



Никитин Александр Владимирович

**Технологическое обеспечение качества деталей с маложесткими
элементами при раздельной двухсторонней механической обработке**

2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт Петербург
2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель:

Васильков Дмитрий Витальевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и производство артиллерийского вооружения» ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова» (г. Санкт-Петербург).

Официальные оппоненты:

Гузев Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология автоматизированного машиностроения» ФГАОУ ВО «Южно-уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (г. Челябинск).

Дмитриев Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент отделения инженерных технологий Передовой инженерной школы гибридных технологий в станкостроении Союзного государства ФГБОУ ВО «Псковский государственный университет» (г. Псков).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» (г. Санкт-Петербург).

Защита диссертации состоится «25» марта 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета У.2.5.6.26. федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный учебный корпус, аудитория 346.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, У.2.5.6.26,
кандидат технических наук



Хрусталева
Ирина Николаевна

Общая характеристика работы

Актуальность. Работоспособность технологических машин различного назначения в значительной степени определяется качеством изготовления деталей, причем, повышенные требования предъявляются к деталям, в том числе с маложесткими элементами, работающим в особо тяжелых условиях эксплуатации. К данным деталям предъявляются жесткие требования по точности размеров, формы и расположения, а также по шероховатости поверхности. Основную проблему составляет обеспечение точности формы при отдельной двухсторонней обработке упругих элементов. Основной причиной являются остаточные деформации, которые приводят к деформированию деталей после каждой обработки. Происходит технологическое наследование отклонений при последовательном выполнении переходов (операций). В результате требования по точности не выполняются. Приходится осуществлять оперативное технологическое вмешательство в процесс изготовления деталей с добавлением ручных операций. Применение новых технологий, позволяющих обоснованно выбрать технологические режимы, исключающие остаточные деформации после каждой обработки является важной проблемой, требующей решения.

Данная проблема является особенно актуальной при изготовлении деталей с маложесткими элементами, таких как диски, фланцы, турбинные лопатки, лопасти, уплотнения, тонкостенные корпуса, рамные, каркасные и континуальные конструктивы. Высокие стоимость и требования к надежности указанных деталей ведут к необходимости гарантированного обеспечения заданного уровня отклонений размеров, формы и расположения, удовлетворяющего требованиям качества их изготовления.

Одним из путей решения указанной проблемы является разработка комплекса методик направленного формирования технологических режимов по критериям обеспечения точности размеров и неизменяемости формы поверхностей при отдельной двухсторонней обработке деталей с маложесткими элементами. Это определяет актуальность научно-технической задачи обеспечения высокопроизводительной механической обработки заготовок с маложесткими элементами при гарантированном обеспечении требуемого качества. Актуальность данного направления исследований подтверждается также участием в Федеральных целевых программах «Развитие инновационной инфраструктуры вузов» в рамках государственного контракта № 13.G37.31.0051 и «Разработка систем мониторинга и диагностики устройств исполнительной автоматики, обеспечивающих длительное автономное функционирование перспективных космических платформ связи для освоения труднодоступных территорий Российской Федерации, удаленных районов мирового океана и Арктики» в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 (соглашение № 075 11-2019-077 от 13.12.2019).

Объектом исследования является технология изготовления деталей различной конфигурации.

Предмет исследования – технология отдельной двухсторонней механической обработки заготовок с маложесткими элементами.

Целью исследования является технологическое обеспечение качества деталей с маложесткими элементами на основе технологии отдельной двухсторонней бездеформационной обработки, по критериям неизменяемости формы.

Для достижения указанной цели в работе поставлена и решена научная задача:

Разработка моделей, методов и методик по обеспечению неизменяемости формы при последовательной отдельной двухсторонней обработке деталей с маложесткими элементами.

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. Предложен метод частотной отстройки возмущающей силы от частоты колебаний закрепленной заготовки, который позволил исключить влияние периодического воздействия и получить динамическую характеристику фрезерования на единых с точением математических принципах с максимально допустимым упрощением динамической модели.

2. Получена моментная характеристика деформирующей способности технологических остаточных напряжений как мера упругого последствия, которая определяет отклонение формы поверхностей и не зависит от размеров обрабатываемой детали.

3 Предложен метод неизменяемости формы поверхностей при последовательной раздельной обработке деталей с маложесткими элементами на основе критериев: бездеформационного, определяющего предельно допустимое значение не приводящей к остаточным деформациям деформирующей способности технологических остаточных напряжений, и уровневых, определяющих допустимую величину поверхностных и подповерхностных технологических остаточных напряжений.

4. Разработана методика последовательной раздельной обработки деталей с маложесткими элементами за несколько циклов, каждый из которых предусматривает раздельную обработку с двух сторон без перезакрепления с одинаковым припуском, экспоненциально уменьшающимся на последующих циклах, причем, каждая обработка выполняется на режимах, соответствующих критериям неизменяемости формы.

Практическая значимость выполненных разработок заключается в следующем:

1. Выполнена апробация модельных решений по обеспечению качества с учетом упругого последствия технологических остаточных напряжений при последовательной раздельной обработке поверхностей маложестких элементов деталей.

2. Разработана технология раздельной механической обработки деталей с маложесткими элементами, обеспечивающая точность формы и расположения поверхностей посредством циклической двухсторонней бездеформационной обработки с последовательным уменьшением припуска

Достоверность полученных научных результатов подтверждена результатами сопоставительных теоретических и экспериментальных исследований, имеющих высокую сходимость, а также положительным опытом внедрения разработанных методик и рекомендаций на предприятиях России

Работа соответствует паспорту специальности – 2.5.6. «Технология машиностроения» пункту 7. Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин.

Реализация в промышленности. Результаты исследований по обеспечению качества при изготовлении деталей с маложесткими элементами внедрены на предприятиях: ОАО «ВНИИ «Сигнал», ООО «ЛП технология»

Апробация работы. Представленные в диссертации результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на МНТК «Уткинские чтения» в БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова в 2015 г., на XII Всероссийском совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники» в МГТУ им Баумана в 2016 г., на МНПК «Технологии упрочнения нанесения покрытий и ремонта: теория и практика». СПб. Политехническом университете в 2016 г., на МНПК «Проблемы эффективного использования научного потенциала общества» в Челябинске в 2017 г, на МНПК «Междисциплинарность науки как фактор инновационного развития» в Екатеринбурге в

2017 г., на МНПК «Прорывные научные исследования как двигатель науки» в Стерлитамаке в 2017 г., на МНПК «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018» в СПб. Горном университете в 2018 г., на V МНПК молодых ученых, аспирантов и студентов ПНИПУ в Перми в 2022 г., на МНПК, посвященной 125-летию Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого в 2024 г.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 27 печатных работ, в том числе, 10 статей опубликованы в журналах ВАК, 5 статей индексируются в Scopus и Web of Science,. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 83 рисунка и 12 таблиц. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 148 наименований, и 1 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Поставлены цель и задачи, а также отражены научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава посвящена анализу литературы по тематике диссертационной работы. К числу деталей с маложесткими элементами относится большое количество изделий, к которым предъявляются высокие требования по качеству изготовления. Их особенностями является то, что маложесткие элементы обрабатываются с двух сторон отдельно. При реализации технологических решений по изготовлению данных деталей возникает проблема обеспечения точности формы их функциональных поверхностей. Для предварительной и финишной обработки многих из них используется лезвийный режущий инструмент.

