

УДК 621.9.044

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Терских И.А., магистрант гр. 8КТМ-11, II курс

Научный руководитель: Андреев М.В., к.т.н., доцент

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,  
г. Барнаул

В настоящее время продолжают совершенствоваться и усложняться машины, аппараты, приборы и другая техника. При производстве машин доля трудозатрат, приходящихся на механическую обработку деталей, составляет порядка 70% от общей трудоемкости их изготовления. Поэтому всегда актуальной остается задача совершенствования методов механической обработки [2].

Современная тенденция, направленная на снижение металлоемкости выпускаемых изделий, обуславливает внедрение в различных отраслях нежестких корпусных деталей из композиционных материалов. Характерные требования, предъявляемые при фрезеровании композиционных материалов:

- экономическая точность обработки в пределах 10...12 квалитетов;
- шероховатость обработанной поверхности  $Ra = 2,5...6,3 \text{ мкм}$ .

Однако достижение данных требований без использования специально разработанных способов весьма затруднительно.

Разработке новых технологических решений для повышения эффективности механической обработки посвящено большое число работ, в области теории резания и инструмента, станкостроения и автоматизации, физико-технических методов обработки и технологии машиностроения. Научное направление, связанное с созданием ресурсосберегающих технологий на основе применения новых более эффективных способов механической обработки, обеспечивающих требуемые параметры качества рабочих поверхностей обрабатываемых деталей известно как эвристическое. Однако, существует достаточное количество работ, способствующих системному (строгому) решению задач поиска и создания новых производительных способов механической обработки. Среди них основополагающие труды академика Г.И. Грановского, который фактически создал периодическую систему для классификации принципиальных кинематических схем резания.

Анализ классификации Г.И. Грановского [1] показал, что по принципиальной кинематической схеме резания 405 работают методы встречного и попутного фрезерования цилиндрическими фрезами (рисунок 1). При этом сделано допущение о точечном касании прямолинейного и вращательного движений, поскольку глубина резания в обоих случаях мала по сравнению с диаметром фрезы. Элементарное прямолинейное движение

сообщается обрабатываемой детали как движение подачи, а вращательное движение – инструменту как скорость резания.

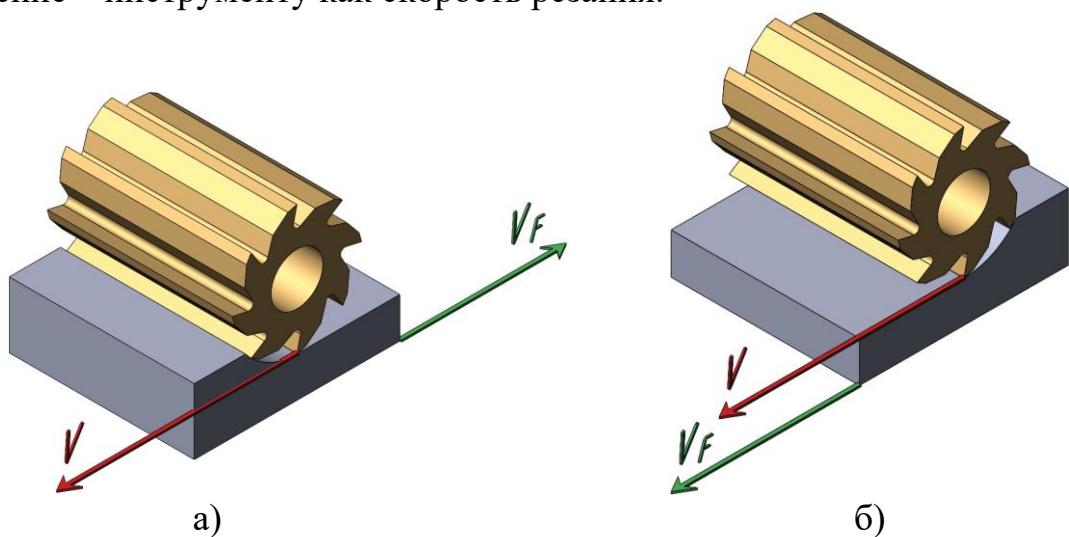


Рисунок 1 – Встречное (а) и попутного (б) фрезерование плоскостей

Характерной особенностью встречного и попутного фрезерования является то, что вектор скорости резания  $V$  и радиальной подачи  $V_F$  лежат в одной плоскости. Осевая подача отсутствует.

Принципиальная кинематическая схема резания 401 (рисунок 2) еще на заре развития техники нашла свое практическое применение. На ней основаны наиболее широко распространенные методы обработки металлов: точение проходными, фасонными и расточными резцами, нарезание резьбы резцами, метчиками, плашками и гребенками; сверление, зенкерование и развертывание; протягивание винтовых пазов. К этому перечню следует добавить известное с недавнего времени плунжерное фрезерование.

