

**Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого
Институт машиностроения, материалов и транспорта**

На правах рукописи

Ларионов Евгений Олегович

**РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ РЕЖУЩЕГО
ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Направление подготовки 15.06.01 «Машиностроение»

Направленность 15.06.01_05 Технология Машиностроения

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы:
Ларионов Евгений Олегович
Научный руководитель: д.т.н., проф.,
Михайлов Станислав Васильевич

Санкт Петербург – 2019

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе Машиностроения, Института машиностроения, материалов и транспорта федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ Машиностроения: *Любомудров Сергей Александрович, к.т.н., доц.*

Научный руководитель: *Михайлов Станислав Васильевич, д.т.н., проф.*

Рецензент: *Максаров Вячеслав Викторович, СПГУ, декан электромеханического факультета, заведующий кафедрой машиностроения, профессор, доктор технических наук*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Высокопроизводительный металлорежущий инструмент является необходимой составляющей современного производственного процесса механической обработки. Обработка резанием в обозримой перспективе не теряет своих позиций. Вместе с тем, современные материалы предъявляют повышенные требования к технологическим свойствам инструмента, а мировая конкуренция требует повышения эффективности процесса металлообработки. Поэтому разработка рациональной геометрии режущего инструмента при обработке жаропрочных сплавов является актуальной темой.

Цель и задачи исследования

Цель: Выбор рациональной геометрии и материала режущего инструмента при обработке перспективных жаропрочных сплавов.

Задачи:

- Разработать методики экспериментальных исследований течения жаропрочных сплавов;
- Провести экспериментальные исследования по течению жаропрочных сплавов;
- Разработать математическую модель, которая покажет степень влияния геометрии режущего инструмента на производительность и стойкость режущего инструмента при тчении жаропрочных сплавов;
- Создать техническое задание на изготовления новой геометрии режущего инструмента, для тчения жаропрочных сплавов;
- Создать техническое задание на разработку компьютерной программы выбора материала режущего инструмента;
- Создать техническое задание на разработку компьютерной программы расчета геометрии режущего инструмента.

Научная новизна

Научная новизна исследования состоит в: разрабатываемой математической модели процесса обработки резанием современных труднообрабатываемых жаропрочных материалов на станках с ЧПУ; выборе на основе математической модели, геометрии и материала обрабатывающего инструмента; создании компьютерной программы расчета геометрии и материала режущего инструмента.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанная геометрия режущего инструмента для обработки перспективных жаропрочных сплавов созданная на основе экспериментальных исследований и созданной математической модели позволит увеличить эффективность и качество резания жаропрочных сплавов, а созданная компьютерная программа упростит процесс выбора инструмента и режимов резания.

Апробация работы и публикации

Результаты данной работы опубликованы в пяти статьях в регулярных изданиях и сборниках докладов на конференциях по теме работы.

Участвовал в проведении предварительных экспериментов при выполнении научно-исследовательской работы для машиностроительного завода ОАО «Климов». В 2013 году принимал участие в хоздоговорной научно-исследовательской работе с ОАО «Климов» по теме «Разработка методов и средств ускоренного определения оптимальных режимов резания перспективных титановых сплавов для изготовления деталей двигателя для ПСВ». В 2014-2015 годах участвовал в научно-исследовательской работе, являющейся утвержденной частью федеральной целевой программы по разделу «Разработка технологии механической обработки деталей из труднообрабатываемых материалов для авиационного двигателестроения на основе определения рациональных режимов резания и выбора эффективного инструмента»;

Материалы диссертационной работы представлялись на следующих научно-практических конференциях: XLII научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (гор. Санкт-Петербург, 2013 г.); XLIII научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (гор. Санкт-Петербург, 2014 г.); XLIV научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (гор. Санкт-Петербург, 2015 г.); V международная научно-практическая конференция «СОВРЕМЕННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ: НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ» (ММЕSE-2016, гор. Санкт-Петербург); XLVII научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (гор. Санкт-Петербург, 2018 г.).

Представление научного доклада: основные положения

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации, сформулирована цель и задачи диссертационного исследования, приведены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практические результаты исследования.

Выбор станочного оборудования, инструментов, приспособлений, режимов резания – задача, над которой работают ведущие мировые предприятия. Одновременно необходимо разрабатывать мероприятия по управлению процессом обработки и получению деталей заданной точности.

При точении, как и при фрезеровании труднообрабатываемых сплавов, производители уделяют внимание разработке новой геометрии инструмента, способного обеспечивать высокую производительность, но и по настоящее время существует множество проблем в данном вопросе, а имеющиеся разработки носят общий характер. Разработанная геометрия режущего инструмента для обработки перспективных жаропрочных сплавов созданная на основе экспериментальных исследований и созданной математической модели позволит увеличить эффективность и качество резания жаропрочных сплавов, а созданная компьютерная программа упростит процесс выбора инструмента и режимов резания.

В первой главе приведено состояние разработок режущего инструмента для точения жаропрочных материалов и обоснован выбор материала для исследования.

Исследования в области проектирования, изготовления и рациональной эксплуатации инструментов, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП) с криволинейной передней поверхностью, ведутся с середины XX в. При оптимальном сочетании геометрических размеров СМП и режимов резания формируется компактная стружка, повышается стабильность и надежность механической обработки. Вместе с тем наличие стружкозавивающих элементов приводит к ограничению технологических возможностей инструментов и снижению их универсальности. Ни за рубежом, ни в отечественной практике нет достаточно надежных методик проектирования и рекомендаций выбора сложнопрофильных режущих пластин, удовлетворяющих требованиям современного автоматизированного производства. Все известные методики строятся на эмпирическом подходе, при котором требуется изготовление нескольких экспериментальных образцов пластин и проведение трудоемких сравнительных испытаний.

