

M202551

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

Владимир Анатольевич СОКОЛОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕЛЬНЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ
ПРОРЕЗНЫХ ФРЕЗ

(Специальность 05.03.03—Обработка материалов резанием

Диссертация написана на русском языке

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель —
кандидат технических наук, доцент Е. Д. Баклунов.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Д. Л. Юдин,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник В. Н. Андреев.

Ведущее предприятие — Московский инструментальный завод.

Автореферат разослан « »

1973 г.

Защита диссертации состоится « »

1973 г.

«Автоматизации и механи-
ческого высшего технического учи-
лища» по адресу: Москва, 107005,

двух экз., заверенные пе-
чатным адресом.

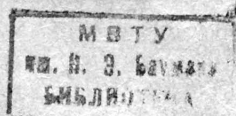
Получить в библиотеке МВТУ

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Ю. А. Степанов

M202551

Гип. МВТУ. Зак. 1136. Тир. 120.



Повышение производительности труда и улучшение качества выпускаемой продукции – это основные задачи, стоящие перед народным хозяйством. Одним из наиболее эффективных способов повышения производительности при механической обработке является создание и применение новых инструментальных материалов, обладающих повышенными режущими свойствами.

В ряде отраслей машиностроения и приборостроения цельно-твердосплавный малогабаритный многозубовый режущий инструмент является одним из перспективных видов режущего инструмента. Это определяется тем, что существующие методы соединения пластинок твердого сплава с корпусом или державкой инструмента из-за огромных технологических трудностей при изготовлении и ненадежности крепления не позволяли использовать твердый сплав в конструкциях режущего инструмента такого типа, и этот режущий инструмент изготовлялся только из инструментальных сталей.

Одним из типовых представителей малогабаритного многозубого режущего инструмента, получившего широкое применение в условиях производства, являются пререзные фрезы.

Фрезерование узких пазов является весьма трудоёмкой операцией. В качестве способа повышения производительности труда на данной операции может служить замена быстрорежущих пререзных фрез цельными твердосплавными фрезами.

Анализ литературных источников приводит к выводу, что сведений о режимах эксплуатации и геометрических параметрах цельных твердосплавных пререзных фрез /ЦТПФ/ явно недостаточно, чтобы обеспечить широкое внедрение этого типа режущего инструмента в промышленность.

Требуется провести исследования по определению оптимальной геометрии, конструкции, стойкости, оптимальным режимам резания, прочности инструмента при обработке различных материалов. Необходимо также получить сведения о допустимых нормах износа, о характере влияния смазывающе-охлаждающей жидкости /СОЖ/ на протекание износа и стойкость фрез.

Целью данной работы явилось исследование эксплуатационных свойств ЦТПФ. При проведении этих исследований ставились следующие задачи: исследования оптимальной геометрии, стойкостных, температурных и динамических зависимостей, а также оценка прочности инструмента при прорезке узких пазов в деталях из жаро-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1202551

Соколов В. А. Исследование

прочной стали аустенитного класса марки ЭИ654, углеродистой конструкционной качественной стали марки 45 и серого чугуна марки СЧ21-40. У исследуемых образцов из стали ЭИ654 и стали 45 контролировались механические свойства, химический состав и микроструктура, а у образцов из серого чугуна - твердость и микроструктура.

Экспериментальные исследования проводились на горизонтально-фрезерном станке.

ЦТПФ устанавливались на оправке и зажимались гайкой через набор установочных колец. Свободный конец оправки подпирался вращающимся центром.

ЦТПФ имели наружный диаметр 63 мм. Ширина фрезы была равна 3 мм, а число зубьев $Z = 18$. В качестве инструментального материала были приняты марки твердого сплава Т15К3, ВК6М и ВК10М. Фрезы имели переходные режущие лезвия. Перед началом экспериментального исследования у ЦТПФ контролировались удельный вес инструментального материала, геометрические параметры режущей части зубьев, шероховатость затачиваемых поверхностей, радиальное и торцевое биения зубьев при установке фрезы на оправке.

