

Министерство образования и науки РФ
ООО «Союз машиностроителей России»
Правительство Ярославской области
Инновационный территориальный кластер Ярославской области
«Газотурбостроение и энергомашиностроение»
Ассоциация «Национальный объединенный аэрокосмический университет»
Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева
ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн»

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФОРУМ «ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ. ПРОИЗВОДСТВО»

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ,
ПОСВЯЩЕННОЙ 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
ГЛАВНОГО КОНСТРУКТОРА П. А. КОЛЕСОВА**

ТОМ 2

**INTERNATIONAL TECHNOLOGICAL
FORUM «INNOVATIONS.
TECHNOLOGIES. PRODUCTION»**

Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство»: Сборник материалов научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения главного конструктора П. А. Колесова. – Т. 2. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2015. – 250 с.

23 – 25 марта 2015 г. в Рыбинске состоится II Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство».

Основная идея форума – поиск решений, партнеров и новых идей, их практическое применение на машиностроительных предприятиях, что послужит стимулом к обеспечению технологического лидерства в отрасли.

Форум является площадкой для встречи технических специалистов машиностроительных и обрабатывающих предприятий с учеными, занимающимися фундаментальными исследованиями; специалистов в области инжиниринга с производителями оборудования, руководителей малых предприятий с руководителями крупных заводов и т. д.

В настоящий сборник вошли материалы научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения главного конструктора П. А. Колесова, которая пройдет в рамках МТФ – 2015.

Направления работы конференции:

1. Материаловедение и конструирование;
2. Газодинамика и горение;
3. Динамика и прочность;
4. Технологическая подготовка машиностроительного производства;
5. Метрология и сертификация.

ПЕТР АЛЕКСЕЕВИЧ КОЛЕСОВ (1915 – 2004)

– советский конструктор авиационных двигателей



Родился в Твери 17 августа 1915 г. В 1932 г. окончил в Москве конструкторские курсы Глававиапрома. Пока учился, работал в Центральном институте авиационного моторостроения в должности техника-конструктора.

В 1935 – 1941 гг. окончил Моторный факультет Московского авиационного института. В эти годы участвовал в создании редуктора для вертолета И. П. Братухина, разрабатывал топливную аппаратуру для моторов, выполнял расчеты системы регулирования поршневого мотора М-250 разработки КБ-2 МАИ.

В марте 1941 г. был направлен в опытный отдел Моторного завода № 16 в Воронеже, где 5 лет работал инженером-конструктором в группе кривошипно-шатунного механизма и картера поршневых моторов. Вместе с производством был эвакуирован в Уфу. В 1943 г. ОКБ-250, где работал П. А. Колесов, переводится оттуда в Рыбинск на Завод № 36 (НПО «Сатурн») и переименовывается в ОКБ-36 (ОКБ В. А. Добрынина).

В 1946 г. назначен ведущим конструктором по разработке двигателя ВД-4К для стратегического бомбардировщика Ту-85. За создание этого двигателя в 1951 г. П. А. Колесову в числе других конструкторов присуждена Государственная премия первой степени.

С 1952 г. ОКБ-36 занимается турбореактивными двигателями. В 1956 г. возглавил конструкторский отдел, а в 1959 г. был назначен заместителем главного конструктора. После ухода на пенсию В. А. Добрынина в 1961 г. П. А. Колесов назначается главным конструктором Рыбинского конструкторского бюро моторостроения, которым руководит до 1984 г.

Профессор (1976), доктор технических наук (1971), автор 43 изобретений и ряда научных трудов.

П. А. Колесов разрабатывал турбореактивные двигатели для самолетов КБ В. М. Мясищева (ВД-5 для дозвукового стратегического бомбардировщика), ОКБ А. Н. Туполева (в т. ч. для Ту-144), П. О. Сухого, А. И. Микояна, А. С. Яковлева. Вел работу над созданием двигателей: РД-7М2 для первого советского сверхзвукового ракетноносца; РД36-41 для самолета Т-4; РД36-51А и РД-36-51 для первого советского сверхзвукового пассажирского самолета Ту-144Д; РД-36-51В для первого советского сверхвысотного самолета М-17 («Стратосфера»); семейством подъемных и бустерных двигателей.

Лауреат Сталинской (1951) и двух Государственных (1971, 1979) премий. Награжден 2 орденами Ленина, орденами Октябрьской Революции, Трудового Красного Знамени, медалями.

ОБРАЩЕНИЕ ГУБЕРНАТОРА ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ К УЧАСТНИКАМ II МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФОРУМА «ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ. ПРОИЗВОДСТВО»



Дорогие друзья!

Я рад приветствовать участников и гостей Международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» на ярославской земле.

Основу промышленного потенциала нашего региона составляют высокотехнологичные предприятия оборонно-промышленного комплекса, входящие в перечень национальных стратегических компаний широкого спектра отраслей.

Наличие долгосрочных заказов для предприятий машиностроения и ОПК на ближайшее десятилетие в значительной степени увеличивает их потенциал для модернизации и расширения собственной производственной базы. В перспективе – это новые высокотехнологичные рабочие места и дополнительные доходы регионального бюджета, столь необходимые для обеспечения достойного уровня и качества жизни жителей Ярославской области.

Региональное Правительство тесно взаимодействует с промышленными предприятиями, оказывая поддержку модернизации производства, развитию внешнеторговой деятельности, повышению образовательного уровня сотрудников, а также создавая благоприятные условия для инновационной активности, используя кластерный подход.

Одним из показательных примеров является кластер «Газотурбостроение и энергомашиностроение», который объединил ведущие рыбинские предприятия, малые и средние компании-сателлиты, Рыбинский государственный авиационный технический университет и другие учебные заведения.

Необходимым условием для развития кластера является наличие авторитетной дискуссионной площадки, которой и является Международный технологический форум. Он обладает всеми возможностями для обсуждения актуальных проблем развития машиностроительной отрасли, моделирования кооперационных связей между компаниями при создании инновационных продуктов и услуг. Это уникальная возможность обмена опытом и мнениями с отечественными и зарубежными коллегами-профессионалами.

Желаю успешной работы!

Сергей Ястребов

ОБРАЩЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО ДИРЕКТОРА ОАО «НПО «САТУРН»,
ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ЯРО ООО «СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИИ»,
ПРЕДСЕДАТЕЛЯ СОВЕТА ИННОВАЦИОННОГО ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО
КЛАСТЕРА «ГАЗОТУРБОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ»



Уважаемые коллеги!

Итоги проведенного в 2014 году Международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» показали актуальность выбранного формата и поставленных перед научно-техническим сообществом проблем. Главный результат прошедшего форума для нашей компании – решение конкретных производственно-технических задач вместе с новыми партнерами. В течение года идеи, сформулированные участниками форума, дали старт новым проектам, были заключены первые контракты. Нам как со-организаторам очень приятно, что форум оказался полезен не только для нас, но и для широкого круга российских и зарубежных компаний и организаций, интересы которых охватывают широкий диапазон от академической науки до высокотехнологичных отраслей производства.

ОАО «НПО «Сатурн» уже несколько лет проводит организационные трансформации, чтобы перейти к парадигме ведения бизнеса по модели «открытых инноваций», и мы ожидаем, что форум 2015 г., станет площадкой открытых инноваций для компаний кластера «Газотурбостроение и энергомашиностроение» в сфере производства и технологий.

В этом году мы привлекли наших постоянных партнеров к проведению секций форума и считаем, что это повысит уровень компетенций участников секций и раскроет новые горизонты для развития всех участников.

Не важно, какой у Вас капитал, какие научные звания, сколько Вам лет и из какой Вы страны. Нам важно, что Вы умеете и знаете и какую продукцию Вы создаете, какие идеи помогут нам вместе создать новый успешный бизнес.

Главное – это наше совместное желание и стремление быть технологическими лидерами!

Добро пожаловать в Рыбинск!

Илья Федоров

ОБРАЩЕНИЕ РЕКТОРА РЫБИНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АВИАЦИОННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ П. А. СОЛОВЬЕВА (РГАТУ)



Уважаемые коллеги!

От имени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва» приветствую участников и гостей Международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство».

Тематическая направленность и значимость в формировании устойчивого развития высокотехнологичных отраслей экономики страны предопределили проведение Форума на базе РГАТУ имени П.А. Соловьёва. Конкурентоспособность университета определяется неразрывной связью с научно-производственным объединением «Сатурн», ведущим разработку газотурбинной техники нового поколения для авиации, энергетики и морского флота, позволяя использовать в процессе обучения теорию и практику реального двигателестроительного производства. Вуз занимает одно из ведущих мест в системе подготовки высококвалифицированных инженерных кадров для аэрокосмической отрасли и научных учреждений Российской Федерации.

Форум откроет широкие возможности установления новых и полезных контактов, позволит перенять опыт мировых лидеров высокотехнологичных отраслей, станет интересной дискуссионной площадкой для обсуждения широкого круга вопросов, связанных с разработкой и использованием последних отечественных и зарубежных достижений науки и техники, создаст условия для формирования и реализации системных и стратегических проектов по развитию отечественного авиадвигателестроения, станет эффективным инструментом развития конструктивного диалога между малыми инновационными компаниями и крупными промышленниками региона.

Желаю участникам, гостям и организаторам Международного технологического форума «Инновации. Технологии. Производство» новых творческих успехов, высоких результатов и достижения поставленных целей.

Удачи!

Валерий Полетаев

СЕКЦИЯ «ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ»

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПАКЕТЕ ANSYS

Р. В. Никифоров, канд. техн. наук, ст. преподаватель
Научный руководитель: В. В. Атрощенко, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

Широкое применение автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом получила в авиа и двигателестроении для сварки тонколистовых коррозионно-стойких сталей аустенитного класса, значительная часть из которых выполняется с присадочной проволокой или без нее на медной подкладке в соответствии с ГОСТ 14771-76 [1].

Максимальное радиальное усилие разжатия концентрических секторов при сварке кольцевых стыковых швов оболочек ограничено пределом текучести материала. Однако слишком малая его величина может привести к радиальным перемещениям свариваемых кромок вследствие термического расширения при нагреве значительной зоны вблизи кромки, и при последующей сборке таких оболочек друг с другом возникает ступенька, что недопустимо. При поузловой сварке часто возникают затруднения из-за несовпадения посадочных и присоединительных размеров собираемых после сварки узлов вследствие возникших перемещений, поэтому часто приходится выполнять подгонку отдельных узлов вручную, а иногда и осуществлять предварительную полную сборку, что существенно снижает возможности механизации и автоматизации сварочного производства. Существующие аналитические методы расчета остаточных деформаций не позволяют с достаточной точностью определить величину коробления сварных конструкций. В расчетных методах не учитывается величина теплоотдачи [2,3] в подкладку/подкладное кольцо, а также расположение и величина прижимных элементов оснастки [8]. Метод фиктивных сил дает лишь приближенную оценку деформаций и приводит к существенным погрешностям при расчетах конструкций, отличных от балочных [4,5]. В некоторых случаях есть возможность использовать упрощенные расчетные методы, когда площадь зоны пластических деформаций меньше всей площади поперечного сечения конструкции в 3-4 и более раза [6].

Аналитические методы, традиционно применяемые для расчета остаточных деформаций, позволяют оценить коробления конструкций после сварки весьма приближенно и не могут учитывать влияние схемы закрепления изделия в сварочном приспособлении и величину теплоотдачи в подкладку при сварке тонколистовых конструкций без проведения дополнительных экспериментов. Учет большинства из этих факторов на распределение остаточных деформаций после сварки изделия на стадии разработки и проектирования приспособления для сварки позволит существенным образом не только снизить расходы на производство приспособления для сварки, но и повысить технико-экономические показатели технологической подготовки производства еще до проведения предварительных экспериментов, а именно [6]:

- прогрессивность приспособления (производительность, механизацию, рациональность аппаратуры и оборудования, возможность обеспечения качества, трудоемкость, условия труда и техники безопасности, загрязнение среды и т. д.);
- длительность производственного цикла;
- габариты и массу приспособлений;
- потребное количество рабочих;
- удельную производительность;
- загрузку оборудования;
- вид и количество отходов;
- расход энергии и материалов;
- капитальные затраты на производство изделий и их себестоимость;
- годовой экономический эффект и срок окупаемости капитальных вложений.

В связи с этим, разработка численной термдеформационной модели для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции даст возможность рассчитывать коробления изделия еще при проектировании оснащения, не прибегая к проверкам и доработкам на спроектированном и изготовленном сборочно-сварочном приспособлении. В качестве примера был выбран корпус наружный турбины низкого давления двигателя АЛ31, имеющий как кольцевые сварные швы между обечайкой и фланцами, так и продольные сварные шва обечайки.

Расчет деформаций проводился на основе неизотермической теории течения с применением языка параметрического проектирования APDL. Загрузку временного шага проводили в нестационарном состоянии в соответствии с итерационным методом Ньютона-Рафсона для вычисления пе-

ремещений внутри шага (не более 10 итераций на 1 шаг). В расчетах использовали модель поведения пластичности с билинейным кинематическим упрочнением (Bilinear Kinematic Hardening) [7,9], характер деформации материала по которой удовлетворял бы критериям текучести Мизеса.

Распределение пластических деформаций по Мизесу в области сварного шва и поперечная усадка сварного изделия для конструктивного решения показано на рис. 1.

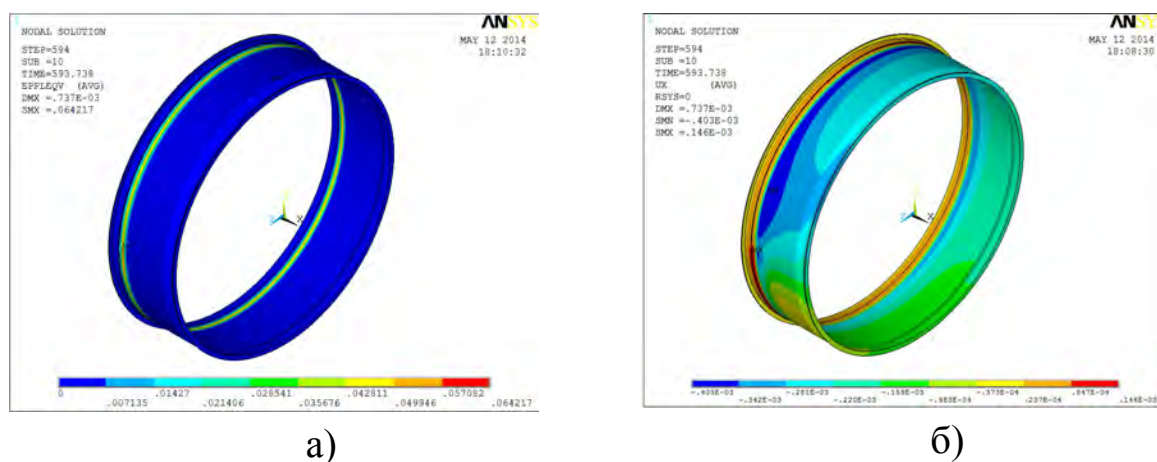


Рис. 1. Распределение пластических деформаций по Мизесу (а) и поперечная усадка сварного изделия для режима сварки с минимальной погонной энергией (б)

При моделировании влияния термдеформационного цикла сварки корпуса наружного опоры турбины низкого давления в сборочно-сварочном приспособлении на распределение остаточных деформаций было установлено, что величина как окружной, так и поперечной усадки кольцевых сварных швов тонкостенных оболочек не зависит от вводимой погонной энергии при сварке в интервале 111 - 156 кДж/м. Существенное влияние на величину поперечной усадки сварного изделия оказывает усилие осевого поджатия в сборочно-сварочном приспособлении, увеличение которого с 6,4 до 12,8 кН приводит к возрастанию поперечной усадки сварного изделия с 0,247 до 0,476 мм (в 1,9 раза) соответственно.

Использование разработанной термдеформационной модели на практике позволяет прогнозировать остаточные деформации тонкостенных сварных конструкций и обечаек с жесткими допусками на отклонение геометрических размеров и добиться их минимизации, подобрав наиболее рациональную схему закрепления в приспособлении, конструкцию и величину разжатия концентрических секторов и осевого поджатия сварного изделия на стадии проектирования сварочного приспособления.

Библиографический список

1. ГОСТ 14771-76. Дуговая сварка в защитных газах. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М.: Издательство стандартов, 1976. 49 с.
2. Атрощенко В.В., Бычков В.М., Никифоров Р.В., Паутов А.Н., Логоня А.А. Численное моделирование формы проплавления при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом на медной подкладке // Вестник УГАТУ. 2012. Т.16. №8(53). С. 89-94.
3. Бычков В.М., Никифоров Р.В., Паутов А.Н., Логоня А.А. Определение влияния теплоотвода в медную подкладку на проплавление тонколистовых материалов при аргонодуговой сварке // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14. №1. С. 349-353.
4. Винокуров В.А. Сварочные деформации и напряжения. М.: Машиностроение, 1968. 236с.
5. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформаций конструкций: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 1982. 272с.
6. Крампит Н.Ю., Крампит А.Г. Сварочные приспособления: Учебное пособие. Томск: ТПУ, 2008. 232 с.
7. Иванов К.М. Прикладная теория пластичности: учебное пособие. СПб.: Политехника, 2009. 375с.
8. Тефанов В.Н., Тефанов К.В. Основы конструирования технологического оснащения сварочного и реновационного производства: Практикум по дисциплине «Основы конструирования технологического оснащения». Уфа: УГАТУ, 2007. 56 с.
9. Chen B.-Q. Prediction of Heating Induced Temperature Fields and Distortions in Steel Plates: dissertation to obtain the degree of Master in Naval Architecture and Marine Engineering. Lisbon. 2011. 75p.

УДК 629.7

НОРМИРОВАНИЕ ВЫВЕДЕННЫХ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ НА ЛОПАТКАХ ТУРБИН МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГТД

А. В. Собуль, аспирант МАИ, инженер-конструктор 2 категории

А. К. Карачалов, эксперт по динамической прочности лопаток

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

В связи с технической невозможностью проведения испытаний по тензометрированию вибрационная прочность лопаток компрессоров и турбин малоразмерных ГТД подтверждается резонансными испытаниями. При отсутствии данных по вибронапряженности лопаток не представляется возможным выполнить нормирование допустимых повреждений (зачисток) в соответствии с ОСТ 1 00303-79.

Для таких случаев НПО «Сатурн» была разработана методология нормирования зачисток (выведенных повреждений) на перьях лопаток, заключающаяся в следующем:

- выполняется 3D расчет форм колебаний в диапазоне частот, соответствующих частотам источников возбуждения в проточной части
- экспериментально на вибростенде определяются формы колебаний лопаток, выполняется верификация с расчетными данными;
- идентифицируются наиболее критические формы колебаний лопаток (на основании имеющегося опыта доводки вибрационной прочности лопаток компрессоров и турбин ГТД производства ОАО «НПО «Сатурн»).

По опыту НПО «Сатурн» наиболее вибронапряженными формами колебаний лопаток турбин являются:

а) форма $f_{1\text{конс}}$, при которой весь венец (в данном случае сектор из трех лопаток) колеблется с частотой основного тона изолированной консольной лопатки, рисунок 1 а;

б) форма $f_{1\text{изг}}$ – 1-а изгибная форма при двухопорном закреплении рисунок 1б;

в) форма $f_{1\text{кр}}$ – 1-я крутильная форма при двухопорном закреплении рисунок 1в.