Пластины чаще всего проектируются для конкретных технологических операций с целью снижения затрат или повышения производительности

обработки. Созданные пластины включаются в каталоги с указанием рекомендуемых областей применения. Точность рекомендаций, как правило, невысокая. Основная их цель – заинтересовать потенциального потребителя приобрести инструмент для испытаний. Оценка работоспособности пластины в новых производственных условиях требует проведения дополнительных исследований и производственных испытаний.

Из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов по использованию в качестве конструкционного материала лидирующее место занимают сплавы из титана. Аллюминиды титана являются очень стойкими к окислению и жаропрочными, что в свою очередь определило их использование в авиации и автомобилестроении в качестве конструкционных материалов. Биологическая безвредность титана делает его превосходным материалом для пищевой промышленности и восстановительной хирургии [1,2,3].

Из достоинств и недостатков титана и его сплавов, как обрабатываемого резанием материала, отметим следующие:

Достоинства:

- малая плотность (4500 кг/м³) способствует уменьшению массы используемого материала;
- высокая механическая прочность. Стоит отметить, что при повышенных температурах (250-500 °С) титановые сплавы по прочности превосходят высокопрочные сплавы алюминия и магния;
- высокая коррозионная стойкость, обусловленная способностью титана образовывать на поверхности тонкие (5-15 мкм) сплошные пленки оксида TiO₂, прочно связанные с массой металла;
- удельная прочность (отношение прочности и плотности) лучших титановых сплавов достигает 30-35 и более, что почти вдвое превышает удельную прочность легированных сталей.

Недостатки:

- высокая стоимость производства, титан значительно дороже железа, алюминия, меди, магния;
- активное взаимодействие при высоких температурах, особенно в жидком состоянии, со всеми газами, составляющими атмосферу, в результате чего титан и его сплавы можно плавить лишь в вакууме или в среде инертных газов;
- трудности вовлечения в производство титановых отходов;
- плохие антифрикционные свойства, обусловленные налипанием титана на многие материалы;
- высокая склонность титана и многих его сплавов к водородной хрупкости и солевой коррозии;

- плохая обрабатываемость резанием, аналогичная обрабатываемости нержавеющей сталей аустенитного класса;

- большая химическая активность, склонность к росту зерна при высокой температуре и фазовые превращения при сварочном цикле вызывают трудности при сварке титана.

Считается, что титан трудно поддается обработке, но это не типично для современных станков, инструментов и методов обработки. Частично трудности в механической обработке титана - это новая область, в которой пока еще не набрано достаточное количество опыта. Титан так же может казаться более трудным в обработке по сравнению с другими металлами, такими как: чугун или низколегированные стали. Механическую обработку титана следует выполнять при других подачах и скоростях в сравнении с другими металлами, но все же он может быть довольно легок в обработке.

Из-за того, что титановые сплавы сохраняют прочность и твердость при высоких температурах, на режущую кромку при обработке воздействует большая нагрузка. При этом в месте резания вырабатывается большое количество тепла, которое влечет за собой опасность деформации. Поэтому большое значение при обработке титана приобретает правильный выбор геометрии сменной пластинки и марки сплава. Решением этой проблемы является пластины с покрытием PVD, которые способны существенно повысить эффективность [4,5].

При точении, как и при фрезеровании труднообрабатываемых сплавов, производители внимание уделяют выбору инструмента, способного интенсивно отводить тепло. Большое внимание этому вопросу уделяет фирма Sandvik Coromant, которая выпускает токарные резцы системы Coro Turn HP, предназначенные для обработки титана, с внутренними каналами с несколькими соплами для подвода СОЖ под давлением до 7 МПа непосредственно в зону резания для уменьшения температуры инструмента за счёт интенсивного отвода тепла и эффективного отвода стружки [6]. А на предприятии фирмы Hipp Przisionstechnik прецизионная токарная обработка деталей из титана 1.4404, 1.4301 или 1.4057, проводится с помощью режущих инструментов фирмы Iscar Germany и СОЖ, подаваемой под высоким давлением [7]. Фирма Walter AG вместе с Ганноверским институтом IFW разрабатывает и испытывает специальный инструмент, позволяющий обрабатывать суперсплавы для современных самолетов, специфика которого заключается в значениях переднего и заднего углов, применении быстрорежущих инструментальных сталей типа E с покрытиями ACN, полировании каналов для отвода стружки [8]. А в работе [9]. Токарную обработку труднообрабатываемых сплавов рекомендуют осуществлять

режущими пластинами из твёрдого сплава 8625 с покрытием TiCN (стойкость против абразивного истирания), Al₂O₃ (высокая теплостойкость) или TiN (уменьшение выкрашивания режущих кромок). Проблемы резания труднообрабатываемых сплавов остаются по сей день мало изученными, поэтому потребители стараются решить эти вопросы в комплексе, обращаясь к фирмам, которые передают на предприятия уже готовые технологии обработки заготовок из конкретного материала вместе с испытанным оборудованием. Например, фирма Starrag Heckert занимается конструированием станков и выбором технологии, режущих инструментов и программного обеспечения для эффективной обработки нового материала Ti5553 с пределом прочности 900 Н/мм² [10]. Но, как показывают исследования обработки жаропрочных сплавов, проблемы токарной обработки и сверления остаются нерешенными [11]. Было выяснено, что несмотря на результаты получения обработанной поверхности без трещин при 5 шлифовании и высокоскоростном резании, токарная обработка и сверление этих материалов все ещё остаются проблематичными. Поверхность детали после токарной обработки, как правило, имели задиры, многочисленные дугообразные трещины, расслоения в подповерхностном слое и значительное упрочнение. Однако было установлено, что названные дефекты можно минимизировать за счёт использования инструментов из поликристаллических алмазов и при обработке резанием с наложением колебаний с ультразвуковой частотой.