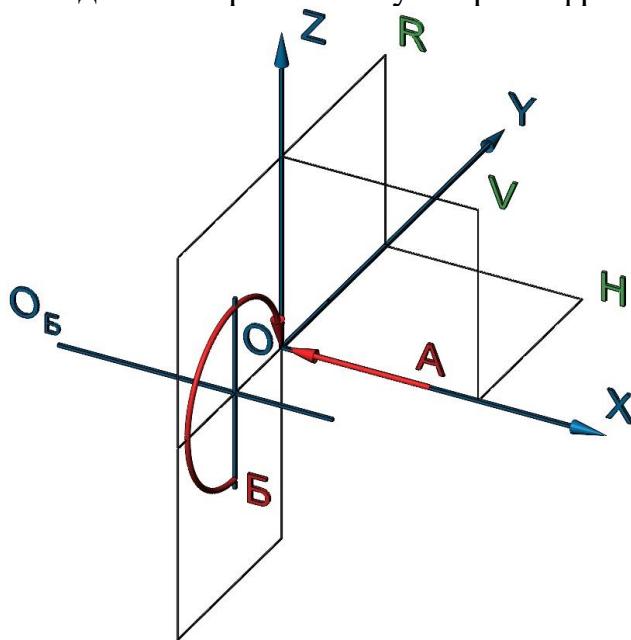


Рисунок 2 – Принципиальная кинематическая схема резания 401  
по классификации Г.И. Грановского

Плунжерное фрезерование (рисунок 3) способно обеспечить эффективное удаление большого объема материала путем последовательных

погружений инструмента в обрабатываемый материал с осевой, а не радиальной подачей. За счет этого плунжерные фрезы менее подвержены вибрациям и позволяют более полно использовать все возможности станка, работая на больших подачах.

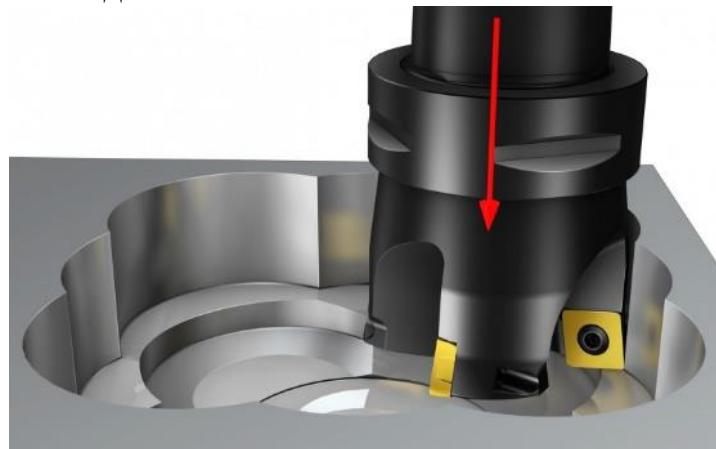


Рисунок 3 – Плунжерное фрезерование

Одним из направлений повышения производительности механической обработки материалов является увеличение скорости резания. Это направление поддерживается в мире современными тенденциями и уровнем развития станкостроения. Теоретические и экспериментальные исследования технологических возможностей высокоскоростной обработки позволяют в настоящее время разрабатывать и применять на практике эффективные технологические процессы скоростного резания, обеспечивающие высокую производительность и высокое качество изготовления деталей машин.

Технологической предпосылкой возможности реализации процесса высокоскоростной обработки послужила гипотеза немецкого инженера Карла Саломона (рисунок 4), давшего первое официальное объяснение явления HSM – High Speed Machining (патент № 523594, April 1931, Германия) [4]. Он исследовал разрезание алюминиевых листов дисковой фрезой большого диаметра. Что позволило достичь высоких скоростей резания до 16500 м/мин (275 м/с), зачастую недоступных даже на современном оборудовании.

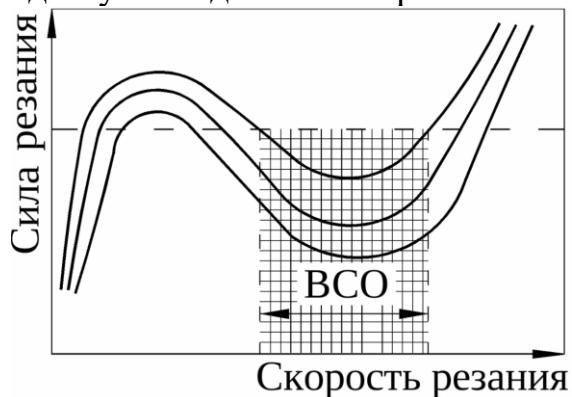


Рисунок 4 – Зависимости силы резания от скорости резания

Принципиальная возможность обработки композиционных материалов в области высоких скоростей резания была установлена при проведении ряда исследований, выполненных отечественными и зарубежными учеными.