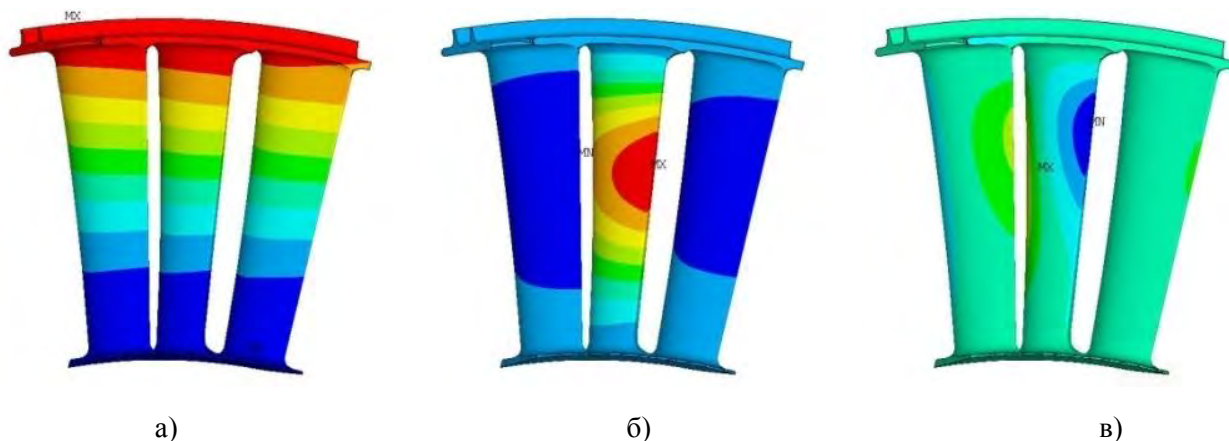


Рис. 1. Наиболее вибронапряженные формы колебаний лопаток

- выполняется 3D расчет распределения вибрационных напряжений по наиболее вибронапряженным формам колебаний, рисунок 2;

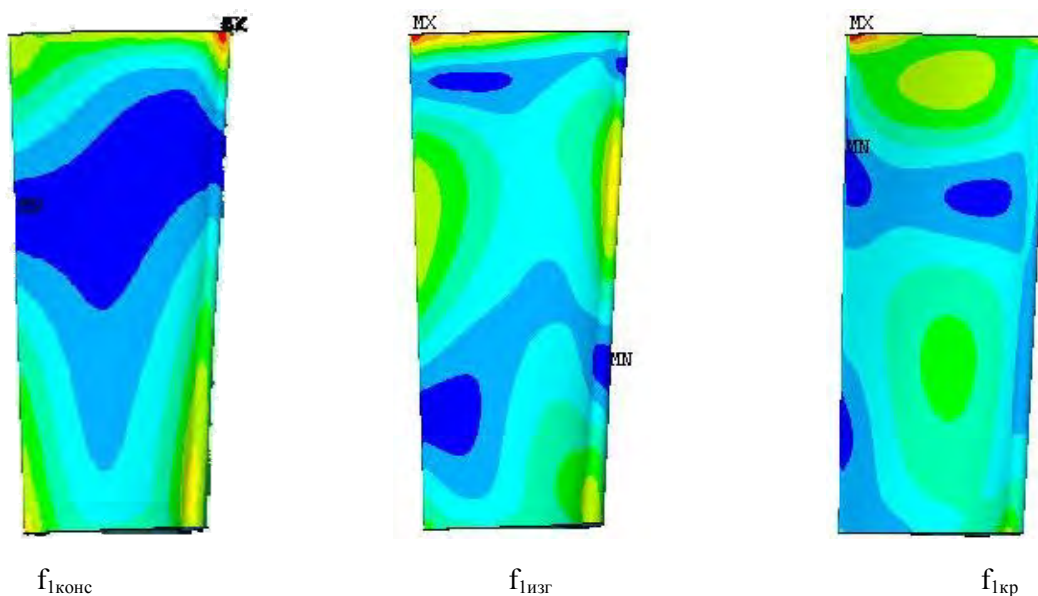


Рис. 2. Распределение относительных эквивалентных вибронапряжений для наиболее вибронапряженных форм колебаний лопаток

- в соответствии с нормативной документацией и имеющимся опытом определяются критические зоны на пере лопатки, где зачистки не допускаются (зоны с максимальной напряженностью по указанным выше формам колебаний);
- в остальных зонах пера моделируются несколько вариантов зачисток различной глубины, рисунок 3 а) – на входной кромке, б) – на выходной кромке, в) – на профиле лопатки со стороны корыта. выполняются расчеты распределения напряжений, определяется максимально возможная глубина зачистки для каждой зоны. Критерием допустимости выведенного дефекта является следующее: напряженность в зачистке не должна превышать напряженность в критической зоне исходной (неповрежденной) лопатки;

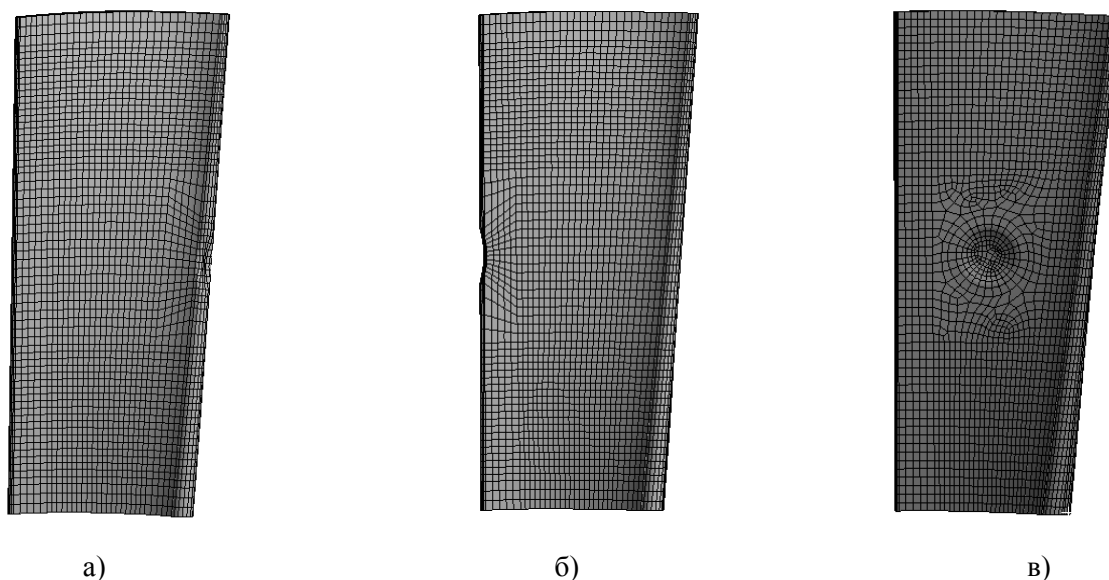
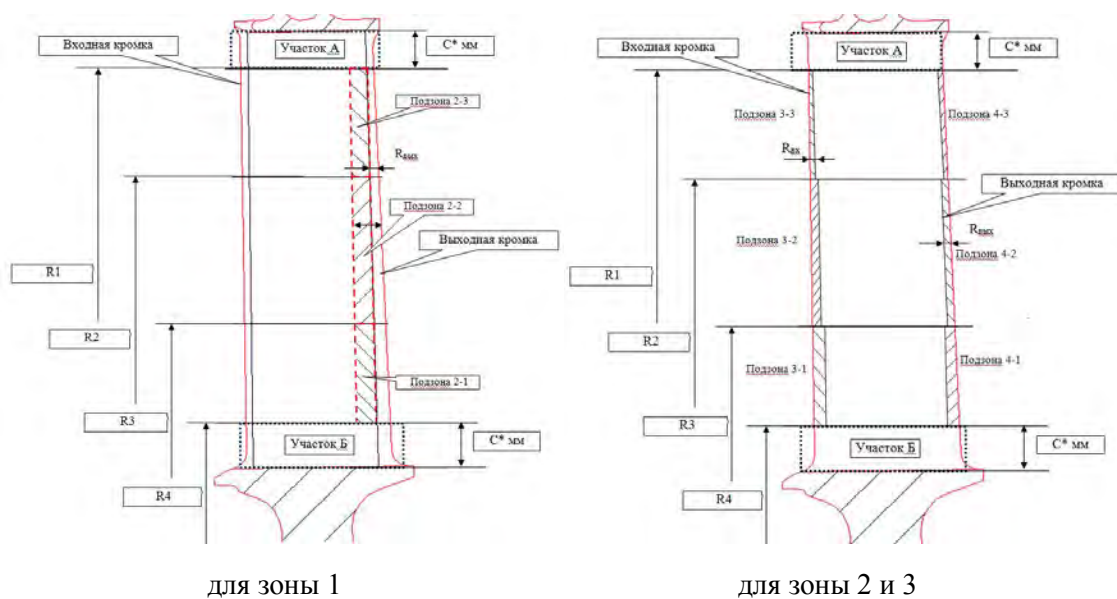


Рис. 3. Зачистка на лопатке $h=0,5$ мм, $L=5$ мм

- запас по статическим напряжениям при выбранной геометрии зачистки проверяется на соответствие требованиям нормативной документации.

Результатом приведенного выше комплекса расчетно-экспериментальных работ является создание карт допустимых выведенных дефектов для лопаток каждой исследуемой ступени. Пример карт допустимых выведенных дефектов приведен на рисунке 4.



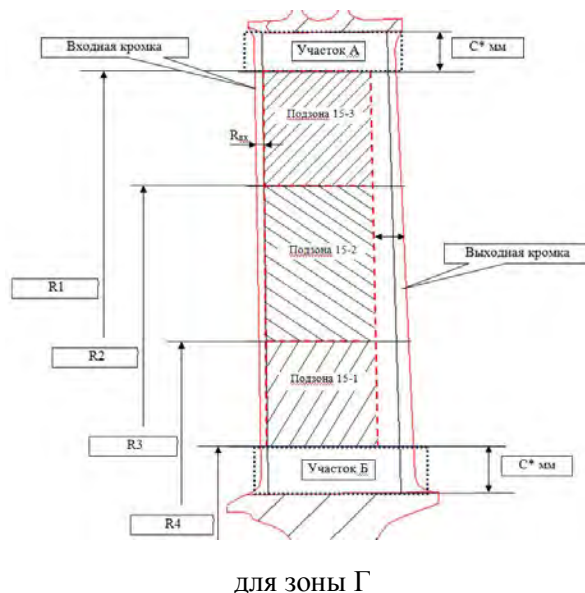


Рис. 4. Карты допустимых выведенных дефектов

УДК 534.629.7.036.3

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ К ФЛАТТЕРУ РАБОЧИХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. В. Посадов

Научный руководитель: А. Е. Ремизов, д-р техн. наук

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева»

Флаттер рабочих лопаток компрессоров авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) – наиболее опасный по своим проявлениям [1] вид аэроупругих колебаний, поэтому обеспечение устойчивости к флаттеру является актуальной задачей исследований.

Решение данной задачи достигается различными путями. Бандажирование рабочих лопаток ГТД в настоящее время не находит применения в ГТД нового поколения т.к. связано с ухудшением технических характеристик. Отстройка от флаттера за счет снижения изгибно-крутильной связанности колебаний [2,3] путем перепрофилирования пера лопатки (увеличения хорды и геометрических размеров сечений) ограничена требованиями к КПД и массе ГТД.

Для устранения указанных недостатков был разработан метод повышения устойчивости к флаттеру лопаток ГТД без их перепрофилирования и увеличения массы, состоящий в следующем.

Экспериментальным и/или расчетно-экспериментальным путем для исходной лопатки определяют первую и вторую изгибную и первую крутильную формы собственных колебаний и соответствующие им частоты. Расчетные методики базируются на методе конечных элементов с использованием системы ANSYS. Полученные значения уточняют экспериментально. Объектом исследования была выбрана рабочая лопатка подпорной ступени авиационного ГТД.

Выбирают критерий изгибно-крутильной связанности [2,3] и задают диапазон его допустимых значений.

Отстройку исходной лопатки от флаттера выполняют путем изгиба ее пера в сторону спинки. При этом форма изгиба соответствует наиболее опасной форме колебаний, в рассматриваемом случае – первой изгибной форме собственных колебаний исходной лопатки. Лопатка с исходным профилем при первой форме колебаний отклоняется в сторону спинки (рис. 1б). Отстроенная лопатка (рис. 1в) колеблется в обратную сторону (при схожей частоте и с такой же амплитудой). Таким образом лопатка возвращается из крайнего положения к первоначальному.

Определяют величину изгиба, требуемого для заданной «раздвижки» частот с сохранением аэродинамического качества лопатки. На рисунке 1а показаны: 1 – исходная лопатка и 2 – отстроенная.

Определяют критерий изгибно-крутильной связанности для отстроенной лопатки по критерию, определяемому как отношение разности частот второй (f_2) и третьей (f_3) форм колебаний к среднему значению (f_{cp}) этих частот [4].

Проверяют принадлежность полученного значения заданному диапазону его допустимых значений, по принадлежности к которому делают вывод об устойчивости лопаток рабочего колеса к флаттеру. Заданное минимальное значение критерия, при котором обеспечивается необходимая устойчивость лопатки к изгибно-крутильному флаттеру, составляет 15 % [4].

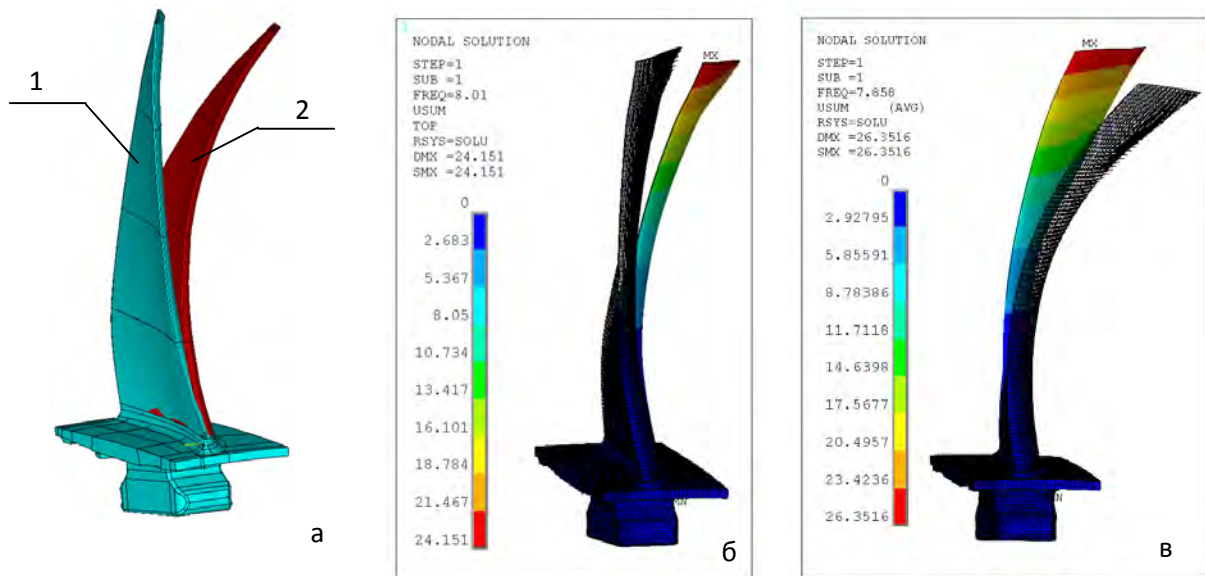


Рис. 1. а) исходная и отстроенная лопатки; б) колебание исходной лопатки по первой форме; в) колебание отстроенной лопатки по первой форме

Результаты моделирования в ANSYS показаны на рисунках 2, 3 и сведены в таблицу.

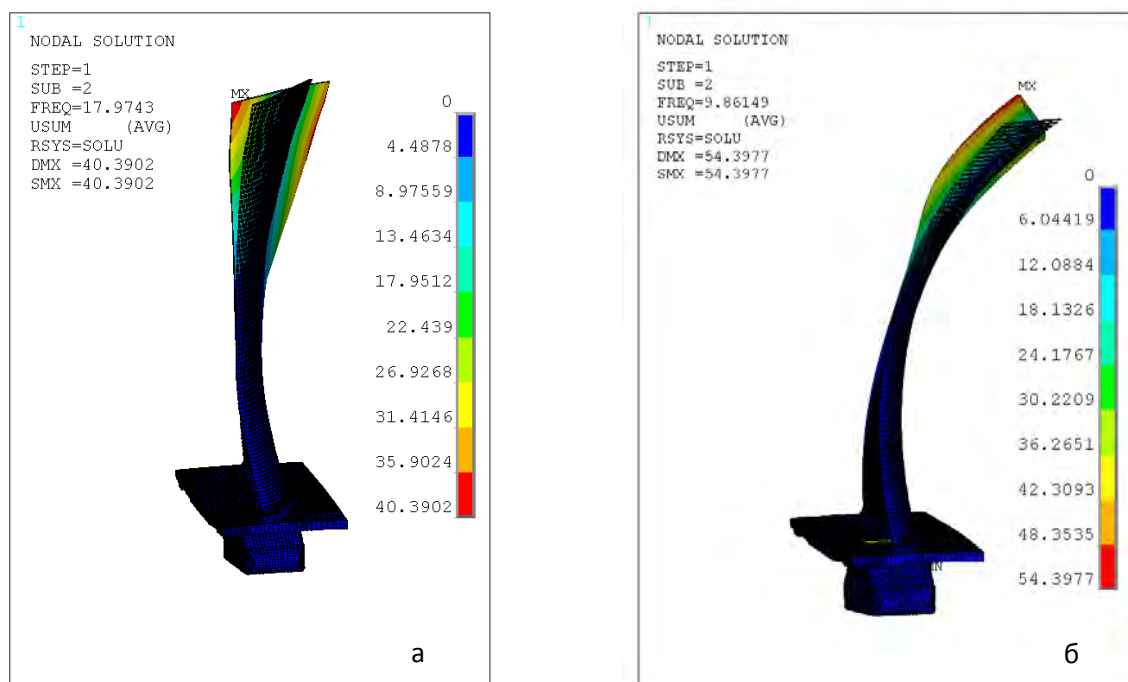


Рис. 2. Колебание лопатки по второй форме: а) исходная лопатка; б) отстроенная лопатка

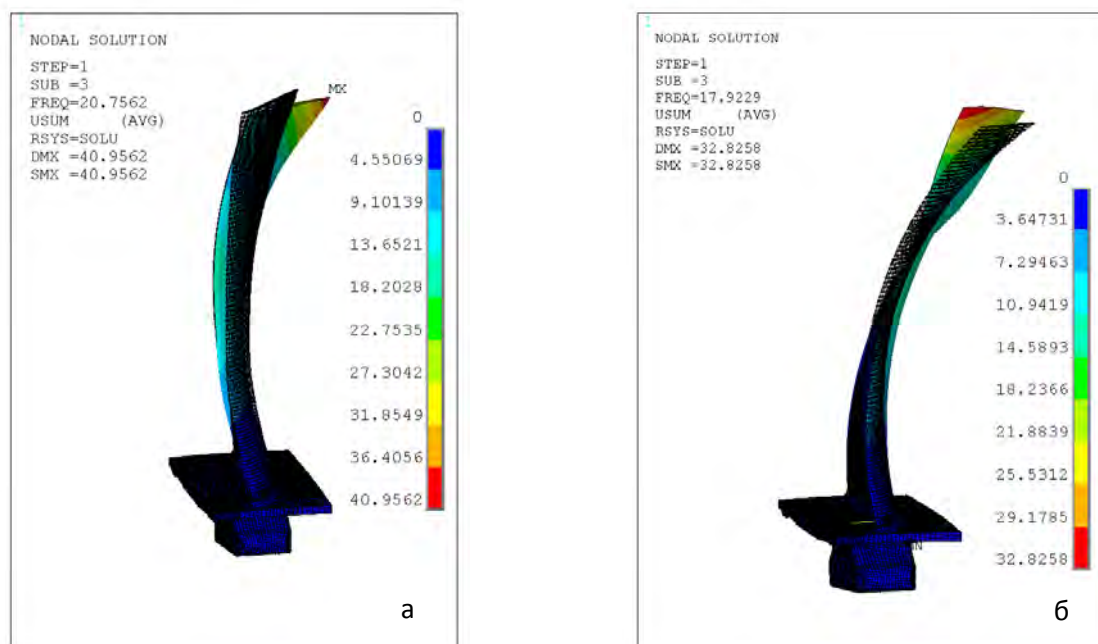


Рис. 3. Колебание лопатки по третьей форме: а) исходная лопатка;
б) отстроенная лопатка

Таблица

Изменение частот колебаний лопатки в зависимости от изгиба

Форма колебаний	Частота колебаний, Гц		Результат изгиба в части изменения частот колебаний для указанных форм
	Исходная лопатка	Отстроенная лопатка	
Вторая (f_2)	18,0	9,9	Снижение приблизительно в 2 раза
Третья (f_3)	20,8	17,9	Незначительное изменение
Результат отстройки			
Критерий $(f_3 - f_2)/f_{cp}$	14,4 %	61,8 %	«Раздвижка» частот в 4,3 раза

До изгиба пера (исходная лопатка) значение критерия составляло 14,4 % (ниже заданного значения).

После изгиба (отстроенная лопатка) частота колебаний пера по второй форме колебаний снизилась почти вдвое, а частота по третьей форме изменилась незначительно, в результате чего значение критерия составило 61,8 %.

Изгиб пера лопатки в сторону спинки по первой изгибной форме колебаний позволил увеличить «раздвижку» частот второй и третьей форм колебаний в 4,3 раза, а, следовательно, снизить изгибно-крутильную связанность.

Из рисунков 2, 3 видно, что изгиб пера не привел к увеличению напряжений в лопатке.

Предложенный метод снижения изгибно-крутильной связанности повышает устойчивость рабочих лопаток ГТД к флаттеру без перепрофилирования и увеличения их массы. На метод получен патент РФ на изобретение [5].

