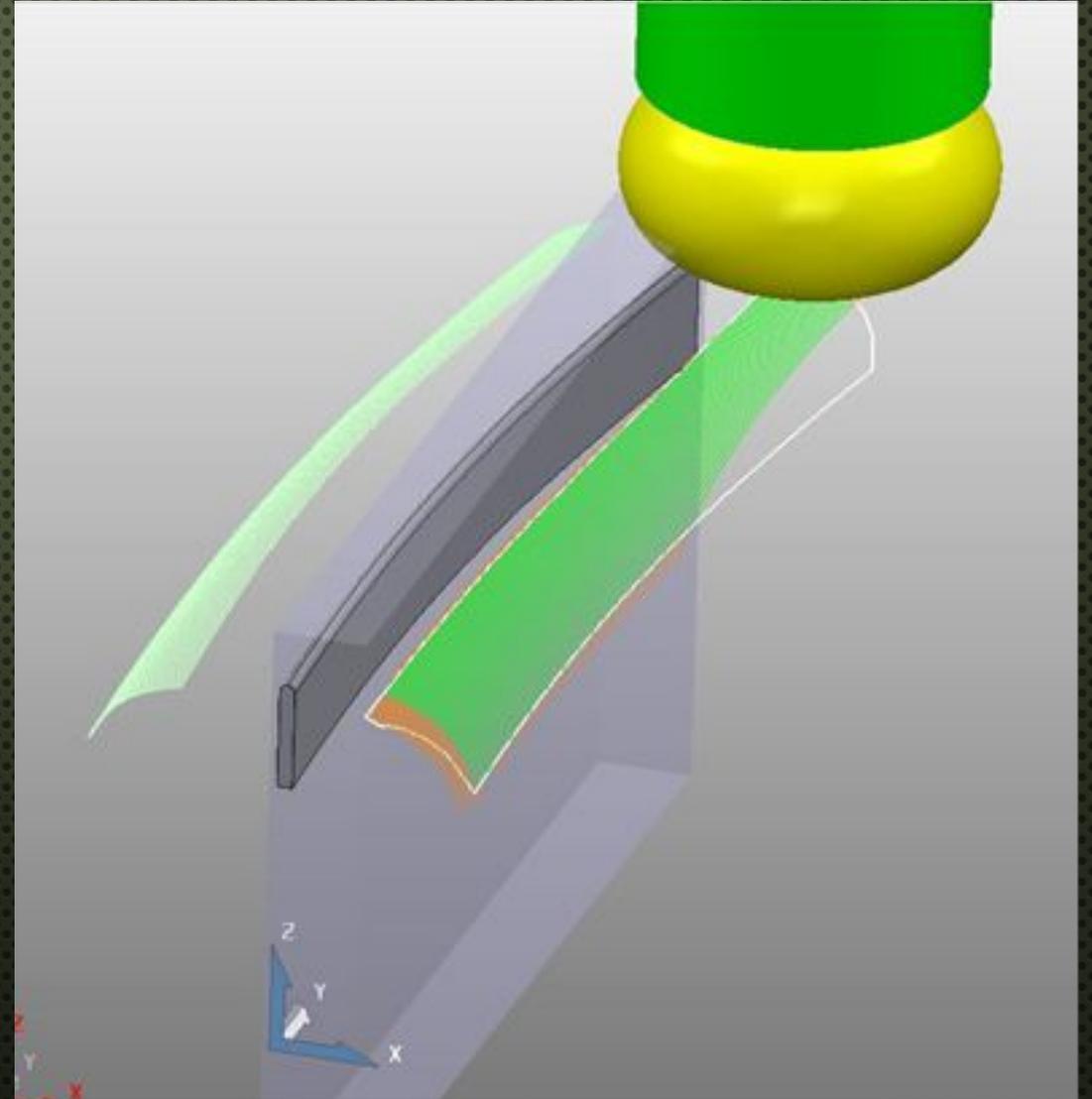


СЫҒАЛДЫ
КА
КРОМОК
ПЕРА ГТД
СТРОГАН
ИЕМ



ЛОПАТКИ ТУРБИН НЕОБХОДИМЫ ДЛЯ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭНЕРГИИ ВХОДЯЩЕГО ВОЗДУХА В МЕХАНИЧЕСКУЮ РАБОТУ РОТОРА.

С ПОМОЩЬЮ КОМПРЕССОРА ВОЗДУХ СЖИМАЕТСЯ И ПОДАЕТСЯ В КАМЕРУ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ. ТАМ ОН СМЕШИВАЕТСЯ С ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ И РАСШИРЯЕТСЯ, ПОСЛЕ ЧЕГО ПОПАДАЕТ НА ЛОПАТКИ. ПОД ДАВЛЕНИЕМ ГАЗА ЛОПАСТИ ПРИДАЮТ ДВИЖЕНИЕ ВАЛУ, СОЕДИНЕННОМУ С ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОМ.