Полученные в МГТУ им. Н.Э. Баумана результаты свидетельствуют, что значительное увеличение скорости (до 41 м/с) не приводит к снижению качества обработанной поверхности, по сравнению с обработкой на низких скоростях, рекомендованных нормативами (до 5 м/с) [3].

На основании вышеизложенного было сделано предположение о возможности создания на базе принципиальной кинематической схемы резания 401 нового способа обработки – высокоскоростного плунжерного фрезерования дисковой фрезой (рисунок 5).

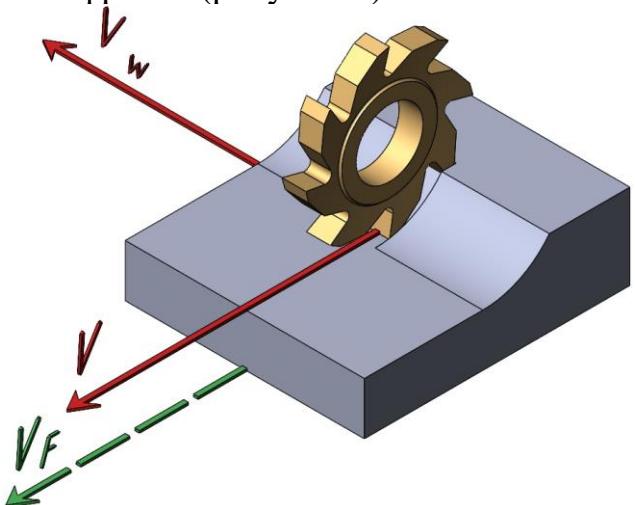


Рисунок 5 – Высокоскоростное плунжерное фрезерование дисковой фрезой

При такой обработке вектор скорости резания  $V$  перпендикулярен вектору осевой подачи  $V_w$ . Радиальная подача  $V_f$  осуществляется периодически в конце каждого рабочего хода, но не учитывается принципиальной кинематической схемой резания.

Также было сделано предположение о возможности создания на базе принципиальной кинематической схемы резания 706 (рисунок 6) нового способа обработки – высокоскоростного плунжерного фрезоточения дисковой фрезой (рисунок 7).

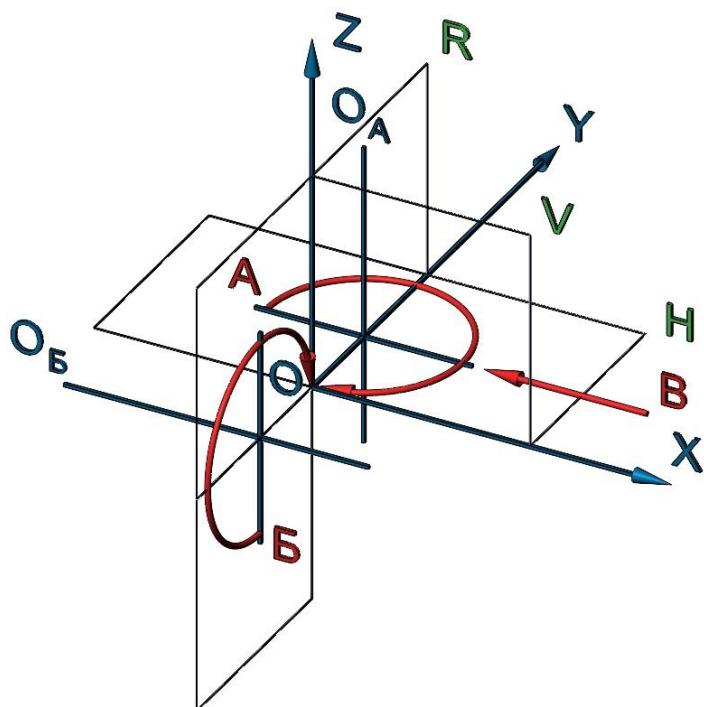


Рисунок 6 – Принципиальная кинематическая схема резания 706  
по классификации Г.И. Грановского

При такой обработке вектор скорости резания  $V$  также перпендикулярен вектору осевой подачи  $V_w$ , которая осуществляется за счет вращения обрабатываемой детали. Радиальная подача фрезы  $V_F$  осуществляется непрерывно.