Библиографический список

1. Посадов В.В. Универсальный метод диагностики аэроупругих колебаний и анализа трендов вибраций при длительных испытаниях газотурбинного двигателя / Посадов В.В., Ремизов А.Е. // Вестник РГАТУ. – 2014. - № 1 (28). – С. 7-12.
2. Технический перевод ЦИАМ № 11721. Вопросы конструирования больших лопаток вентилятора, 1971.
3. И.М. Федоров. Численный анализ математических моделей динамической устойчивости и оптимизация лопаток турбомшины. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. М. 10.09.2008.
4. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. 3-е, перер. и доп.-е изд. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
5. Посадов В.В. (мл.), Посадов В.В., Фирсов А.В. Способ обеспечения устойчивости рабочих лопаток турбомшины к автоколебаниям: пат. 2533526. Рос. Федерация. № 2013138533/06; заявл. 19.08.2013; опубл. 19.09.2014.

УДК 621.4

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ РОТОРОВ ГТД В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS

А. В. Пахоменков, В. В. Воинова, А. Н. Яржин, Д. В. Габов

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г Рыбинск

Современные газотурбинные двигатели (ГТД) представляют собой сложные механические конструкции, состоящие из статора и ротора, работающие длительное время в широком диапазоне частот вращения. Корпус двигателя вместе с роторами представляет собой единую упругую систему, в которой возникают связанные колебания. Критические частоты вращения роторов и формы связанных колебаний могут существенно отличаться от частот и форм колебаний отдельных роторов.

В данной работе проведен сравнительный анализ расчетных значений критических частот вращения, полученных как на математической модели одновального ротора ГТД, так и на модели ротора совместно с корпусами.

Расчет критических частот вращения ротора проводился на 3D модели в программном комплексе ANSYS. Для построения модели использовались элементы типа SHELL (трехмерный мембранный). Конечно-элементные модели ротора и статора приведены на рис.1. Опоры ротора моделировались элементом COMBIN. Лопатки рабочих колес выполнены абсолютно жесткими для исключения лопаточных частот.

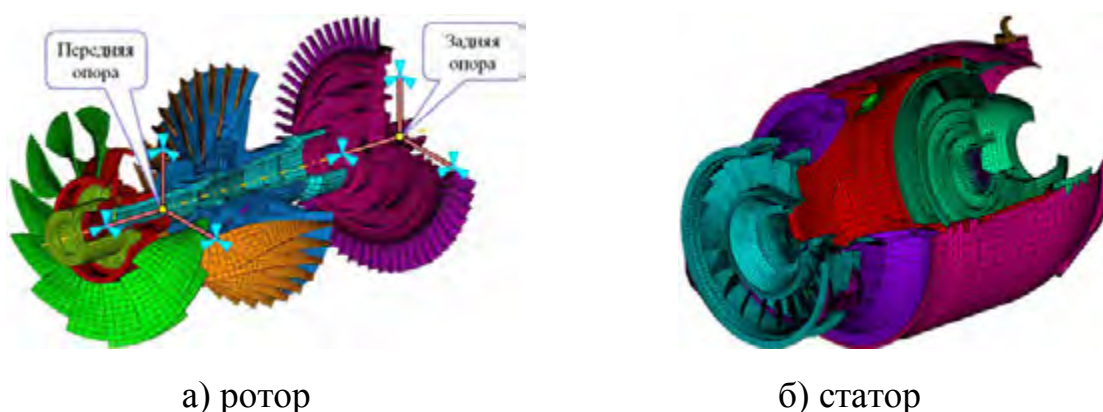


Рис. 1. Модель ротора ГТД и статора

Для построения модели статора использовались элементы типа SHELL и SOLID.

Результаты расчета системы «ротор + статор» приведены на рис. 2

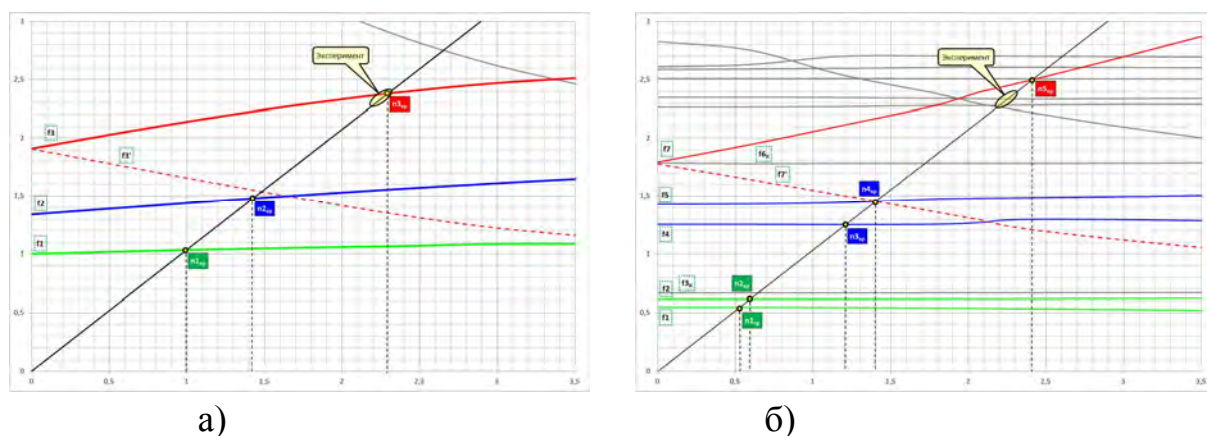


Рис. 2. Резонансная диаграмма: а) для изолированного ротора; б) для модели ротор+статор

Как видно из резонансной диаграммы, при расчёте модели ротор+статор происходит раздвоению критических частот опорных форм колебаний на две составляющие в плоскостях максимальной и минимальной жесткостей (это связано с ярко выраженной анизотропией жесткости опор модели с корпусами).

Анализ полученных результатов показал, что математическая модель ротора с необходимой точностью описывает динамические характеристики системы ротор – статор при сравнении расчетных критических частот с частотами, полученными экспериментальным путем (наибольшая погрешность менее 4%).

УДК 621.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАБРОСА СРЕДНЕЙ ПТИЦЫ НА ВХОД В АВИАЦИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Д. В. Габов, А. В. Пахоменков, Р. А. Азимов

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

Одной из наиболее важных задач обеспечения надежности и безопасности авиационных двигателей является обеспечение стойкости конструкции к попаданию посторонних предметов, в том числе птиц. Активное развитие вычислительной техники и численных методов моделирования сложных физических процессов, таких как ударные взаимодействия, позволяет использовать численные методы моделирования сложных дина-

мических термомеханических состояний конструкции на этапе проектирования и обоснования работоспособности конструкции.

Разработана методика моделирования заброса птицы на вход в авиационный двигатель. Данная методика основана на использовании конечно-элементного расчетного программного комплекса, с явной схемой интегрирования второго порядка по времени LsDyna.

Получены кривые деформирования материалов двигателя с эффектом скоростной чувствительности. В методике использована модель материала в форме закона пластического течения.

Для моделирования птицы выбран SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) метод. В качестве модели поведения материала выбрана модель MAT_NULL (позволяет получить уравнение состояния без расчета девиатора тензора напряжений, не обладает жесткостью при сдвиге). Уравнение состояния для материала птицы соответствует свойствам воды и описывается уравнением Грюнайзена. Форма птицы – эллипсоид с соотношением радиусов $2R \times R \times R$.

Сравнение деформированного состояния лопаток первой ступени ротора, полученного в результате эксперимента и расчета, приведено на рисунке 1.

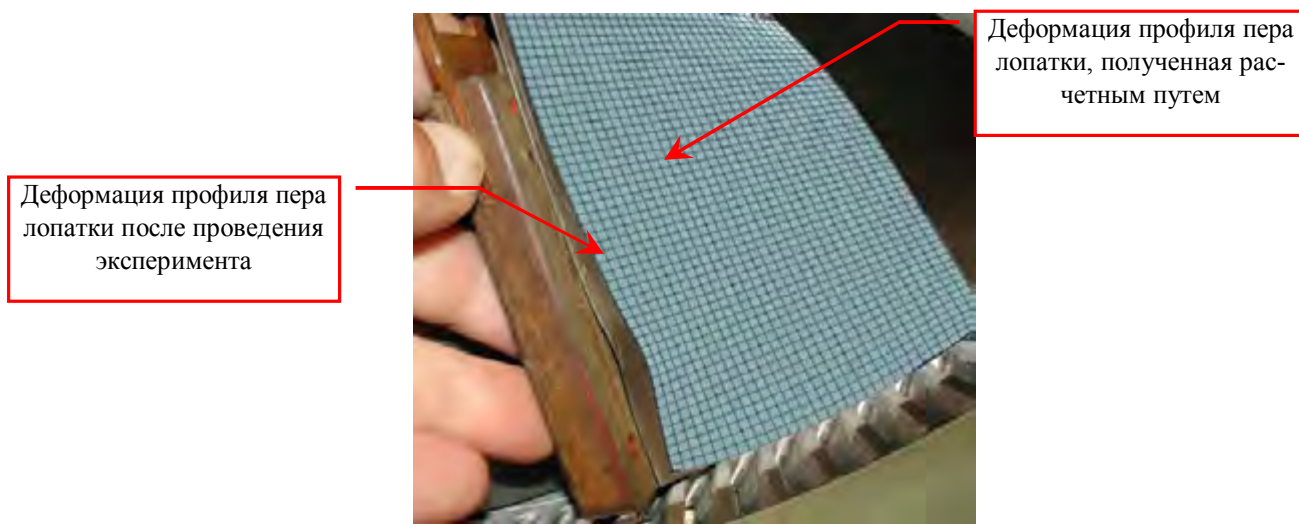


Рис. 1. Сравнение деформированного состояния лопаток первой ступени ротора



Рис. 2. Расчетная конечно-элементная модель

УДК 621.452

ЛОПАТОЧНЫЙ ВЕНЕЦ РОТОРА ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ С АСИММЕТРИЧНОЙ БАНДАЖНОЙ ПОЛКОЙ

С. М. Скирта, Ф. В. Карпов, И. А. Немтырева, канд. техн. наук
ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

Широко известны рабочие лопатки газовых турбин с бандажными полками. Бандажная полка служит для уменьшения потерь КПД в радиальном зазоре и демпфирования вибраций. Контактные поверхности бандажных полок лопаток соединяются в колесе между собой с монтажным «натягом» и демпфируют колебания рабочих лопаток за счет трения. При сборе лопаток в колесе полку поворачивают и тем самым создают необходимый «натяг».

Основным недостатком такой конструкции является то, что большая жесткость на кручение профильной части пера затрудняет выбор параметров зацепления верхних бандажных полок, трудно выбрать оптимальный натяг из-за опасности возникновения больших напряжений в лопатке и, как следствие, возникновения связанных с этим дефектов. А так же такая конструкция не позволяет осуществлять замену отдельных лопаток на изделия без его демонтажа, что является особенно важным для энергетических установок большой мощности. Все это приводит к тому, что, несмот-

ря на все преимущество применения рабочих лопаток с верхними бандажными полками, приходится выполнять рабочие лопатки без них.

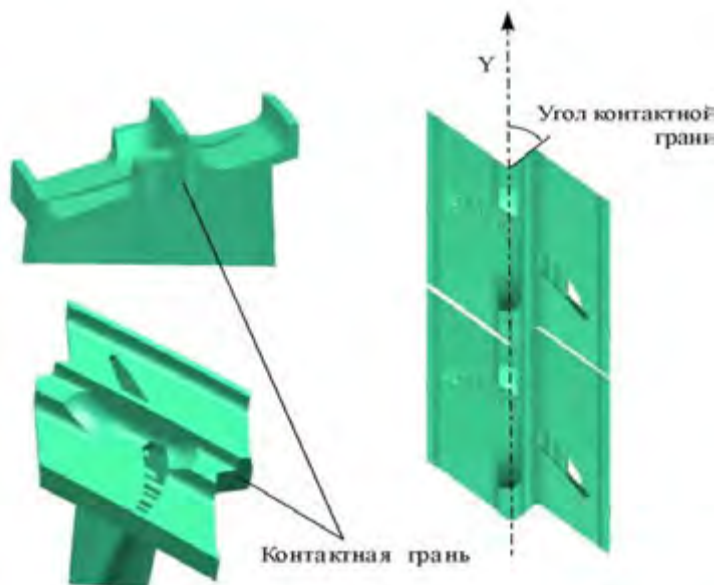


Рис. 1

Предлагаем снижение перетеканий через радиальный зазор и демпфирование вибраций осуществлять за счет верхней бандажной полки, имеющей плечи разной длины со стороны спинки и корыта (рисунок 2). В этом случае натяг на контактной поверхности появляется только во время работы двигателя. Усилия на контактные грани точно рассчитаны и регулируются с помощью отношения длин плечей.

Новым является то, что верхняя бандажная полка имеет вылет со стороны спинки меньший, чем со стороны корыта. В отличие от общепринятых бандажных полок «натяг» в рабочем колесе создается за счет асимметрии предлагаемой бандажной полки и различной упругости ее плечей.

Контактные поверхности на гранях плечей выполнены под углом 45 градусов (острый угол) со стороны спинки и 135 градусов (тупой угол) со стороны корыта к поверхности вращения. На этапе проектирования лопатки в программном комплексе ANSYS рассчитывается геометрия верхней бандажной полки, расположенной на концевой части профиля, таким образом, чтобы отношение вылета со стороны спинки к вылету со стороны корыта составило 0,26...0,3 для компенсации сил, действующих на бандажную полку рабочего колеса при работе турбины.

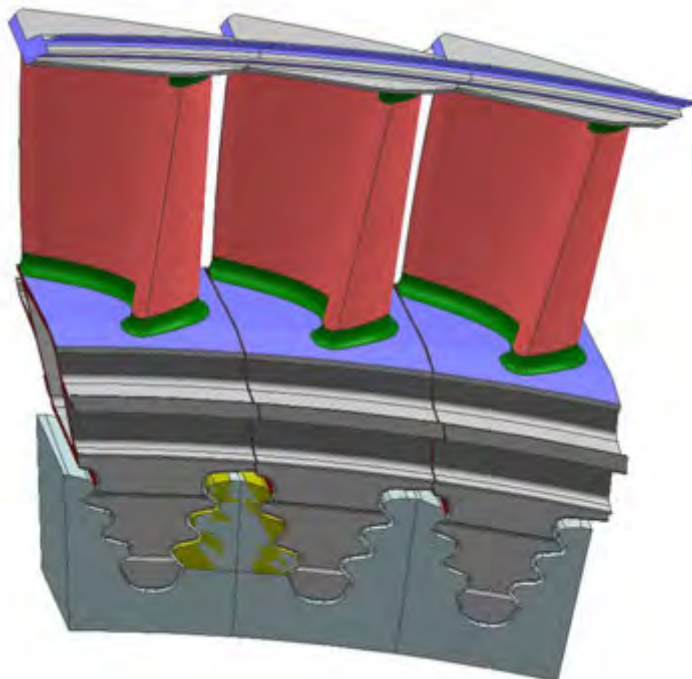


Рис. 2

Бандажная полка намеренно нецентрирована относительно периферийного сечения. Вылет (консоль) полки со стороны корыта значительно больше вылета полки со стороны спинки. Следствие этого – различная податливость консоли со спинки и корыта, что приводит к различной деформации свободных (не стоящих в колесе) концов полки в поле центробежных сил (рисунок 3). В сборе (в колесе) более податливый конец полки упирается в менее податливый, образуя при этом натяг (сила в контакте ~ 175 кгс), это приводит к выравниванию напряжений в галтелях полки со стороны спинки и корыта. Причем отношение перемещения короткой части бандажной полки к длинной составляет приблизительно 1 к 10. При этом при работе турбины возникает контакт бандажных полок по контактными полостям в рабочем колесе и необходимый натяг для его демпфирования.

Таким образом, в области рабочих температур и высоких частот вращения за счет компенсации сил, действующих на полку, происходит не отрыв бандажной полки, а перемещение одной относительно другой по плоскости контактной поверхности, составляющей 45 градусов к поверхности бандажной полки. Такая геометрия делает возможным применение бандажных полок даже на первой наиболее горячей ступени турбины. Кроме того, подобная конструкция позволяет производить замену рабочих лопаток в колесе турбины без ее демонтажа, что существенно снижает издержки при эксплуатации двигателя.

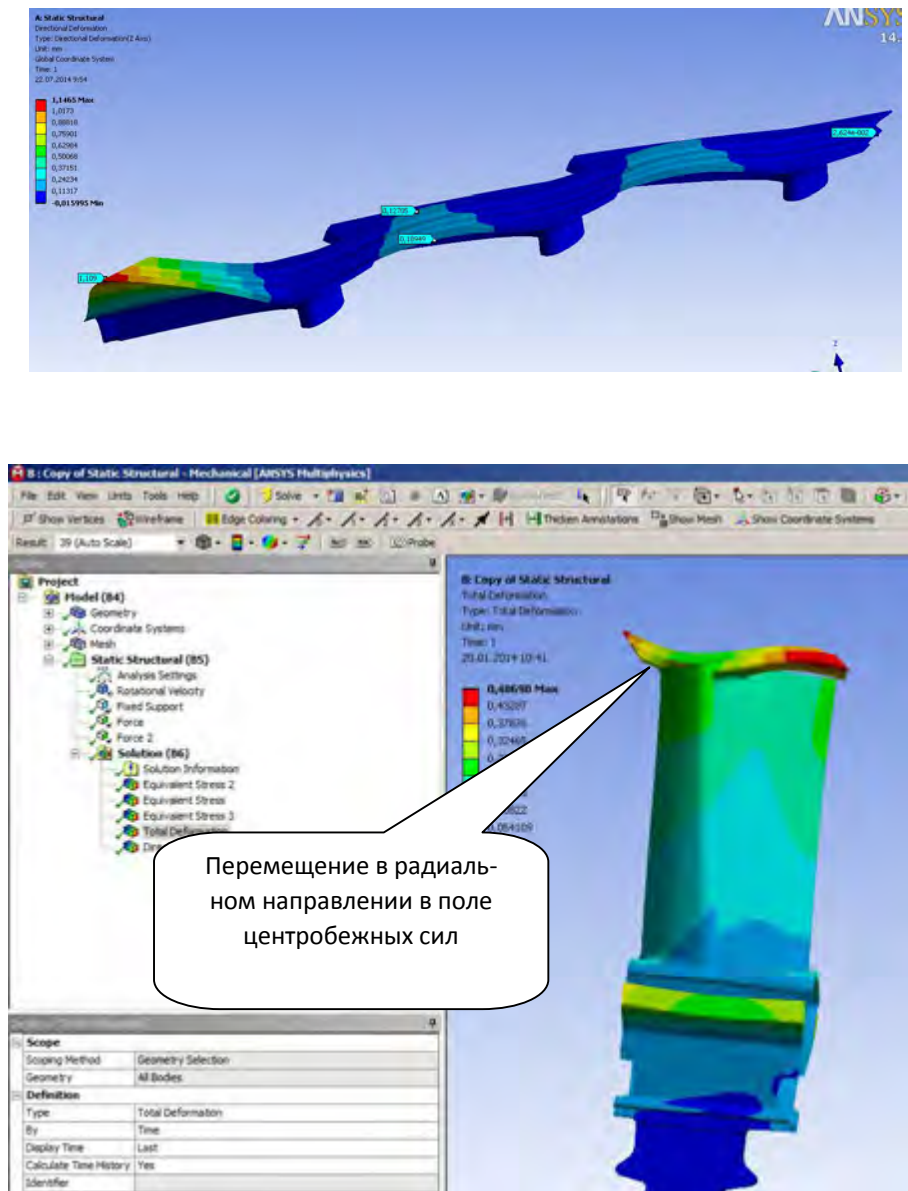


Рис. 3

Расчеты показали, что благодаря такой геометрии бандажной полки с учетом корректно рассчитанных вылетов мы получаем напряжения в ней уровень которых гораздо ниже, чем для традиционных бандажных полок. К тому же, при их контакте во время работы двигателя не происходит их деформации и отрыва, а плавное перемещение полок относительно друг друга в окружном направлении по контактным поверхностям. Кроме того отсутствие зигзагообразного зацепления по контактным поверхностям и натяга при сборке делает возможным замену рабочих лопаток в колесе без демонтажа турбины.

УДК 629.782

ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПРИ РЕМОНТЕ ДЕТАЛЕЙ ГТД

С. Н. Бардинова, канд. техн. наук, ведущий инженер-технолог

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

Технологический процесс ремонта деталей должен обеспечивать их высокое качество, надежность и заданный ресурс. Вместе с тем при выборе способа обработки при ремонте массовых деталей необходимо учитывать и экономическую эффективность.