Основными представителями типовых деталей с маложесткими элементами являются тонкостенные диски, такие как покрывные диски ротора газотурбинного двигателя, опорные диски аксиально-поршневых гидромашин, корпуса и каркасы для установки элементов гироскопических систем, полые корпуса систем терморегулирования космических аппаратов, втулки, вкладыши и др. Анализ проблем, связанных с обеспечением качества при изготовлении перечисленных деталей показал следующее:

1. Основной проблемой обработки деталей с маложесткими элементами является обеспечение точности формы функциональных поверхностей.

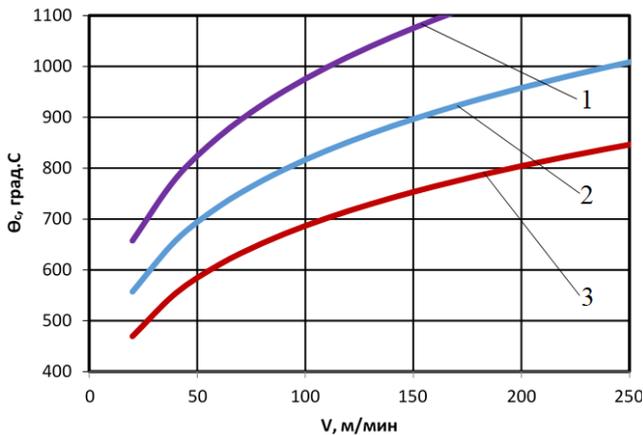
2. Раздельная обработка отдельных поверхностей маложестких элементов приводит к остаточным деформациям, компенсация которых представляет большие сложности.

3. Для достижения требований шероховатости отдельных поверхностей применяют шлифование, которое сопровождается повышенными температурами в зоне резания и приводит к нежелательным при эксплуатации растягивающим остаточным напряжениям. В результате возникают остаточные деформации, приводящие к искажению формы функциональных поверхностей. Проблемы нарастают в последовательности обработки поверхностей.

4. Наличие маложестких элементов у обрабатываемых деталей может приводить при обработке к нежелательным вибрациям. Для их исключения необходимо формировать область технологических режимов, обеспечивающих спокойное резания без высокого уровня вибраций.

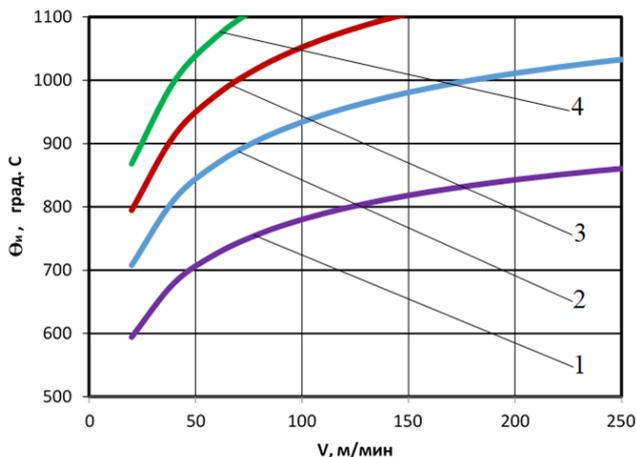
Во второй главе выполнено исследование теплофизических, силовых и динамических характеристик технологической системы механической обработки (ТСМО) деталей с маложесткими элементами.

Вычисление теплофизических характеристик в зоне резания выполнено на основе метода источников. Определены источники и стоки теплоты. Получены зависимости: температуры стружкообразования, температуры на поверхности изделия и др. Графики указанных величин в зависимости от скорости резания представлены на рис. 1-2. Вычисления выполнены применительно к обработке точением для трех обрабатываемых материалов: сплава на никелевой основе ХН70ВМЮТ, - титанового сплава ОТ4-0, стали 20Х13.

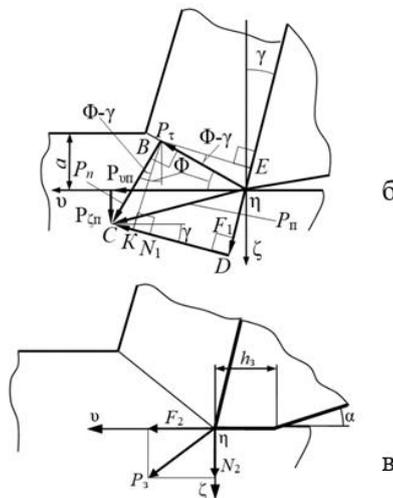
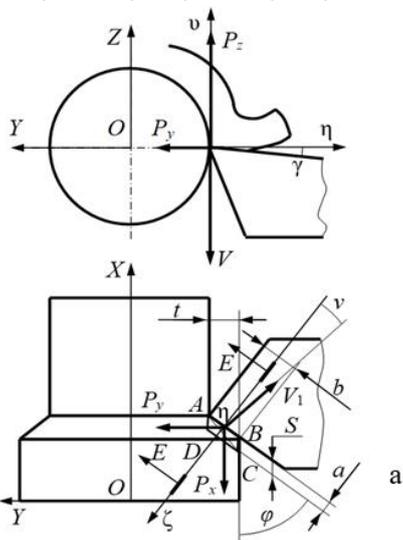


1 — ХН70ВМЮТ 2 — ОТ4-0 3 — 20Х13

Рис. 1. Температура стружкообразования



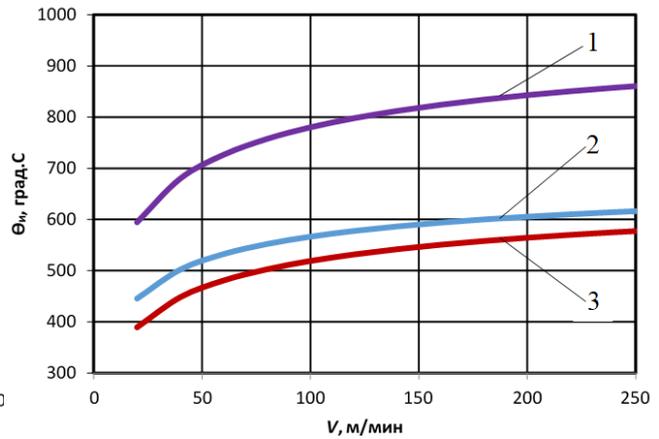
1 — $h_3=0,2$ мм; 2 — $h_3=0,4$ мм; 3 — $h_3=0,6$ мм; 4 — $h_3=0,8$ мм



б

в

Рис.4. Силы резания при точении по: а, б - передней поверхности; в - задней поверхности



1 — ХН70ВМЮТ 2 — ОТ4-0 3 — 20Х13

Рис. 2. Температура на поверхности изделия

Большое влияние на теплофизические характеристики оказывает износ инструмента. На рис. 3 представлено изменение температуры на поверхности изделия из сплава ХН70ВМЮТ при износе по задней поверхности $h_3 = 0,2 \dots 0,8$ мм.

Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности изделия от скорости резания для сплава ХН70ВМЮТ при варьировании фаски износа $h_3 = 0,2 \dots 0,8$ мм

При вычислении теплофизических характеристик определялись компоненты силы резания, как температурозависимые величины. Применительно к обработке точением (рис. 4) определены силы резания со стороны передней и задней поверхностей. Получены проекции силы резания в зависимости от изменения скорости резания, которые представлены в форме статической характеристики

$$P_x = \left\{ k_\tau \sigma_B (1 + \delta) \left[k_g \xi^{0,1} (\xi(1 - 2 \operatorname{tg} \gamma) + 1 / \cos \gamma) \frac{\cos \Phi \cos \varphi}{\cos(\Phi - \gamma)} - \frac{\sin \gamma \cos \varphi}{\cos(\Phi - \gamma) \sin \Phi} + \frac{k_f h_3}{S \mu_2 \tan \varphi} \right] \right\} ab = k_x ab ;$$

$$P_y = \left\{ k_\tau \sigma_B (1 + \delta) \left[k_g \xi^{0,1} (\xi(1 - 2 \operatorname{tg} \gamma) + 1 / \cos \gamma) \frac{\cos \Phi \sin \varphi}{\cos(\Phi - \gamma)} - \frac{\sin \gamma \sin \varphi}{\cos(\Phi - \gamma) \sin \Phi} + \frac{k_f h_3}{S \mu_2} \right] \right\} ab = k_y ab ;$$

$$P_z = \left\{ k_\tau \sigma_B (1 + \delta) \left[k_g \xi^{0,1} (\xi(1 - 2 \operatorname{tg} \gamma) + 1 / \cos \gamma) \frac{\sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)} + \frac{\cos \gamma}{\cos(\Phi - \gamma) \sin \Phi} + \frac{k_f h_3}{S \sin \varphi} \right] \right\} ab = k_z ab ,$$

где σ_B , δ – предел прочности и относительное удлинение при растяжении обрабатываемого материала; ξ – коэффициент усадки стружки; γ – передний угол; k_τ , k_g , k_f – поправочные коэффициенты; μ_2 – коэффициент трения по задней поверхности инструмента; Φ – угол сдвига; k_x , k_y , k_z – коэффициенты приведения. На рис. 5 показаны графики зависимости проекций силы резания P_x , P_y , P_z от скорости резания. Они показывают, что с увеличением скорости резания силу резания уменьшают, что соответствует результатам многочисленных исследований.

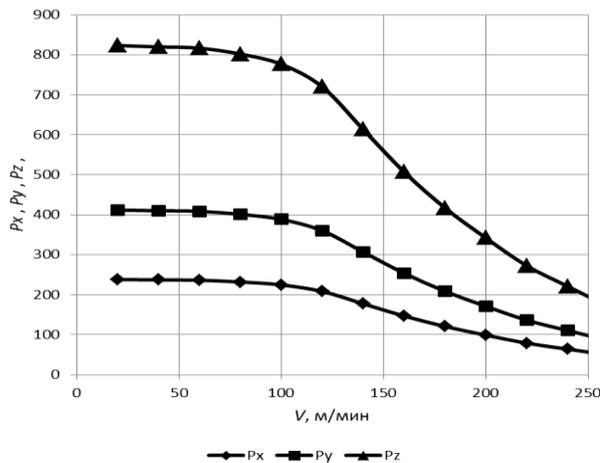


Рис. 5. Зависимость проекций силы резания P_x , P_y , P_z от скорости резания

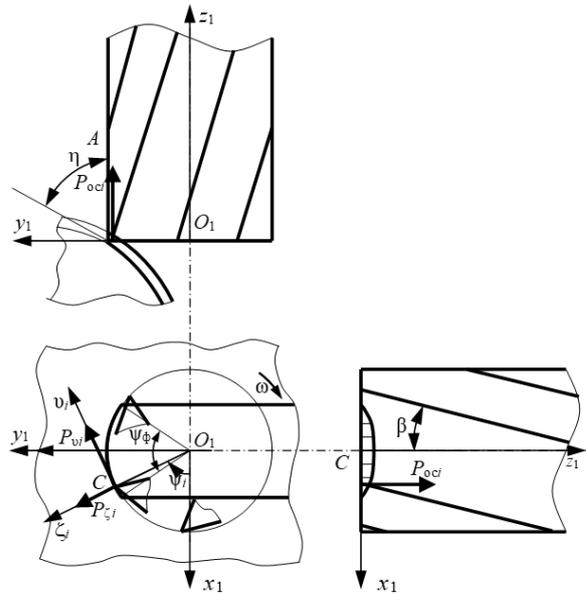


Рис. 6. Силы резания при фрезеровании

Выполнено определение силы резания при фрезеровании (рис. 6). Рассмотрен общий случай контурного фрезерования. При угле положения фрезы $\eta=90^\circ$ получаем торцевое фрезерование. Результаты вычисления составляющих силы резания для i -го зуба фрезы в зависимости от угла его поворота ψ_i сведены в форме статической характеристики в подвижной системе координат $Cv_i \zeta_i z_i$, связанной с фрезой. Окружная P_{vi} , нормальная $P_{\zeta i}$ и осевая P_{oci} составляющие силы резания, действующей на i -й зуб фрезы, определяются по аналогии с выражениями для точения

$$P_{vi} = k_v a_i b_i ; P_{\zeta i} = k_\zeta a_i b_i ; P_{oci} = k_{oc} a_i b_i ,$$

где a_i , b_i – толщина и ширина среза для i -го зуба фрезы при угле его поворота ψ_i ; k_v , k_ζ , k_{oc} – коэффициенты приведения, определяемые выражениями

$$k_{\xi} = k_{\tau} \sigma_B (1 - \delta) \left[k_g \xi^{0,1} \left[\xi (1 - 2 \tan \gamma) + \frac{2}{\cos \gamma} \right] \frac{\cos \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)} - \frac{k_{\tau} \sin \gamma}{\sin \Phi \cos(\Phi - \gamma)} \right];$$

$$k_{\nu} = k_{\tau} \sigma_B (1 - \delta) \left[k_g \xi^{0,1} \left[\xi (1 - 2 \tan \gamma) + \frac{2}{\cos \gamma} \right] \frac{\sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)} + \frac{k_{\tau} \cos \gamma}{\sin \Phi \cos(\Phi - \gamma)} \right];$$

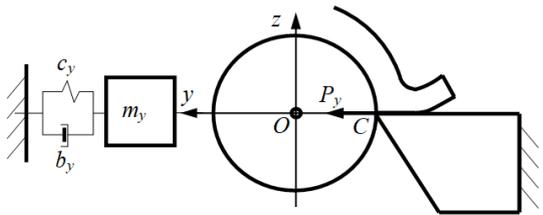
$$k_{oc} = \frac{k_{\tau} \sigma_B (1 - \delta)}{\tan \beta} \left[k_g \xi^{0,1} \left[\xi (1 - 2 \tan \gamma) + \frac{2}{\cos \gamma} \right] \frac{\sin \Phi}{\cos(\Phi - \gamma)} + \frac{k_{\tau} \cos \gamma}{\sin \Phi \cos(\Phi - \gamma)} \right].$$

Тогда проекции силы резания, действующей на i -й зуб фрезы в зоне резания, в системе координат $O_1x_1y_1z_1$ будут соответственно равны

$$P_{xli} = P_{\zeta i} \cos \psi_i - P_{\nu i} \sin \psi_i; P_{yli} = P_{\zeta i} \sin \psi_i + P_{\nu i} \cos \psi_i; P_{zli} = P_{oci}.$$

При полустойковой и чистой обработке в резании участвует только один зуб фрезы, так как глубина резания не превышает 1,5 мм. Результаты вычисления теплофизических и силовых характеристик были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными проф. Кушнером В.С. и Праведниковым И.С. и показали удовлетворительную сходимость.

Выполнена разработка динамических моделей ТСМО при точении и фрезеровании. В них доминирующей является подсистема заготовки. Динамическая модель ТСМО представляет собой совместно составленную систему дифференциальных уравнений модели динамической системы и динамической характеристики резания.