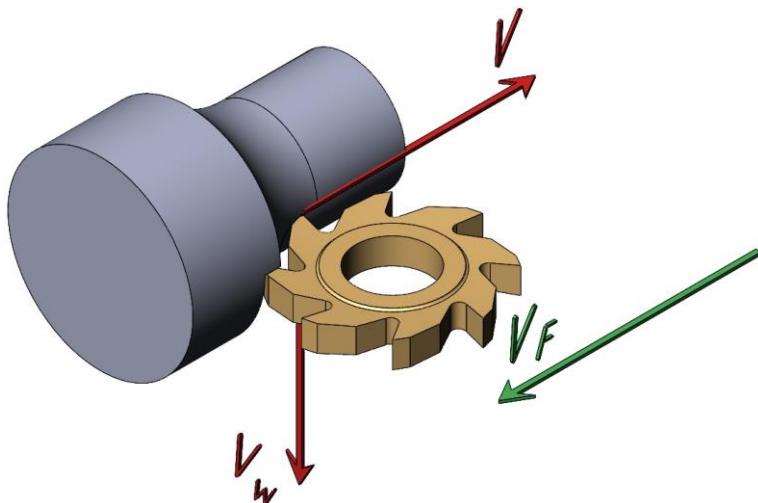


Рисунок 7 – Высокоскоростное плунжерное фрезоточение дисковой фрезой

На сегодняшний день высокоскоростную обработку как предварительную, так и окончательную рекомендуется осуществлять по схеме попутного фрезерования. Обработку композиционных материалов также рекомендуется вести при попутной подаче. При попутном фрезеровании скорость резания и движение подачи однонаправлены. Такая обработка характеризуется тем, что толщина стружки на входе зуба в материал максимальна и уменьшается до нулевого значения на выходе.

Предлагаемые способы обработки по принципиальным кинематическим схемам резания 401 и 706 должны реализовываться при выполнении следующих условий:

1. Сравнительно большой диаметр фрезы.
2. Высокая частота вращения фрезы.
3. Малая подача на зуб.
4. Малая глубина резания.
5. Взаимное перемещение фрезы и обрабатываемой детали в направлении перпендикулярном вектору скорости резания.
6. Ширина среза  $b$  при входе зуба фрезы в материал максимальна и уменьшается до нулевого значения при ее выходе.

Условия 1 и 2 позволяют достичь высоких скоростей резания.

Условия 3 и 4 обеспечат уменьшение силы резания, что позволит вести обработку нежестких деталей.

Условие 5 принципиально исключит влияние недостаточной динамической жесткости или наличия люфта в механизме подачи стола фрезерного станка при фрезеровании. Также оно исключит подкручивания детали при фрезоточении под действием силы резания. В результате снизится вероятность повреждения режущей кромки инструмента. При этом резание будет осуществляться торцевой поверхностью фрезы, как при плунжерном фрезеровании.

Условие 6 обеспечит выполнение рекомендаций по высокоскоростной обработке и обработке композиционных материалов.

Использование в качестве инструмента трехсторонней дисковой фрезы позволит исключить холостые ходы при обработке, что будет способствовать повышению производительности.

Экспериментальная проверка проводилась на универсальном горизонтальном консольно-фрезерном станке модели 6М83 Горьковского завода фрезерных станков.

Для осуществления высокоскоростного плунжерного фрезерования дисковой фрезой станок был оснащен специально разработанной высокоскоростной фрезерной головкой. Это прототип высокоскоростных фрезерных головок, которые могут использоваться на фрезерных станках для выполнения высокоскоростной обработки. Частота вращения таких головок не должна составлять несколько десятков тысяч оборотов, как в станках для высокоскоростного фрезерования, поэтому их стоимость и стоимость их обслуживания будут гораздо ниже. Требуемые скорости резания будут достигаться не только за счет частоты вращения, но и за счет диаметра инструмента, при условии выполнения ограничений, обусловленных размерами обрабатываемой детали и рабочей зоны станка.

Крепление головки осуществлялось через отверстие в хоботе станка с использованием упора. На 3-Д модели головки показан фрагмент хобота станка с направляющими типа «ласточкин хвост» (рисунок 8). Такой способ закрепления гарантирует надежную фиксацию и защиту от проворота.

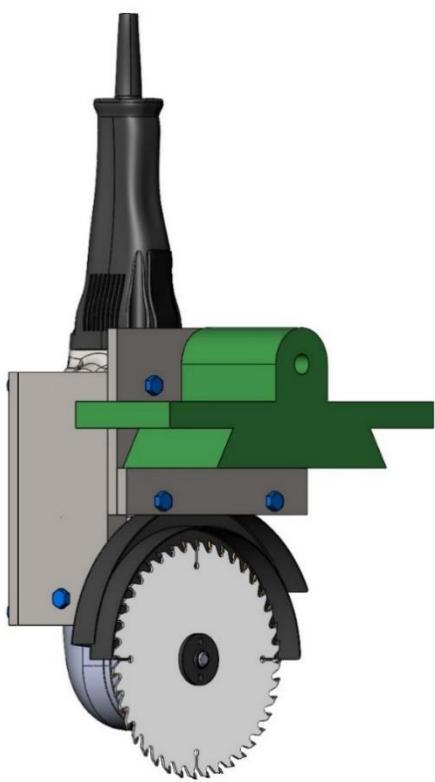


Рисунок 8 – 3-Д модель высокоскоростной фрезерной головки

В качестве привода высокоскоростной фрезерной головки была использована углошлифовальная машина УШМ Интерскол УШМ-180/1800М ЗАО «Интерскол» с частотой вращения круга при номинальной нагрузке 6500 об/мин.