Диссертация состоит из пяти глав.

Глава первая посвящена исследованию оптимальных геометрических параметров режущей части зубьев ЦТПФ и стойкостных зависимостей при фрезеровании узких пазов.

В процессе проведения экспериментального исследования производилось периодическое измерение линейного износа по главным задним поверхностям A_z и по задним поверхностям переходных режущих лезвий A_y . При определении периода стойкости ЦТПФ принималась во внимание величина среднего арифметического износа по задним поверхностям переходных режущих лезвий. Контролировался также износ ЦТПФ по ширине.

Исследования оптимальных геометрических параметров режущей части зубьев фрез при обработке стали ЭИ654 и стали 45 были проведены при двух значениях подачи на зуб, а именно: 0,005 мм/зуб и 0,02 мм/зуб.

Ввиду отсутствия производственного опыта фрезерования стали ЭИ654 и стали 45 ЦТПФ были проведены предварительные опыты, в результате чего была выбрана скорость резания, равная 28 м/мин, при попутном фрезеровании всухую стали ЭИ654 фрезами из твердого сплава ВК10М, а для обработки стали 45 фрезами из твердого сплава ВК6М скорость резания составляла 48 м/мин.

Обработка стали 45 проводилась в условиях встречного фрезерования с применением в качестве СОЖ 10%-го водного раствора эмульсола НТЛ-205.

При этих значениях скорости резания имели место равномерное изнашивание ЦТПФ, отсутствие сколов режущих лезвий и значительных отслоений инструментального материала по задним поверхностям режущих зубьев.

Глубина обрабатываемого паза $\Phi = 4$ мм наиболее типична при фрезеровании узких пазов.

При исследовании влияния величины заднего угла на стойкость фрез величина переднего угла была принята равной 5° .

Оптимальная величина заднего угла прорезных фрез была определена при двух значениях подачи на зуб не только по максимальной стойкости инструмента, но и по целому ряду других признаков: по максимальной длине обработанной поверхности паза, по минимальному радиальному износу, по минимальному объемному износу, по максимальной суммарной стойкости и по признаку обеспечения прочности режущих лезвий. В результате комплексного исследования оптимальной величины заднего угла прорезных фрез было установлено:

1. При обработке жаропрочной стали ЗИ654 ЦТПФ из твердого сплава ВК10М оптимальная величина заднего угла α равна 30° ;

2. При обработке с охлаждением конструкционной качественной стали марки 45 ЦТПФ из твердого сплава ВК6М оптимальная величина заднего угла α составляет 20° ;

3. При постоянной подаче на зуб максимальную стойкость имеют фрезы с такими значениями задних углов, при которых еще не началось скалывания режущих лезвий.

Кроме того, была установлена зависимость величины заднего угла α от величины подачи на зуб, при которой прочность режущих лезвий будет достаточна для осуществления процесса резания.

Исследования оптимальной величины переднего угла, проведенные при подаче на зуб, равной 0,02 мм/зуб, показали, что оптимальная величина переднего угла равна 5° как при обработке стали ЗИ654 так и при обработке стали 45.

Исследования зависимости стойкости инструмента от параметров режима резания и величины износа были проведены при обработке стали ЗИ654 и стали 45 фрезами, имеющими оптимальные

значения задних и передних углов, а при обработке серого чугуна СЧ21-40 величина заднего угла составляла 15° , величина переднего угла была равна 5° .

Как было установлено предварительными опытами при обработке стали ЭИ654, эксплуатация ЦТПФ при величине износа по задним поверхностям переходных режущих лезвий свыше 0,3 мм сопряжена с опасностью разрушения корпуса фрезы.

Кроме того, при величине износа свыше $h_y = 0,3$ мм наблюдались значительные отслоения частиц инструментального материала по задним поверхностям. Поэтому при проведении стойкостных исследований за норму износа была принята величина износа по задним поверхностям переходных режущих лезвий h_y , равная 0,3 мм.