Модель динамической системы при точении (рис. 7) представлена в предельно упрощенном виде одноконтурной динамической модели. Такое упрощение обосновывается следующим:

Рис. 7. Модель динамической системы при точении

1. Нормальный контур Oy определяет точность обработки, формирует вибрационный след на поверхности и вносит определяющий вклад в формирование границы области устойчивости.

2. Касательный контур Oz улучшает шероховатость поверхности, забирает на себя часть формируемой в процессе резания энергии и соответственно расширяет область устойчивости. При технологических вычислениях он может быть исключен из модели.

Получили одноконтурную модель динамической системы

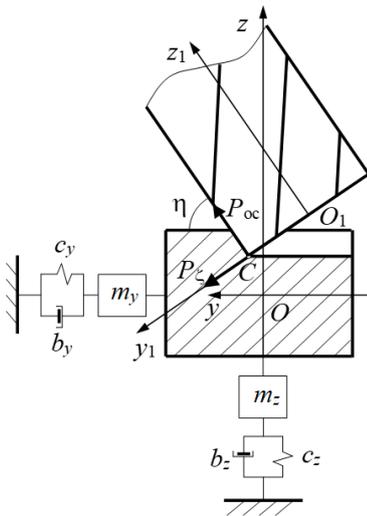
$$m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + c_y y = P_y,$$

где m_y , b_y , c_y коэффициенты инерции, диссипации, жесткости в направлении оси y – параметры динамической системы.

Динамическая характеристика резания при точении строится на основе статической характеристики. В динамике изменение площади среза ΔF связано со смещением y соотношением $\Delta F = k_F y$, $k_F = a \sin \varphi + b \cos \varphi$, k_F – коэффициент изменения площади среза. С учетом данного изменения уточняем статическую характеристику резания:

$$P_y = k_y^* y; k_y^* = k_y k_F.$$

Динамическая характеристика определяет изменение силы P_y в результате смещения инструмента y . Ввиду наличия инертности при смещении сила изменяется не мгновенно, а с запаздыванием. Динамическая характеристика резания записывается путем добавления к статической характеристике аргумента в форме производной по времени от силы P_y , умноженной на постоянную запаздывания процесса стружкообразования T_p



$$T_p \frac{dP_y}{dt} + P_y = -k_y^* y .$$

Знак минус в правой части свидетельствует об отрицательной обратной связи. При совместном рассмотрении модели динамической системы и динамической характеристики резания получаем динамическую модель ТСМО при точении.

$$m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + c_y y = P_y ;$$

$$T_p \dot{P}_y + P_y = -k_y^* y .$$

Рис. 8. Модель динамической системы при фрезеровании

Модель динамической системы при фрезеровании (рис. 8) представлена в виде двухконтурной динамической модели.

Нежелательно исключение из модели динамической системы дифференциальных уравнений движения в направлении координаты z , так как это может привести к большим погрешностям вычислений.

Для упрощения динамической характеристики резания при фрезеровании применен метод частотной отстройки частоты возмущающей силы от резонансных режимов, состоящий в следующем:

1. Если частота периодического воздействия отстраивается от собственной частоты обрабатываемой детали, то для фрезерования можно применить модель, аналогичную модели для точения.

2. Для обеспечения частотной отстройки необходимо выполнить критерий

$$\begin{cases} kv_\phi / v_1 < 0,8 \text{ при } v_1 > kv_\phi ; \\ v_1 / (kv_\phi) < 0,8 \text{ при } v_1 < kv_\phi , \end{cases}$$

где v_ϕ - частота возмущающей силы при фрезеровании, $v_\phi = n z / 60$, Гц; n - частота вращения фрезы, об/мин; z - число зубьев фрезы; v_1 - собственная частота колебаний закрепленной заготовки на первой форме, Гц; k - коэффициент кратности частоты v_ϕ возмущающей силы, $k = 1, 2, 3$. Опыт испытаний металлорежущих станков и их вибродиагностики показал, что увеличение коэффициента кратности k более трех не целесообразно. Граница резонансного режима расширена до 20%, что строго исключает влияние периодического воздействия на динамику ТСМО.

3. Частотная отстройка осуществляется варьированием частоты вращения фрезы n до выполнения критерия частотной отстройки.

4. При выполнении критерия частотной отстройки для дальнейших вычислений учитываются условия, для которых сила резания при фрезеровании имеет максимальное значение. При положении зуба фрезы в точке C (рис. 8) сила резания имеет максимальное значение. Для данного положения: угол поворота фрезы $\psi_c = \pi/2$; толщина среза $a_c = S_z \sin \eta$; ширина среза $b_c = t / \sin \eta$. Получаем простые соотношения для составляющих силы резания в системе координат $O_1x_1y_1z_1$: $P_{x1} = -P_0$; $P_{y1} = P_\zeta$; $P_{z1} = P_{0c}$, где с учетом упрощения: $P_0 = k_0 a_c b_c$; $P_\zeta = k_\zeta a_c b_c$; $P_{0c} = k_{0c} a_c b_c$. Тогда силы P_y и P_z в форме статических характеристик резания как функция координат y, z модели может быть записана в виде:

$$P_y = k_y^* y; P_z = k_z^* z; k_y^* = (k_\zeta \sin \eta + k_{oc} \cos \eta) b_c; k_z^* = (k_{oc} \sin \eta - k_\zeta \cos \eta) b_c.$$

Динамическая характеристика резания в направлении осей y, z при фрезеровании по форме будут строго соответствовать динамической характеристике для точения. При совместном рассмотрении модели динамической системы и динамической характеристики резания получаем динамическую модель ТСМО для фрезерования

$$m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + c_y y = P_y;$$

$$m_z \ddot{z} + b_z \dot{z} + c_z z = P_z;$$

$$T_p \dot{P}_y + P_y = -k_y^* y;$$

$$T_p \dot{P}_z + P_z = -k_z^* z,$$

где $m_y, m_z, b_y, b_z, c_y, c_z$ - коэффициенты инерции, диссипации, жесткости в направлении осей y, z - параметры динамической системы.

Устойчивость ТСМО в малом по А.М. Ляпунову определяется по алгебраическому критерию Гурвица. Построение границы устойчивости осуществляется в автоматическом режиме с применением алгоритма Лоэба при попарном варьировании технологических параметров.

В третьей главе выполнено исследование деформирующей способности и упругого последствия технологических остаточных напряжений (ТОН). Предложены методы их расчетно-экспериментального определения.

Технологические остаточные напряжения после обработки, но до ее деформации имеют начальную эпюру $\sigma(h)$, которая является неуровновешенной и показывает характер их изменения в глубину h металла поверхностного слоя изделия. Деформирующая способность ТОН I является интегральной характеристикой и определяется по формуле $I(h) = \int_{h=0}^{h=h_M} \sigma dh$.

Деформирующая способность ТОН как функция $I(h)$ изменяется в глубину h металла поверхностного слоя, а как функционал $I^* = I(h_M)$ является конечным значением в точке h_M выбега эпюры ТОН. Для физической интерпретации действия деформирующей способности ТОН рассмотрен фрагмент балки прямоугольной формы длиной l , шириной g и толщиной H . Верхняя поверхность фрагмента механически обработана. В результате температурно-механического воздействия при резании в поверхностном h -слое глубиной h_M возникли ТОН $\sigma_y(h)$ в плоскости $hA\zeta$ (рис. 9, а).