Выводы по первой главе: проблемы резания труднообрабатываемых сплавов остаются, по сей день, малоизученными. Анализ рынка производителей режущего инструмента и научных публикаций по теме исследований показывает отсутствие инстру, тема разработки рациональной геометрии режущего показывает, что выбор рациональной геометрии и материала режущего инструмента при обработке перспективных жаропрочных сплавов является актуальной задачей.

Во второй главе приведены данные по предварительным экспериментам по выбору наиболее производительной СМП представленной на рынке, для последующей доработки геометрии режущей пластины, с целью увеличения производительности.

Для проведения предварительных экспериментов на кафедре «Технология машиностроения» СПбПУ в рамках Федеральной целевой программы был разработан автоматизированный многопараметрический стенд. На рисунке 1 приведена компоновочная схема стенда для экспериментальных исследований экспериментальных образцов деталей

авиадвигателей из труднообрабатываемых материалов.

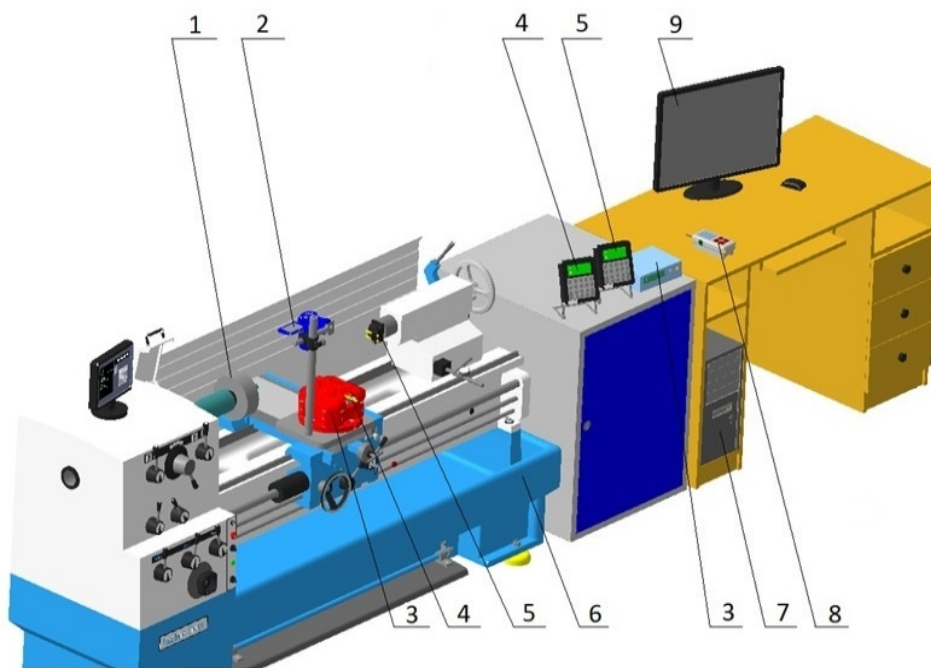


Рисунок 1 – Автоматизированный многопараметрический стенд

В состав разработанной системы включены следующие технологические компоненты: 1 – деталь; 2 – тепловизор BALTECH TR-01200; 3 – система измерения сил резания; 4 – система измерения температурной деформации резца; 5 – система измерения размерного износа режущего инструмента; 6 – токарный станок Turnado 230/1000V; 7 – блок вторичной обработки информации; 8 – профилометр marsurf PS1; 9 – монитор.

Данный стенд позволяет:

- установить связь стойкости режущего инструмента от интенсивности его износа при точении труднообрабатываемых материалов;
- определить критерии допустимого износа режущего инструмента при чистовом точении труднообрабатываемых материалов;
- установить степень влияния сил резания на износ режущего инструмента и вибрации при резании;
- установить корреляцию между параметрами обработки и качеством обработанной поверхности;
- определить основные составляющие, влияющие на точность обработки и способы компенсации погрешностей, возникающих при формообразовании;
- определить механические характеристики, как для материала заготовки, так и материала режущего инструмента при различных

температурах нагрева;

– определить зависимости температуры в зоне резания от скорости резания.

Для проведения предварительного эксперимента был выбран материал ВТ8, так как многие детали авиационных двигателей изготавливаются именно из него.