Исследования режущих свойств ЦТПФ при обработке стали 45 проводились фрезами из твердых сплавов ВК10М, Т15К6 и ВК6М, а при обработке стали ЭИ654 и серого чугуна СЧ21-40 ЦТПФ из твердого сплава ВК10М.

Применение охлаждения при обработке стали 45 ЦТПФ из твердого сплава ВК6М обеспечило отсутствие схватывания стружки с передней поверхностью. Инструмент не ломался. Кроме того, высота микронеровностей дна и стенок обрабатываемого паза уменьшилась по сравнению с обработкой без использования СОЖ.

При проведении стойкостных исследований износ ЦТПФ происходил, в основном, за счёт истирания задних поверхностей инструмента. Однако, на повышенных скоростях резания $V \geq 36$ м/мин при обработке стали ЭИ654 и $V \geq 48$ м/мин при обработке стали 45/ на задних поверхностях наблюдались следы отслаивания инструментального материала, имеющие серый цвет.

Пределы изменения параметров режима резания при проведении стойкостных исследований представлены в таблице.

Обрабатываемый материал:	ЭИ654	:	Сталь 45	:	СЧ21-40
Скорость резания, м/мин:	11...48	:	12...75	:	57...115
Подача на зуб, мм/зуб	0,0054...0,026	:	0,0028...0,032	:	0,01...0,05
Глубина паза, мм	2...8	:	2...8	:	2,5...10

Стойкость ЦТПФ была оценена как по времени работы фрезы до затупления T , так и по времени непосредственного резания T_p и по длине поверхности обработанного паза L . Зависимости стой-

кости фрез по времени работы фрезы до затупления и по времени непосредственного резания дополнительно аппроксимированы рядами Фурье с целью описания этой частной зависимости стойкости единой формулой во всём диапазоне изменения скорости резания.

На основании математической обработки результатов стойкостных исследований были установлены частные зависимости стойкости ЦТПФ из твердого сплава ВК10М при обработке стали ЭИ654 и серого чугуна СЧ21-40 и ЦТПФ из твердого сплава ВК6М при обработке с охлаждением стали 45 от параметров режима резания и величины износа и получены общие зависимости стойкости от указанных выше факторов, имеющие вид:

$$T = \frac{C \eta_n^x}{V^n S^{y_1} t^{y_2}} \quad (1)$$

Постоянные величины этих уравнений были определены исходя из экспериментальных данных.

Экспериментальными исследованиями установлено:

1. При обработке стали ЭИ654 и серого чугуна СЧ21-40 зависимости стойкости от скорости резания имеют экстремальный характер. Максимум стойкости T имеет место при скорости резания

$V = 17$ м/мин при обработке стали ЭИ654 и при $V = 73$ м/мин при обработке серого чугуна СЧ21-40. При обработке стали 45 имеет место изменение степени влияния скорости резания на стойкость T при значении $V = 37$ м/мин.

2. Зависимости стойкости от величины подачи на зуб и глубины обрабатываемого паза — монотонно убывающие.

3. Максимальная длина обработанного паза соответствует такому граничному режиму резания, при котором ещё не происходит изменения характера протекания износа.

4. При обработке стали 45 прорезные фрезы из твердого сплава марок ВК10М и Т15К6 обладают худшими режущими свойствами по сравнению с прорезными фрезами из твердого сплава ВК6М.

5. При обработке стали 45 применение СОЖ повышает допустимую величину износа фрез; улучшает чистоту обработанных поверхностей; увеличивает длину паза, получаемую за один период стойкости; позволяет вести обработку на больших скоростях резания.

В главе второй изложены результаты экспериментального исследования динамических зависимостей ЦТПФ. Динамические исследования были проведены с целью получения необходимых данных для расчета на жесткость и прочность системы СПИД.