При обработке деталей в процессе резания происходит изменение технологических условий обработки (колебание величины припуска, изменение физико-механических характеристик материала заготовки, износ инструмента, изменение скорости резания относительно сечений). Таким образом, применяя полирование в качестве окончательной обработки, нельзя добиться постоянства эксплуатационных свойств по всей обработанной поверхности, поэтому усталостная прочность лопаток получается различной. Возникает необходимость в совершенствовании технологии ремонта деталей, для получения необходимых параметров качества поверхностных слоев и условий механической обработки с точки зрения обеспечения требуемой усталостной прочности. Кроме того, для тонкостенных деталей имеет значение применение методов финишной обработки с минимальной силой, воздействующей на обрабатываемое изделие. Наряду с финишной обработкой, осуществляемой путем удаления слоя металла, следует более широко применять методы пластической деформации, которые позволяют получить не только необходимую макро- и микрогеометрию поверхности, но и повысить износостойкость и создать благоприятные напряжения, способствующие повышению эксплуатационных свойств машин. [1].

В настоящей работе проводится анализ возможности применения такого технологического метода повышения усталостной прочности и износостойкости деталей при ремонте деталей ГТД, как дробеструйная обработка.

Изучение влияния режимов дробеструйной обработки на физико-механические свойства поверхностного слоя является условием установления оптимальных режимов обработки (давление воздуха P , время обработки, расстояние детали до сопла L , угол атаки α), которые позволят по-

высить усталостную прочность деталей при сохранении требуемого качества поверхностного слоя.

Для проведения экспериментальных исследований на первом этапе были подобраны лопатки компрессора высокого давления из материала ЭИ787. Обработку образцов проводили на дробеструйной установке фирмы “Rösler” стальной дробью $\varnothing 0,315$ мм по следующим режимам (табл. 1).

Таблица 1

Режимы обработки образцов

Партия №1	$P=0,2\text{МПа}, L=125\text{ мм}, \alpha=45^0$
Партия №2	$P=0,3\text{МПа}, L=125\text{ мм}, \alpha=45^0$
Партия №3	$P=0,4\text{МПа}, L=125\text{ мм}, \alpha=45^0$
Партия №4	$P=0,2\text{МПа}, L=125\text{ мм}, \alpha=90^0$
Партия №5	$P=0,3\text{МПа}, L=125\text{ мм}, \alpha=90^0$
Партия №6	$P=0,4\text{МПа}, L=125\text{ мм}, \alpha=90^0$

После проведения обработки был произведен анализ качества поверхностного слоя, который показал, что при увеличении давления воздуха и расстояния увеличивается шероховатость поверхности, при условии полного охвата поверхности при обработке. Значения шероховатости поверхности, полученные при дробеструйной обработке, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения шероховатости поверхности, полученные при обработке

№ партии	Ra , мкм
1	1,13
2	1,85
3	2,72
4	1,59
5	1,32
6	2,01

Для испытаний на усталость использовалась установка ВЭДС-1500, позволяющая возбуждать колебания лопаток по основному тону и высшим формам колебаний с необходимой амплитудой колебаний. Оценен предел выносливости на базе $2 \cdot 10^6$ циклов профильной части пера лопатки при комнатной температуре по результатам испытаний натурных лопаток на усталость при колебаниях по основному тону.

Для каждого разрушенного образца вычислялся условный предел выносливости σ_{-1}^y по следующей формуле:

$$\sigma_{-1}^y = \sigma_{pi} - \frac{\Delta\sigma}{2},$$

где σ_{pi} – разрушающее напряжение, МПа; $\Delta\sigma$ – величина повышающего напряжения, МПа.

Для каждого вычисленного предела выносливости определялась вероятность разрушения P_i , равная отношению числа образцов, разрушенных при амплитуде σ_i и ниже, к общему количеству образцов:

$$P_i = \frac{n_{1p} + n_{2p} + \dots + n_{pi}}{n}$$

где n_{pi} – число образцов, разрушившихся при амплитуде σ_i ; n – общее количество образцов.

Произведена обработка результатов для построения кривой усталости и определения предела выносливости.

Построен график зависимости вероятности разрушения от предела выносливости в координатах $P - \lg \sigma$ (рисунок 1).

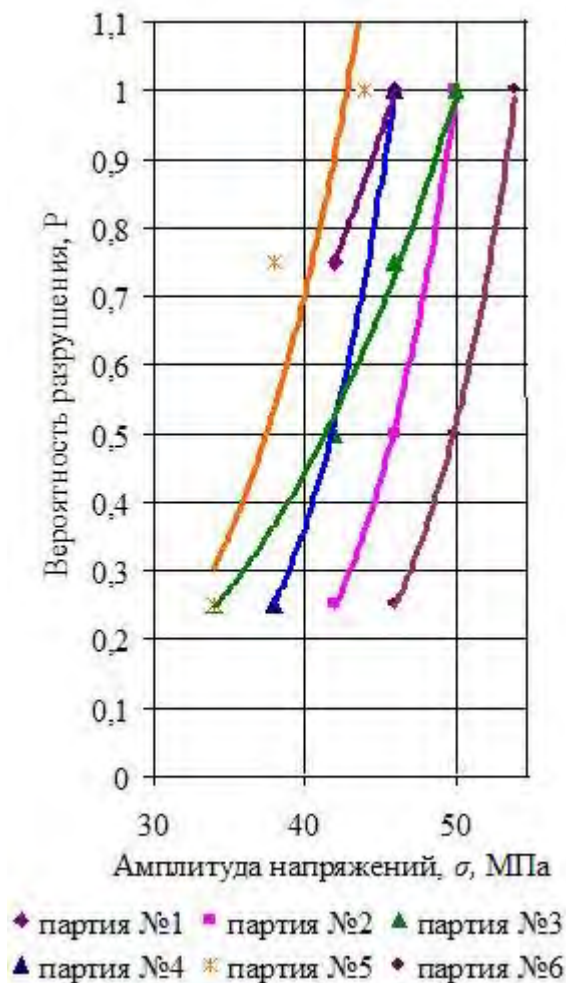


Рис. 1. Зависимость вероятности разрушения от амплитуды напряжения образцов из материала ЭИ787

По существующей документации предел прочности лопаток должен быть не менее 32 кг/мм^2 для образцов из материала ЭИ787. Дробеструйная обработка позволила повысить усталостную прочность деталей и обеспечить требуемые нормативные значения.

Таким образом, введение дробеструйной обработки в технологию ремонта деталей ГТД позволяет повысить качество проводимого ремонта, увеличить срок службы отремонтированных деталей.

Библиографический список

1. Елизаветин М. А. Повышение надежности машин. – М.: Машиностроение, 1973. – 430 с.
2. Авдонин А. С., Фигуровский В. И. Расчет на прочность летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1985. – 440 с.

УДК 621.4:681.518: 004.932.2

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛИ ГТД НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЯ

И. Н. Паламарь, канд. техн.наук, доцент, профессор

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Эффективная эксплуатация авиационных двигателей связана с обеспечением высокого уровня надежности и работоспособности изделий, важную роль в достижении которого играют ответственные детали ГТД. Такие детали ГТД в процессе эксплуатации испытывают влияние множества дестабилизирующих внутренних и внешних факторов, к которым относятся значительные высокочастотные знакопеременные и циклические нагрузки, существенные термические нагрузки в условиях воздействия агрессивных сред. Следовательно, к высоконагруженным деталям предъявляются повышенные требования по параметрам надежности и долговечности, определяемым такими свойствами как жаропрочность и жаростойкость, износостойкость и т. д.

Требуемые эксплуатационные свойства обеспечиваются как структурой материала детали, так и в значительной степени структурой поверхностного слоя. В процессе эксплуатации происходит неизбежная деградация структуры поверхностного слоя, создаются условия для формирования дефектов из-за деформации детали, коррозии и эрозии материала, возникновение зон концентрации напряжений и т. п.

Контроль состояния поверхностного слоя ответственных деталей машин является одним из важных этапов при оценке технического состояния деталей, по результатам которого принимаются решения либо о возможном продолжении эксплуатации, либо о возможности восстановления для продления ресурса работы и выбора соответствующей технологии ремонта, позволяющей восстановить эксплуатационные характеристики детали и, следовательно, продлить ее ресурс и ресурс механизма в целом.

Ответственные детали представляют собой сложную систему, совершенствование структуры которой является целью согласованной совокупности технологий изготовления. Поскольку значения параметров определяются состоянием структуры поверхностного слоя, современные исследования опираются на анализ изображений структуры, ее характерных элементов. Анализ качества структуры и её параметров позволяет оценить техническое состояние детали, которое определяется структурой. Под техническим состоянием структуры будем понимать совокупность подверженных изменению параметров структуры на изображении поверхностного слоя, определяющих требуемые эксплуатационные свойства детали в соответствии с используемой технологией на определенном этапе жизненного цикла, установленных технической документацией или согласующихся со знаниями экспертов.

Различные эксплуатационные параметры определяются различными структурными элементами, выделение которых является функциональным назначением системы анализа изображения структуры. В соответствии с концепцией функциональной адаптации универсальная система должна обладать возможностями для изменения анализируемых параметров структуры и критериев их оценки в зависимости от контекста функционального назначения анализа.

Для анализа структуры широко применяется мультифрактальный анализ изображения, позволяющий получить числовые характеристики описания структуры. Возможности математической оценки однородности и упорядоченности структуры позволяют исследовать изменения структуры и выявлять связь с различными эксплуатационными характеристиками

материалов, например, микротвердостью [1], с коэффициентами упрочнения и пределов текучести [2] и т. п.

Мультифрактальный анализ выполняется на основе бинаризованного изображения [3]. Поскольку алгоритмы реализации мультифрактального анализа ориентированы на попиксельную обработку, то точность вычисления параметров сильно зависит от качества предварительной обработки изображения. Операция бинаризации, используемая для предварительной обработки изображения, эффективно работает только для изображений, объекты интереса на которых являются контрастными и однородными.

Изображение поверхностного слоя относится к изображениям неоднородной сегментной структуры. Такие изображения требуют для качественной сегментации сложных процедур обработки, ориентированных на представление спектральной, текстурной и контурной информации об структурных элементах.

С целью совершенствования качества мультифрактального анализа изображения неоднородной сегментной структуры и повышения эффективности исследования влияния отдельных структурных элементов на эксплуатационные показатели детали необходимо адаптировать процесс вычисления мультифрактальных характеристик к функциональному назначению структурных элементов.

Метод сегментации структурных элементов предполагает совместное использование разнородной информации об изображении (спектральной, текстурной и контурной) в рамках общей модели представления данных. Это позволит максимально эффективно использовать информацию о реальной структуре поверхностного слоя или материала детали в целом. В результате сегментации изображение представляется множеством выделенных областей, каждая из которых описывается спектральными, текстурными и контурными дескрипторами, которые могут объединяться с помощью процедур слияния по целевым критериям в функциональную систему. Для функциональной системы строится семантическая сеть описания, которое обладает чувствительностью к топологическим изменениям структуры.

Метод мультифрактального анализа может быть интегрирован в общую технологическую систему обработки и анализа изображения за счёт многомасштабного представления пикселя с его окрестностью, что позволяет получить вектор мультифрактальных показателей по глубине рассмотрения. Кроме того, каждый масштабный уровень для изображения в

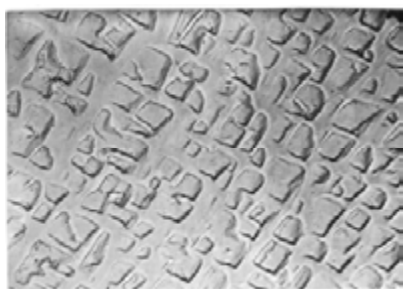
целом позволяет получить топологическую карту представления структурных элементов.

Предлагаемый подход позволяет получить расширенный набор мультифрактальных параметров структуры на различных масштабных уровнях, интегрировать процесс оценки технического состояния структуры с анализом изображения и, таким образом, адаптировать анализ структуры к её исследуемым функциональным свойствам.

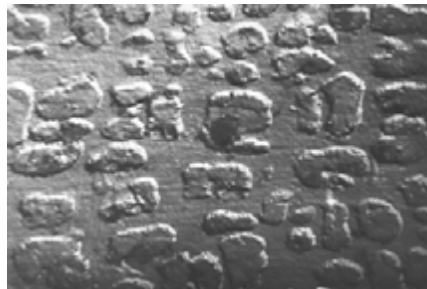
В авиадвигателестроении широко применяют жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС), которые имеют гетерофазную структуру. Количественные и морфологические параметры γ' -фазы определяют свойства жаропрочности и жаростойкости высоконагруженных деталей ГТД. Изображения структуры ЖНС, отражающие изменения γ' -фазы в процессе термоусталости представлены на рисунке 1.

Анализ изображения на различных масштабных уровнях и выделение структурных элементов по функциональному назначению позволяет получить характеристики структуры, связанные с определенными эксплуатационными показателями. Совместный анализ выбранных структурных систем на определенных уровнях позволяет оценить характеристики, определяемые взаимоположением и взаимовлиянием структурных элементов.

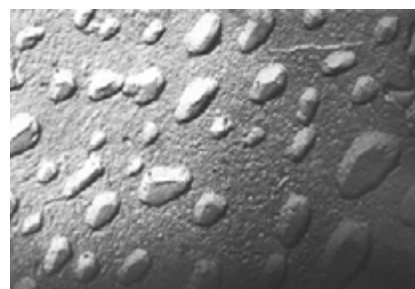
Примеры результатов выделения структурных элементов на различных масштабных уровнях для исходного состояния структуры, приведенного на рисунке 1 а), представлены на рисунке 2. Сегментация изображения выполнена в автоматическом режиме с помощью программной среды [4]. Мультифрактальный анализ структуры, выполняемый на каждом масштабном уровне, позволит отразить характеристики функциональной однородности структуры и позволяет получить более точную оценку технического состояния структуры по исследуемым эксплуатационным показателям.



а)



б)



в)

Рис. 1. Изображения шлифа монокристаллического ЖНС: а) исходное состояние; б) состояние после 350 термоциклов; в) состояние после 2000 термоциклов

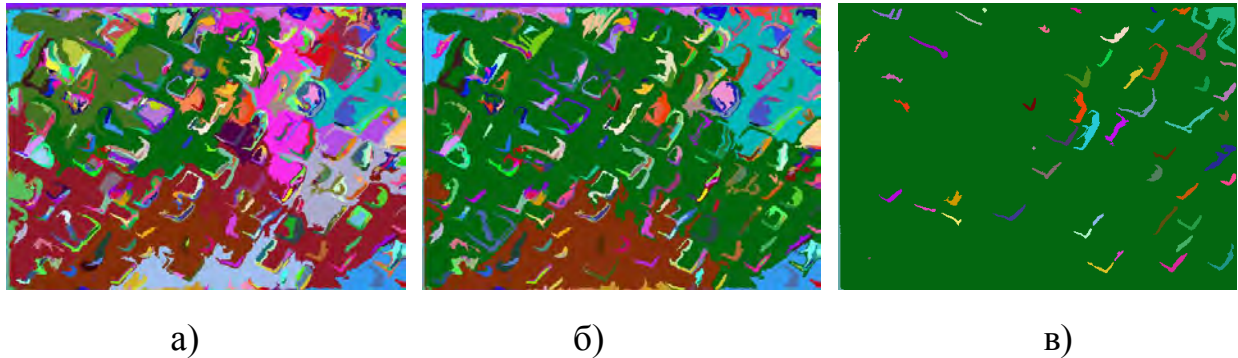


Рис. 2. Результаты сегментации структуры на различных масштабных уровнях: а) масштаб 1; б) масштаб 4; в) масштаб 7

Получение количественных характеристик структуры, описывающих её техническое состояние и полученных в автоматическом режиме, обеспечивает возможность построения математических моделей для оценки деградации структуры в процессе эксплуатации, а также может быть использовано при отработке технологий восстановительного ремонта деталей ГТД.

Решение проблемы анализа изображений структуры на разных масштабных уровнях, гибко реагирующего на изменения свойств деталей на основных этапах жизненного цикла и позволяющего оценить эти изменения, будет способствовать развитию перспективных производственных технологий, связанных с необходимостью оперативного контроля микроструктуры и физико-механических свойств материалов деталей.

Библиографический список

1. Стряпунина, К.А. Мультифрактальный анализ композиционного материала на основе терморазмягченного графита / К.А. Стряпунина, Л.Е. Макарова, А.И. Дегтярев и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1 – 2. С. 552 – 556.
2. Барахтин, Б.К. Определение режимов горячей деформации сплава AL-MG-SC по данным пластометрических испытаний сжатием / Б.К. Барахтин, А.Б. Воробьев // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 7. С. 36 – 41.

3. Масловская, А.Г. Расчет скейлинговых характеристик РЭМ-изображений доменных структур сегнетоэлектриков методом фрактальной параметризации / А.Г. Масловская, Т.К. Барабаш // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2011. № 55. С. 35 – 42.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614091. Программная среда для сегментации изображений на основе методов выращивания областей и вейвлет-преобразований [Текст] / Паламарь И. Н., Сизов П. В. ; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО «РГАТА имени П. А. Соловьёва». – Заявка № 2010612442 от 5.05.2010 ; опубл. 23.06.2010.

УДК 621.1.001:621.438:539.431

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВАЛОВ ГТД В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ

¹А. А. Округин, и.о. гл. конструктора - руководителя проекта ПД-14

²С.А. Букатый, д-р техн. наук, профессор

¹ ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

²ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва»

С целью повышения эксплуатационных характеристик на ОАО «НПО «Сатурн» проводятся работы по экспериментальному подтверждению соответствия МЦУ валов ротора компрессора низкого давления (КНД) и турбины низкого давления (ТНД) требуемой циклической долговечности серийных двигателей SaM146. Для подтверждения возможности использовать серийные детали на необходимый ресурс при воздействии нагрузок, соответствующих работе в составе двигателя, проводятся эквивалентно-циклические испытания на специализированных стендах.

В настоящее время режимы для эквивалентно-циклических испытаний высоконагруженных деталей назначают в соответствии с рекомендациями ЦИАМ по методике, учитывающей совместное влияние малоциклового усталости и длительной прочности на основе линейного суммирования статической и циклической составляющих повреждений [1]. Результаты расчётов по указанной методике показывают, что валы ТНД облада-

ют пониженными запасами прочности. Например, расчётная циклическая долговечность указанных выше валов на участке шлиц составляет ~ 45000 циклов. Однако опыт эксплуатации ГТД показывает, что экспериментально установленный ресурс валов и дисков компрессора ГТД, работающих в условиях малоциклового усталости и длительной прочности, значительно превышает ресурс, определяемый расчётным путем [2, 3]. В работе [4] также указывается, что ресурс дисков компрессора ГТД из титановых сплавов более чем в 6 раз превышает расчётный ресурс. Кроме того, неясно как влияет на малоцикловую долговечность деталей наложение циклических нагрузок с повышенной частотой, которым фактически подвергаются валы и диски. Очевидно, требуется уточнение расчётных методик для деталей, работающих в условиях малоциклового усталости и длительной прочности при двухчастотном нагружении.

О необходимости учитывать их совместное влияние на долговечность деталей указывается и в работе [1]. С этой целью в испытательных

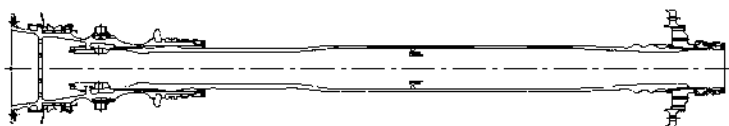


Рис. 1. Объект испытаний – валы КНД и ТНД

лабораториях ОАО «НПО «Сатурн» проведен ряд исследований, как на опытных стандартных образцах, так и на натурных деталях (рис.1).

Испытания валов КНД и ТНД проводились на испытательном стенде (рис. 2), обеспечивающем одновременное нагружение валов постоянной растягивающей силой и циклически изменяющимся крутящим моментом.



Рис. 2. Испытательный стенд

Целью испытаний было подтверждение требуемой прочности и циклической долговечности валов ротора КНД и ТНД, а также исследование

влияния на работу валов наложения высокочастотного нагружения на основное низкочастотное. Для испытаний были взяты новые валы. Перед испытаниями валы прошли контроль. Испытания проводили по отнулево-му циклу. Поэтому для исключения потери контакта в процессе испытаний предварительно экспериментальным путем был определён минимальный крутящий момент $M_{\min} = 139 \text{ кгс.м}$, при котором гарантированно не происходит расщепления зубьев шлиц. Все испытания проводились при комнатной температуре.