Были выбраны следующие державки для сменных многогранных пластин фирмы Sandvik Coromant, согласно рекомендациям фирмы:

- державка DDJNR 2525M 15
- державка PCLNR 2525M 12HP
- державка SVJBR 2525M 16 HP

Сменные многогранные пластины для державок выбирались с разными геометрическими параметрами и испытывались при одинаковых режимах резания. Сплав пластин выбран согласно рекомендациям фирмы, Sandvik Coromant [12]: одинаковый Н13А. Список выбранных пластин:

- DNMG 150404-SF Н13А
- CNGG 120404-SGF Н13А
- CNGG 120408-SGF Н13А
- VBGT 160404-UM Н13А

Для каждой из пластин были выбраны 4 скорости резания. Наименьшая скорость резания берется по рекомендации CoroGuide Sandvik Coromant с учетом характеристик обрабатываемого материала, сплава и геометрии пластины, а также заданных технических требований к обработанной поверхности. Все исследуемые пластины предназначены для финишной обработки и рекомендуемая скорость 70 м/мин. Так как определяющим фактором является производительность и основное влияние на размерный износ оказывает скорость резания, еще 3 скорости были выбраны следующие: 90, 120, 160 м/мин.

Подача и глубина резания в меньшей мере влияют на размерный износ и для всех пластин были выбраны постоянные значения. Подача назначена с учетом рекомендаций Sandvik Coromant и минимальная для токарного станка Turnado 230/1000V равная 0,031 мм/об. Такая подача позволяет резцу пройти максимальный путь резания, при этом расходуя столько же материала, как и на более высокой. Глубина резания выбрана с учетом рекомендаций Sandvik Coromant и равна 0,6 мм.

Для 4 различных пластин Sandvik Coromant, на автоматизированном многопараметрическом стенде и с режимами резания, описанными ранее были произведены предварительные испытания на материале ВТ8. Количество проходов было рассчитано на примерно одинаковый путь

инструмента равный 3 км.

При наружном точении кольца из титана BT8 ГОСТ 26492-85 при глубине 0,6 мм и подаче 0,031 мм/об наименьшие показания размерного износа при максимальной испытуемой скорости 160 м/мин получились у пластины CNGG 120404-SGF H13A в державке PCLNR 2525M 12HP. Главный и вспомогательный углы в плане в этом случае равны 50° , угол при вершине 80° , главный и вспомогательный задние углы по 6° , главный передний угол $+6^\circ$ и угол наклона главной режущей кромки тоже 6° . Радиус скругления 0,4 мм. Наихудшие результаты показала пластина VBGT 160404-UM H13A в державке SVJBR 2525M 16 HP. Главный угол в плане в этом случае равен 93° , вспомогательный угол в плане 52° , угол при вершине 35° , главный и вспомогательный задние углы 0° , главный передний угол 0° и угол наклона главной режущей кромки тоже 0° . Радиус скругления 0,4 мм.

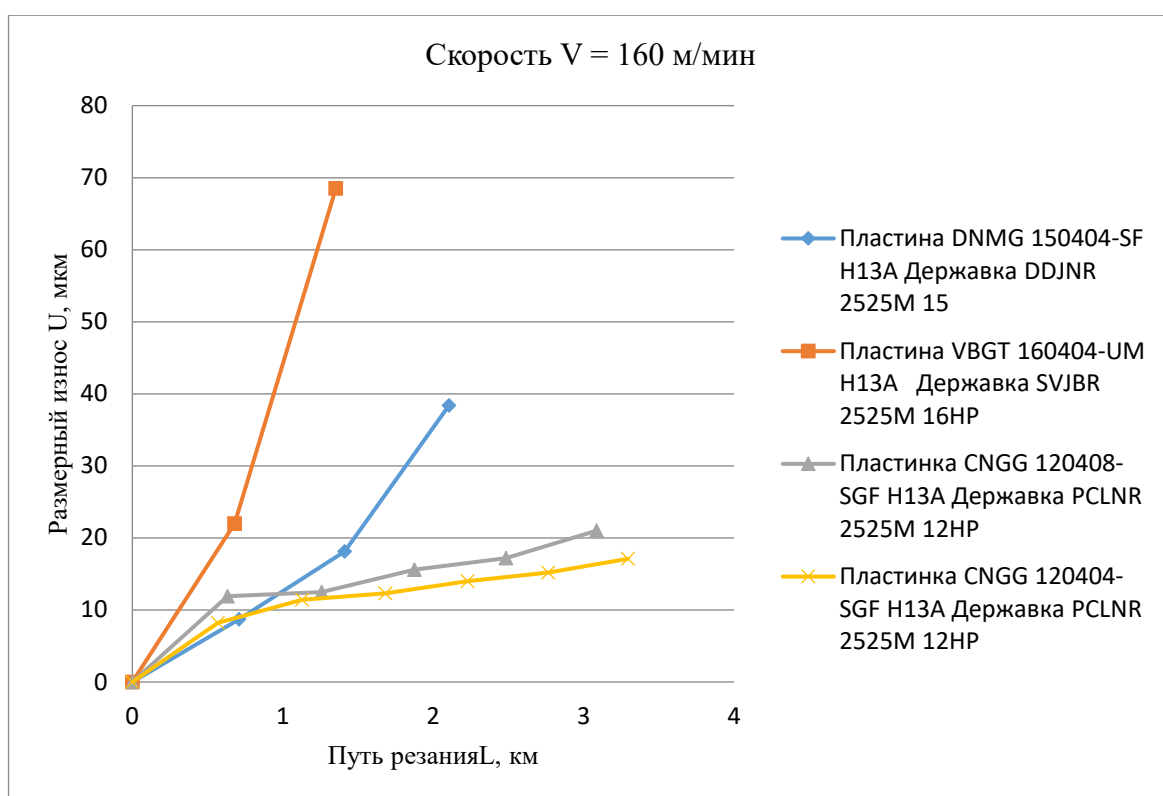


Рисунок 2 – График зависимости размерного износа всех испытуемых пластин от пути резания при скорости $V = 160$ м/мин

На размерный износ огромное влияние оказывает угол при вершине. С увеличением угла при вершине размерный износ уменьшается. Зависимости влияния геометрических параметров резца на шероховатость обработанной поверхности выявлено не было. При увеличении радиуса скругления до значения большего глубины резания происходит незначительное увеличение размерного износа. При уменьшении радиуса скругления до значений

меньших 0,75 глубины так же увеличивается размерный износ.