Оценка величины силы резания производилась по результатам измерения её составляющих: горизонтальной - A_g , вертикальной - P_g и окружной - P_{Σ} . Для измерения A_g и P_g использовался универсальный трехкомпонентный динамометрический стол, а для измерения окружной составляющей A_{Σ} применялась специально сконструированная динамометрическая оправка. При измерении составляющих силы резания были использованы тензометрический усилитель модели ТУ-6М, на выходе которого стоял фильтр для снятия наводок, и шлейфный осциллограф Н700. Все эксперименты по определению динамических зависимостей были проведены без применения СОМ.

Динамические исследования были проведены ЦТПФ с теми же геометрическими параметрами и в тех же диапазонах изменения параметров режима резания, что и при статических исследованиях.

При встречном фрезеровании стали 45 ЦТПФ из твердого сплава ВК10М составляющие силы резания P_g и P_{Σ} достигали значительных величин /до 50 кг/ и были сравнимы с силами при резании жаропрочной труднообрабатываемой стали ЭИ654.

Составляющие силы резания при фрезеровании стали 45 ЦТПФ из твердого сплава ВК6М и Т15К6 в 3 - 4 раза меньше, чем при обработке фрезами из твердого сплава ВК10М.

На основании математической обработки результатов динамических исследований были установлены зависимости составляющих сил резания от параметров режима резания и состояния инструмента, имеющие вид:

$$P = C_p S_x^x t^y K_v K_u \quad (2)$$

Значения постоянной величины C_p , показателей степеней x и y , а также коэффициентов K_v и K_u были определены при попутном фрезеровании стали ЭИ654 ЦТПФ из твердого сплава ВК10М, при встречном фрезеровании стали 45 ЦТПФ из твердого сплава марок ВК10М, Т15К6 и ВК6М и при встречном фрезеровании серого чугуна СЧ21-40 ЦТПФ из твердого сплава ВК10М.

В результате проведенных динамических исследований фрезерования конструкционных материалов ЦТПФ было установлено:

1. Зависимости составляющих сил резания от величины подачи на зуб и глубины обрабатываемого паза имеют монотонно возрастающий характер.

2. При исследовании зависимостей составляющих сил резания от скорости резания был выявлен экстремальный характер этих зависимостей. В исследованных диапазонах изменения скорости резания поправочный коэффициент K_v , учитывающий влияние скорости

резания на составляющие силы резания, достигает значительной величины, равной $K_V = 1,3...1,6$.

3. Составляющие силы резания возрастают приблизительно в 1,5 - 2 раза при фрезеровании затупленным инструментом, то есть коэффициент, учитывающий затупление фрезы, $K_u \approx 1,5...2$.

4. При попутном направлении подачи уровень величин составляющих силы резания P_{ϕ} и P_z ниже /до 20%/, чем при встречном фрезеровании.

5. Вертикальная составляющая силы резания при встречном направлении подачи более чем в два раза меньше по величине горизонтальной составляющей.

В главе третьей представлены результаты исследования температуры в зоне резания и теплового поля ЦТПФ. Проведение этих исследований было необходимо для более полного и достоверного объяснения стойкостных зависимостей и получения данных для аналитического расчета температурных напряжений в корпусе инструмента.

Температура в зоне резания измерялась методом естественной термопары в начальный период работы, когда ещё фреза не успевала нагреться и все стыки измерительной цепи имели температуру помещения, что исключало возможность появления паразитных ТЭДС. Запись ТЭДС производилась осциллографом Н700 с помощью гальванометра типа МООІ-Іа. При оценке температуры в зоне резания принималась в расчёт средняя величина отклонения луча шлейфа кривой ТЭДС, имеющей пикообразный характер.

Исследование теплового поля фрезы проводилось с помощью искусственных термопар /хромель-алюмель/, приваренных к различным точкам корпуса фрезы, специального токосъёмника с медными контактными элементами, шлейфного осциллографа Н700 с гальванометрами типа МООІ-І и МООІ-Іа. Исследование теплового поля фрезы имело своей целью вывод уравнения температуры в любой точке фрезы в зависимости от положения её относительно центра фрезы и параметров режима резания.