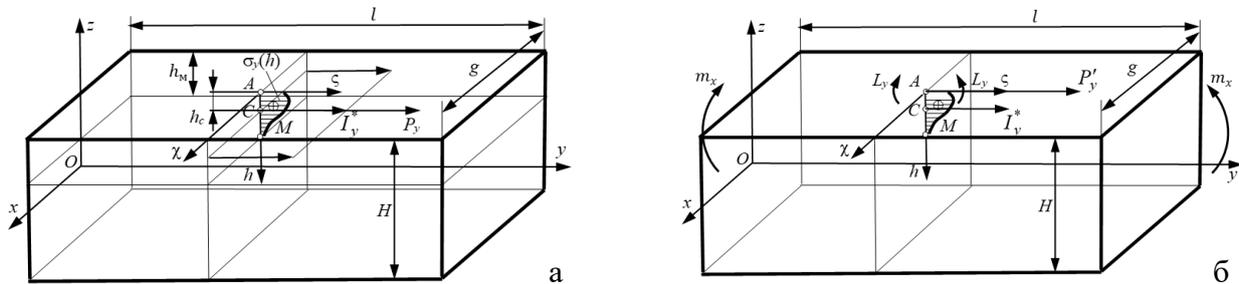


Рис. 9. Деформирующая способность ТОН (а) и ее упругое последствие (б)

Деформирующая способность ТОН I_y^* представляет собой интенсивность распределенной по ширине g нагрузки, равной подповерхностной силе P_y , определяющей действие ТОН:

$$P_y = \int_{x=-g/2}^{x=g/2} \int_{h=0}^{h=h_M} \sigma_y dh dx = \int_{x=-g/2}^{x=g/2} I^* dx = I^* g.$$

Приведем силу P_y к поверхности. Получим эквивалентную систему сил (рис. 9, б), включающую силу P_y' , равную по величине и направлению силе P_y , и пару сил моментом $m_x = h_c P_y = gh_c I_y^* = gL_\chi$, где L_χ - моментная характеристика деформирующей способности ТОН I_y^* , представляющая собой интенсивность моментной нагрузки m_x от на плече g , направлена перпендикулярно плоскости $hA\zeta$ вдоль оси χ . Под действием силы P_y' происходит продольная деформация рассматриваемого фрагмента в виде параллельного смещения. Под действием момента m_x происходит изгибная деформация в виде углового смещения и искажения формы поверхности, которая в основном определяет отклонения формы и расположения функциональных поверхностей детали с маложесткими элементами при отдельной обработке. Упругое последствие деформирующей способности ТОН в виде углового смещения и искажения формы поверхности при остаточных деформациях определяет моментная характеристика деформирующей способности ТОН L_χ . В качестве примера рассмотрено упругое последствие деформирующей способности ТОН на широкополую балку при обработке верхней и нижней поверхностей по разным технологиям.

Характер распределения технологических остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемого материала определяется физическими полями, воздействующими на поверхностный слой. Их действие суммарно формирует эпюру технологических остаточных напряжений. Оно рассмотрено на основе принципа независимости действия сил, согласно которому эффект от суммы воздействий на конструкцию равен сумме эффектов от каждого воздействия в отдельности. Физические поля формируются в процессе резания в результате температурного и силового воздействий, имеют затухающий характер и убывают в глубину по экспоненциальному закону. Были составлены уравнения экспоненциальной регрессии для i -го компонента ТОН и деформирующей способности ТОН:

$$\sigma_i = \begin{cases} \sigma_{pi} \exp \left\{ - \left[\frac{h}{h_{mi}} \ln \left(\frac{\sigma_{pi}}{\Delta\sigma} \right) \right] \right\} & \text{для силовых ТОН;} \\ \sigma_{pi} \exp \left[- \left[\frac{h}{h_{mi}^2} \ln \left(\frac{\sigma_{pi}}{\Delta\sigma} \right) \right]^2 \right] & \text{для температурных ТОН;} \end{cases} \quad I_i(h) = \int_{h=0}^{h=h_{mi}} \sigma_i dh; \quad I_i^* = I_i(h_{mi}), \quad (1)$$

где σ_{pi} – поверхностные напряжения i -го компонента ТОН; h_{mi} – точка выбега эпюры i -го компонента ТОН; $\Delta\sigma$ - напряжения, принятые за точку выбега, $\Delta\sigma=2\dots5$ МПа.

Общая схема действия сил и формирования эпюр технологических остаточных напряжений при обработке резанием показана на рис. 10. Покомпонентно формируются силовые (рис. 11, а-в) и температурные (рис. 11, г) ТОН следующим образом. В направлении сил P_x, P_z формируются ТОН сжатия, а в ортогональном им направлении – ТОН растяжения (рис. 11, б, в). Сила P_y формирует в направлении осей x, z ТОН сжатия. Температурное воздействие формирует в направлении осей x, z ТОН растяжения. Формирование ТОН от фазоструктурных изменений не рассматривается. Это связано с тем, что контактное взаимодействие поверхностей режущего инструмента и заготовки имеет постоянную времени 10^{-4} с. С точки зрения воздействия на упругое последствие при обработке резанием доминирующее влияние имеют ТОН $\sigma_x(h)$. При этом ТОН $\sigma_z(h)$ могут активно проявляться в тонкостенных деталях.

Получены расчетные уравнения для вычисления проекций на оси x и z результирующих ТОН σ_x и σ_z по аналогии с (1).

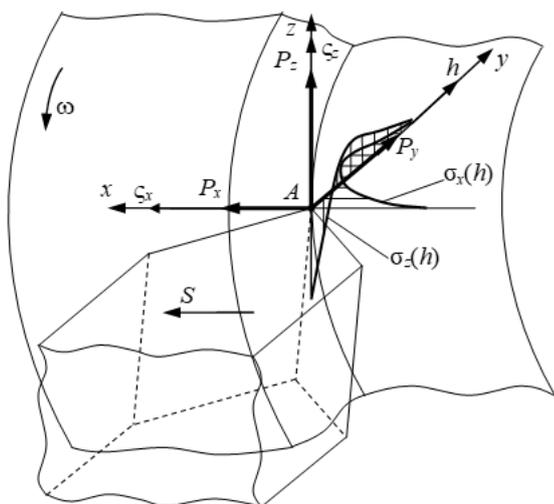


Рис. 10. Общая схема действия сил и формирования эпюр ТОН при обработке резанием

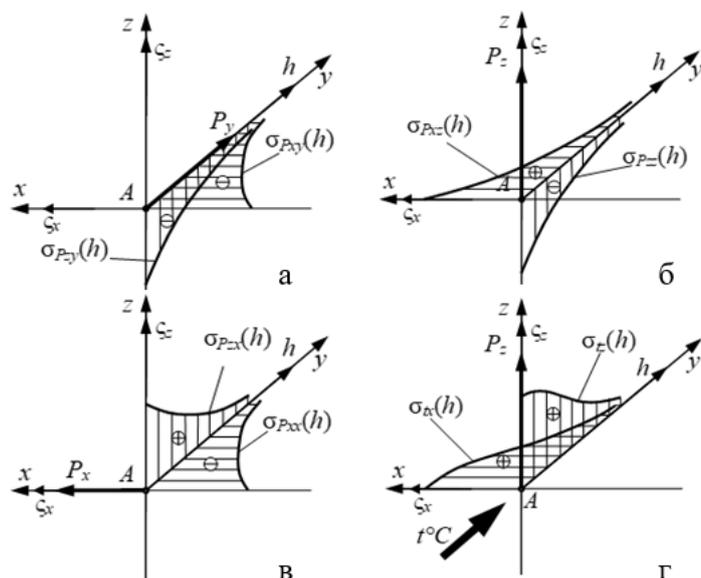


Рис. 11. Формирование компонентов ТОН: а - σ_{Pyx} , σ_{Pyz} от действия силы P_y ; б - σ_{Pz} , σ_{Pxz} от действия силы P_z ; в - σ_{Pxx} , σ_{Pzx} от действия силы P_x ; г - σ_{tx} , σ_{tz} от действия температуры