Рисунок 3 – Состояние режущей кромки пластины DNMG 150404-SF H13A $V = 160$ м/мин, R нет – скол

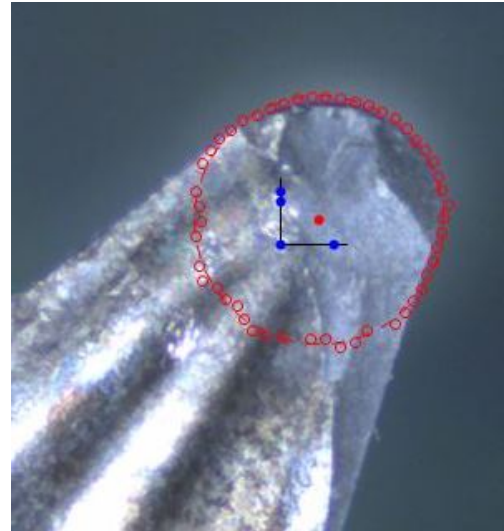


Рисунок 4 – Состояние режущей кромки пластины VBGT 160404-UM H13A $V = 160$ м/мин, R нет – скол

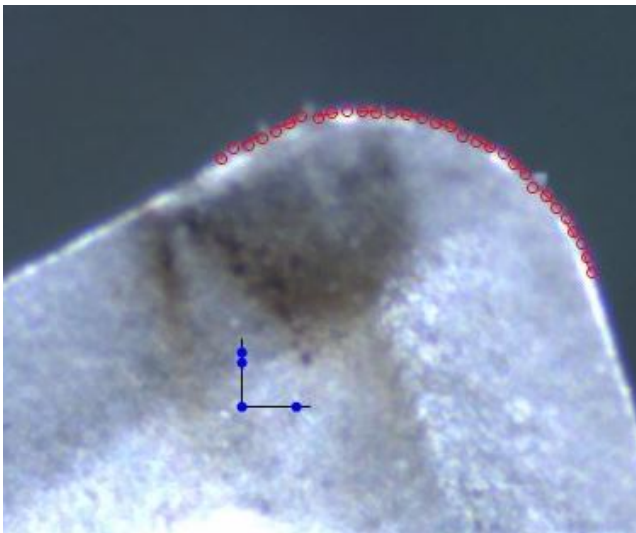


Рисунок 5 – Состояние режущей кромки пластины CNGG 120408-SGF H13A $V = 160$ м/мин, $R = 0,869$ мм

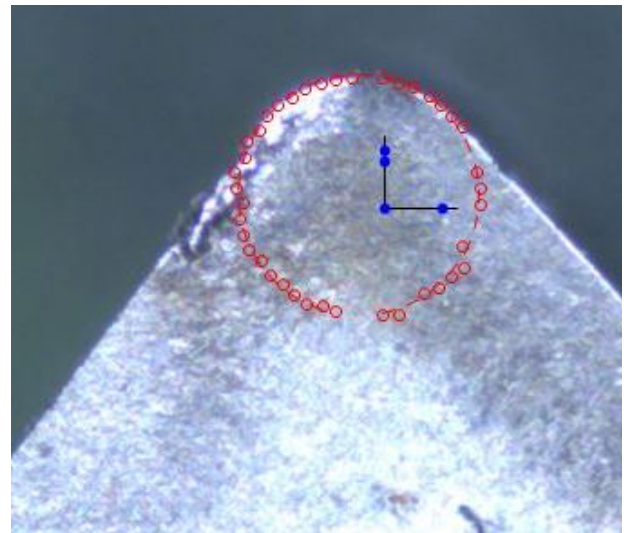


Рисунок 6 - Состояние режущей кромки пластины CNGG 120404-SGF H13A $V = 160$ м/мин, $R = 0,409$ мм

Выводы по второй главе: По полученным данным предварительных экспериментов для наружного точения материала ВТ8 при наибольшей производительности была выбрана пластина CNGG 120404-SGF H13A в державке PCLNR 2525M 12HP, которая показала значение размерного износа на 3х километрах пути инструмента при скорости 160 м/мин равное 17 мкм.

В третьей главе рассмотрены основные положения и этапы проектирования сменных многогранных твердосплавных пластин со стружкозавивающими поверхностями для обработки жаропрочных сплавов.

В основе проектирования режущих пластин лежат физические и математические модели, связывающие режимы резания и геометрию инструмента с выходными характеристиками процесса резания, в том числе с силами резания, прочностью лезвия, температурой резания, износостойкостью пластины, размерами и формой образующейся стружки. Такие модели позволяют оптимизировать геометрию сменных режущих пластин с учетом различных технических ограничений.