В качестве инструмента использовался пильный диск по дереву Sparta 180 x 22мм x 40T с переменно-скошенными режущими зубьями из твердого сплава ВК8 представленный на рисунке 9 (производитель Шанхай Мэтл Грейт Тулз Ко.лтд., Китай, под контролем немецкой компании Matrize Handels GmbH).



Рисунок 9 – Пильный диск по дереву Sparta 180 x 22мм x 40T

При номинальном диаметре пильного диска  $d_\phi = 180$  мм, вращающегося с частотой  $n_\phi = 6500$  об/мин достигалась скорость резания:

$$V = \frac{\pi \cdot d_\phi \cdot n_\phi}{60 \cdot 1000} = \frac{3,14 \cdot 180 \cdot 6500}{60 \cdot 1000} \approx 60 \text{ (м/с)}, \quad (1)$$

где  $d_\phi$  – диаметре пильного диска, мм;  
 $n_\phi$  – частота вращения пильного диска при номинальной нагрузке;  
60 – коэффициент для перевода минут в секунды;  
1000 – коэффициент для перевода миллиметров в метры.

Характерные углы заточки зубьев пильного диска представлены на рисунке 10:

$\gamma$  – передний угол (угол атаки),  $\gamma \approx 15^\circ$ ;

$\alpha$  – задний угол,  $\alpha \approx 7^\circ$ ;

$\lambda$  – угол лицевого скоса,  $\lambda \approx 7^\circ$ ;

$\kappa$  – угол верхнего скоса,  $\kappa \approx 7^\circ$ ;

$\theta$  – касательный угол зазора,  $\theta \approx 1^\circ$ ;

$\varepsilon$  – радиальный угол зазора,  $\varepsilon \approx 1^\circ$ .

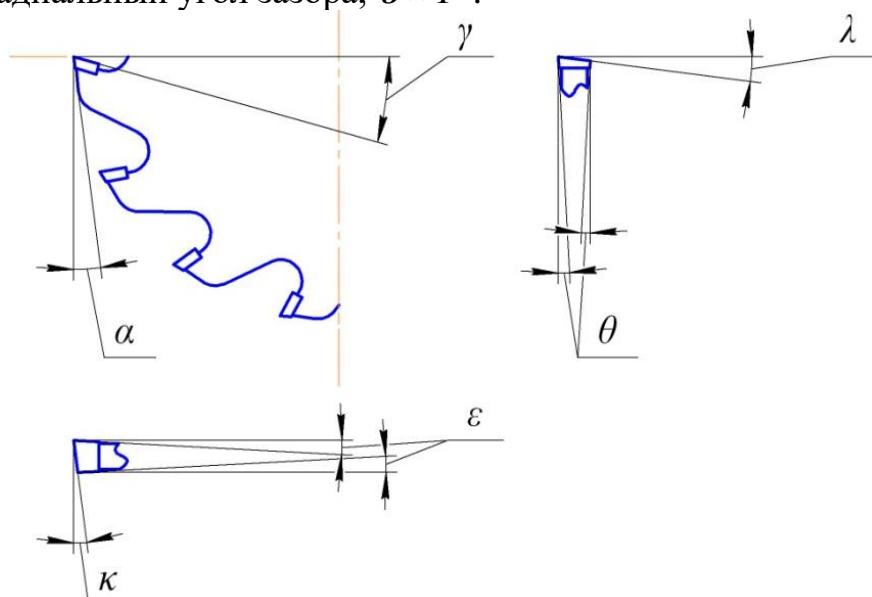


Рисунок 10 – Характерные углы заточки зубьев пильного диска  
Шероховатость обработанной поверхности измерялась на профилографе-профилометре модели HOMMEL TESTER W55 (производитель Hommelwerke GmbH, Германия) (рисунок 11).



Рисунок 11 – Профилограф-профилометр HOMMEL TESTER W55

Глубина резания измерялась цифровым штангенциркулем 150 мм.