Проекцию σ_x получают суммированием компонентов ТОН: σ_{Pxx} , σ_{Pyx} , σ_{Pzx} , σ_{tx} ; проекцию σ_z получают суммированием компонентов ТОН: σ_{Pzz} , σ_{Pyz} , σ_{Pzx} , σ_{tz} ; первые индексы при силовых компонентах заменяются на цифры: $x - 1$, $y - 2$, $z - 3$

$$\sigma_x(h) = \sum_{i=1}^{i=3} \sigma_{P_{ix}}(h) + \sigma_{tx}(h) = \sum_{i=1}^{i=3} \sigma_{pix} \exp \left\{ - \left[\frac{h}{h_{mix}} \ln \left(\frac{\sigma_{pix}}{\Delta \sigma} \right) \right]^2 \right\} + \sigma_{pix} \exp \left\{ - \left[\frac{h}{h_{mix}^2} \ln \left(\frac{\sigma_{pix}}{\Delta \sigma} \right) \right]^2 \right\}; \quad (2)$$

$$\sigma_z(h) = \sum_{i=1}^{i=3} \sigma_{P_{iz}}(h) + \sigma_{tz}(h) = \sum_{i=1}^{i=3} \sigma_{piz} \exp \left\{ - \left[\frac{h}{h_{miz}} \ln \left(\frac{\sigma_{piz}}{\Delta \sigma} \right) \right]^2 \right\} + \sigma_{piz} \exp \left\{ - \left[\frac{h}{h_{miz}^2} \ln \left(\frac{\sigma_{piz}}{\Delta \sigma} \right) \right]^2 \right\}. \quad (3)$$

В уравнениях (2)-(3) имеются задаваемые параметры: σ_{Pix} , σ_{Piz} , σ_{Ptx} , σ_{Ptz} , h_{mix} , h_{miz} , h_{mix} , h_{miz} . Они определяются в соответствии с методиками проф. Биргера И.А., Абрамова В.В., Кравченко Б.А. Деформирующие способности ТНН определяются в соответствии с соотношениями (1).

Экспериментальное определение деформирующей способности ТОН выполнено резистивным электроконтактным методом, который основан на корреляции между интегральными электрическими и механическими характеристиками – удельной электрической проводимостью γ или обратно пропорциональным ей удельным электрическим сопротивлением ρ в h -слое металла и деформирующей способностью технологических остаточных напряжений I . В основе метода заложен скин-эффект – с увеличением частоты пропускаемого электрического тока проводящий слой приближается к поверхности. Его глубина h обратно пропорционально корню квадратному от частоты сигнала f . и, с учетом магнитной проницаемости материала изделия μ , определяется соотношением $h = 1/\sqrt{\pi f \mu \gamma}$. Изменение проводимости $\Delta \gamma$ пропорционально изменению средних технологических остаточных напряжений $\Delta \bar{\sigma}_d$ по формуле: $\Delta \gamma = K_\sigma \cdot \Delta \bar{\sigma}_d$, где K_σ – экспериментально определяемый коэффициент, характеризующий свойства материала. Средние напряжения $\Delta \bar{\sigma}_d$ линейно связаны с деформирующей способностью I_d .

Коэффициентом пропорциональности является глубина h -слоя, в котором распределены средние напряжения $\Delta\bar{\sigma}_d$. Измерения осуществляли на ИВК «Резикон» (рис. 12). Схема установки датчика на образец представлена на рис. 13. Рабочий диапазон измерений имеет от 5 до 9 ступеней, начиная с частоты 8 МГц, с двукратным уменьшением на каждой последующей ступени.

Датчик представляет собой пассивный четырехполюсник. Он имеет две пары электродов (подающую и приёмную). 3D-модель датчика в разборе представлена на рис. 14. Выполнено ряд важных усовершенствований датчика, позволивших повысить точность измерений. Так, замена наконечников инденторов из оловянистой бронзы на бериллиевую бронзу позволила уменьшить погрешность измерений с 5% до 2%, что было подтверждено экспериментально. Для измерений с получением технологических остаточных напряжений разработаны достаточно массивные образцы свидетели в форме кубов (кубарей), толстостенных дисков и толстостенных пластин с возможностью вырезки из них образцов для разрушающего контроля.

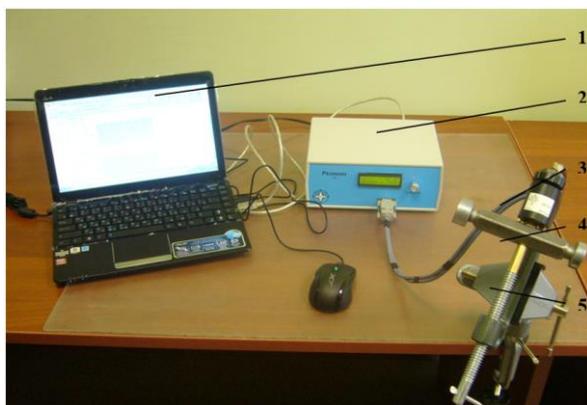


Рис. 12. ИВК «Резикон»: 1-ПК; 2-электронный блок; 3-датчик; 4-образец; 5-оснастка

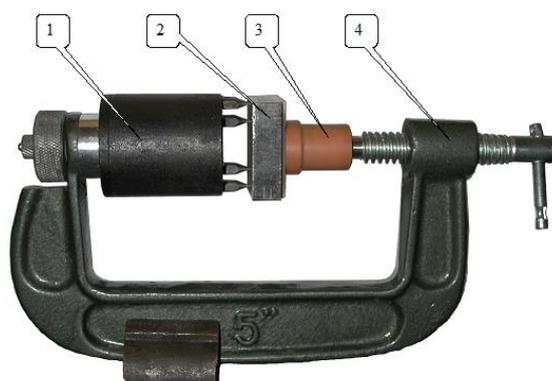


Рис. 13. Установка датчика на образец: 1 - датчик; 2-образец; 3-прижим; 4-оснастка

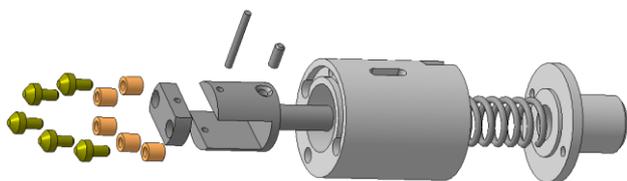


Рис. 14. 3D-модель датчика в разборе

Это позволило получить практически неискаженную начальную эпюру технологических остаточных напряжений. Толстостенные диски и пластины являются образцами свидетелями отдельных технологических переходов или операций, а кубы - технологической наследственности остаточных напряжений в последовательности переходов или операций.