Текст к предыдущему слайду

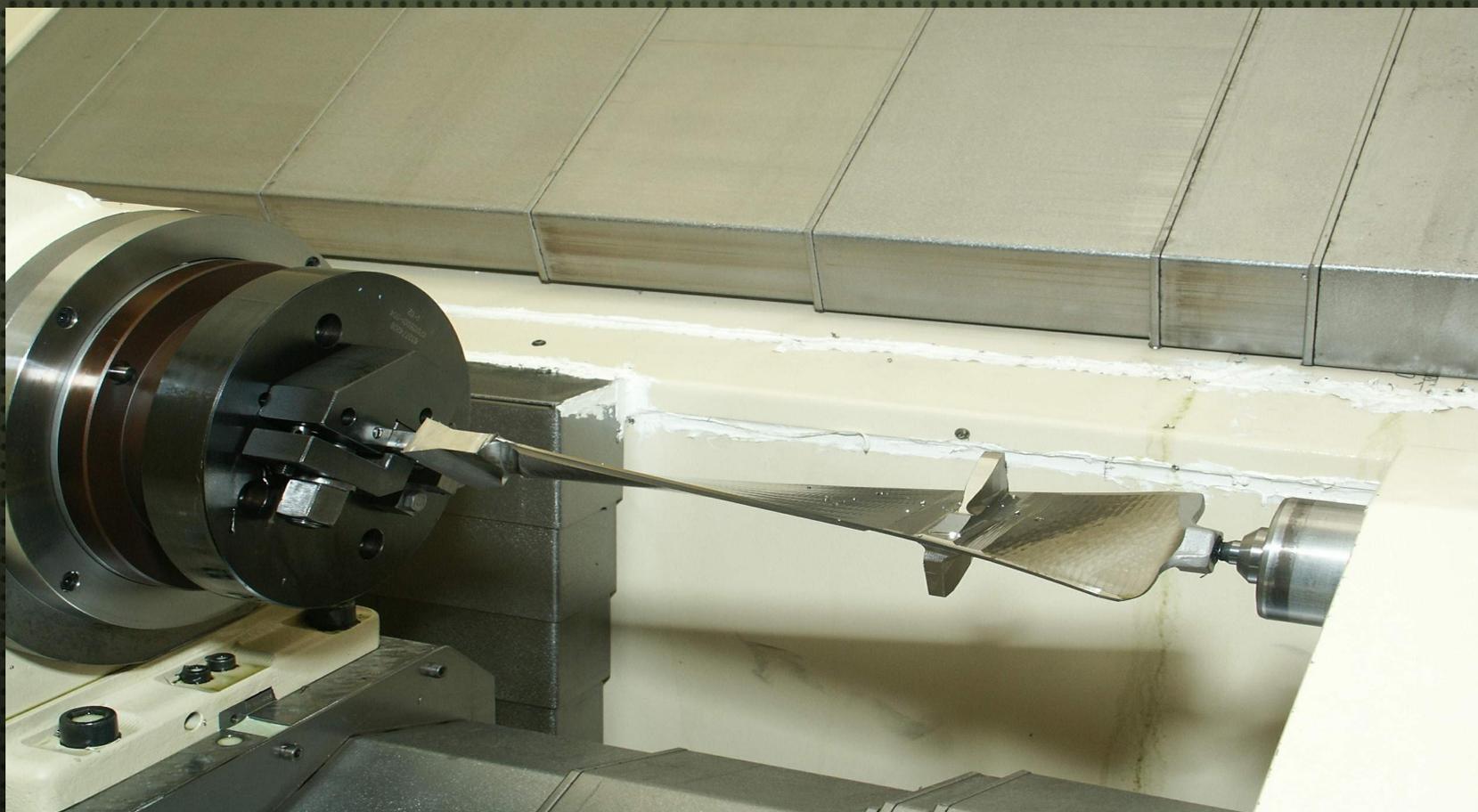
К современным деталям авиационных двигателей и энергетических установок предъявляются высокие требования точности. Кромки пера лопаток должны изготавливаться по 4 – 5 качеству, а их шероховатость не должна превышать $Ra\ 0,32$ мкм. Достижение показателей точности размеров и качества обработанной поверхности кромок пера лопатки газотурбинного двигателя (ГТД) является сложной задачей, решить которую только одним способом обработки, как правило, не удастся. Существует множество различных способов обработки кромок пера. Важным требованием к изготовлению лопаток современных ГТД является обеспечение заданного уровня остаточных напряжений. Качество поверхностного слоя оказывает существенное влияние на надежность и долговечность деталей, которые работают в условиях переменных нагрузок и повышенных температур.