В качестве экспериментальных образцов использовались пластины размером 500×40×8 мм из листового стеклотекстолита марки 3240 (Китай) на основе эпоксидно-фенольной смолы (рисунок 14). Данный материал является современным аналогом стеклотекстолита марок СТЭФ, СТЭФ-1, СТЭФ-У и соответствует требованиям ГОСТ 10292-74 «Стеклотекстолит конструкционный. Технические условия», ТУ 16-89 И79.0066.002 «Стеклотекстолит электротехнический листовой марки СТЭФ-У».

Для экспериментального исследования формирования шероховатости при фрезеровании нежестких деталей из композиционных материалов образцы из стеклотекстолита устанавливались на две опоры расположенные на расстоянии 445 мм друг от друга. Обработка проводилась в средней части образца, равноудаленной от обеих опор (рисунок 12).

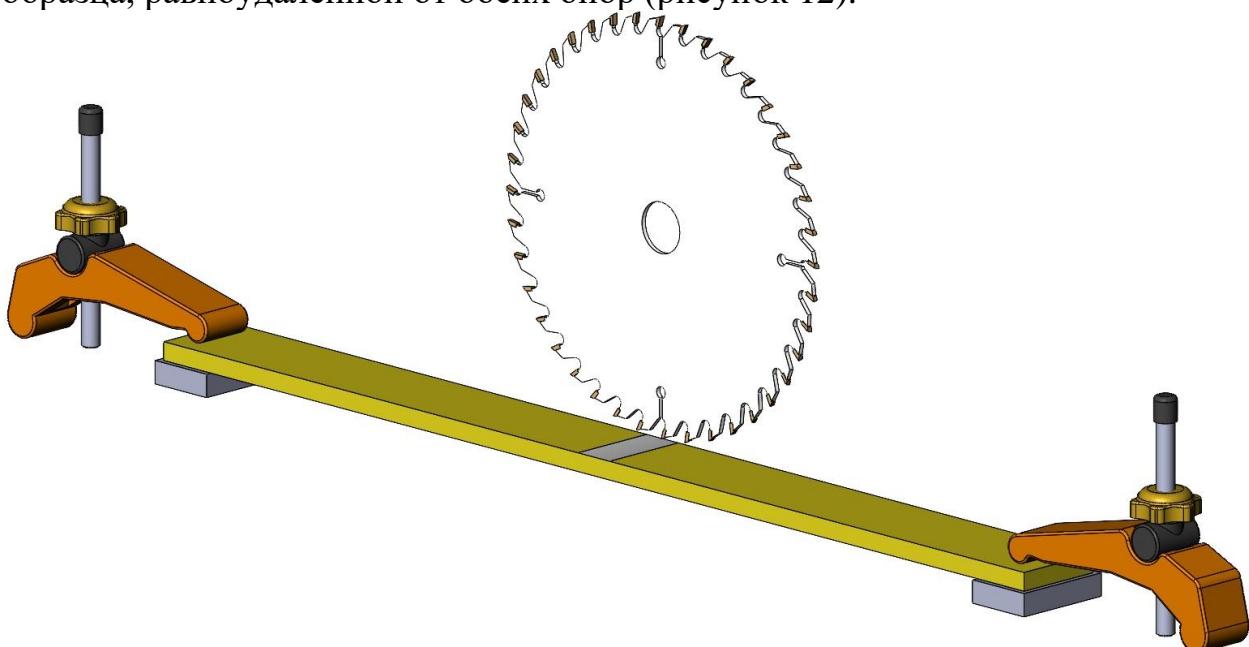


Рисунок 12 – Модель высокоскоростного фрезерования нежестких деталей

Эксперименты проводились при варьировании следующих факторов:

- глубины резания  $t = 0,125 \text{ мм}; 0,25 \text{ мм}; 0,5 \text{ мм}; 1 \text{ мм};$
- скорости перемещения детали вдоль оси фрезы  $V_w$ , за счет минутной подачи фрезерного станка  $S_m = 1250 \text{ мм/мин}; 3000 \text{ мм/мин}.$

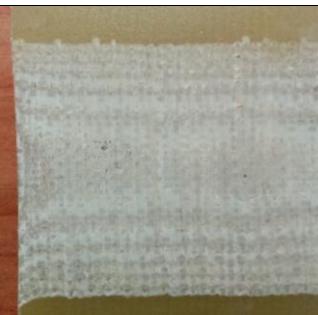
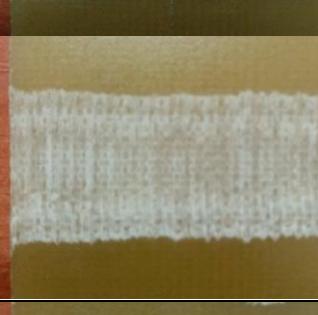
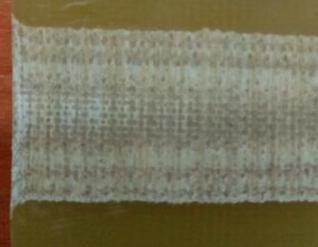
В связи с тем, что зубья пильного диска переменно-скошенные и в процессе резания будут участвовать только те зубья, которые имеют односторонний скос, число зубьев  $z$  при расчете подачи на зуб будет вдвое меньше фактического. Следовательно, подача на зуб составит:

$$S_z = \frac{S_m}{z \cdot n_{\phi}} = \frac{1250}{20 \cdot 6500} \approx 0,01 \text{ (мм/зуб)},$$

$$S_z = \frac{S_m}{z \cdot n_{\phi}} = \frac{3000}{20 \cdot 6500} \approx 0,02 \text{ (мм/зуб)}. \quad (2)$$

Условия опытов и фотографии обработанных поверхностей образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Условия опытов и фотографии обработанных поверхностей образцов

№	Условия опытов		Фотография обработанной поверхности	№	Условия опытов		Фотография обработанной поверхности
	$t$ , мм	$S_m$ , мм мин			$t$ , мм	$S_m$ , мм мин	
1	1	3000		5	0,25	3000	
2	1	1250		6	0,25	1250	
3	0,5	3000		7	0,125	3000	
4	0,5	1250		8	0,125	1250	

После этого было проведено измерение шероховатости обработанной поверхности образцов. Отдельно измерялась продольная и поперечная составляющие шероховатости. Продольная шероховатость  $Ra_{np}$  измерялась вдоль следов обработки, поперечная шероховатость  $Ra_n$  – в направлении, перпендикулярном следам обработки.

В таблице 2 представлены условия опытов и результаты измерений продольной и поперечной шероховатости обработанных поверхностей. Измерение глубины резания показало отсутствие прогиба обрабатываемых образцов под действием сил резания т.к. измеренные значения полностью соответствовали настроечным размерам. Поэтому полученные значения

глубины резания не подвергались дальнейшей математической обработке.

Таблица 2 – Условия опытов и результаты измерений продольной и поперечной шероховатости обработанных поверхностей образцов

№	Условия опытов		Продольная шероховатость $Ra_{np}$ , мкм				Поперечная шероховатость $Ra_n$ , мкм			
	$t$ , мм	$S_m$ , мм мин	$Ra_{np\ j1}$	$Ra_{np\ j2}$	$Ra_{np\ j3}$	$\overline{Ra}_{\text{пр}j}$	$Ra_{n\ j1}$	$Ra_{n\ j2}$	$Ra_{n\ j3}$	$\overline{Ra}_{\text{п}j}$
1	1	3000	5,15	5,55	3,73	4,81	3,19	3,4	3,3	3,30
2	1	1250	2,54	2,99	4,7	3,41	3,44	2,9	3,73	3,36
3	0,5	3000	4,15	5,29	8,71	6,05	4,22	3,76	2,76	3,58
4	0,5	1250	1,79	3,21	2,4	2,47	3,72	3,11	3,47	3,43
5	0,25	3000	4,35	3,73	4,61	4,23	5,64	3,61	4,44	4,56
6	0,25	1250	3,22	5,51	3,54	4,09	4,29	3,64	2,93	3,62
7	0,125	3000	3,04	2,99	2,45	2,83	1,2	1,82	1,93	1,65
8	0,125	1250	3,97	5,62	5,61	5,07	3,57	2,3	3,66	3,18

Была проведена аппроксимация экспериментальных данных продольной шероховатости степенной функциональной зависимостью по программе в системе компьютерной алгебры Maple:

$$Ra_{\text{п}р} = 0,9 \cdot t^{0,02} \cdot V^{0,2}, (\text{мкм}). \quad (3)$$

График полученной зависимости представлен на рисунке 13.