Поскольку в основе расчётов на долговечность лежит гипотеза о линейном суммировании повреждений, то нагружение валов осуществляли в два этапа. На первом этапе валы проходили последовательно 50000 циклов с периодом цикла нагружения 8 с. Комбинированная нагрузка состояла из осевой силы и крутящего момента. Осевая сила прикладывается к валу как постоянная нагрузка 7000 кг, а крутящий момент

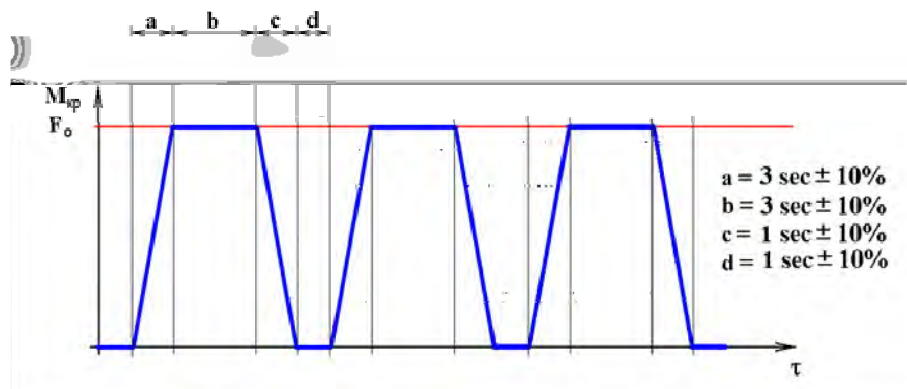


Рис. 3. Цикл нагружения первого этапа испытаний

изменялся по циклу «153 – 2380 – 153» кг×м (рис. 3). Целью первого этапа испытаний является подтверждение циклической долговечности валов для их сертификации.

На втором этапе валы нагружали подэтапами по 50000 циклов длительностью 205 секунд с наложением высокочастотного нагружения. Комбинированная нагрузка состояла также из осевой силы 7000 кг и крутящего момента. Осевая сила прикладывалась к валу как постоянная нагрузка, а крутящий момент изменялся по циклу «153 – 2380 – 153» кг×м с наложением симметричного треугольного подцикла $\pm 8\%$ от установленного номинального значения с частотой 1 Гц (рис. 4). Т. о. на втором этапе валы дополнительно нагружались треугольными подциклами в количестве 107 ц. Целью второго этапа испытаний является подтверждение циклической долговечности валов на полный ресурс.

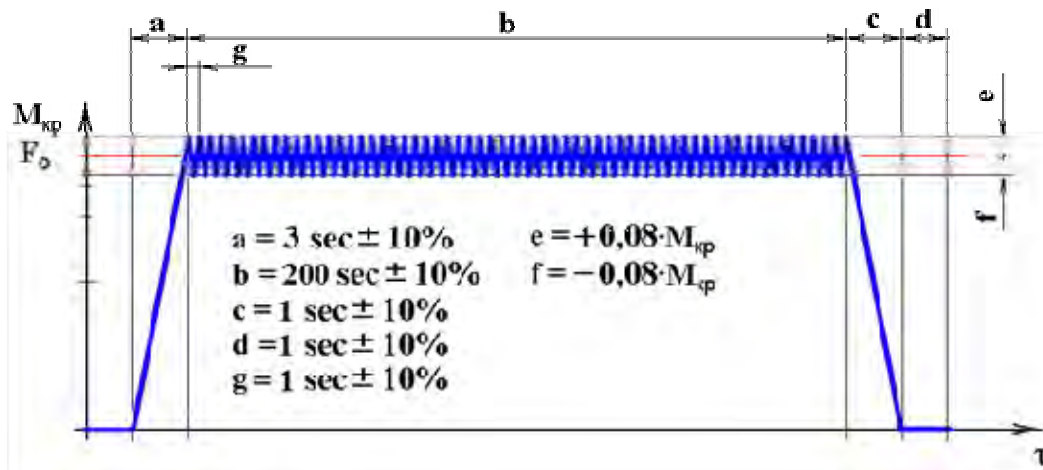


Рис. 4 Цикл нагружения второго этапа испытаний.

Перед началом проведения испытаний валы роторов КНД и ТНД проходили магнитный контроль, и обмеры для согласования данных деталей на проведение испытаний. После прохождения каждого этапа испытаний процедуры контроля повторялись. Обмер валов выполнялся по серийной технологии. В процессе испытаний на обоих этапах в качестве критерия процессов пластического деформирования и разрушения контролировалось изменение угла закрутки валов.

На первом этапе угол закрутки от действия крутящего момента, измеренный перед началом испытаний, составил $7,56^\circ$. После 50000 циклов нагружения угол закрутки составлял $7,58^\circ$. Изменение угла в $0,02^\circ$ находится в области погрешности измерений, следовательно остаточное скручивание валов ТНД и КНД отсутствовало. Изменений других геометрических параметров также не было выявлено.

На втором этапе испытаний угол закрутки валов колебался в пределах от $7,8^\circ$ до 8° , что также свидетельствует об отсутствии существенных остаточных углов закручивания. Изменения других геометрических параметров также не было выявлено.

Проведённый расчёт напряженно-деформированного состояния валов в области концентраторов напряжений показал, что уровень максимальных эквивалентных напряжений составил $92,80 \text{ кг/мм}^2$. Статический предел текучести материала составляет 158 кг/мм^2 , а динамический $\sim 126 \text{ кг/мм}^2$ – существенно выше рабочих напряжений. Это объясняет отсутствие остаточного скручивания и удлинения валов.

Выводы

1. По результатам сопоставления измерений, проведенных до и после испытаний валов, остаточное изменение длины и остаточное скручивание валов КНД и ТНД отсутствует. Наложение высокочастотного на-

гружения в данном случае практически не повлияло на остаточные деформации валов, т.к. напряженно-деформированное состояние валов в области концентраторов напряжений находилось в зоне упругих деформаций.

2. Расчёты малоцикловой долговечности валов на участке шлиц по существующей методике ~ 45000 циклов показывают существенно заниженные результаты, т.к. при испытаниях при двухчастотном нагружении валы выдержали 50000 циклов без разрушения.

Библиографический список

1. Демьянушко И.В. Расчёт на прочность вращающихся дисков [Текст] / И.В. Демьянушко, И.А. Биргер // – М.: Машиностроение, –1978. – 247 с.

2. Портер А.М. Исследование влияния длительности действия максимальных напряжений в цикле нагружения на малоцикловую усталость и длительную прочность вала ГТД из материала ЭИ961-Ш [Текст] / А.М. Портер, С.А. Букатый, А.Л. Водолагин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва, –№ 3(19). –2009, Часть 2. –С. 55–63.

3. Портер А.М. Исследование процессов накопления повреждений и разрушения валов и дисков ГТД из материалов ЭИ-961 в зависимости от длительности действия максимальных напряжений в цикле нагружения [Текст] / А.М. Портер, С.А. Букатый, А.А. Округин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А.Соловьева. –№ 2(14). –2008. –С.65–74.

4. Шереметьев А.В. Прогнозирование циклической долговечности и установление ресурсов основных деталей авиационных ГТД [Текст] / А.В. Шереметьев // Материалы X Международного конгресса двигателестроителей. Авиационно-космическая техника и технология, –№ 8(24). – 2005. –С. 45–50 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ДОПУСТИМЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ СТАТОРА ГТД НА ОСНОВЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Д. А. Слободской, начальник бригады статора, КО Прочность,

А. В. Пахоменков, начальник КО Прочность

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

К современным авиационным двигателям предъявляются жесткие требования по надежности и безопасности. В ряд этих требований входит периодический контроль состояния деталей двигателя во время эксплуатации для проверки их работоспособности и оценки риска разрушения при дальнейшей эксплуатации. Это обусловлено возможностью повреждения различных деталей двигателя в процессе эксплуатации. Повреждения могут возникать по разным причинам: попадание посторонних предметов в газо-воздушный тракт, работа на экстремальных и нерасчетных режимах, износ и т.д. Для отслеживания состояния деталей двигателя и обнаружения различных повреждений на его деталях и предусмотрены периодические осмотры.

При обнаружении каких-либо повреждений на деталях возникает вопрос об их дальнейшем безопасном использовании. Существуют два способа ответить на эти вопросы: экспериментальное и расчетное подтверждение достаточной прочности и ресурса деталей с повреждениями.

Первый способ требует большого количества времени и средств на экспериментальные работы, что целесообразно только при наличии достаточно большого опыта эксплуатации деталей прототипов с различными повреждениями. При разработке нового двигателя (не имеющего прототипов) целесообразно использовать расчетные методы.

Для определения допустимых повреждений статорных деталей ГТД разработана специальная методика с использованием расчетных методов, описанная в данной работе. Использование данной методики позволяет определить допустимые повреждения на различных статорных деталях ГТД и обеспечить требуемую надежность и безопасность их использования.

Общие положения

Последовательность определения допустимых повреждений заключается в следующем:

1 – классификация типов повреждений;

- 2 – определение коэффициентов концентрации напряжений (K_t) для различных размеров повреждений в каждом классе повреждений;
- 3 – расчеты НДС и определение запасов прочности;
- 4 – определение допустимых размеров для различных типов повреждений на основе K_t используя запасы прочности.

1. Классификация типов повреждений

Классификация повреждений деталей выполняется на основе статистики обобщающего опыта эксплуатации авиационных двигателей и определенных групп деталей, подверженных повреждениям (например: сопловые аппараты, корпуса компрессора и турбины и т.д.).

В результате определяются основные группы повреждений: царапины, забоины и вмятины. Для деталей из тонкостенных оболочек (например: смеситель и обтекатели) выделены дополнительные группы: оболочковые вмятины округлой и прямоугольной формы.

Также на основе статистических данных определены геометрические соотношения формы повреждений.

2. Определение коэффициентов концентрации напряжений

Расчеты коэффициентов концентрации напряжений проводились с использованием метода конечных элементов. Моделировались дефекты с различными размерами. При расчетах определялось наиболее неблагоприятное направление нагрузки относительно дефекта, вызывающее наибольший K_t . Для анализа приняты эквивалентные напряжения по Мизесу. На рисунке 1 показаны расчетные графики зависимости K_t от размеров для различных типов повреждений.

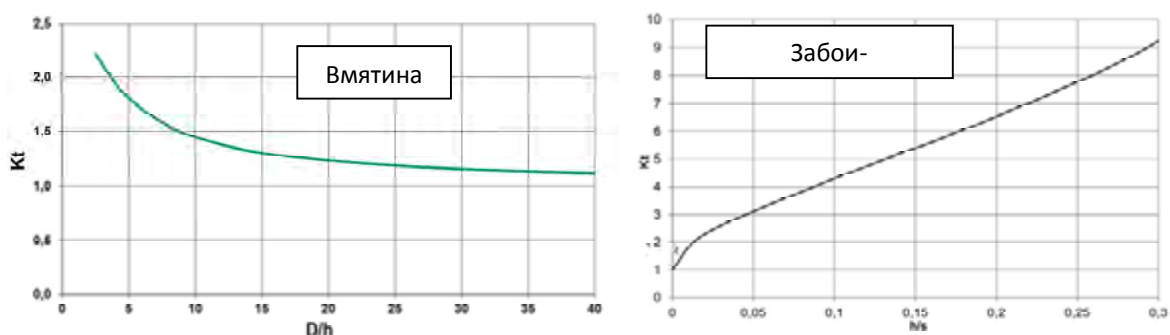


Рис. 1. Зависимости K_t от размеров дефектов

3. Расчеты НДС и определение запасов прочности

Детали авиационных двигателей подвержены широкому спектру статических и динамических нагрузок. При проектировании этих деталей требуется обеспечить работоспособность всех элементов в любой возможной ситуации. Основными видами расчетов в обеспечение надежной и безопасной работы элементов ГТД являются:

- расчет циклического ресурса (малоцикловая усталость - МЦУ);
- расчет на воздействие вибраций (многоцикловая усталость - МнЦУ);
- расчеты при экстремальных нагрузках (например, в случае обрыва лопатки вентилятора).

С использованием МКЭ определяется напряженно-деформированное состояние деталей для каждого вида нагрузок. В каждой точке поверхности детали для всех видов нагрузок определяются запасы прочности по эквивалентным напряжениям σ .

Запас прочности по напряжениям МЦУ определяется как отношение допустимых напряжений для требуемого ресурса $[\sigma_{VM_МЦУ}]$ к расчетным σ_{VM} (рисунок 2а).

$$\alpha_{\sigma_МЦУ} = [\sigma_{VM_МЦУ}] / \sigma_{VM}.$$

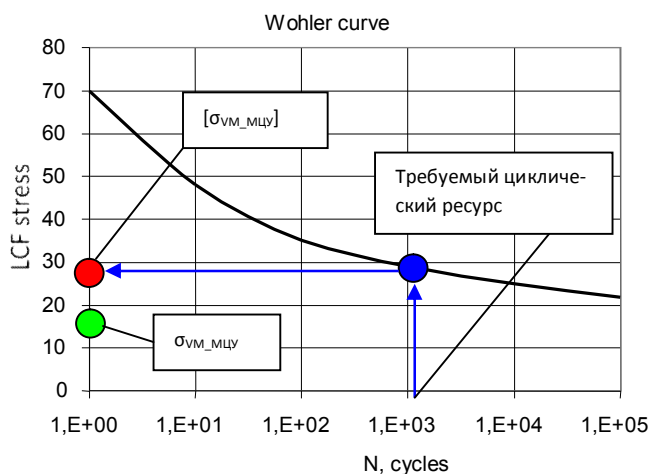
Запас прочности по напряжениям МнЦУ определяется как отношение допустимых вибрационных напряжений с диаграммы Гудмана к расчетным с учетом увеличения на K_t статических напряжений (рисунок 2б).

$$\alpha_{\sigma_МнЦУ} = OB/OA.$$

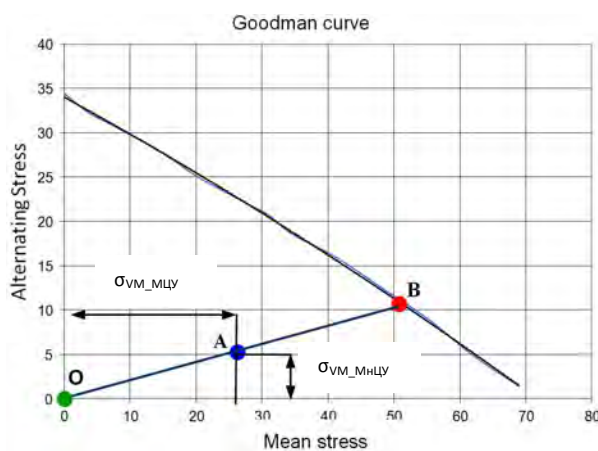
Запас прочности при экстремальных нагрузках определяется как отношение предела прочности материала σ_{B_Neuber} к расчетным напряжениям $\sigma_{VM_ЭН}$. Для этого предел прочности необходимо пересчитать в упругий по гипотезе Небера.

$$\alpha_{\sigma_ЭН} = \sigma_{B_Neuber} / \sigma_{VM_ЭН}$$

$$\sigma_{B_Neuber} = (E \cdot \sigma_B \cdot \delta_5)^{0.5}$$



а)



б)

Рис. 2. Диаграммы для определения запасов прочности:
а – диаграмма Веллера; б – диаграмма Гудмана

Далее для всех точек поверхности детали выбирается минимальный из всех запасов прочности (МЦУ, МнЦУ и ЭН), и строятся карты распределения минимальных запасов прочности (рисунок 3).

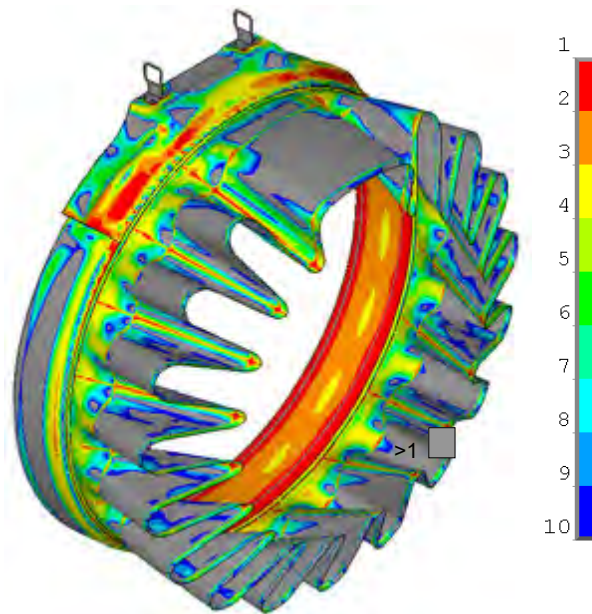


Рис. 3. Карта распределения минимальных запасов прочности

4. Определение допустимых размеров повреждений

Используя графики зависимости коэффициентов концентрации напряжений от размеров повреждений, приравнявая минимальные запасы прочности к K_t , определяются допустимые размеры повреждений (рисунок 4).

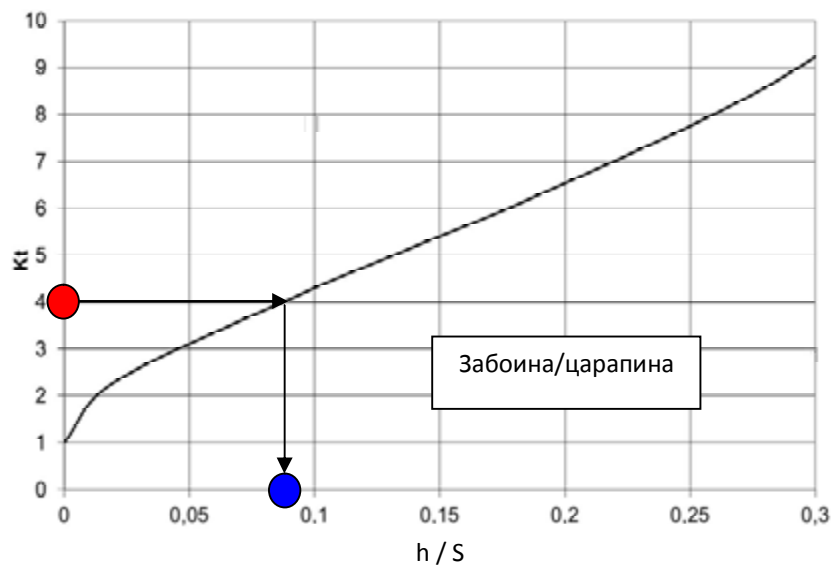


Рис. 4. Схема определения допустимых размеров повреждений

Поверхности детали делятся зоны с одинаковым размером допустимых повреждений. В итоге составляются карты зон на детали и таблицы с допустимыми повреждениями для каждой зоны (рисунок 5). Также отдельно выделяются зоны, для которых повреждения не допускаются – зоны в которых запас близок к единице.

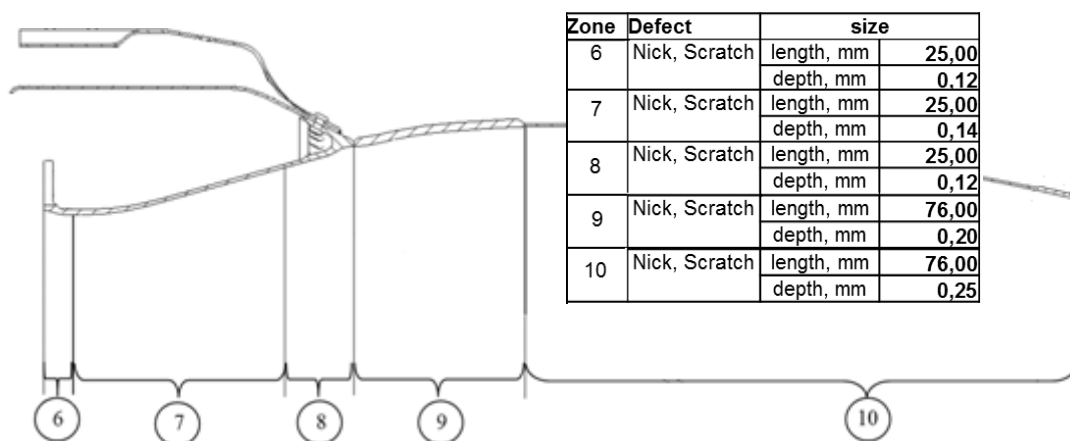


Рис. 5. Допустимые повреждения для различных зон детали

Таким образом, приведенная методика позволяет определять допустимые размеры поверхностных повреждений, обеспечивающих безопасную работу деталей в течение заданного ресурса.

Выводы

Основным преимуществом предложенного метода является его простота. Простое определение коэффициента концентрации напряжений и позволяет систематизировать базу данных для различных типов повреждения и деталей.

Данная методика была разработана и использовалась при сертификации семейства двигателей SaM146. За исключением быстроты и простоты, этот метод также гарантирует достаточную точность и надежность из-за консервативного подхода. Это предварительно подтверждается результатами осмотров в ходе эксплуатации и циклической наработкой опытных и лидерных двигателей.

