функции из широкого ряда нелинейных зависимостей, когда интуитивно понятно, что с имеющимся «размахом» полученных экспериментальных точек наиболее рационально использовать полиномиальную аппроксимацию, а вопрос стоит только в определении степени полинома. 4. В тексте автореферата и диссертации встречаются понятия «прижоги», «засаливание», «заполировка» отверстий. Описания данного типа дефектов, причин их появления и способов устранения в работе не приводится.

6. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»**. Составлен д.т.н., доцентом Б.Я. Мокрицким (научная специальность 05.02.07). Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Излишне подробно приводится описание работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных обработке композиционных материалов. 2. Не раскрыта работа алгоритма по назначению рациональных режимов резания, представленному на рис.7. Нет расшифровки сокращений, приведенных в алгоритме: ПП, ДПП, ОПП и пр. 3. На стр.10 автореферата указано, что наиболее предпочтительными для обработки отверстий являются режимы резания со средними значениями осевой составляющей силы резания до 3,5 Н. Не понятно, из чего это следует.

7. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»**. Составлен д.т.н., профессором Ю.В. Максимовым (научная специальность 05.02.08). Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. На странице 3 автореферата указан стандарт ОСТ 107.460092.004.02-86. Далее автор указал, что более современной нормативной документации в настоящий момент нет. Возможно, следовало провести анализ иностранных стандартов, типа ASME, DIN или IPC и, при наличии, привести данные касательно режимов обработки печатных плат. 2. В автореферате употребляется выражение «Реальное производство». Для исключения разночтений, автору следовало бы пояснить значение этого выражения. 3. В разделе «Методоло-

гия» указано, что практические исследования выполнены на исправном, действующем промышленном оборудовании. Возможно, автору следовало указать год выпуска оборудования или дату проведения его проверки на технологическую точность. 4. На странице 9 автореферата указано: «а среднее абсолютное отклонение составило не более 12 %». Считаю, что автору требуется пояснить примененные методы планирования и анализа результатов экспериментов. 5. В автореферате имеются опечатки, например, стр.9, четвертый абзац сверху «...с увеличением сетки конечных в 4 раза...»

8. **Отзыв из ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».** Составлен к.т.н., доцентом В.В. Малыхиным (научная специальность 05.03.01). Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. На стр. 8 автореферата указано, что для определения сопрягаемости модели сверления с имеющимися решениями схожих по структуре и строению со стеклонаполненным слоистым текстолитом проанализированы зависимости М. Фернандес, К. Кука, И. Рахматуллы, М.К. Шунмугама, К.К. Цао, Х. Хоченга и Р. Ананда, К. Патры. Установлено, что ни одна из ранее разработанных моделей сверления композиционного материала не годится для обработки стеклотекстолита. Самих зависимостей и моделей не приведено. 2. В автореферате приводится понятие «Шероховатость поверхности отверстий», как одного из основных критериев качественной обработки отверстий. Оптимальные и «пороговые» значения шероховатости в отверстиях не приведены.

9. **Отзыв из Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.** Составлен д.т.н., профессором А.И. Кондаковым (научная специальность 05.02.08). Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. На стр. 10 автореферата написано «Предварительно разработан алгоритм назначения бездефектных режимов резания...». Где он представлен и в чем он заключается? Далее в следующем абзаце не понятно, каким образом от рис. 4 перешли к рис. 5, на котором построили точки и кривые второго порядка? 2. На рис. 7 (стр. 13 автореферата) блок 2 имеет один вход и два выхода, что противоречит правилам построения блок-схем и алго-

ритмов, приведенных в ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов, программ, данных и систем».

10. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»**. Составлен д.т.н., профессором кафедры «Технология машиностроения». А.П. Моргуновым Научная специальность 01.02.06. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Среди упомянутых работ в исследуемой области не нашли отражения работы Штучного Бориса Петровича, который еще в 60-е годы прошлого столетия проводил исследования по обработке стеклотекстолита и опубликовал справочник, где содержатся режимы обработки при сверлении отверстий. 2. Не отмечена особенность стеклотекстолита при сверлении отверстий, когда диаметр последних уменьшается по окончании сверления.

11. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»**. Составлен с.н.с. О.Г. Латыповым. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Из автореферата не понятно, почему не проводилось моделирование операций сверления с использованием сверл диаметром меньше 1 мм. 2. В списке работ автора приведена только половина из 22 работ автора диссертации.

12. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина»**. Отзыв составлен д.т.н., профессором А.А. Игнатьевым. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. В общей характеристике работы (с. 3) отсутствует степень проработки темы с указанием исследователей и недостатков наиболее близких работ, хотя в главе 1 сведения имеются. 2. Не уточнено, как используется модель, приведенная на рис. 2. 3. Не указаны отличительные особенности графиков на рис. 4. 4. Не приведены какие-либо данные, подтверждающие повышение стойкости сверл в 6...8 раз (с.16).

13. Отзыв из **Белорусского национального технического университета**. Составлен к.т.н., доцентом П.Г. Сухоцким. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Название диссертации следовало бы начинать



со слова «Технология». 2. Целесообразно было бы более подробно исследовать зависимости режимов резания от материала режущего инструмента.

14. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»**. Составлен к.т.н., доцентом В.Н. Некрасовым (научные специальности 05.03.01; 05.13.06). Отзыв положительный со следующим замечанием: 1. Из автореферата не совсем ясно, как решение задачи 1 нашло отражение в общих выводах.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается тем, что они являются ведущими специалистами в области теории механической обработки материалов, включая труднообрабатываемые и композиционные материалы, имеют научные публикации по данному направлению в рецензируемых научных изданиях, обладают достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов. В ведущей организации и организациях, в которых осуществляют свою деятельность официальные оппоненты, выполнен значительный объем научных исследований, связанных с изучением процессов, рассматриваемых соискателем в диссертационной работе.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработан** комплекс технологических решений для улучшения обрабатываемости фольгированного стеклотекстолита, учитывающий снижение дефектности обработки;

**разработана** имитационная модель обработки стеклотекстолита, учитывающая его слоистую структуру и анизотропность свойств;

**предложена** методика расчетного определения режимов резания с учетом технологических ограничений на процесс сверления стеклотекстолита;

**доказано**, что при использовании разработанных соискателем технологических рекомендаций, обеспечивается заданная производительность и качество поверхности просверленных отверстий;

новые понятия **не вводились**.

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что:

**доказана** методика назначения эффективных режимов сверления фольгированного стеклотекстолита с учетом комплекса технологических ограничений.

**использована** компьютерная имитационная модель процесса механической обработки для расчета режимов обработки фольгированного стеклотекстолита.

**изложены** значения осевой составляющей силы резания, при которых обеспечиваются технологические условия резания материала, и ее предельные значения, при превышении которых имеет место образование недопустимых дефектов при обработке.

**раскрыта** взаимосвязь режимов резания материала с процессом образования стружки, качеством отверстий, упругим восстановлением материала и наличием заусенцев фольги в отверстиях после обработки.

Значения полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**разработаны и внедрены** новые рабочие методики на АО «Радий» (г. Касли), которое при изготовлении печатных плат применяет автоматизацию расчетов режимов резания, составление расчетно-технологических карт наладки и рационализацию работы группы инструментального хозяйства;

**разработаны и внедрены** результаты научно-технических и технологических работ на АО «Радий», ЗАО «Техносвязь» (г. Екатеринбург), ООО «Эко» (г. Екатеринбург) которые занимаются изготовлением печатных плат с оформлением актов внедрения и промышленного использования;

**определено** и доказано увеличение производительности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита, как с точки зрения количественных, так и качественных показателей;

**создана** система технологических рекомендаций по обучению технического и производственного персонала АО «Радий» при подготовке произ-

водства печатных плат с оформлением сопроводительных документов;

**представлены** результаты экспериментальной проверки адекватности рассчитанных рациональных режимов резания при сверлении отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита;

**представлено** экономическое обоснование эффективности внедрения результатов работы и установлено повышение рентабельности выпуска продукции за счет значительного снижения трудовых и материальных затрат при производстве печатных плат.

Оценка достоверности результатов исследований выявила:

**для экспериментальных работ** использование современных измерительных средств, результатов полученных на сертифицированном оборудовании, достаточную статистическую воспроизводимость результатов исследований, полученных по разработанным соискателем методикам;

**теоретические исследования (теория)** построены на известных проверяемых теоретических и экспериментальных данных и согласуются с опубликованными экспериментальными данными других исследователей по тематике диссертации;

**идея** диссертационной работы базируется на анализе известных результатов исследования процесса сверления композиционных материалов, использования и обобщения передового опыта российских и зарубежных ученых в области разработки рациональных режимов резания при сверлении стеклотекстолита и материалов со схожей внутренней структурой;

**использовано** сравнение данных, полученных автором, с данными полученными ранее другими зарубежными и отечественными авторами по тематике диссертации;

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации, сравнения данных, полученных автором по разработанным моделям, с данными, полученными в ходе натурных экспериментов других ученых, а также с результатами производственной практики.

**Личный вклад соискателя состоит в:**

**теоретически** и практически обоснованном выборе рациональных режимов резания при сверлении стеклотекстолита;

**установлении** общих закономерностей влияния режимов резания на процесс обработки и показатели качества сверления отверстий.

**определении** граничных значений осевой составляющей силы резания допустимых при сверлении фольгированного стеклотекстолита;

**разработке** алгоритма расчета режимов обработки печатных плат, исходя из основной номенклатуры базовых материалов обрабатываемых заготовок, твердосплавных сверл и сформированной базы данных рациональных режимов резания;

**установлении** зависимости периода стойкости твердосплавного режущего инструмента от режимов резания при сверлении заготовок из разных марок стеклотекстолита.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием плана исследований и основной идейной линии, взаимосвязью поставленных задач и полученных результатов, содержит новые научные результаты, свидетельствующие о личном вкладе автора диссертации в науку.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены научные результаты.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая содержит решение актуальной задачи повышения эффективности сверления отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита.