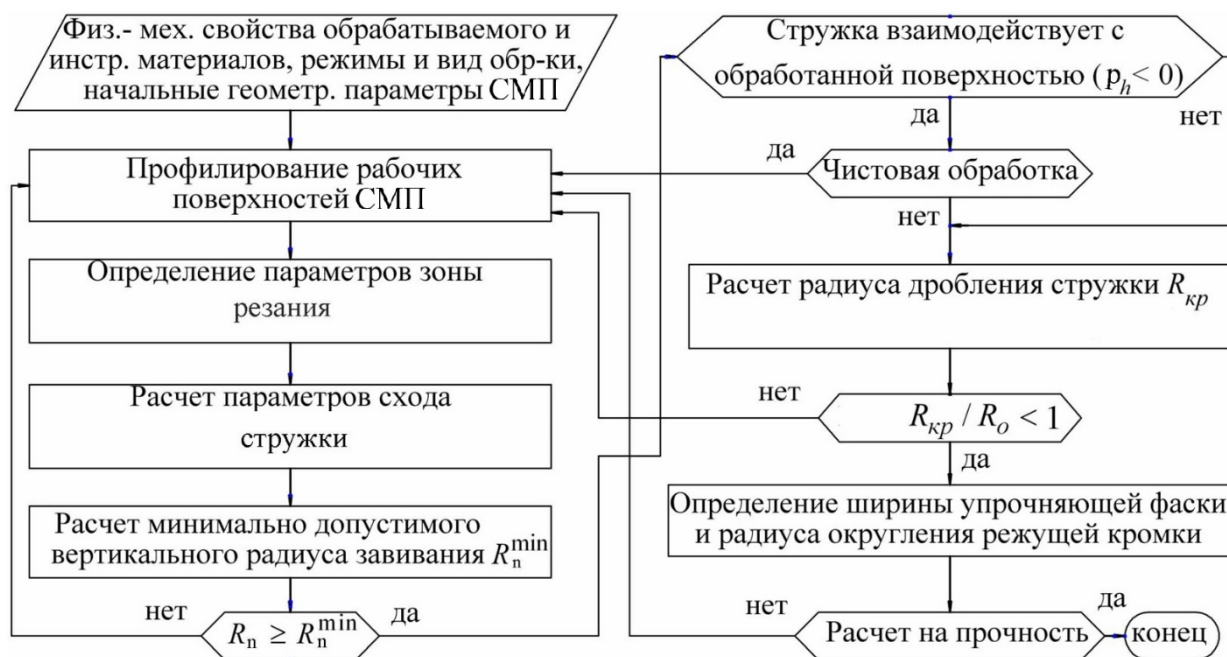


Рисунок 7 - Алгоритм проектирования стружкоформирующей поверхности СМП

Общий алгоритм проектирования СМП со сложнопрофильной передней поверхностью с учетом получения БФС представлен на рисунке 7. В качестве исходных данных используются физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материала, режимы резания, схема операции точения, начальные геометрические параметры пластины (φ , φ_1 , γ , α). Проектирование рабочих поверхностей СМП осуществляется в следующей последовательности.

1. Задаются исходные данные, необходимые для начальной стадии проектирования СМП (физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, режимы обработки, начальные геометрические параметры пластины).

Выполняется анализ зарубежных аналогов пластин. Подбираются предварительные, начальные геометрические параметры пластины с учетом требований к прочности режущей пластины и качества поверхностного слоя обрабатываемых изделий.

2. Рассчитываются усредненные параметры зоны резания: толщина a_l и ширина b_l срезаемого слоя, угол схода стружки η , длины пластического l_0 и полного l контакта стружки с передней поверхностью инструмента, угол наклона условной поверхности сдвига β_l и коэффициент утолщения стружки k_a . Расчеты выполняются с помощью программы Prognos Chip.

3. С помощью программы Prognos Chip зона резания рассекается на части параллельными плоскостями, расположенными вдоль направления начального схода стружки. С учетом требований к форме стружки выполняется профилирование передней поверхности СМП по сечениям.

4. 4. Выполняется расчет минимально допустимого радиуса завивания в вертикальной плоскости. Проверяется условие $R_u \geq R_u^{\min}$. Определялось предельно допустимое приближение стружкозавивающего уступа к режущей кромке и его форма

5. 5. Рассчитываются параметры схода стружки: внешний радиус витка стружки R_0 , шаг спирали стружки Ph , угол наклона оси спирали стружки θ .

6. 6. Рассчитывается радиус дробления стружки. Проверяется условие дробления стружки $R_{кр} = (1,2...2)R_0$.

7. 7. Определяется ширина упрочняющей фаски, которая не должна быть больше толщины срезаемого слоя, т. е. $f < a_l$.

8. 8. Рассчитывается радиус округления режущей кромки.

9. 9. Определяются параметры дополнительных стружкодеформирующих элементов передней поверхности.

10. 10. Выполнялся расчет сил резания и параметров качества поверхностного слоя обрабатываемой детали.

11. 11. Выполняется прочностной расчет режущей пластины.

12. Основные расчетные зависимости, используемые при проектировании передней поверхности, приведены в таблице 1.

Анализ конструкций лезвий инструментов показывает, что практически всю их гамму можно представить, как совокупность прямолинейных и радиусных участков контактных поверхностей инструмента в сочетании с различной формой стружкозавивающих упоров.