Остаточные напряжения в поверхностном слое оказывают значительное влияние на сопротивление усталости деталей, работающих в условиях статических и знакопеременных нагрузок. С одной стороны, при стендовых испытаниях, а с другой – в процессе эксплуатации, – наличие растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое является причиной образования и развития усталостных трещин и, как следствие, снижения долговечности лопаток. Необходимость оценки влияния остаточных напряжений, действующих в поверхностном слое деталей сложной формы в зонах концентрации напряжений (кромки пера лопаток компрессора, радиусы перехода пера к полке замка), особенно актуальна при эксплуатации ГТД с большим ресурсом, в том числе для прогнозирования его надежности в дальнейшем.



МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ КРОМОК ПЕРА ЛОПАТКИ ГТД

ФРЕЗЕРОВАНИЕ:



Текст к предыдущему слайду

Кромки пера лопатки ГТД из высокопрочных и никелевых сплавов получать фрезерованием неэффективно вследствие низкой обрабатываемости этих материалов. Кроме того, этим способом невозможно вести обработку кромок очень длинных и тонких лопаток, так как под действием возникающих сил резания происходит отгиб обрабатываемого изделия, и возникают вибрации, все вместе это приводит к снижению геометрической точности и потере качества обработанной поверхности. **Формирование остаточных напряжений при фрезеровании кромки пера лопатки имеет возможность получения, как напряжения сжатия, так и остаточные напряжения растяжения.**

При условии большего влияния силового фактора в поверхностном слое формируется напряжения сжатия, а в нижележащих слоях — уравнивающие их остаточные напряжения растяжения. Это объясняется растягиванием поверхностного слоя в ходе обработки до пластической деформации и упругим деформированием слоя под обрабатываемой поверхностью.

В случае преобладающего влияния температурного фактора на поверхностном слое образуются напряжения растяжения, а в нижних — напряжения сжатия. Это объясняется тем, что в поверхностном слое материал стремится к увеличению объема, но встречает сжимающее противодействие со стороны окружающего металла нижележащих слоев, что приводит к образованию напряжения растяжения после обработки.

ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННАЯ ОБРАБОТКА:

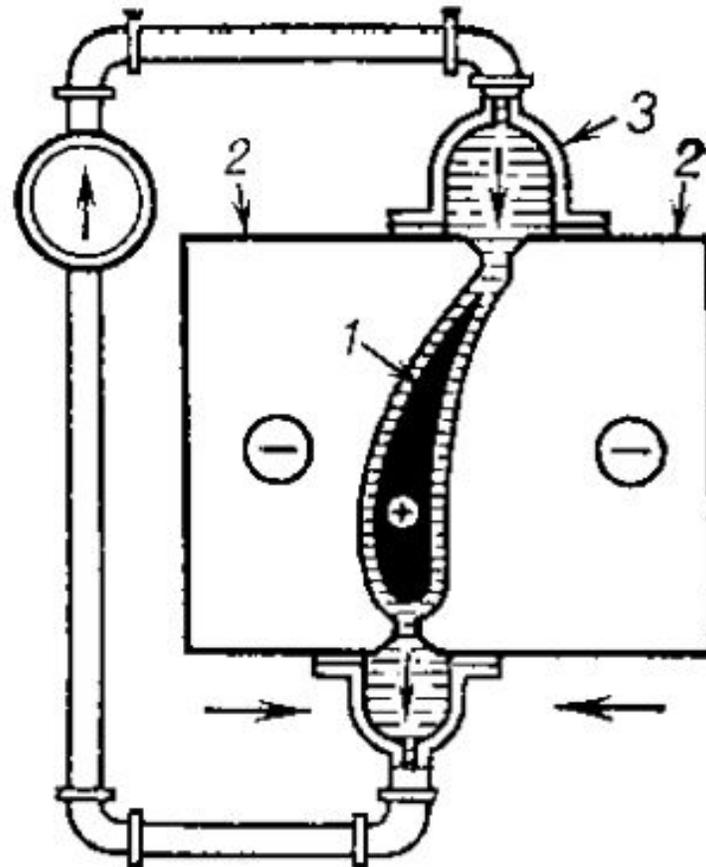


Рисунок 6 – Схема процесса обработки лопатки ГТД методом ЭЭО:
1 – обрабатываемая лопатка ГТД; 2 – электроды; 3 – электролит