Геометрические параметры и пределы изменения режимных параметров были такими же, что и при проведении стойкостных исследований.

При исследовании теплового поля фрез влияние установочных колец не учитывалось, то есть предполагалось, что температура корпуса фрезы от диаметра установочного кольца до диаметра внутреннего отверстия изменяется незначительно.

Было установлено, что температура точки не зависит от угла поворота фрезы.

Математическая обработка результатов температурных исследований позволила записать зависимости температуры в зоне резания от параметров режима резания и степени затупления инструмента в следующем виде:

$$\theta_{\text{з.т.п.}}^{\circ} = C V^{\alpha} S_z^{\beta} t^{\gamma} K_{\text{л}} K_{\text{сж}} \quad (3)$$

Зависимости температуры точек корпуса фрезы от положения их относительно центра фрезы при обработке без применения СОЖ можно выразить уравнением:

$$\theta_z^{\circ} = \left[A \left(\frac{r}{R_n} \right)^B + (1-A) \right] \theta_{\text{з.т.п.}}^{\circ} \quad (4)$$

Константы уравнений / 3 / и / 4 / определены по результатам проведенных экспериментальных исследований.

Исследования температуры в зоне резания, проведенные при обработке различных конструкционных материалов ЦТПФ, показали:

1. Наибольшее влияние на температуру в зоне резания оказывает скорость резания V , затем величина подачи на зуб S_z и глубина обрабатываемого паза t . Все полученные зависимости температуры в зоне резания от параметров режима резания имеют монотонно возрастающий характер.

2. При исследовании зависимостей температуры в зоне резания от скорости резания было отмечено замедление роста температуры в диапазонах скоростей резания, соответствующих максимальной длине обработанной поверхности паза.

3. При фрезеровании стали 45 без применения СОЖ наибольшая температура в зоне резания имеет место при использовании ЦТПФ из твердого сплава Т15К6, причём СОЖ недостаточно эффективно понижает температуру в зоне резания.

Исследованиями теплового поля ЦТПФ было установлено:

1. Вследствие сравнительно низкой теплопроводности твердого сплава значительному нагреву подвергается лишь узкая зона на периферии фрезы. В результате неравномерного нагрева корпуса фрезы в нем могут возникнуть внутренние температурные напряжения.

2. При обработке без СОЖ характер тепловых полей ЦТПФ при фрезеровании стали ЭИ654, стали 45 и серого чугуна СЧ21-40 остается постоянным.

3. Применение СОЖ при обработке стали 45 снизило температуру корпуса ЦТПФ из твердого сплава ВК6М до температуры окружающей

среды.

Глава четвертая посвящена исследованиям прочности ЦТФ, которые были проведены аналитически с использованием зависимостей, установленных в теории прочности и теории упругости.

Основными причинами возникновения внутренних напряжений в корпусе фрезы являются сила резания и неравномерность нагрева различных участков корпуса фрезы.

Исследование напряжений, возникающих от действия силы резания, было проведено аналитически с использованием зависимостей, определяющих величины компонент напряжения в диске от действия произвольно ориентированной силы на контуре и уравнивающих её силы и пары в центре.

В корпусе ЦТФ возникают окружные напряжения σ_t , радиальные напряжения σ_r и касательные напряжения τ , которые определяются следующими выражениями:

$$\sigma_r = -\frac{2P \cos \theta}{\pi z} \left[\frac{3+\mu}{8} - \frac{1-\mu}{8} \cdot \frac{z^2}{z_1^2} + \frac{z^2 R^2 \sin^2(\theta - \theta_0)}{z_1^4} \right] - \frac{2PR \cos \theta_0}{\pi z_1^2} \left[1 - \frac{z_1^2}{4R^2} - \frac{R^2}{z_1^2} \sin^2(\theta - \theta_0) \right]; \quad (5)$$