Таблица 1 Расчетные зависимости для определения параметров зоны резания

Параметр	Расчетная зависимость
Толщина a_1 и ширина b_1 срезаемого слоя	<p>при $t \geq r(1 - \cos \varphi); s \leq 2r \sin \varphi_1$</p> $a_1 = \frac{s}{c'} \sin \operatorname{arctg} \left(\frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')} \right);$ $b_1 = c't / \sin \operatorname{arctg} \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')},$ <p>где $a' = r/t$, $b' = s/2r$, $c' = 1 - a'(1 - \sqrt{1 - b'^2})$</p>
	<p>при $t < r(1 - \cos \varphi); s \leq 2r \sin \varphi_1$</p> $a_1 = \frac{s}{c'} \sin \operatorname{arctg} \left(\frac{c'}{\sqrt{2a' - 1} + a'b'} \right);$ $b_1 = c't / \sin \operatorname{arctg} \frac{c'}{\sqrt{2a' - 1} + a'b'},$ <p>где $a' = r/t$, $b' = s/2r$, $c' = 1 - a'(1 - \sqrt{1 - b'^2})$</p>
Угол схода стружки	$\eta = \eta_0 - \operatorname{arctg} [\operatorname{tg} \lambda \sin(\eta_0 + \varphi) - \operatorname{tg} \gamma \cos(\eta_0 + \varphi)],$ <p>где при $t \geq r(1 - \cos \varphi); s \leq 2r \sin \varphi_1;$</p> $\eta_0 = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{t - r + 0,5\sqrt{4r^2 - s^2}}{t \cdot \operatorname{ctg} \varphi + r \cdot \operatorname{tg}(\varphi/2) + 0,5s}$ <p>при $t < r(1 - \cos \varphi); s \leq 2r \sin \varphi_1;$</p> $\eta_0 = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{t - r + 0,5\sqrt{4r^2 - s^2}}{\sqrt{2r \cdot t - t^2} + 0,5s}$
Угол отклонения стружки от нормали к главной режущей кромке	$\xi = \eta + \varphi - \frac{\pi}{2}$
Толщина стружки	$a_2 = a_1 k_a$

Параметр	Расчетная зависимость
Ширина стружки	$b_2 = b_1 \cos(\eta_0 - \eta)$
Угол наклона условной поверхности сдвига	$\operatorname{tg} \beta_1 = B^x D^z \Gamma^y c (1 - \sin \gamma_\phi)^n k_{II} k_C K_d,$ где $B = \nu a_1 / a; D = a_1 / b_1; \Gamma = \lambda_p \beta \varepsilon / \lambda$
Коэффициент утолщения стружки	$k_a = \frac{1}{a_1} \left[R_u - \sqrt{R_u^2 - \left(D_\beta - \left(R_u \cos \gamma - l_0 \sin \gamma - \frac{a_1}{\operatorname{tg} \beta_1} \right)^2} \right) \right],$ где $D_\beta = (R_u^2 - l_0^2) \cos^2 \gamma - 2R_u (l_0 \cos \gamma - a_1) \sin \gamma + a_1 (2l_0 \cos \gamma - a_1)$
Длина контакта	$l = \frac{a_1 \sqrt{2} \left[1 - (a_1 / R_u)^{0,91} \cdot \exp(-3,96 a_1 / R_u) \right]}{\sin \beta_1 \sin(\pi / 4 + \beta_1 - \gamma)}$
Боковой радиус завивания стружки	$R_s = 4,5 b_2 l_{zn} / (l_{zn} - l_{bc}),$ где l_{zn}, l_{bc} – длины главной и вспомогательной режущей кромки
Коэффициент трения стружки с резцом	$\mu = \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - \operatorname{tg} \beta_1 (\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma - \sin \gamma + \operatorname{tg} \beta_1 (\cos \gamma + \sin \gamma)}$

Частные аналитические выражения радиуса кривизны стружки в нормальной плоскости для основных типов поверхностей инструментов приведены в работах автора. Адекватность представленных формул подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями.

Выводы по третьей главе: Методика проектирования сменных многогранных твердосплавных пластин со стружкозавивающими поверхностями, разработанная под руководством Михайлова С.В., позволяет разработать СМП для обработки жаропрочных титановых сплавов.

В четвертой главе сформировано техническое задание для проектирования, изготовление и внедрение новых конструкций СМП для токарной обработки материалов гр. S., а также техническое задание на разработку программного обеспечения для выбора рациональной геометрии

режущего инструмента при токарной обработке и назначению режимов резания.

Для проектирования СМП по методике, описанной в главе 3 выбран новый жаропрочный титановый сплав ВТ41. Его характеристика представлены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики титанового сплава ВТ41

Сплав	Полуфабрикат, состояние	σ_b	$\sigma_{0,2}$	σ_b^{600} °	σ_{100}^{600} °	(МЦУ/МнЦУ): σ_R^* , МПа, при $N=2 \times 10^4 / N=2 \times 10^7$ цикл
		МПа				
ВТ41	Штамповка (β -деформация), отожженное состояние	1030	945	720	330	930/410
	Штамповка ($(\alpha+\beta)$ -деформация), отожженное состояние	1080	1020	660	295	970/490**

По выполненному анализу зарубежных аналогов пластин в главе 1 и предварительным экспериментам в главе 2, были подобраны начальные геометрические параметры пластины с учетом обеспечения максимальной производительности CNGG 120404-SGF H13A в державке PCLNR 2525M 12HP. Проводятся повторные эксперименты для выбранной геометрии режущей пластины на новом материале.