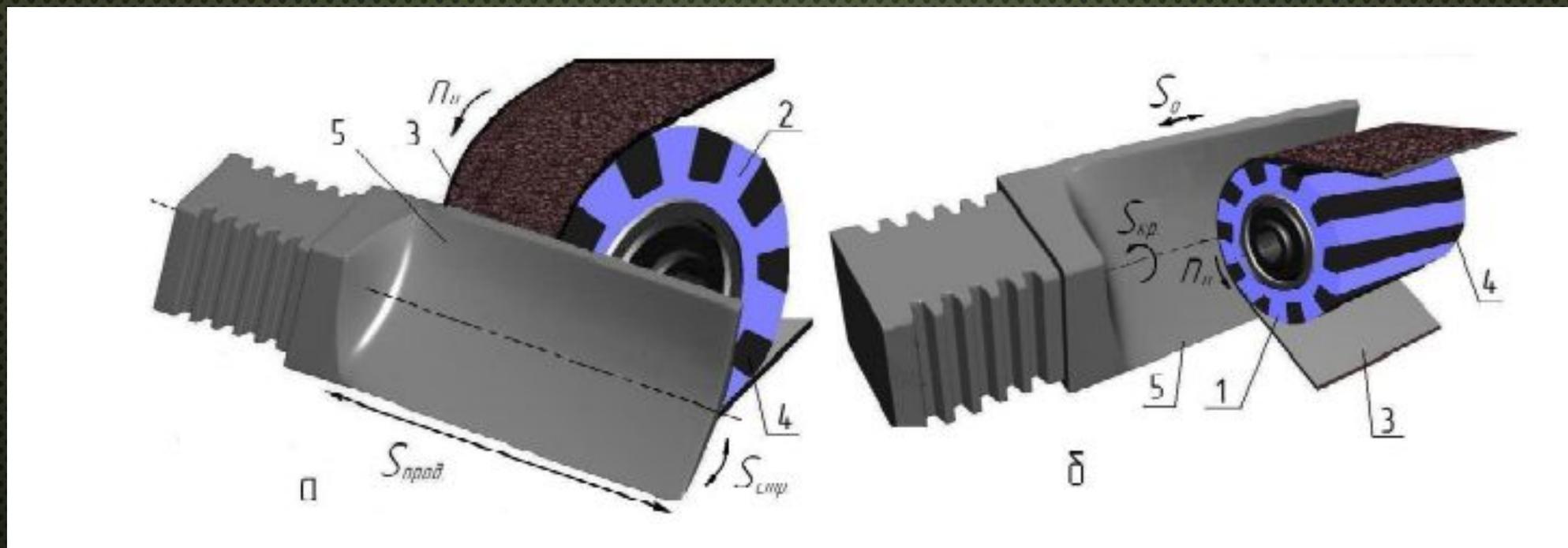
ТЕКСТ К ПРЕДЫДУЩЕМУ СЛАЙДУ

Преимущества метода электроэрозионной обработки заключаются в возможности обработки любых токопроводящих материалов независимо от их физико-химических свойств, твердости, вязкости и хрупкости. Отпадает необходимость использования инструмента с более высокими механическими характеристиками, чем у обрабатываемых материалов. Формообразование всей сложной поверхности изделий осуществляется простым поступательным перемещением за счет использования фасонных электродов. Технологические операции выполняются практически без силового воздействия инструмента на заготовку, что позволяет вести обработку нежестких и тонкостенных деталей.

Как и в любом методе помимо преимуществ имеются недостатки данного метода. Для электроэрозионной обработки характерными недостатками является производительность, которая в свою очередь повышает расход электроэнергии. Точность обработки и качество обработанной поверхности зависит от многих факторов, учет которых не всегда возможен. Электрод-инструмент в процессе обработки значительно изнашивается, что сказывается на точности обработки.

Также при обработке данным методом превалирует влияние температурного фактора что приводит к формированию напряжения растяжения на поверхностном слое и напряжений сжатия в нижнем.

ШЛИФОВАНИЕ КРОМОК ПЕРА ЛОПАТКИ



Текст к предыдущему слайду

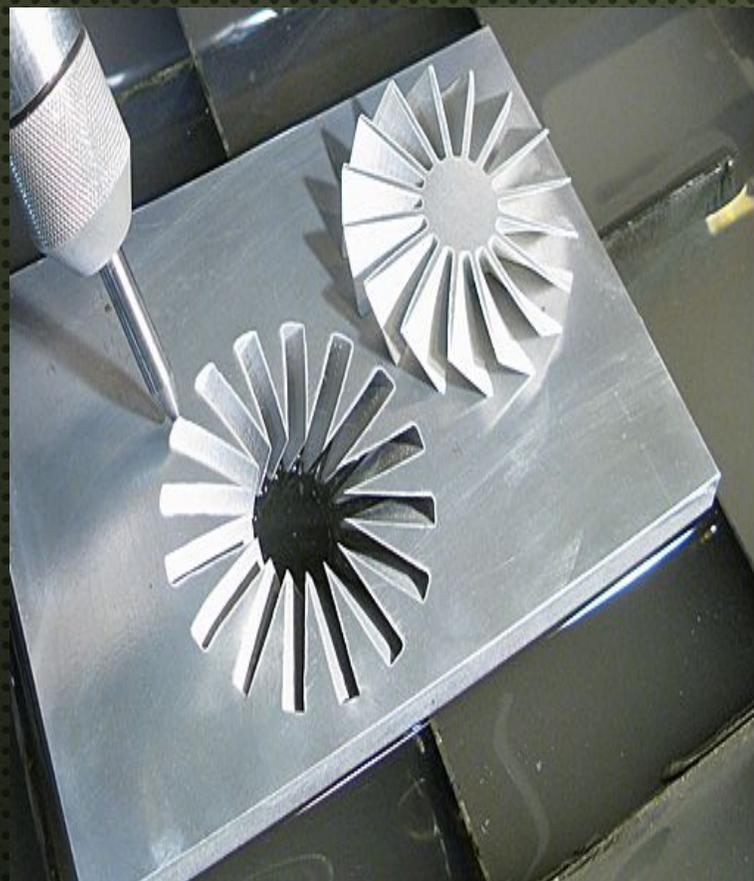
Шлифование как правило применяется в качестве финишной обработки. Данный метод позволяет получать высокую геометрическую точность и высокое качество обработанной поверхности.