В четвертой главе выполнено направленное формирование технологических режимов раздельной обработки поверхностей маложестких элементов деталей с целью обеспечения требований точности формы и расположения. Предложен метод неизменяемости формы поверхностей при последовательной раздельной обработке деталей с маложесткими элементами на основе критериев: бездеформационного, определяющего предельно допустимое значение не приводящей к остаточным деформациям деформирующей способности технологических остаточных напряжений, и уровневых, определяющих допустимую величину поверхностных и подповерхностных технологических остаточных напряжений. Бездеформационный критерий формируется в соответствии с

условием: $I^* \rightarrow 0$. Условие выполняется при средних ТОН $\sigma_{cp} \leq 5$ МПа в слое глубиной $h_M = 200$ мкм. Бездеформационный критерий составит:

$$I^* \leq [I^*] = \sigma_{cp} h_M = 1 \text{ Н/мм.}$$

Принята следующая норма уровневых критериев неизменяемости формы:

- на предварительных переходах (операциях): $\sigma_{II} > (-0,6\sigma_T)$; $\sigma_{II} < 0$; $\sigma_{III} < (+0,6\sigma_T)$; $\sigma_{III} > 0$;
- на окончательных переходах (операциях): $\sigma_{II} > (-0,4\sigma_T)$; $\sigma_{II} < 0$; $\sigma_{III} < (+0,4\sigma_T)$; $\sigma_{III} > 0$.

Основными технологическими параметрами при лезвийной механической обработке являются режимы резания: скорость резания V , подача S , глубина резания t . Глубина резания, как правило, задается и изменению не подлежит. Увеличение скорости резания приводит к увеличению температуры в зоне резания и, следовательно, к увеличению температурных ТОН растяжения. Соответственно, увеличение подачи приводит к увеличению силовых ТОН сжатия. Изменение скорости резания имеет доминирующий характер по отношению к изменению подачи.

Отработка технологических режимов начинается с расчетного или экспериментального определения деформирующей способности ТОН на технологических режимах, обеспечивающих точность размеров. Далее осуществляется проверка бездеформационного и уровневых критериев неизменяемости формы. Если критерии удовлетворены, то выбранные технологические режимы становятся базовыми для дальнейших вычислений. Если критерии не удовлетворены, необходимо провести варианты изменения технологических режимов с перерасчетом до удовлетворения критериев неизменяемости формы. На данном этапе исследований удовлетворение критериев достигается методом пошагового перебора.

При бездеформационной обработке возникает необходимость в разработке новой технологии последовательной двухсторонней обработки. В основе данной технологии заложена последовательная раздельная обработка поверхностей частей детали с упругими элементами с малым припуском. При этом толщина упругих элементов уменьшается. Внутренние напряжения частично высвобождаются с небольшой остаточной деформацией. Затем данный цикл повторяется с уменьшением снимаемого припуска. Внутренние напряжения высвобождаются в меньшей степени с соответствующими остаточными деформациями. От цикла к циклу припуск уменьшается по экспоненциальному закону. При этом минимальный припуск не должен быть меньше 0,1 мм. Каждая обработка осуществляется на технологических режимах, обеспечивающих неизменяемость формы. Опытная отработка технологии показала, что для обеспечения бездеформационной обработки минимальное количество циклов $n=2$, а максимальное количество циклов $n=5$.

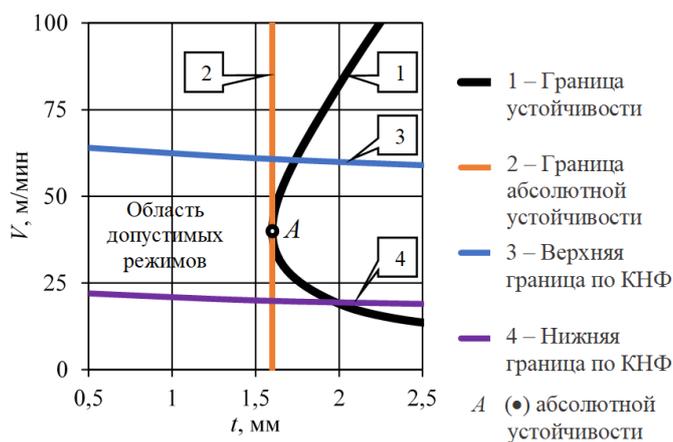


Рис. 15. Область допустимых режимов, по критериям неизменяемости формы

Важным элементом новой технологии являются контрольные проверки качества, включающие определение точности размеров и шероховатости поверхности. По результатам вычисления устойчивости технологической системы получена область допустимых режимов

(рис. 15), удовлетворяющих критериям неизменяемости формы (КНФ). Она отделена границей абсолютной устойчивости, верхней и нижней границами по критериям неизменяемости формы. Технология последовательной двухсторонней бездеформационной обработки является обязательной частью технологического процесса изготовления детали с мало жесткими элементами.

Для обоснования основных положений, выдвинутых в диссертационной работе, была выполнена апробация, включающая:

- вычислительный эксперимент по компонентному расчету технологических остаточных напряжений при обработке точением торцевой поверхности тонкостенного диска из сплава ХН73МБТЮ;

- технологическое обеспечение точности формы при изготовлении покрывного диска ротора компрессора ГТД на основе экспериментального метода определения технологических остаточных напряжений;

- технологическое обеспечение качества при изготовлении каркаса для установки гироскопических блоков.

Результаты апробации позволили обеспечить требования качества обработанных изделий и подтвердили обоснованность разработанных научных положений.

Заключение

1. Выполнена научно-методическая разработка теплофизических, силовых и динамических характеристик технологической системы, расчетно-экспериментального определения деформирующей способности технологических остаточных напряжений и технологии последовательной раздельной обработки деталей с мало жесткими элементами для обеспечения точности размеров, формы, расположения, шероховатости поверхности и устойчивости при их изготовлении.

2. На основе вычисления теплофизических характеристик выполнено определение сил резания при обработке точением и фрезерованием в форме статической характеристики резания. При увеличении скорости резания силы резания уменьшаются, что свидетельствует об их зависимости от температуры и подтверждается экспериментальными исследованиями.

3. Предложен метод частотной отстройки возмущающей силы от частоты колебаний закрепленной заготовки, который позволил исключить влияние периодического воздействия и получить динамическую характеристику фрезерования на единых с точением математических принципах с максимально допустимым упрощением динамической модели.

4. В качестве количественной меры упругого последствия принята моментная характеристика деформирующей способности ТОН, которая физически интерпретируется как распределенная по ширине интенсивность изгибающего момента. Она зависит только от величины и характера распределения ТОН.

5. Реализация аддитивного подхода применительно к температурным и силовым ТОН предусматривает расчетное определение изменяющихся по глубине остаточных напряжений с использованием уравнений экспоненциальной регрессии, параметры которых определяются условиями контактных взаимодействий режущего инструмента и заготовки в процессе резания.

6. Для экспериментального определения деформирующей способности технологических остаточных напряжений принят неразрушающий резистивный электроконтактный метод, так как он отвечает следующим требованиям: послойное определение средних технологических остаточных напряжений в металлах и сплавах;

эквивалентное удельное сопротивление коррелирует с деформирующей способностью технологических остаточных напряжений, так как является интегральной характеристикой, связанной с глубиной h -слоя.

7. Предложен метод неизменяемости формы поверхностей при последовательной раздельной обработке деталей с маложесткими элементами на основе критериев: бездеформационного, определяющего предельно допустимое значение не приводящей к остаточным деформациям деформирующей способности технологических остаточных напряжений, и уровневых, определяющих допустимую величину поверхностных и подповерхностных технологических остаточных напряжений.

8. Разработана методика последовательной раздельной обработки деталей с маложесткими элементами за несколько циклов, каждый из которых предусматривает раздельную обработку с двух сторон без перезакрепления с одинаковым припуском, экспоненциально уменьшающимся на последующих циклах, причем, каждая обработка выполняется на режимах, соответствующих критериям неизменяемости формы.