УДК 62.192

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНОГО СОЧЕТАНИЯ
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДОПУСКОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРУЕМОГО СОСТОЯНИЯ ДЕТАЛЕЙ

П. А. Султанова, инженер-проектировщик
Р. А. Азимов, инженер-конструктор 2 категории
А. В. Пахоменков, начальник КО «Прочность»

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

В настоящее время разработано большое количество коммерческих программных комплексов, позволяющих с высокой точностью определять уровень расчетных напряжений в деталях, возникающих от действия внешних нагрузок. В основе большинства данных комплексов используется численный метод решения уравнений, основанный на методе конечных элементов. Однако, несмотря на высокую точность в определении уровня расчетных напряжений, в конечном счете, результаты анализа зависят от выбранной расчетной схемы и граничных условий, прикладываемых к рассматриваемой модели. В данной статье представлена методология анализа влияния неблагоприятного сочетания геометрических допусков при определении НДС в рассматриваемых деталях на примере фланцевого соединения дисков турбины низкого давления двигателя SaM146.

Анализ напряженно-деформируемого состояния (НДС) деталей является одним из важнейших аспектов проектирования двигателя. Повышение точности в определении НДС оказывает существенное влияние на массово-габаритные и ресурсные характеристики деталей, являющиеся ключевыми, с точки зрения обеспечения конкурентоспособности проектируемых двигателей при обеспечении заданного уровня надежности. Современные тенденции развития методологий по определению расчетного ресурса деталей, а также стремление разработчиков газотурбинных двигателей к использованию третьей стратегии управления ресурсом (СУР) двигателей, основывается на существенном объеме расчетных данных. Определение расчетного НДС деталей, коррелирующего с высокой точностью относительно НДС этих же деталей с учетом реальных условий эксплуатации, является одной из главных задач при проведении прочностного анализа.

Стремление к повышению точности в определении уровней расчетных напряжений приводит к рассмотрению большого количества факторов различного рода, оказывающих влияние на НДС рассматриваемых де-

талей. В данной статье представлены результаты анализа влияния одного из таких факторов на НДС дисков турбины низкого давления (ТНД). В большинстве случаев при анализе НДС деталей ГТД используется либо номинальная, либо минимальная геометрия деталей. Однако при рассмотрении сложных элементов конструкции, таких как болтовое фланцевое соединение двух дисков, данный подход не дает полное представление картины распределений расчетных напряжений в самих фланцах дисков. При определении картины распределения расчетных напряжений в подобных элементах конструкции необходимо учитывать влияние геометрических допусков. При определении наихудшего сочетания допусков для рассматриваемой конструкции были рассмотрены следующие геометрических размеры (указанные в конструкторской документации):

- диаметр болтового отверстия;
- смещение болтового отверстия относительно оси болта;
- положение оси отверстия относительно внешнего радиуса выкружки;
- толщина перемычки фланца.

При определении наихудшего сочетания геометрических допусков учитывалось влияние размеров обоих фланцев одновременно. По результатам анализа геометрических допусков определяется количество расчетных моделей, подлежащих исследованию по определению НДС. Для анализа НДС фланцевого соединения использовался метод конечных элементов (МКЭ) реализованный в программном комплексе ANSYS. При составлении расчетных схем для всех моделей использовались идентичные граничные условия. С целью обеспечения идентичности по дискретизации конечно-элементной сетки использовался метод «Blocking», реализованный в программном комплексе ICEM CFD. Данный метод позволяет использовать идентичную конечно-элементную сетку на схожих моделях с полным сохранением ее дискретизации.

На первоначальном этапе определения НДС для всех расчетных моделей выполняется анализ уровня расчетных напряжений в одних и тех же узлах, являющихся критическими по результатам анализа НДС номинальной геометрии деталей. Далее, после сравнения уровней расчетных напряжений во всех расчетных моделях определяется максимальная разница между напряжениями в моделях с номинальной геометрией и с геометрией учитывающей, наихудшее сочетание допусков. В качестве рассматриваемых напряжений используются эквивалентные по Мизесу напряжения. После определения максимальной разницы в напряжениях вычисляется

поправочный коэффициент в виде процентной величины относительно максимального уровня напряжений номинальной геометрии. Использование данного поправочного коэффициента сравнимо с применением коэффициентов концентрации, определенных по гипотезе Петерсона [1]. Учет данного коэффициента осуществляется посредством его перемножения на величину напряжений, определенных по номинальной геометрии детали. Таким образом, осуществляется корректировка уровня расчетных напряжений, учитывающая наиболее консервативное состояние реальных деталей после их изготовления.

Данная методология учета неблагоприятного сочетания геометрических допусков позволяет получать более достоверную картину НДС деталей, в конечном счете, определяющую ресурсные характеристики детали. Учитывая стремление большинства разработчиков ГТД использовать третью стратегию управления ресурсом, в основе которой уделяется большое внимание результатам расчетных анализов, использование данного метода учета неблагоприятного сочетания геометрических допусков является неотъемлемой частью в определении НДС деталей.

Библиографический список

1. Коэффициенты концентрации напряжений. Петерсон Р., 1977. – 301 с.

УДК 621.534.1

ДИНАМИКА МЕХАТРОННЫХ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ПРИВОДОВ С ЦИКЛОИДАЛЬНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ

А. А. Молчанов, аспирант

Научный руководитель: И. В. Надеждин, д-р. техн. наук, зав. кафедрой
«Прикладная механика»

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева»

Циклоидальные механизмы, благодаря благоприятным динамическим характеристикам, нашли широкое применение в устройствах машин-автоматов и мехатронных сборочных систем с дискретным перемещением исполнительного органа [1]. Одним из путей повышения энергоэффектив-

ности таких механизмов предлагается в качестве движителя использовать пружины растяжения-сжатия, реализуя тем самым принцип рекуперации энергии [2, 3]. Расчетная схема циклоидального механизма с пружинным двигателем приведена на рисунке.

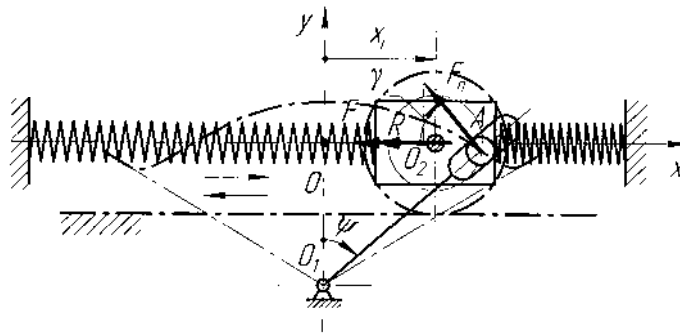


Рис. Расчетная схема циклоидального механизма с рекуперацией энергии

Уравнение движения ведомого звена рассматриваемого механизма имеет вид

$$I_{\text{пр}} \ddot{\psi} = M_{\text{дв}} + M_c(\dot{\psi}) + M_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{пр}}$ – приведенный момент инерции ведомых масс, $M_{\text{дв}}$ – движущий момент; M_c – момент сил сопротивления, пропорционален скорости.

Движущий момент, создаваемый пружинным приводом

$$M_{\text{дв}} = F r_k = -c x r_k,$$

где F – движущая сила, r_k – радиус зубчатого колеса; c – суммарная жесткость пружин, x – деформация пружины. Пружины имеют одинаковую жесткость c , причем жесткость каждой пружины будет $c/2$.

Дифференциальное уравнение движения ведущего звена с учетом действующих сил: движущей силы F , силы сопротивления R и возмущающей силы $P = F_n \cos \gamma$ (рис. 1) будет иметь вид

$$m \ddot{x} = -c x - \alpha \dot{x} + F_n \cos \gamma, \quad (2)$$

где m – приведенная масса, x – обобщенная координата; $\dot{x}$, $\ddot{x}$ – первая и вторая производные от обобщенной координаты, α – коэффициент пропорциональности; F_n – сила нормального давления на стенку паза ведомого звена: $F_n = M_{2\Sigma} / l_k$, $M_{2\Sigma}$ – суммарный вращающий момент на валу ведомого звена; $l_k = O_1 A$ – расстояние от центра вращения ведомого звена до центра цевки; γ – угол между направлением силы F_n и осью размещения пружин.

Формула для l_k в безразмерном виде имеет вид [1]

$$l_k / r_k = \sqrt{\rho^2 + 2\rho(\lambda_2 \cos \varphi + \varphi \sin \varphi) + (\varphi^2 + \lambda_2^2)},$$

где $\rho = d / r_k$; $\lambda_2 = [\rho(\pi + \arccos \rho)] / \sqrt{1 - \rho^2}$; d – расстояние от центра A до центра O_2 зубчатого колеса; φ – угол, определяющий положение цевки в процессе поворота зубчатого колеса.

Разделив обе части уравнения (2) на m и введя обозначения: $c/m = k^2$; $\alpha/m = 2n$; $F_n \cos \gamma / m = \Omega$, после преобразований получим следующее дифференциальное уравнение движения ведущего звена

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2 x = \Omega \quad (3)$$

Общее решение однородного уравнения (3), а именно, его левой части имеет следующий вид

$$x = e^{-nt} (C_1 \cos \sqrt{k^2 - n^2} t + C_2 \sin \sqrt{k^2 - n^2} t),$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

При циклоидальном законе движения ведомого звена точка A центра цевки описывает укороченную циклоиду с координатами:

$$x/r = \varphi + \sin \varphi; \quad y/r = \lambda_2 + \rho \cos \varphi.$$

Тогда частное решение неоднородного уравнения (3) будем искать вида

$$x = D \sin(pt + \xi). \quad (4)$$

Можно подобрать такие постоянные D и ξ , при которых выражение (4) будет удовлетворять уравнению (3).

Найдем производные от координаты x по времени t :

$$\dot{x} = dx/dt = Dp \cos(pt + \xi); \quad \ddot{x} = d^2x/dt^2 = -Dp^2 \sin(pt + \xi) \quad (5)$$

Подставим в уравнение (3) выражения для $\dot{x}, \ddot{x}$

$$-Dp^2 \sin(pt + \xi) + 2nDp \cos(pt + \xi) + k^2 D \sin(pt + \xi) = \Omega. \quad (6)$$

Из уравнения (6) можно найти выражения для постоянных D и ξ :

$$D = \frac{\Omega}{\sqrt{(k^2 - p^2)^2 + 4n^2 p^2}}; \quad \xi = \arctg \frac{2np}{k^2 - p^2}.$$

Тогда общее выражение для обобщенной координаты x получим в виде

$$x = e^{-nt} (C_1 \cos \sqrt{k^2 - n^2} t + C_2 \sin \sqrt{k^2 - n^2} t) + \frac{\Omega \sin(pt + \xi)}{\sqrt{(k^2 - p^2)^2 + 4n^2 p^2}}, \quad (7)$$

Выражения для скорости $\dot{x}$ и ускорения $\ddot{x}$ ведущего звена можно получить соответствующим дифференцированием (7). Однако это приводит к сложным и громоздким выражениям. Для этого более удобно применять методы моделирования.

Решение дифференциальных уравнений осуществлялось с помощью системы моделирования динамических систем Simulink [4]. Анализ результатов моделирования динамики привода углового перемещения с пружинным двигателем показал, что при заданном быстродействии исполнительного механизма продолжительность успокоения колебаний ведомой массы в точке позиционирования зависит от упругих свойств пружин, частоты и коэффициента демпфирования собственных колебаний системы, приведенного момента инерции ведомых масс.

Библиографический список

1. Надеждин, И. В. Высокодинамичные механизмы вспомогательных операций автоматизированных сборочных производств. М.: Машиностроение, 2008. – 270с.
2. Надеждин И. В. Поворотное устройство. Патент 2304242 Российская Федерация. Бюл. № 22, 2007.
3. Надеждин И. В., Молчанов А. А. Поворотное устройство. Патент 144750 Российская Федерация, Бюл. № 24, 2014.
4. Дэбни, Дж. Б. Simulink® 4. Секреты мастерства [Текст] / Дж. Б. Дэбни, Т.Л. Харман; пер. с англ. М. Л. Симонов.– М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.– 403 с.

УДК 621.52.011

ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С УПРАВЛЯЕМЫМ ПНЕВМОПРИВОДОМ

Научный руководитель: И. В. Надеждин, д-р. техн. наук,
зав. кафедрой «Прикладная механика»

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А. Соловьева»

В настоящее время проблема создания современных быстродействующих мехатронных систем во многом определяется динамическими характеристиками приводов. Оптимальную конструкцию привода выбирают с учетом обеспечения в первую очередь выполнения операции за минимально возможное время, что определяет повышенные требования к приводам с точки зрения динамики реализуемых законов движения.

В приводах мехатронных систем часто применяют пневмопривод, шток которого кинематически связан с исполнительным звеном, совершающим возвратно поступательное или возвратно-вращательное движения [1]. С появлением сервомеханических систем позиционирования появилась возможность управлять с помощью контроллера законом движения пневмопривода путем изменения по соответствующему закону размеров сечений выходных отверстий выхлопной полости пневмоцилиндра [2, 3]. Управляемые пневмоприводы весьма перспективны, особенно при реализации сложных законов движения. Динамика таких систем определяется рядом факторов: законом движения исполнительного органа, характеристиками упруго-диссипативных связей привода и ведомых звеньев системы.

В работе приведен анализ безразмерных характеристик наиболее распространенных и хорошо зарекомендовавших себя на практике законов движения исполнительных устройств машин-автоматов и мехатронных систем. Анализ показал, что если сравнивать законы движения по величине максимального ускорения, существенно влияющего на величину динамических нагрузок на звенья механизма, то минимальную константу пика ускорения среди однородных законов движения имеют следующие законы (в порядке возрастания ε_{mi}): закон Шуна; наклонной синусоиды; циклоидальный. Среди комбинированных законов движения наименьший пик ускорения имеют: закон Неклютина и модифицированный закон изменения ускорения по треугольнику с участками постоянной скорости и ускорения. С точки зрения минимальных энергозатрат приводного движи-

теля предпочтительны законы: наклонной синусоиды и полиномиальные. Для повышения быстродействия приводов машин-автоматов важное значение имеет анализ критерия пульса j_{mi} в точках позиционирования и в середине фазы движения j_{mi} . Здесь наиболее предпочтительными являются законы: наклонной синусоиды, закон Шуна, циклоидальный и изменение ускорения по треугольнику

В данной работе моделирование динамики загрузочных устройств мехатронных сборочных систем с управляемым пневмоприводом производилось в программе «20-sim 4.1» «Controllab Products B.V.2009». Структурная схема исследуемой динамической модели загрузочного устройства, учитывающей упругодиссипативные свойства пневматического привода и инерционно-упругодиссипативные свойства исполнительного звена, изображена на рис. 1, где приняты следующие обозначения: m_1 – масса поршня, штока-рейки и промежуточных звеньев; I_1, I_2 – приведенные моменты инерции промежуточных звеньев и исполнительного звена; c_1, c_2 – коэффициенты жесткости элементов системы; n_1, n_2 – коэффициенты демпфирования элементов системы; q_1, q_2 – обобщенные координаты; M_c – момент сопротивления; Π – кинематический аналог механизма, реализующий требуемый закон движения.

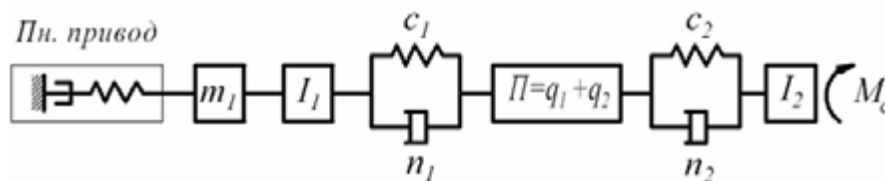


Рис. 1. Динамическая модель мехатронного устройства с пневмоприводом

На рис. 2 приведены реальные законы движения исполнительного звена мехатронных устройств с управляемым пневмоприводом, полученные в результате моделирования при следующих параметрах: $\psi_{\Sigma} = 90^\circ$, $t_{пов} = 0,2$ с, $I_2 = 0,5$ кг·м/с².

Анализ результатов моделирования показывает, что диаграммы скоростей и ускорений для большинства законов движения исполнительного звена имеют искаженный характер за счет перераспределения между участками разгона и торможения, что в итоге привело к резкому возрастанию максимальных ускорений $\varepsilon_{\max}^{(r)}$ на участке торможения. Наименьшие ускорения на участке торможения среди однородных законов движения имеет закон Шуна; среди комбинированных – закон Неклютина и закон движения постоянной скорости с переменными участками по синусоиде при $t(v = \text{const}) = 0,5T_{\Pi}$. Наименьшее значение коэффициента K_d динамичности

имеют полиномиальные законы $K_d = 1 \dots 1,17$, а также циклоидальный и наклонной синусоиды $K_d = 1,27$.

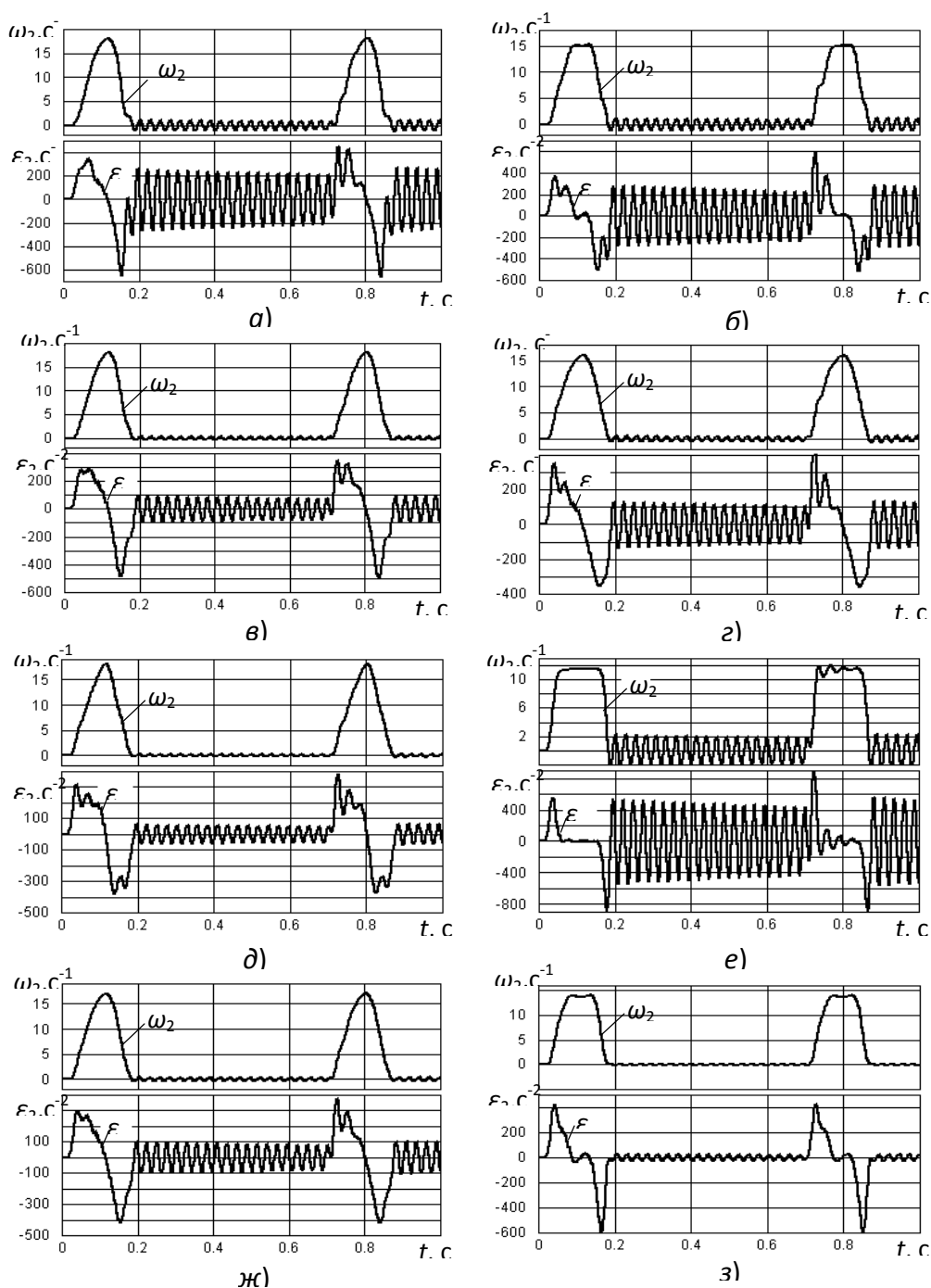


Рис. 2. Результаты моделирования динамики мехатронных устройств с различными законами движения исполнительного звена: а – изменение ускорения по треугольнику; б – модифицированный закон; в – циклоидальный; г – закон наклонной синусоиды; д – Закон Неклютина; е – закон движения $v = \text{const}$ с переменными участками по синусоиде; ж – закон Шуна; з – полиномиальный 9 степени

Отличительной особенностью реальных законов движения от идеальных является наличие значительных крутильных колебаний исполнительного звена в точках позиционирования, что приводит к существенному нарушению симметрии динамических характеристик, причем на кривых ускорений появляются заметные фазовые сдвиги и всплески, превы-

шающие максимальные ускорения на режиме торможения. Резкое возбуждение крутильных колебаний наблюдается при комбинированных законах движения. Так, для модифицированного закона изменения ускорения по треугольнику с участками постоянной скорости и ускорения показатель $O_{\varepsilon}^* = 0,86$; для закона движения постоянной скорости с переменными участками по синусоиде $O_{\varepsilon}^* = 0,98$. В то же время для законов Неклютина, Шуна и циклоидального – показатель $O_{\varepsilon}^* = 0,22...0,29$. Наименьшее значение $O_{\varepsilon}^* = 0,04$ соответствует полиномиальному закону 9-ой степени.