По полученным данным строится модель СМП и изготавливается опытный образец. Проводятся эксперименты и оцениваются полученные результаты. Создается модель выбора геометрии режущего инструмента и модель назначения режимов резания для обеспечения максимальной производительности при обработке жаропрочных сплавов.

Созданные модели используются для разработки программного обеспечения.

Выводы по четвертой главе: сформированные технические задания позволят разработать СМП, провести экспериментальные исследования по обработке ВТ41 новой геометрией СМП и разработать компьютерные программы для упрощения процесса выбора инструмента и режимов резания.

Заключение: Для разработки рациональной геометрии режущего инструмента при обработке жаропрочных сплавов был выполнен анализ рынка производителей режущего инструмента, проведены предварительные эксперименты по обработке жаропрочного титанового сплава BT8, разработана методика проектирования СМП и сформированы технические задания на дальнейшие исследования.

Список использованных источников

1. Корбут Е. В., Лабунец В. Ф. Особенности изнашивания инструмента при обработке титановых сплавов // Проблемы тертя та зношування. – 2011. – №. 55. – С. 83-93.
2. Трудности обработки титана. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.tochmeh.ru/info/obrtit.php> – Загл. с экрана.
3. Основные сведения о титане и его сплавах. [Электронный ресурс]. – режим доступа: <http://www.metotech.ru/titan-opisanie.htm#> – Загл. с экрана.
4. Wang Z., Nakashima S., Larson M. Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration // Procedia CIRP. – 2014. – Т. 17. – С. 523-528.
5. Сутягин В. В., Сайкин С. А. Повышение ресурса концевых инструментов за счет применения нанокompозитных PVD-покрытий при обработке титановых сплавов в авиастроении // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №. 5. – С. 41-44.
6. Обработка титана, деталей из титана и титановых сплавов. Раздел 3 [Электронный ресурс] / American Machinist (N. 8, 2008, США) / Инструменты фирмы Sandvik Coromant, с. 20, 24, 25, ил. 2. <http://www.stankoinform.ru/03.titan.htm> (дата обращения: 7.06.2014).
7. Обработка титана, деталей из титана и титановых сплавов. Раздел 3 [Электронный ресурс] / W+B 4 – 2012. Grundler E. / Прецизионная токарная обработка медицинского назначения, с. 70-71, ил.4 <http://www.stankoinform.ru/03.titan.htm> (дата обращения: 7.06.2014).
8. Обработка титана, деталей из титана и титановых сплавов. Раздел 3 [Электронный ресурс] / Produktion (Nr. 10, 2008, Германия). Lapple R. / Особенности обработки резанием титана и его сплавов, с. 17, ил. 1. <http://www.stankoinform.ru/03.titan.htm> (дата обращения: 7.06.2014).
9. Обработка титана, деталей из титана и титановых сплавов. Раздел 3 [Электронный ресурс] / M+W 10 (декабрь) 2011. / Обработка титана, с.28-29, ил.3. <http://www.stankoinform.ru/03.titan.htm> (дата обращения: 7.06.2014).
10. Обработка титана, деталей из титана и титановых сплавов. Раздел 3 [Электронный ресурс] / W+B 7,8-11. Leuch M. / Стратегия обработки титана, с. 13-15, ил.6. <http://www.stankoinform.ru/03.titan.htm> (дата обращения: 7.06.2014).

11. Обработка титана, деталей из титана и титановых сплавов. Раздел 3 [Электронный ресурс] / Annals of CIRP. 2005. V. 54 № 1. Aspinwall D. et al. / Обработка интерметаллического сплава, с. 99–103, ил. 6. <http://www.stankoinform.ru/03.titan.htm> (дата обращения: 7.06.2014).
12. Sandvik Coromant «Токарные инструменты» / режущие инструменты. 2012, 529 с.

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

1. Ларионов Е.О., Козарь И.И., Выбор эффективного инструмента для обработки перспективных титановых сплавов авиационного двигателестроения на основе анализа процессов при резании Печ. Неделя науки СПбГПУ: Материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. Ч. 1. –СПБ: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. – 240 - 242 с.
2. Ларионов Е.О., Козарь И.И., Выбор режущего инструмента при резании труднообрабатываемых материалов в авиационном двигателестроении Печ. Неделя науки СПбГПУ: Материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. Ч. 2. –СПБ: Изд-во Политехн. Ун-та, 2015. – 288 - 290 с.
3. Ларионов Е.О., Козарь И.И., Выбор эффективного инструмента для обработки перспективных титановых сплавов за счет выбора рациональной геометрии. Печ. Неделя науки СПбГПУ: Материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. – СПб: Изд-во Политехн. Ун-та, 2016..
4. Ларионов Е.О., Козарь И.И., Колодяжный Д. Ю., Оценка погрешности обработки резанием деталей из труднообрабатываемых материалов в авиадвигателестроении Печ. Современное машиностроение: наука и образование (ММЕСЕ-2016) : материалы 5-й Международной научно-практической конференции, 30 июня - 1 июля 2016 года / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; [под ред. А. Н. Евграфова и А. А. Поповича] Санкт-Петербург, 2016 С. 936-945
5. Ларионов Е.О., Любомудров С.А. Методика выбора режущего инструмента при резании труднообрабатываемых материалов Печ. Неделя науки СПбГПУ: Материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. – СПб: Изд-во Политехн. Ун-та, 2018.

Аспирант _____ Ларионов Е.О.

(подпись)