К недостаткам данного метода относятся:

- сильное нагревание за счет трения до 1000 °С;
- деформирование верхнего слоя обрабатываемой детали.

Касательно формирования остаточных напряжений можно сделать вывод, что процесс, сопровождающийся высокими температурами при обработке, наводит напряжения растяжения.

ГИДРОАБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА



Текст к предыдущему слайду

К этому способу обработки относится струйная резка под действием струи высокодавления чистой воды или струи воды, смешанной с абразивом (гидроабразивная обработка — ГАО). На сегодняшний день технология ГАО является одной из наиболее эффективных, гибких, экологически чистых и энергосберегающих технологий обработки. При гидроабразивной обработке в водоструйных установках насосом высокого давления создается высокое давление воды до 6000 бар, которое преобразуется в кинетическую энергию струи, вытекающую через смеси-тельные трубки с сапфировым или алмазным соплами с диаметром проходного сечения от 0,08 до 12 мм при скорости струи более 3500 км/ч. Полученная таким образом форма струи имеет вид идеального точечного инструмента, что дает возможность обрабатывать изделия сложного профиля практически с любым радиусом закругления (минимальный радиус скругления будет равен радиусу струи. При гидроабразивной обработке в струю воды добавляют абразив (песок), что позволяет снизить отходы материалов по сравнению с традиционными способами в 15-20 раз. Силы резания в процессе обработки не превышают 100 Н, что исключает деформацию материала в прилегающей к зоне резания области.

К основным преимуществам ГАО следует отнести: широкий диапазон обрабатываемых материалов: хорошее качество получаемой поверхности (шероховатость поверхности $R_a = 3,2 \dots 6,3 \text{ мкм}$, точность линейного позиционирования $\pm 0,05 / 500 \text{ мм}$), высокую скорость обработки (до 25 м/мин) при резке по контуру; отсутствие нагрева обрабатываемого материала в процессе обработки (при обработке материал сохраняет комнатную температуру), что позволяет эффективно обрабатывать как твердые материалы, так и материалы с низкой температурой плавления; экологическая чистота процесса (не образуются вредные вещества), уровень шума находится в пределах от 85 до 95 дБ; отсутствует необходимость в применении специальных конструкций инструментов для различных операций ГАО (резка, прошивка отверстий, вырезка окон, образование пазов и щелей выполняется одним и тем же инструментом — головкой для ГАО, которая может быть установлена в различные положения). Основными недостатками ГАО являются: сравнительно малый срок службы смесительных трубок и сопел (до 50 часов работы); необходимость в специальном оборудовании, сложность его ремонта и обслуживания (ремонт и текущее обслуживание необходимо производить через каждые 300... 500 часов работы); сложность управления обработкой вследствие проявления эффекта «заноса» гидроабразивной струи с величиной отклонения струи от вертикали (**Следующий слайд**), обусловленного спецификой взаимодействия струи и обрабатываемого материала и зависящей от толщины обрабатываемой детали. Вследствие последнего недостатка данный метод нашел применение для предварительного удаления металла из межлопаточных каналов, реже — для чистовой обработки лопаток сложнопрофильных моноколес, имеющих двойную кривизну.

СЛОЖНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАБОТКОЙ
ВСЛЕДСТВИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭФФЕКТА «ЗАНОСА»
ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ С ВЕЛИЧИНОЙ
ОТКЛОНЕНИЯ СТРУИ ОТ ВЕРТИКАЛИ

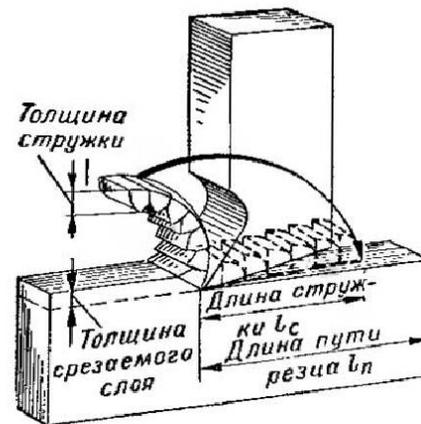


Рисунок 2 – Проявление эффекта «заноса» гидроабразивной струи

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ ОБРАБОТКИ КРОМКИ ПЕРА ЛОПАТКИ. СТРОГАНИЕ



Строгание металла



Текст к предыдущему слайду

Производительность данного метода значительно выше чистового фрезерования. Стругание позволяет снизить машинное время в 5-10 раз за счет многократного сокращения пути режущего клина вне обрабатываемого материала даже при гораздо меньшей скорости резания.

Также предлагаемый метод обработки кромок пера лопатки в силу оказания механического воздействия, которое превалирует над тепловым, наводит остаточные напряжения сжатия, которые в свою очередь повышают износостойкость и усталостную прочность.

Преимущества обработки кромок пера лопатки строганием заключаются в следующем:

- формирование остаточных напряжений сжатия;
- качество обработанной поверхности (шероховатость) сравнительно выше, чем у классического метода обработки кромок пера лопатки (фрезерования);
- исключается динамическая нагрузка на кромку при обработке, что положительно сказывается на стойкости режущего инструмента.

Несмотря на достоинства данного метода необходимо решить ряд задач для реализации данного способа обработки:

- сложность написания управляющей программы (УП) для строгания сложнопрофильных поверхностей;
- определение диапазона наклона кромки пера лопатки при проекции на плоскость, который позволит производить обработку без поворота режущего инструмента;
- разработка специального инструмента;
- требование минимизации ударной нагрузки в начале врезания.

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПРОБНОГО ОБРАЗЦА МЕТОДОМ СТРОГАНИЯ КРОМКИ ПЕРА
ЛОПАТКИ ГТД.**



Фрезерование

Строгание



ДИАГНОСТИКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ

- На данный момент существуют несколько принципиальных методик неразрушающей диагностики напряжений: метод магнитной памяти (ММП), рентгеновский метод, нейтронный, различные ультразвуковые методы, а также методы, основанные на влиянии остаточных напряжений на теплофизические свойства среды, диагностики остаточных напряжений в стальных образцах, с помощью возбуждаемых лазерным излучением импульсов продольных акустических волн. Каждая из перечисленных методик имеет как свои преимущества, так и недостатки, и универсального метода пока не существует.

РЕНТГЕНОВСКИЙ МЕТОД

- Метод основан на прецизионном измерении изменений межплоскостных расстояний, определяемых по смещению дифракционной линии. Иначе: основан на явлении дифракции рентгеновских лучей при прохождении через кристаллическую решетку.
- Рентгеновский метод позволяет определять напряжения в деталях сложной геометрической формы, неограниченных размеров, исследовать напряжения на весьма малых участках поверхности образца, измерять градиенты напряжений, определять мгновенные напряжения в деталях, подвергающихся периодическим нагрузкам.
- Недостатки: пониженная точность при работе с сильнодеформируемыми и крупнозернистыми материалами, невозможность одновременного измерения в нескольких точках. Есть ограничения по геометрии исследуемых образцов. Значительное влияние на результат может оказать состояние поверхностного слоя (влияние шлифовки, образование окалины, ковки, прокатки, коррозии). Сравнительно высокая стоимость оборудования. Дополнительные погрешности возникают при исследовании напряжений на участках, претерпевших в процессе сварки пластическую деформацию.

МЕТОД АФЧХ-ТЕСТИРОВАНИЯ



ТЕКСТ К ПРЕДЫДУЩЕМУ СЛАЙДУ

- Метод АФЧХ-тестирования Метод АФЧХ-тестирования используется в серии приборов СИТОН (скан-идентификаторы технологических и остаточных напряжений), разработанных ООО «НПП «Сигма-Тест». Прибор СИТОН (рис. 1) позволяет осуществлять измерение механических напряжений (технологических остаточных и эксплуатационных) в металле поверхностного слоя изделия неразрушающим методом АФЧХ-тестирования. Аппаратура включает переносной модуль, специальный электроконтактный датчик и персональный компьютер. Метод АФЧХ-тестирования реализуется путем пропускания электрического тока переменной частоты через исследуемый участок поверхности. Переносной модуль управляет в автоматическом режиме частотой измерительного сигнала. Специальный алгоритм позволяет по измеренным электрическим величинам определить величину средних напряжений в каждом слое с последующим пересчетом в интеграл напряжений и действительные напряжения. Сканирование осуществляется на 3 – 16 ступенях в зависимости от модификации прибора

АКУСТИЧЕСКИЕ (УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ) МЕТОДЫ

- Ультразвуковой метод основывается на зависимости скорости распространения ультразвуковой волны от напряженного состояния. Это неразрушающий метод, что позволяет применять его при исследовании ответственных конструкций. Однако, неоднородность механических свойств оказывает существенное влияние на скорость упругих волн, что ограничивает применение метода в сварных конструкциях.