Результаты исследования динамических характеристик реальных законов движения мехатронных устройств с учетом колебательных процессов в точках позиционирования показали, что наилучшими законами движения с точки зрения быстродействия являются: циклоидальный, наклонной синусоиды, закон Шуна, полиномиальный 9-ой степени. Из комбинированных законов наиболее предпочтительным является закон Неклютина.

Рассмотрен пример мехатронного устройства с управляемым пневмоприводом, в котором реализован циклоидальный закон движения. Управление пневмоцилиндром осуществлялось с помощью пропорционального распределителя фирмы FESTO [3]. В процессе управления контроллер получает сигналы обратной связи по давлению в полостях пневмоцилиндра и по положению поршня и управляет пропорциональным распределителем в соответствии с циклоидальным законом движения.

На рис. 3 приведены результаты экспериментального исследования динамических характеристик пневмопривода загрузочного устройства при реализации циклоидального закона движения, максимальном времени перемещения $t_s \leq 1,0$ с; и массе заготовок $m = 12$ кг. Для сравнения там же приведены соответствующие кривые, полученные для традиционного способа торможения пневмоцилиндра с помощью демпфирующих устройств.

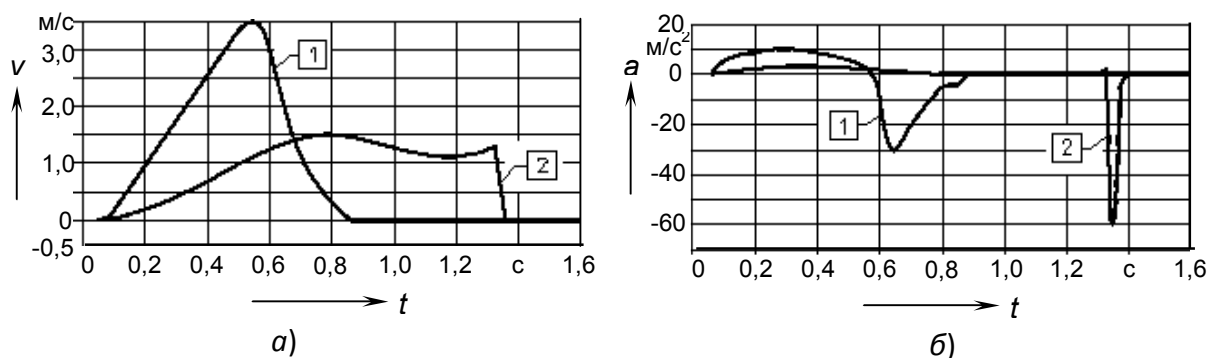


Рис. 3. Динамика мехатронного устройства с циклоидальным законом движения:
 а – скорость; б – ускорение; 1 – пневмопривод с циклоидальным законом движения;
 2 – пневмопривод с традиционным законом движения

Приведенные графики показывают, что управляемый пневматический привод с циклоидальным законом движения обеспечивает более высокое быстродействие и благоприятные динамические характеристики.

Библиографический список

1. Надеждин И. В. Высокодинамичные механизмы вспомогательных операций автоматизированных сборочных производств/под ред. В. Ф. Безъязычного. М.: Машиностроение, 2008. – 270 с.
2. Надеждин И. В. Характерные динамические модели исполнительных механизмов транспортно-загрузочного оборудования автоматизированных сборочных производств // Сборка в машиностроении и приборостроении». 2010.- № 4. – С.9 – 15.
3. Festo Product Catalogue [Электронный ресурс]. – 2008. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM).

УДК 621.88:658.589

ОПТИМИЗАЦИЯ ГРУППОВЫХ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ВНЕШНЕЙ СИЛЫ В ПЛОСКОСТИ СТЫКА

В. В. Шевелев, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Во многих узлах механических и строительных конструкциях широко применяют детали с резьбой, с помощью которых собирают разъёмные предварительно напряжённые соединения. Среди них и групповые болтовые соединения (ГБС). Во многих случаях при их эксплуатации внешняя сила, действующая в плоскости стыка, обуславливает влияние на болты сдвигающего и вращательного эффектов [1]. При этих условиях суммарная нагрузка каждого болта равна геометрической сумме соответствующих сил реакций, возникающих при сдвигающем усилии и вращающем моменте. Например, вектор суммарной нагрузки первого болта $\overrightarrow{F_{\Sigma 1}}$ показан на рис. 1, а.

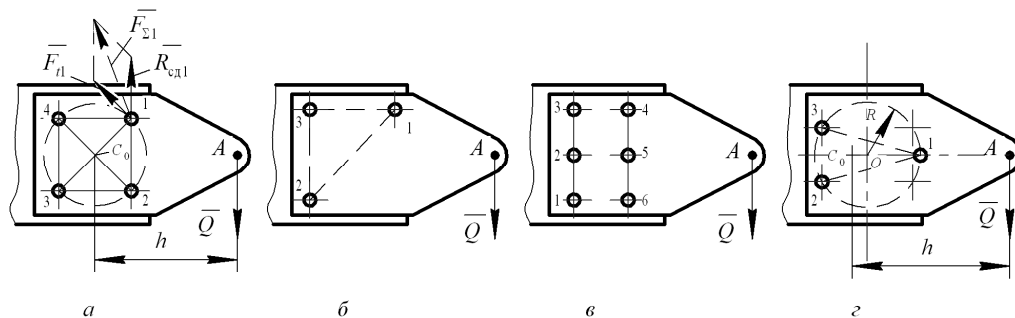


Рис. 1. Примеры расположения отверстий под болты на плоскости стыка в групповых болтовых соединениях

Для достижения достаточной надёжности при работе таких соединений на этапе проектирования устанавливают запас прочности, который необходимо обеспечить при сборке. Затяжка всех болтов при сборке соединений выполняют ключом предельного момента, определяемого по наибольшей суммарной силе реакций. На практике меньшие суммарные нагрузки не учитывают. В зависимости от числа болтов в соединении, соотношения размеров между рядами болтов, их расположения относительно линии действия внешней силы и её направления суммарные реакции в болтах могут отличаться существенно. Например, в ГБС с тремя болтами при действии равных внешних силовых факторов эта разность может быть равна 20 ... 50 %; с четырьмя болтами 30 ... 85 % и с шестью болтами 50 ... 250 %. Не учитывать этого или каждый болт устанавливать со своими параметрами нетехнологично. Следовательно, на практике существует конкретная проблема, с которой связаны неоправданные материальные и энергетические затраты при изготовлении таких соединений. Уменьшение до определённого значения или сведение к нулю разности нагрузок на болты в ГБС при эксплуатации является инженерной задачей. Её следует решать на этапе проектирования соединения, проводя оптимизационные исследования. За критерий оптимальности следует принять разность значений суммарных реакций на максимально и минимально нагруженных болтах (ΔF_{Σ}). Достаточно близкое к нулю значение критерия будет решением поставленной задачи.

На примере ГБС с тремя болтами рассмотрим алгоритм поиска оптимальных условий, при которых все болты при работе соединения будут нагружены равномерно. Постоянными исходными параметрами принимают:

- фигуру площади стыка – треугольник 123 (рис. 1, г);
- внешнюю силу $\vec{Q}$, вектор которой направлен вертикально вниз справа от площади стыка;

- вращающий момент $M_{(C_0)}(\vec{Q})$ относительно центра тяжести (точка C_0) площади стыка;
- радиус R описанной окружности треугольника.

Применив метод проб с расчётом соединений при заданных условиях с разными вписанными и по-разному расположенными треугольниками, находят вариант, при котором разность между наиболее и менее нагруженными болтами минимальная. Этому условию соответствует равносторонний треугольник при параллельном расположении его стороны 23 линии действия внешней силы $\vec{Q}$ и равных между собой суммарных реакций второго и третьего болтов. Учитывая наилучшее положение соединения, дальнейшие шаги поиска оптимальных условий продолжают при трансформировании фигуры площади стыка в равнобедренные треугольники. Для этого единственным управляемым переменным параметром становится угол φ_n (рис. 2). Все другие необходимые для выполнения расчёта соединения геометрические и силовые параметры будут функционально зависимыми от этого угла. Выполнив необходимые преобразования, получают следующие трансцендентные уравнения:

$$\alpha_n = \arctg \left[\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{\sin \varphi_n} + \operatorname{ctg} \varphi_n \right) \right]; \quad \gamma_n = \arctg \left(\frac{3 \cdot \sin \varphi_n}{1 + \cos \varphi_n} \right);$$

$$\beta_{2n} = \beta_{3n} = 180^\circ - \gamma_n; \quad r_{1n} = \frac{2}{3} \cdot R \cdot (1 + \cos \varphi_n); \quad r_{2n} = r_{3n} = \frac{R \cdot (1 + \cos \varphi_n)}{3 \cdot \sin \alpha_n};$$

$$F_{t1n} = \frac{\frac{2}{3} \cdot M_{(C_0)}(\vec{Q}) \cdot R \cdot (1 + \cos \varphi_n)}{\left[\frac{2}{3} \cdot R \cdot (1 + \cos \varphi_n) \right]^2 + 2 \cdot \left[\frac{R \cdot (1 + \cos \varphi_n)}{3 \cdot \sin \alpha_n} \right]^2};$$

$$F_{t2n} = F_{t3n} = \frac{F_{t1n}}{2 \cdot \sin \alpha_n}.$$

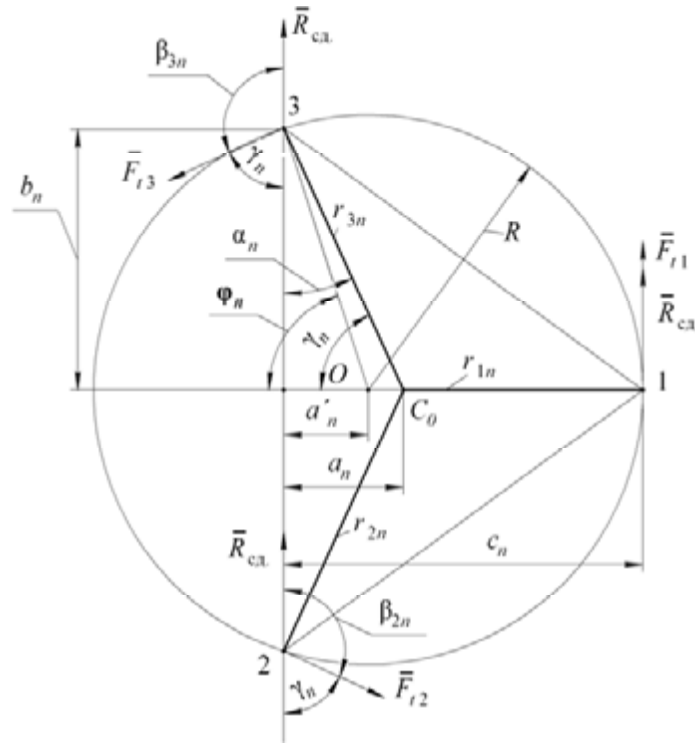


Рис. 2. Геометрические параметры расположения центров отверстий под болты 1, 2 и 3 на площади стыка и направления векторов сил реакций в болтах

Реакции во всех болтах на сдвиг одинаковые и равны $R_{\text{н.а.}} = |\bar{Q}|/z$, где z число болтов. Значения суммарных реакций в болтах соответственно определяют по формулам:

$$F_{\Sigma 1n} = F_{t1n} + R_{\text{н.а.}}; \quad F_{\Sigma 2n} = F_{\Sigma 3n} = \sqrt{R_{\text{н.а.}}^2 + F_{t2n}^2 + 2 \cdot R_{\text{н.а.}} \cdot F_{t2n} \cdot \cos \beta_{2n}}.$$

После этого определяют разность суммарных реакций, принимаемой за критерий оптимальности геометрических параметров расположения болтов и являющейся зависимой переменной величиной от угла φ_n :

$$f(\varphi_n) = \Delta F_{\Sigma n} = F_{\Sigma 1n} - F_{\Sigma 3n}.$$

Изменяя значение аргумента (φ_n) и получая значения $f(\varphi_n)$, проводят поиск оптимальных условий работы ГБС по методу хорд [2]. Итерации продолжают до тех пор, пока не будет найдена пара последовательных значений функции $f(\varphi_n)$ и $f(\varphi_{n+1})$, имеющих противоположные знаки. В интервале между этими значениями и будет находиться функция равная нулю при значении аргумента φ^* , которое определяют по формуле:

$$\varphi^* = \varphi_n - f(\varphi_n) \cdot \frac{\varphi_{n+1} - \varphi_n}{f(\varphi_{n+1}) - f(\varphi_n)}.$$

Это значение аргумента используют для определения значения функции $f(\varphi^*)$, которое сравнивают со значениями функций $f(\varphi_n)$ и $f(\varphi_{n+1})$. В дальнейшем значение $f(\varphi^*)$ используется вместо того из них, с которым оно совпадает по знаку. Если значение $f(\varphi^*)$ недостаточно близко к нулю, то вся процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнута необходимая степень сходимости $|f(\varphi^*)| \leq \varepsilon$, где ε – заранее установленная величина допустимого отклонения от критерия оптимальности.

Расчёт ГБС с тремя болтами и поиск оптимальных условий на стадии проектирования показан при условиях, когда исходными данными по схеме соединения (рис. 1, з) были: площадь стыка – равнобедренный треугольник с осью симметрии, перпендикулярной к линии действия внешней силы; модуль внешней силы $|\vec{Q}| = 450 \text{ Н}$; плечо силы относительно центра тяжести (точка C_0) площади стыка $h = 300 \text{ мм}$; радиус описанной окружности площади стыка $R = 70 \text{ мм}$; материал болтов сталь марки Ст3; коэффициент запаса прочности при растяжении болтов $[k_\sigma] = 2,0$; коэффициент надёжности соединения при сдвиге $[s_\tau] = 1,5$; коэффициент трения $f_{\text{тр}} = 0,15$. Заданные постоянные значения внешней силы, плеча и радиуса описанной окружности обуславливают постоянство значений вращающего момента и силы сдвига, действующих на соединение при разных положениях центров осей второго и третьего болтов на описанной окружности:

$$M_{(C_0)}(\vec{Q}) = |\vec{Q}| \cdot h = 450 \cdot 300 = 135 \text{ Нм}; \quad R_{\text{сд.}} = |\vec{Q}| / z = 450 / 3 = 150,0 \text{ Н}.$$

Расчеты выполняют, изменяя управляемый переменный параметр угол φ_n в геометрии расположения центров осей указанных болтов (см. рис. 2). Начальное значение этого угла выбирают после выполнения предварительных расчетов, добиваясь значения выбранного критерия оптимальности нескольких десятков ньютонов. В рассматриваемом примере начальное значение угла $\varphi_0 = 78^\circ$.

Далее проводят поиск условий оптимальности по критерию $\Delta F_{\Sigma n}$, варьируя угол φ_n через один градус. Полученные при поиске условий оптимальности основные геометрические и силовые параметры соединения, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходная величина φ_n , град.	Определяемые величины						
	r_{1n} , мм	r_{3n} , мм	$F_{\Sigma 1n}$, Н	$F_{\Sigma 3n}$, Н	$\Delta F_{\Sigma n}$, Н	d'_{11} , мм	d'_{13} , мм
78,0	56,3692	74,0443	688,0794	664,3441	23,7353	10,6720	10,4863
79,0	55,5711	74,1191	682,9928	669,2650	13,7277	10,6325	10,5251
80,0	54,7702	74,1768	677,9846	674,2535	3,7312	10,5934	10,5642
81,0	53,9669	74,2172	673,0548	679,3141	-6,2593	10,5548	10,6038
80,3735	54,4705	74,1939	676,1343	676,1348	-0,0004	10,5790	10,5790
80,3734	54,4705	74,1939	676,1345	676,1345	0,0000	10,5790	10,5790

В таблице столбик значений критерия оптимизации рассмотренного соединения выделен жирным шрифтом. Из геометрических параметров показаны расстояния от центра тяжести площади стыка до центров отверстий под первый r_{1n} и третий r_{3n} болты. Расстояние до центра второго болта равно расстоянию до третьего болта для рассматриваемой геометрии площади стыка. Показаны также предварительно определенные значения внутренних диаметров крепёжной резьбы по критерию прочности материала болтов. Для первого болта этот диаметр должен быть не менее d'_{11} , для третьего – не менее d'_{13} (для второго, как и для третьего). По приведенным значениям диаметров резьбы по таблицам стандарта ГОСТ 8724-81 выбирают резьбу со стандартными параметрами.

По результатам таблицы при нулевом значении критерия оптимизации следует выбирать болты для сборки рассмотренного соединения с резьбой М14 с крупным шагом 2 мм, у которой внутренний диаметр резьбы по дну впадины резьбы $d_3 = 11,546$ мм. Для сравнения проведен расчёт соединения без оптимизации, собранного по схеме прямоугольного равнобедренного треугольника (рис. 1, б) с такими же исходными данными, но при параллельном положении к линии действия силы вертикального катета. По полученным результатам расчета такого соединения по наиболее нагруженному болту ($F_{\Sigma \max} = 898,928$ Н) для его сборки, следует выбирать болты с минимальным диаметром резьбы не менее $d'_{11} = 12,2011$ мм. По таблице стандарта ГОСТ 8724-81 этому условию удовлетворяет резьба М16 с шагом 2 мм.

По известной методике [1] и результатам приведённых расчётов определяют требуемые моменты на ключе предельного момента при сборке

ГБС. Для оптимизированного соединения $M_{\text{зав.}} = 19,1$ Нм, для неоптимизированного $M_{\text{зав.}} = 28,3$ Нм.

Таким образом, проведение оптимизации на стадии проектирования группового болтового соединения при действии силы в плоскости стыка повышает эффективность сборки и технологичность соединений.

УДК 62.192

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕСУРСА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Р. А. Азимов, инженер – конструктор 2 категории
А. В. Пахоменков, начальник КО «Прочность»

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

Одним из важнейших показателей при проектировании авиационных двигателей является ресурс, как основных деталей, так и двигателя в целом, что, в свою очередь, является ключевым фактором при определении конкурентоспособности двигателя в условиях современных рыночных отношений. В данной статье представлена методология определения расчетного циклического ресурса основных деталей двигателя основанная на опыте проектирования и сертификации двигателя SaM146.

На протяжении нескольких десятилетий одним из основных методов определения расчетного циклического ресурса основных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) в авиационной промышленности РФ является аналитическая зависимость, предложенная Менсоном [1]. Основным недостатком данного метода является отсутствие возможности прямого учета объемного напряженного состояния и неоднозначность выбора среднего напряжения в цикле. Наличие данного рода неопределенностей в уравнении Менсона требует корректировки расчетной циклической долговечности посредством использования нормируемых запасов, строго регламентируемых в нормативно – технической документации (НТД) авиационной промышленности РФ. Применяющаяся система запасов согласно НТД не подлежит изменению на протяжении всех этапов жизненного цикла двигателя, что не позволяет проектировать конструкции, обеспечивающие требуемые габаритно – массовые характеристики, и как следствие негативно отражается на основных характеристиках, определяющих конкурентоспособность ГТД. Кроме того, на основе многочисленных иссле-

дований по определению фактической циклической долговечности деталей, проведенных в ОАО «НПО «Сатурн» [2], определено, что уравнение Менсона приводит к занижению циклической долговечности по отношению к экспериментальным данным.

Для определения циклической долговечности основных деталей ГТД в предлагаемом методе используется следующая зависимость:

$$N_K = K_1 \cdot K_2 \cdot N,$$

где N – расчетное значение количества циклов рассматриваемой детали;

K_1, K_2 – коэффициенты запаса по циклической долговечности.

Для определения расчетного значения количества циклов используется кривая малоциклового усталости (МЦУ), основанная на результатах экспериментальных исследований характеристик материала.

Коэффициенты запаса, используемые в предлагаемом методе, подразделяются на два типа: коэффициент запаса, основывающийся на факторах аналитического характера (K_1) и коэффициент запаса, основывающийся на эксплуатационных факторах (K_2). При этом каждый из данных коэффициентов является функцией от параметров, характеризующих аналитические и эксплуатационные факторы.