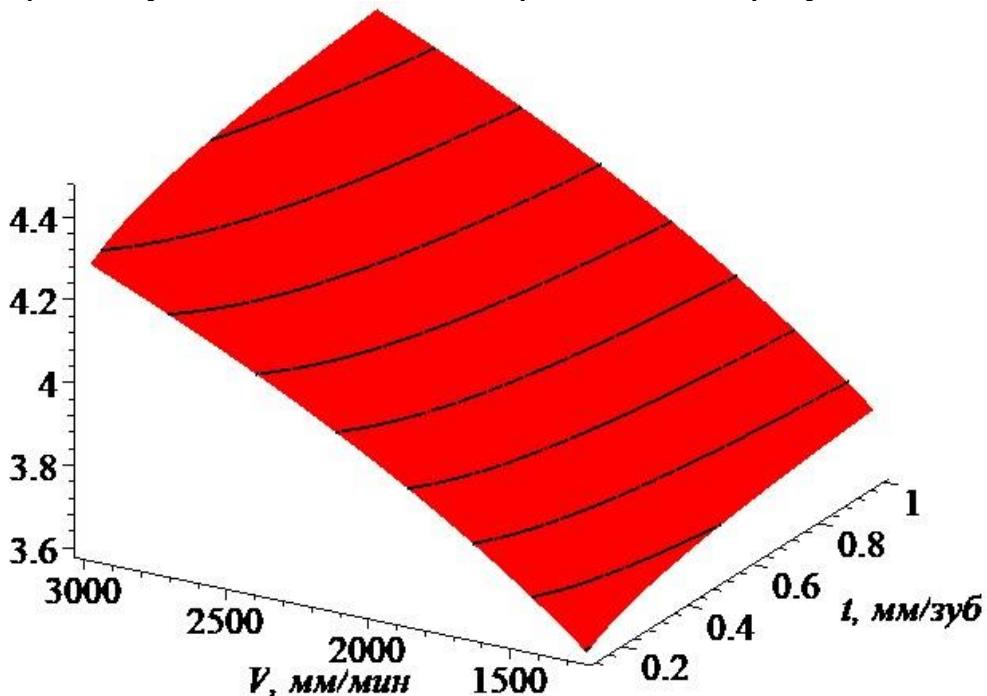


Рисунок 13 – Зависимость продольной шероховатости  $Ra_{np}$  от глубины резания  $t$  и скорости перемещения детали вдоль оси фрезы  $V_w$

Также была проведена аппроксимация экспериментальных данных поперечной шероховатости степенной функциональной зависимостью:

$$Ra_{\text{п}п} = 8,9 \cdot t^{0,1} / V^{0,1}, (\text{мкм}). \quad (4)$$

График полученной зависимости представлен на рисунке 14.

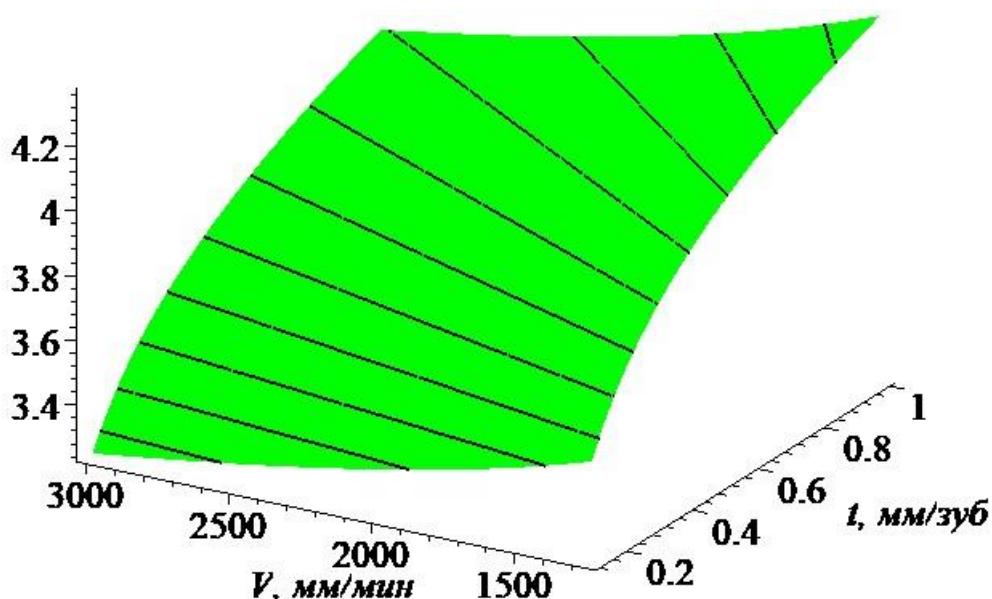


Рисунок 14 – Зависимость поперечной шероховатости  $R_{a_n}$  от глубины резания  $t$  и скорости перемещения детали вдоль оси фрезы  $V_w$

Проверка полученных зависимостей проводилась по критерию Фишера. Шероховатость обработанной поверхности соответствует требованиям, предъявляемым к деталям из композиционных материалов.

Результаты экспериментальной проверки позволяют сделать вывод о целесообразности дальнейшего использования разработанного метода обработки как в производственных целях – для фрезерования нежестких деталей из композиционных материалов, так и в научных – для дальнейших исследований возможностей его применения.

#### Список литературы:

1. Грановский Г.И. Кинематика резания / Г.И. Грановский. – М.: Машгиз, 1948. – 200 с.
2. Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием / Ю.М. Ермаков. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
3. Ярославцев В.М. Обработка резанием полимерных композиционных материалов: учебное пособие / В.М. Ярославцев. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 180 с.
4. Salomon C. High Speed Machining / Deutsches Patent [German patent] Nr. 523594, April (1931).