- Метод позволяет измерять как поверхностные, так и внутренние напряжения. Чаще всего применяется для изучения одноосных остаточных напряжений. На основе нелинейной теории упругости получены соотношения, описывающие волновую скорость как функцию внутренних напряжений.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ

- Данная группа методов базируется на зависимости между магнитными свойствами металла и величиной действующих в данном объеме остаточных напряжений. Однако, помимо данной зависимости, имеется и зависимость от величины зерна, химического состава, структуры. Поэтому результаты измерений, полученные на образцах со структурной неоднородностью, например, в сварных швах, носят неоднозначный характер. Метод пригоден для измерения остаточных напряжений только в образцах из металлов и сплавов, обладающих магнитными свойствами. Глубина проникновения электромагнитных волн в ферромагнетик зависит от рабочей частоты волн. Минимальная толщина измеряемого слоя составляет 0,5мм, максимальная 1,5мм.
- Измерения проводят с использованием индуктивных преобразователей. С уменьшением площади поперечного сечения магнитопровода накладного индуктивного первичного преобразователя погрешность измерения уменьшается но снижается чувствительность.
- *Электромагнитный метод* значительно более производителен, чем тензометрический, оптический. Но точность его невысока. Наиболее целесообразно его применение для оперативного контроля (оценки) изменения остаточных напряжений. Для измерений остаточных напряжений используются эталоны, изготовленные из того же сплава и свободные от наличия в них остаточных напряжений.

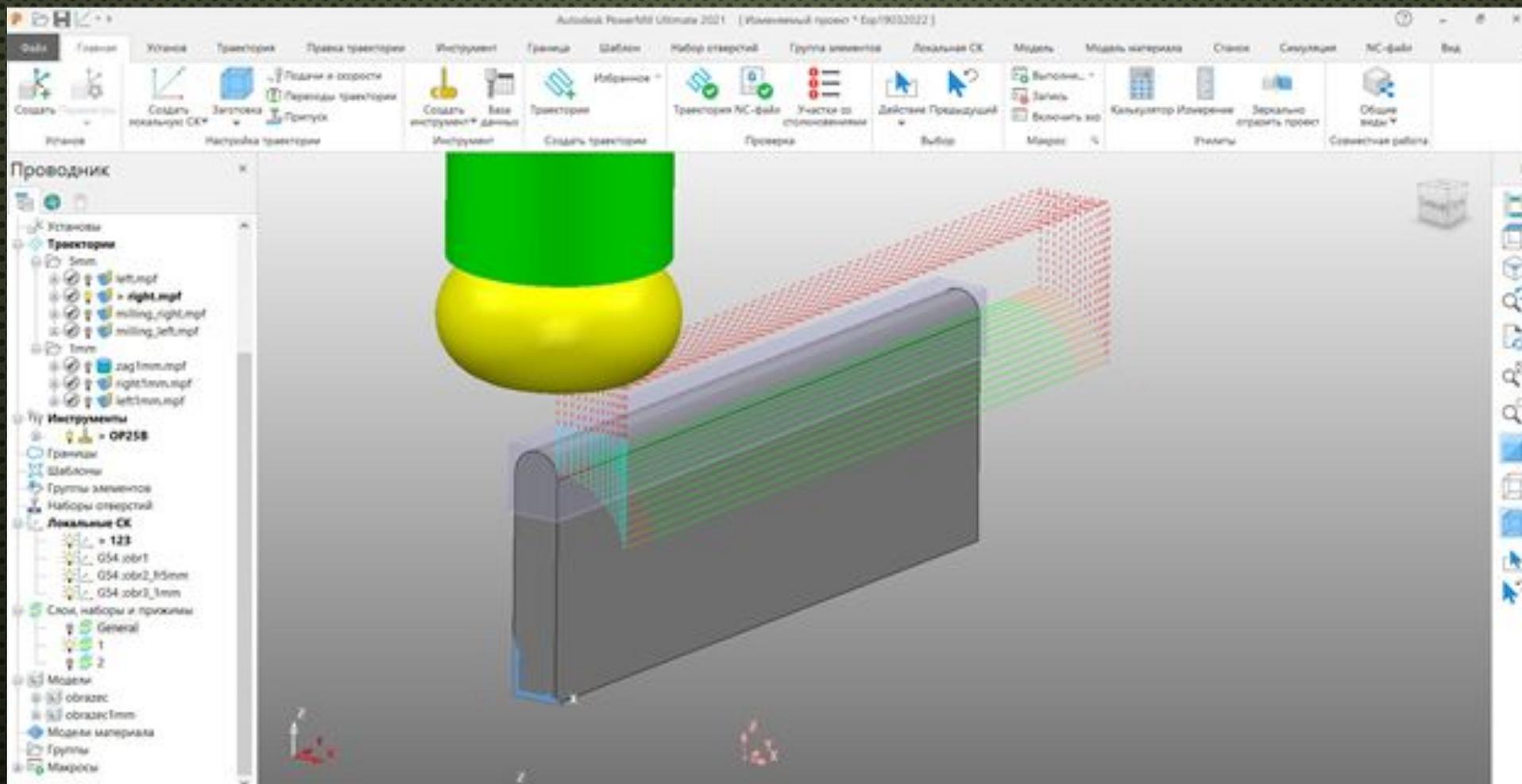
МЕТОД МАГНИТНОЙ ПАМЯТИ (ММП)