$$\sigma_t = \frac{2P \cos \theta}{\pi z} \left[\frac{1-\mu}{8} + \frac{3(1+\mu)}{8} \frac{z^2}{R^2} + \frac{z^2 R^2 \sin^2(\theta - \theta_0)}{z_1^4} \right] + \frac{2P \cos \theta_0}{\pi z_1^2} \left[\frac{z_1^2}{4R^2} - \frac{R^2}{z_1^2} \sin^2(\theta - \theta_0) \right]; \quad (6)$$

$$\tau = -\frac{2PR^3 \sin(\theta - \theta_0)}{\pi z_1^4} \left[\frac{z}{R} - \cos(\theta - \theta_0) \right] \left(\cos \theta_0 - \frac{z}{R} \cos \theta \right) + \frac{P \sin \theta}{4\pi z} \left[(1-\mu) + (1+\mu) \frac{z^2}{R^2} \right] + \frac{PR \sin \theta_0}{2\pi z^2} \quad (7)$$

где P — сила резания;
 z — радиус, задающий положение рассматриваемой точки;
 z_1 — расстояние от точки приложения силы резания до рассматриваемой точки;
 θ_0 — угол приложения силы резания;
 θ — угол, задающий положение рассматриваемой точки;
 R — наружный радиус фрезы;
 μ — коэффициент Пуассона.

Исследование напряженного состояния фрез от действия силы резания проводилось в предположении, что сила резания действует

в срединной плоскости фрез на ее внешнем диаметре, а точка приложения силы резания делит дугу контакта в отношении 2 : 1.

В результате исследования было установлено, что компоненты напряжения /радиальное напряжение σ_r , окружное напряжение σ_t и касательное напряжение τ / возрастают с уменьшением радиуса r . Наименьшее значение радиуса r соответствует величине радиуса установочного кольца. Расчет компонент напряжения производился на наружном диаметре установочных колец.

Проведенные исследования компонент напряжений σ_r , σ_t и τ показали, что наибольшие величины этих напряжений имеют место в зоне приложения силы резания.

Исследование напряженного состояния корпуса ЦТПФ было проведено для случая обработки стали ЭИ654 затупленными фрезами, так как динамическими исследованиями было установлено, что при этом имеют место наибольшие значения составляющих силы резания.

При исследовании температурных напряжений в корпусе ЦТПФ ввиду малости угла бокового поднутрения толщина фрезы принималась постоянной и равной 3 мм. Кроме того, предполагалось, что фреза является диском, так как глубина стружечных канавок, особенно после многократных переточек, мала по сравнению с радиусом фрезы.

Температурные напряжения были исследованы с помощью аналитического метода расчета напряжений во вращающемся неравномерно нагретом диске. В корпусе ЦТПФ из-за неравномерного нагрева возникают радиальные σ_r и окружные σ_t температурные напряжения, которые определяются следующими выражениями:

$$\sigma_r = \frac{E\alpha}{\nu^2} \left\{ \frac{r^2 - R_{вн}^2}{R_{вн}^2 - R_{вн}^2} \int_{R_{вн}}^{R_{вн}} \left[A \left(\frac{r}{R_{вн}} \right)^6 + (1-A)z dz - \int_{R_{вн}}^r \left[A \left(\frac{r}{R_{вн}} \right)^6 + (1-A) \right] z dz \right\} C V^k S_z^l t^m K_u \quad (8)$$

$$\sigma_t = \frac{E\alpha}{\nu^2} \left\{ \frac{r^2 - R_{вн}^2}{R_{вн}^2 - R_{вн}^2} \int_{R_{вн}}^{R_{вн}} \left[A \left(\frac{r}{R_{вн}} \right)^6 + (1-A)z dz - \int_{R_{вн}}^r \left[A \left(\frac{r}{R_{вн}} \right)^6 + (1-A) \right] z dz - \left[A \left(\frac{r}{R_{вн}} \right)^6 + (1-A) \right] z^2 \right\} C V^k S_z^l t^m K_u \quad (9)$$

Эти выражения получены на основе результатов исследований тепловых полей ЦТПФ и были использованы при исследовании напряженного состояния корпуса ЦТПФ при обработке без применения СОЖ.