9. Выполненный комплекс расчетно-экспериментальных исследований и апробация отдельных технологических решений подтвердили правильность научных результатов, полученных в диссертационной работе.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК:

1. Никитин А.В. Сверление отверстий малого диаметра в тонкостенных изделиях из труднообрабатываемых материалов в условиях ограниченного доступа // *Металлообработка*, 2014, №6(78). С 22-28.
2. Васильков Д.В., Кочина Т.Б., Никитин А.В. Экспериментально-расчетное определение технологических остаточных напряжений в поверхностном слое тонкостенных дисков при обработке точением // *Металлообработка*, 2015, №6(90). С.17-22.
3. Никитин А.В., Васильков Д.В., Кочина Т.Б. Методические аспекты расчета упругого последствия деформирующей способности технологически остаточных напряжений при механической обработке // *Металлообработка*, 2016, №6(96). С. 18-21.
4. Васильков Д.В., Васильков С.Д., Никитин А.В. Измерение остаточных напряжений резистивным электроконтактным методом // *Металлообработка*, 2017, №5(101). С. 30-34.
5. Никитин А.В., Васильков Д.В., Кочина Т.Б. Теплофизические и силовые характеристики в зоне резания при обработке жаропрочных сплавов // *Металлообработка*, 2018, №2(104). С. 2-11.
6. Васильков Д.В., Мезенцев Д.А., Никитин А.В., Бундур Т.М., Тариков И.Я. Технологические остаточные напряжения и их деформирующая способность при обработке резанием // *Металлообработка*, 2018, №4(106). С. 2-6.
7. Никитин А.В. Анализ устойчивости технологической системы с маложесткими элементами при обработке точением и фрезерованием на основе упрощенных моделей // *Металлообработка*, 2018, №3(105). С. 13-18.
8. Васильков Д.В., Кузнецова З.А., Никитин А.В. Технологическое обеспечение качества при обработке точением тонкостенных деталей из титановых сплавов электронасосных агрегатов системы терморегулирования космических аппаратов // *Металлообработка*, 2020, №1(115). С. 3-9.

9. Никитин А.В., Александров А.С., Васильков Д.В., Голикова В.В. Определение деформирующей способности технологических остаточных напряжений в тонком поверхностном слое изделия на основе метода инструментального идентифицирования // *Металлообработка*, 2021, №5-6(125-126). С. 78-86.

10. Никитин А.В. Экспериментальное определение деформирующей способности технологических остаточных напряжений на образцах свидетелях // *Металлообработка*, 2024, №4(142). С. 66-71.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных

Scopus / Web of Science:

11. Vasilkov D.V., Nikitin A.V., Cherdakova V.S. Stability of the dynamic system of the machine tool when machining with a blade tool. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, Volume 194, 4, 042026.

12. Vasilkov D.V., Vasilkov S.D., Nikitin A.V. Application of a resistive method for determination of technological residual stresses in the manufacture of parts from heat resisting alloys. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, Volume 194, 2, 022045.

13. Vasilkov D.V., Nikitin A.V., Tarikov I. Ya. The Dynamics of Contact Interaction during the Cutting Process. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 2019, Volume 4, No. 5, 1218–1227.

14. Nikitin A.V., Tarikov I. Ya., Vasilkov D.V. Determination of technological residual stresses in the surface layer of parts with thin-walled elements during turning. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2019, Volume 11, Issue 08, 2926-2932.

15. Nikitin A.V., Vasilkov D.V., Shvetsov I.V. Technological Residual Stresses in the Surface Layer of the Profile of the Working Part of the Rotor of the Screw Compressor During Milling. *AIP Conference Proceedings* [this link is disabled](#), 2022, 2486, 040015.

Публикации в других изданиях:

16. Васильков Д.В., Марков Е.А., Никитин А.В. Математические основы исследования автоколебаний в технологических системах механической обработки лезвийным инструментом / *Качество машин. Межвузовский сборник научных трудов*. СПб.: Изд. БГТУ Военмех, 2011. С. 37-52.

17. Васильков Д.В., Никитин А.В. К вопросу о контроле качества поверхностного слоя ответственных деталей машин / *Качество машин. Межвузовский сборник научных трудов*. СПб.: Изд. БГТУ Военмех, 2011. С. 90-95.

18. Никитин А.В. Методика расчета режимов резания при сверлении отверстий малого диаметра в тонкостенных изделиях из труднообрабатываемых материалов / *Качество машин. Межвузовский сборник научных трудов*. СПб.: Изд. БГТУ Военмех, 2011. С. 167-171.

19. Васильков Д.В., Кочина Т.Б., Никитин А.В. Упругое последствие в деталях при контактном взаимодействии в трибосопряжениях со сверхвысокими скоростями относительных деформаций / *Материалы Международной научно-технической конференции «Уткинские чтения: Новые материалы и технологии в конструировании современных быстровращающихся роторных систем»*. СПб: БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2015.

20. Васильков Д.В., Кочина Т.Б., Кочетков А.Н., Никитин А.В. Упругое последствие деформирующей способности остаточных напряжений и технологическая наследственность при изготовлении деталей / *Сборник материалов XII Всероссийского совещания-семинара: Инженерно-физические проблемы новой техники*. М.: МГТУ им Баумана, 2016. С.294-297.

21. Васильков Д.В., Никитин А.В., Рыбкин А.В., Филиппов Р.А. Повышение точности изготовления тонкостенных деталей на основе расчета технологических остаточных напряжений / Материалы международной научно-практической конференции «Технологии упрочнения нанесения покрытий и ремонта: теория и практика». СПб.: Изд-во Политехн. университета, 2016. С. 275-282.

22. Васильков Д.В., Никитин А.В., Тариков И.Я. Упругое последствие деформирующей способности остаточных напряжений при обработке точением / Сборник статей по итогам международной научно-практической конференции «Проблемы эффективного использования научного потенциала общества» В 5 частях. Часть 4. Челябинск, 2017. С. 18-21.

23. Васильков Д.В., Никитин А.В., Тариков И.Я. Деформирующая способность как мера действия технологических остаточных напряжений / Сборник статей по итогам международной научно-практической конференции «Междисциплинарность науки как фактор инновационного развития». В 4 частях. Часть-3. Екатеринбург, 2017. С.40-42.

24. Васильков Д.В., Никитин А.В., Тариков И.Я. Деформация широкополной балки под действием деформирующей способности технологических остаточных напряжений при обработке резанием / Сборник статей по итогам международной научно-практической конференции «Прорывные научные исследования как двигатель науки». Часть 2. Стерлитамак, 2017. С.141-143.

25. Васильков Д.В., Васильков С.Д., Никитин А.В. Применение резистивного метода для определения технологических остаточных напряжений при изготовлении деталей из жаропрочных сплавов / МНПК «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018». СПб: Изд-во Горного университета, 2018. С.22-26.

26. Никитин А.В., Васильков Д.В. Технологические остаточные напряжения в поверхностном слое изделия при технологических воздействиях / Электрофизические методы обработки в современной промышленности. Материалы V Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Пермь, 2022. С. 94-98.

27. Никитин А.В., Васильков Д.В. Экспериментальное определение деформирующей способности технологических остаточных напряжений на образцах свидетелях на основе автоматизированного вычислительного комплекса Резикон / Перспективные машиностроительные технологии. Сборник статей Международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и 5-летию Высшей школы машиностроения. Санкт-Петербург, 2024. С. 620-626.