- МЕТОД ОСНОВАН НА РЕГИСТРАЦИИ СОБСТВЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАССЕЯНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИХ НА ОБОРУДОВАНИИ В ЛОКАЛЬНЫХ ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАБОЧИХ НАГРУЗОК В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ. ПРИ ЭТОМ ВЕЛИЧИНА МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАССЕЯНИЯ В ОБЪЕКТЕ КОНТРОЛЯ ОТРАЖАЕТ ТЕНЗОР ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ.
- ПРЕИМУЩЕСТВА — НЕ ВЛИЯЕТ НА СОСТОЯНИЕ МАТЕРИАЛА В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕРЕНИЯ.
- НЕ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА. НЕ ТРЕБУЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ.
- МАГНИТНАЯ ПАМЯТЬ МЕТАЛЛА — НЕОБРАТИМОЕ ИЗМЕНЕНИЕ НАМАГНИЧЕННОСТИ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЯМИ, ПРЕВЫШАЮЩИМИ СРЕДНИЙ УРОВЕНЬ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИМИ НА ОБЪЕКТЕ КОНТРОЛЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАБОЧИХ НАГРУЗОК В СЛАБОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ. ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МАГНИТНАЯ ПАМЯТЬ МЕТАЛЛА ПРОЯВЛЯЕТСЯ В ВИДЕ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ, СФОРМИРОВАВШЕЙСЯ ПОСЛЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ, И ОТОБРАЖАЕТ ИХ СТРУКТУРНУЮ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ.
- ЭТОТ МЕТОД ПОЗВОЛЯЕТ ПОЛУЧАТЬ ОБЪЕМНУЮ КАРТИНУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ С КОЛИЧЕСТВЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ОПРЕДЕЛЯТЬ ВЕЛИЧИНУ РАЗРУШАЮЩЕЙ ЭНЕРГИИ, НАКОПЛЕННОЙ В АКТИВНО РАСТУЩЕЙ НЕСПЛОШНОСТИ.

КОНТРОЛЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛА.

- Изменения электропроводности регистрируется либо путем ее прямого измерения, либо токовихревым методом. Прямой метод измерения требует наличия аппаратуры с высокой чувствительностью, а токовихревой – прост в использовании и пригоден для промышленного применения.
- Для проведения измерений требуется наличия градуировочного образца из того же материала и с той же термомеханической предысторией, что и исследуемый образец. Метод позволяет определять знак, направление и величину изменения значений остаточных напряжений.
- Точность токовихревого метода существенно зависит от базы датчика и от размера и постоянства зазора между изделием и преобразователем. Основной источник погрешности – немагнитный зазор, зависящий от шероховатости поверхности детали.

НАПИСАНИЕ УП ДЛЯ СТРОГАНИЯ



Текст к предыдущему слайду

При написании УП для обработки образцов строганием имеются определенные особенности, которые необходимо учитывать. Вначале разберем на примере образцов с неизменным углом, которые поддаются обработке при участии одного формообразующего движения:

Угол поворота инструмента в начале врезания;

наличие определенного расстояния от начала движения до врезания в заготовку, для разгона привода до рабочих подач;

для экономии времени на холостых перемещениях рекомендуется проводить обработку радиусной части “постепенно”, то есть сначала справа, затем слева;

ДИАГНОСТИКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ

- На данный момент существуют несколько принципиальных методик неразрушающей диагностики напряжений: метод магнитной памяти (ММП), рентгеновский метод, нейтронный, различные ультразвуковые методы, а также методы, основанные на влиянии остаточных напряжений на теплофизические свойства среды, диагностики остаточных напряжений в стальных образцах, с помощью возбуждаемых лазерным излучением импульсов продольных акустических волн. Каждая из перечисленных методик имеет как свои преимущества, так и недостатки, и универсального метода пока не существует.