стали ЭИ654, стали 45 и серого чугуна СЧ21-40.

Исследованиями температурных напряжений в корпусах ЦТПФ при обработке всухую конструкционных материалов было установлено, что величины температурных напряжений зависят от физико-механических свойств твердого сплава и обрабатываемого материала, параметров режима резания и величины затупления инструмента.

При увеличении параметров режима резания температурные напряжения возрастают. Наибольшее влияние на величину температурных напряжений оказывает скорость резания V , затем величина подачи на зуб S_z и глубина обрабатываемого паза t .

В результате проведенных исследований было установлено, что радиальные напряжения являются напряжениями растяжения от диаметра посадочного отверстия до наружного диаметра, а окружные напряжения на диаметре посадочного отверстия являются напряжениями растяжения, а на периферии фрезы — напряжениями сжатия, причём зависимость окружных напряжений в точках корпуса фрезы от их расстояния до центра фрезы является монотонно убывающей.

По величине окружные напряжения на диаметре посадочного отверстия приблизительно втрое превосходят максимальную величину радиальных напряжений. Они лимитируют прочность корпуса ЦТПФ, так как для твердого сплава наиболее опасными являются напряжения растяжения.

Исследование влияния наружного диаметра фрез на температурные напряжения было проведено на основе анализа зависимости:

$$\sigma_t = f(v, V, S_z, t, h_v) \quad (9)$$

Проведенными ранее исследованиями было установлено, что радиальные температурные напряжения по своей величине составляют менее 30% от величины окружных напряжений, поэтому влияние наружного диаметра фрез на изменение напряженного состояния исследовалось на примере окружных температурных напряжений σ_t .

Влияние наружного диаметра фрез D_n на величину температурных напряжений σ_t исследовалось при обработке ЦТПФ из твердого сплава ВК10М стали ЭИ654. При этом предполагалось, что параметры режима резания остаются постоянными и равными: $V = 44$ м/мин; $S_z = 0,01$ мм/зуб; $t = 4$ мм, а уравнение теплового поля фрез имеет следующий вид:

$$\theta_t^* = \left[0,625 \left(\frac{z}{R_n} \right)^n + 0,175 \right] \theta_{a.t.}^*$$

Исследованиями было установлено, что увеличение наружного диаметра фрезы при постоянстве параметров режима резания приводит

к увеличению абсолютной величины температурных напряжений.

На основании проведенных исследований температурных напряжений, исходя из условия сохранения прочности корпуса ЦТПФ, в работе даны практические рекомендации по ограничению параметров режима резания и наружного диаметра фрез.

Исследованиями напряженного состояния корпуса ЦТПФ было установлено, что температурные напряжения в корпусе инструмента значительно превосходят по величине напряжения, возникающие от действия силы резания, и лимитируют прочность корпуса ЦТПФ.

Глава пятая посвящена исследованию экономической эффективности применения ЦТПФ. Результаты проведенных стойкостных исследований позволили произвести оценку экономической эффективности замены быстрорежущих фрез ЦТПФ.

Составляющими экономического эффекта являются экономия рабочего времени и снижение затрат на эксплуатацию инструмента.

Исследованиями экономической эффективности ЦТПФ установлено:

1. Экономический эффект при замене быстрорежущего инструмента ЦТПФ при обработке конструкционных материалов получается за счёт экономии рабочего времени и снижения затрат на эксплуатацию инструмента.

2. При эксплуатации ЦТПФ повышение параметров режима резания приводит к увеличению суммарного экономического эффекта за год на одном рабочем месте.

3. Обработка стали 45 ЦТПФ из твердого сплава ВК6М на низких режимах резания / $V = 37$ м/мин; $f_z \leq 0,01$ мм/зуб / экономически нецелесообразна.

4. Наибольший экономический эффект за год на одном рабочем месте имеет место при обработке стали ЭИ654 и серого чугуна СЧ21-40.

Общие выводы

1. Комплексный характер исследований цельных твердосплавных прорезных фрез, а именно, проведение стойкостных, динамических и температурных исследований, позволил произвести всестороннюю оценку работоспособности ЦТПФ из различных марок твердого сплава при обработке типовых представителей конструкционных материалов /жаропрочной стали ЭИ654, углеродистой качественной стали 45 и серого чугуна СЧ21-40/.

2. Исследованы оптимальные геометрические параметры режу-

щей части ЦТПФ. Исследования оптимальной геометрии инструмента было проведено при двух значениях подачи на зуб по следующим признакам: по минимальному линейному износу, по минимальному радиальному износу, по минимальному объемному износу, по признаку обеспечения достаточной прочности режущих лезвий и по максимальной суммарной стойкости инструмента. На основе проведенных исследований даны практические рекомендации по оптимальным геометрическим параметрам ЦТПФ.

3. Установлены зависимости стойкости ЦТПФ от параметров режима резания и величины износа. Стойкость фрез была выражена не только общим временем работы, но и длиной обработанной поверхности паза и временем непосредственного резания, что дает возможность произвести более полную оценку режущих свойств ЦТПФ.

4. Динамическими исследованиями фрезерования узких пазов ЦТПФ были установлены зависимости составляющих силы резания от параметров режима резания и степени затупления инструмента. Полученные зависимости могут быть положены в основу расчёта отдельных элементов системы СПИД на прочность и жесткость.

5. Проведены температурные исследования ЦТПФ, в результате чего были получены зависимости температуры в зоне резания от параметров режима резания и степени износа фрез. Установлены уравнения тепловых полей прорезных фрез при обработке типовых представителей конструкционных материалов. Полученные данные имеют большое значение при оценке эксплуатационных свойств ЦТПФ.

6. Проведенными исследованиями напряженного состояния корпуса ЦТПФ от действия силы резания и неравномерного нагрева корпуса инструмента показано, что прочность корпуса ЦТПФ лимитируют температурные напряжения, которые значительно превосходят по величине напряжения, возникающие в корпусе инструмента от действия силы резания.

7. Установлено, что наибольшее влияние на величину температурных напряжений оказывает скорость резания и наружный диаметр фрез. Проведенные исследования позволяют определить предельные значения скорости резания как главного фактора производительности при использовании ЦТПФ и наружного диаметра как одного из основных параметров конструкции фрез исходя из условия обеспечения прочности инструмента.

8. Результаты проведенных исследований были положены в основу расчёта технико-экономической эффективности применения ЦТПФ. Анализ технико-экономической эффективности применения в условиях

производства этого типа режущего инструмента вместо быстрорежущих прорезных фрез показал, что при обработке исследованных типовых представителей конструкционных материалов обеспечивается значительный экономический эффект. Например, экономия за год на одном рабочем месте при обработке стали ЭИ654 достигает 20.000 рублей. Установлено, что при эксплуатации ЦТФ повышение параметров режима резания приводит к увеличению суммарного экономического эффекта за год на одном рабочем месте.

9. Проведение исследования оптимальной геометрии, стойкостных, динамических и температурных зависимостей, исследования прочности и экономической эффективности применения ЦТФ обеспечивают их широкое применение в различных отраслях машиностроения.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ваклунов Е.Д., Соколов В.А. Оптимальная геометрия цельных твердосплавных прорезных фрез. В сб. "Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент". НИИМАШ, 1972, № 5.

2. Ваклунов Е.Д., Соколов В.А. Стойкость цельных твердосплавных прорезных фрез при обработке конструкционных материалов. В сб. "Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент". НИИМАШ, 1972, № 8.