В качестве аналитических факторов используются следующие факторы:

- условия эксплуатации ГТД ($K_{уэ}$);
- тепловое состояние отдельных деталей и модулей двигателя в целом ($K_{ТС}$);
- напряженно-деформированное состояние основных деталей ($K_{НДС}$);
- свойства используемых материалов ($K_{СМ}$);
- расчетная циклическая долговечность ($K_{ЦД}$).

В качестве эксплуатационных факторов используются следующие факторы:

- стендовые заводские испытания ($K_{СИ}$);
- эксплуатация имеющегося авиационного парка ($K_э$).

Степень влияния каждого из данных факторов на соответствующий коэффициент запаса характеризуется достоверностью и объемом имеющейся информации, характеризующей каждый фактор. Для каждого из вышеперечисленных факторов проводится количественная оценка, включающая в себя подробный анализ всех характеристик, описывающих каждый из факторов. Для проведения количественной оценки каждого фактора используется бальная система, имеющая строгий численный диапазон для каждой характеристики фактора.

После проведения количественной оценки каждого из факторов определяются показатели аналитического ($K_{АП}$) и эксплуатационного ($K_{ЭА}$) анализов, являющиеся функциями соответствующих факторов:

$$K_{АП} = f(K_{УЭ}, K_{ТС}, K_{НДС}, K_{СМ}, K_{ЦД},)$$

$$K_{ЭП} = f(K_{СИ}, K_{Э},)$$

После определения каждого из показателей, проводится оценка области применения каждого из показателей. Область применения характеризуется численным диапазоном, выход за рамки которого, приводит к аннулированию показателей и как следствие невозможности использования данного метода к оценке циклической долговечности деталей. Основной причиной выхода за рамки области применения показателей является недостаток информации при анализе, как отдельного фактора, так и суммарной оценке всех факторов. Границы области применения показателей определяются на основе результатов экспериментальной проверки по влиянию каждого их факторов на циклический ресурс деталей. В данной статье не приводится описание процедуры экспериментальной проверки влияния факторов на циклический ресурс деталей, поскольку описание данной процедуры носит индивидуальный характер для каждого из факторов и требует отдельного рассмотрения. Однако, следует отметить, что применяющаяся количественная оценка факторов посредством бальной системы имеет индивидуальный характер для двигателей различного назначения. В настоящее время в ОАО «НПО «Сатурн» проводится ряд экспериментальных исследований, направленных на адаптацию предлагаемого метода оценки циклического ресурса к двигателям различного назначения.

После определения величины аналитического и эксплуатационного анализа определяются величины коэффициентов запаса по циклической долговечности K_1 и K_2 , которые в свою очередь также являются функциями соответствующих показателей и изменяются в диапазоне от 0 до 1.

$$K_1 = f(K_{АП})$$

$$K_2 = f(K_{ЭП})$$

Таким образом, в предлагаемом методе оценки циклического ресурса деталей, величины коэффициентов запаса по циклической долговечности не являются постоянной величиной и изменяются в зависимости от степени достоверности и объема данных, располагаемых фирмой разработчиком при проектировании ГТД.

Данная методология оценки циклической долговечности деталей успешно применена на ОАО «НПО «Сатурн» при проектировании двигателя

SaM146, введенного в серийное производство и успешно эксплуатируемого рядом отечественных и зарубежных авиационных компаний в составе воздушного судна SSJ100.

Библиографический список

1. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 702с.
2. Портер А.М., Матвеев Г.П., Букатый С.А. К вопросу о выборе эквивалентного нагружения стандартных гладких образцов для определения малоциклового долговечности основных деталей ГТД. Материалы докладов междунар. науч.-техн. Конференции 2006 г – Самара: СГАУ, 2006. – В 2-х Ч. Ч.2-224 с. с.115-116.

УДК 621.452–226:620.191

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ КОНТРОЛЕЙ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

А. М. Портер, Д. П. Лёшин

ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, г. Рыбинск

С целью максимального использования ресурсного потенциала каждой основной детали разработан метод эксплуатации авиадвигателя по его техническому состоянию с периодическим контролем деталей в эксплуатации.

Определяющими факторами при установлении безопасного интервала контроля являются минимальная величина гарантированно выявляемого дефекта и период безопасного развития дефекта. Принцип реализации расчетно-экспериментального определения периодичности контролей основных деталей ГТД при эксплуатации по техническому состоянию представлен блок-схемой на рис.1.

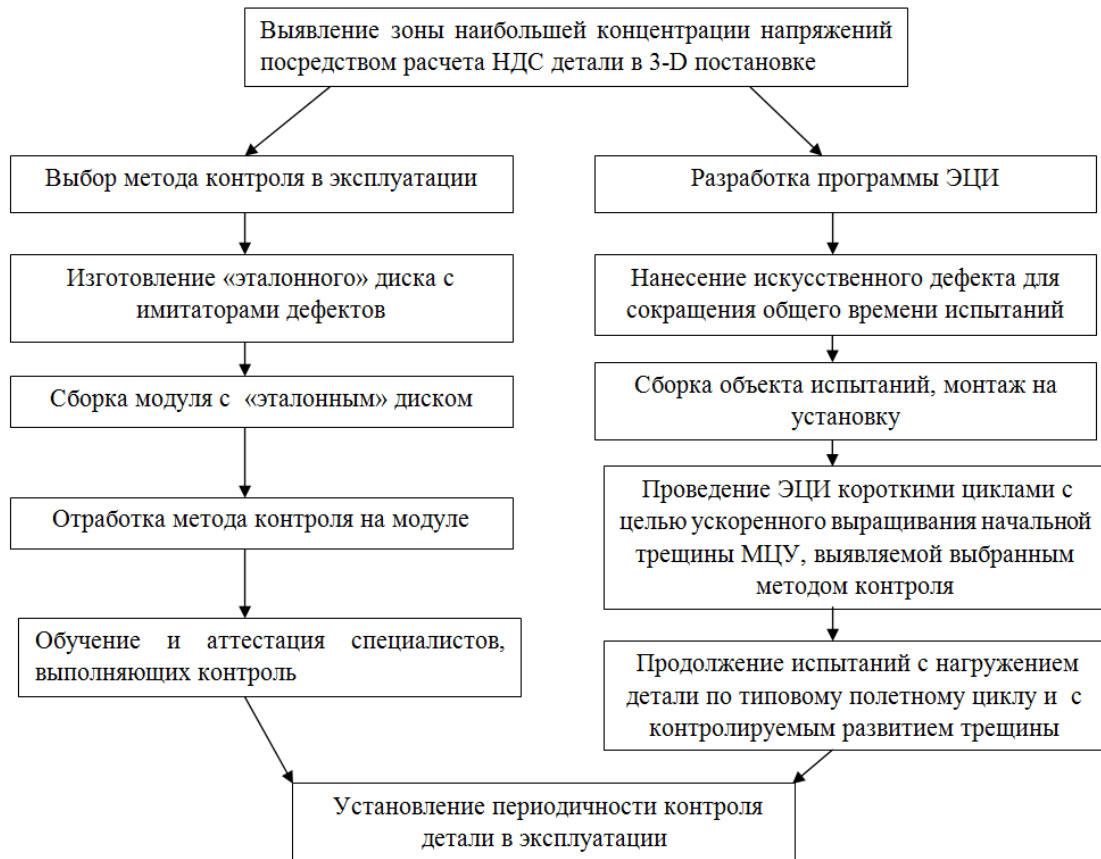


Рис. 1

Здесь в качестве примера исследования малоциклового повреждаемости для перехода на эксплуатацию по техническому состоянию и определения периодичности осмотров в эксплуатации рассмотрен диск 2-й ступени КНД двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154.

Первым шагом выполнен численный анализ методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния рабочего колеса второй ступени КНД, который показал, что максимальные напряжения находятся в нижней точке контура отверстий задней реборды диска с внутренней стороны (рис.2), где наиболее вероятно и возникнет очаг малоциклового повреждения диска.

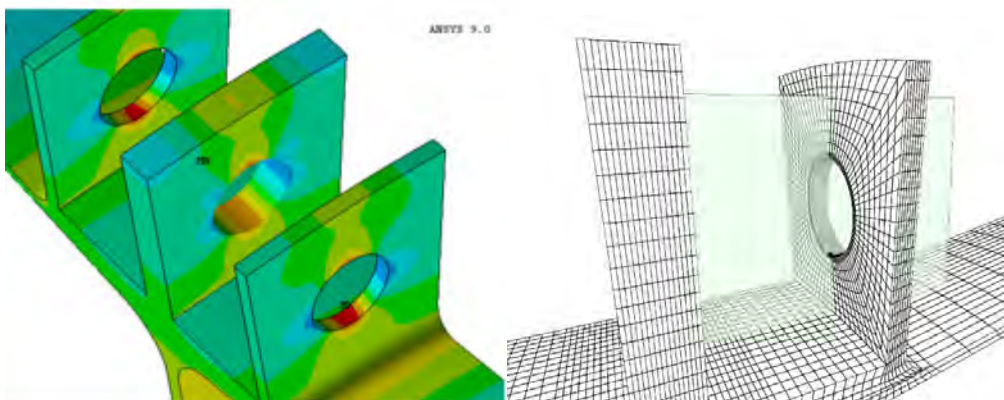


Рис. 2. Определение критических зон и направления распространения дефекта – перпендикулярно плоскости действия максимальных главных напряжений

Исходя из конструктивных особенностей узла (наличия лючков между лопатками направляющих аппаратов и возможности доступа к наружной поверхности задней реборды, где трещина будет располагаться в плоскости перпендикулярной поверхности) в качестве неразрушающего метода контроля выбран вихретоковый контроль (ВТК) наружной боковой поверхности реборды (рис. 3).

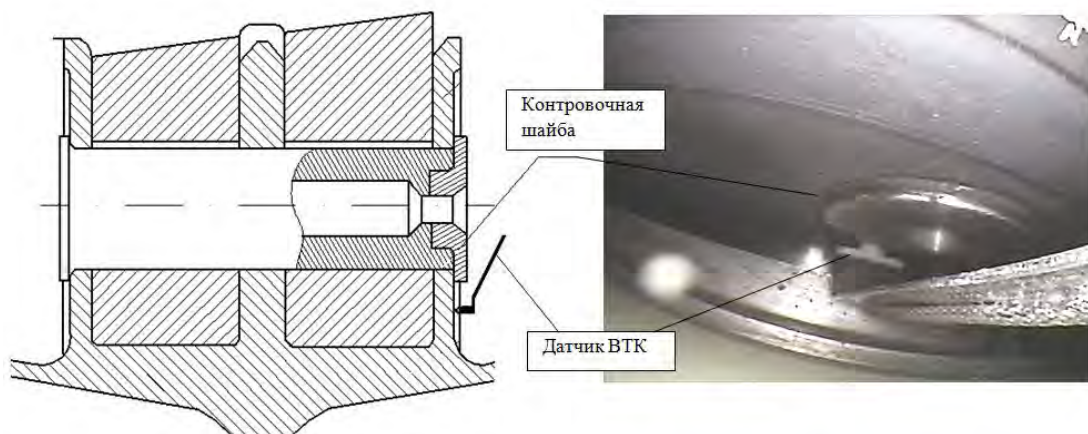


Рис. 3. Выбор доступного метода контроля в эксплуатации

Далее с целью определения периода безопасного развития трещины был выполнен натурный эксперимент на разгонном стенде (УИР-3, НПО «Сатурн»). Для сокращения общего времени испытаний на реборде в зоне максимальных напряжений был выполнен искусственный надрез электроэрозионным способом, ослабляющий деталь по линии действия максимальных напряжений.

Для проведения испытаний диск с имитатором дефекта собирается в узел раскрутки, взамен рабочих лопаток в диск устанавливаются имитаторы лопаток, воспроизводящие инерционную нагрузку на реборды эквивалентную нагрузке от рабочих лопаток.

Состояние диска в процессе испытаний периодически оценивалось по результатам визуального и ВТ контроля наружной боковой поверхности реборды по технологии, которая применима в эксплуатации (рис.4).

Испытания проведены в два этапа. На первом этапе осуществлялось ускоренное выращивание начальной трещины МЦУ короткими циклами до величины, выявляемой ВТК. Первый этап проведен по трапецеидальному циклу нагружения с выдержкой 20 секунд на максимальной частоте вращения.

Протяженность трещины по контролируемой поверхности на момент обнаружения ВТК (окончание первого этапа испытаний) составила 4мм.



Рис. 4. Оборудование для проведения вихретокового контроля наружной поверхности задней реборды в условиях установки УИР-3

С момента выявления трещины проведён второй этап испытаний с нагружением диска по циклу, максимально приближенному по повторяемости и нагруженности режимов к типовому полетному циклу (ТПЦ) двигателя Д-30КП. Объем испытаний $N_{\text{ТПЦ}}$ на втором этапе определяется, исходя из получения приемлемой периодичности инспекций диска в эксплуатации, с точки зрения возможности совмещения контролей с обязательными формами технического обслуживания двигателей, при этом диск в процессе испытаний должен сохранить запас по несущей способности.

В ходе второго этапа испытаний трещина закончила своё развитие в пределах реборды и дошла до участка галтельного перехода от реборды к цилиндрической поверхности обода диска, имея глубину 11,5 мм (рис.5).

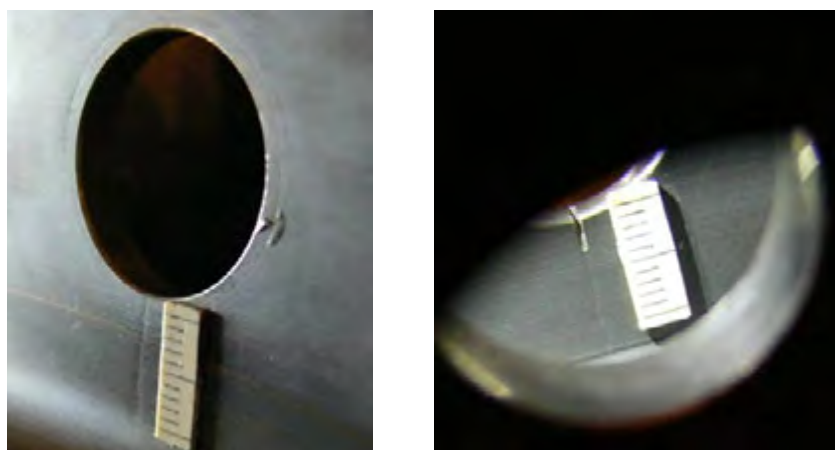


Рис. 5. Внешний вид трещины на наружной и внутренней боковой поверхности реборды по окончании испытаний по контролируемому развитию дефекта

Для установления соответствия размера надежно выявляемого дефекта в зоне отверстий реборд дисков 2-й ступени КНД в условиях испытательного стенда УИР-3 и полноразмерного двигателя специалистами управления эксплуатации АГТД НПО «Сатурн» с использованием учебного модуля КНД был выполнен ВТК эталонного диска 2-й ступени, имеющего радиально ориентированные искусственные надрезы протяженностью 3, 4 и 5 мм от нижней части контура отверстий передней и задней реборд.

Результаты вихретокового контроля подтвердили надежное выявление дефекта размером 4 мм.

В результате проведенных исследований определена допустимая безопасная наработка $[N]$ между последовательными операциями контроля состояния диска в эксплуатации, не превышающая половины наработки НТПЦ между обнаружением трещины неразрушающим методом контроля и максимальной наработкой, достигнутой при выполнении этапа испытаний по полетному циклу с контролируемым развитием трещины:

$$[N] = N_{\text{ТПЦ}} / K_N, \text{ где } K_N \geq 2.$$

Применение разработанной методологии позволило в сжатые сроки и с высокой достоверностью определить остаточный ресурс дисков на стадии роста усталостной трещины, что в конечном счете предупреждает от преждевременной замены деталей двигателя до выработки потенциально возможного ресурса с обеспечением безопасности полетов.

УДК 621.515.1

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СБОРА ДАННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ТУРБОМАШИН

Е. В. Медведева, студент

Научный руководитель: Ю. А. Равикович, д-р техн. наук, профессор,
зав. кафедрой

ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Автоматизация стендовых испытаний является одним из важнейших факторов, позволяющих повысить качество, сократить время на проведение испытаний и многократно увеличить их производительность.

В работе рассматривается вопрос автоматизации процесса сбора данных при проведении стендовых испытаний турбомашин. Приведена реализованная автоматизация стенда турбохолодильной установки, показана система сбора параметров и их обработка.

Автоматизация стендовых испытаний была выполнена с помощью платформы LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench). Эта платформа базируется на графическом языке программирования «G» фирмы National Instruments (США).

Платформа LabVIEW используется для создания уникальных программ, с помощью которых можно проводить сбор, анализ, измерения, визуализацию и обработку данных, а также управлять техническими объектами.

Язык LabVIEW имеет уникальный графический интерфейс, который существенно отличается от других текстовых языков, таких как Java, C и т. д. Любая программа представляет собой виртуальный прибор (ВП), которая состоит из двух частей: лицевой панели и блок-диаграммы. Лицевая панель описывает внешний интерфейс виртуального прибора, на ней могут располагаться средства ввода-вывода для управления прибором, кнопки, переключатели, светодиоды, графики и т.д. Блок- диаграмма описывает логику работы виртуального прибора и содержит функциональные узлы, с помощью которых происходит управление объектами на лицевой панели.

Испытательная установка, для которой реализовывалась автоматизация сбора данных, представляет собой стенд (схема стенда представлена на рис. 1), который состоит из: двухступенчатого электрокомпрессора ЭК-12 мощностью 12 кВт, турбодетандера ТХ-12, двух теплообменников с вентиляторами, трубопроводов и кранов. В качестве рабочего тела используется воздух. Предложенная система регистрирует в автоматическом режиме следующие параметры:

- 1) давление и температура на входе в первую ступень компрессора $P_1, \text{МПа}; T_1, \text{C};$
- 2) давление и температура на входе во вторую ступень компрессора $P_2, \text{МПа}; T_2, \text{C};$
- 3) давление и температура на входе в теплообменник $P_3, \text{МПа}; T_3, \text{C};$
- 4) давление и температура на входе в компрессорную ступень турбодетандера $P_4, \text{МПа}; T_4, \text{C};$
- 5) давление и температура на входе в теплообменник $P_5, \text{МПа}; T_5, \text{C};$
- 6) давление и температура на входе в турбину $P_6, \text{МПа}; T_6, \text{C};$
- 7) температура воздуха на выходе из турбины $T_7, \text{C};$

- 8) температура обмоток электродвигателя T_8, C ;
- 9) расход воздуха $m, кг/с$;
- 10) частота вращения вала турбодетандера $n, об/мин$.

Измерения производятся с помощью следующих датчиков. Для измерения давлений используются манометры типа Овен ПД-100. Для измерения температур используются терморезисторы ДТС034-РТ100. Расход воздуха измеряется расходомером типа сопла Вентури. Перепад давления регистрируется дифференциальным пьезоэлектрическим датчиком давления Motorola MPX-5010DP. Частота вращения вала турбодетандера измеряется бесконтактным способом с помощью лазерного датчика метки ЛДМ 1.

Для регистрации показаний с датчиков используется оборудование компании National Instruments — системы сбора данных «NI compact DAQ-9178», состоящей из шасси, модулей измерения, USB-кабеля.

Для подключения датчиков используются три модуля: NI 9217, NI 9203, NI 9205. Четырехканальный 24 разрядный модуль NI 9217 аналогового ввода с сигналом 100 Ω позволяет подключить четыре термометра сопротивления (терморезистора). Тридцати двух канальный, 16 разрядный модуль NI 9205 аналогового ввода с сигналом от $\pm 200 мВ$ до $\pm 10 В$ используется для подключения датчика измерения перепада давления. Восьмиканальный, 16 разрядный модуль NI 9203 аналогового ввода с сигналом $\pm 20 мА$ используется для подключения датчиков измерения давлений.

Физические параметры измеряемой среды с помощью датчиков преобразуются в унифицированные сигналы и с помощью системы сбора данных, подключенной через USB-кабель, эти сигналы передаются на ПК. А с помощью приложения, разработанного в программном комплексе LabVIEW, производится регистрация параметров и их запись для дальнейшей обработки.

На лицевой панели ВП изображена схема стенда (рис. 1). Стрелками указано направление потока воздуха и показаны индикаторы температур, давлений, расхода, частоты. На индикаторы, с помощью программного кода в режиме реального времени, передаются значения регистрируемых параметров с датчиков.

Для удобства на приборной панели индикаторы показаний датчиков продублированы в цифровом виде. Так же на приборной панели расположен блок управления записи данных испытаний в файл и кнопка остановки программы.

Программный код в LabVIEW представляется графически (рис. 2). Каждая функция и оператор изображается в виде иконки, у которой есть

определенные свойства, входы и выходы. Линии, соединяющие входы и выходы обозначают связи, по которым идут потоки информации (в них есть входные сигналы со стенда, циклы обработки и сохранения результатов эксперимента и т.д.).

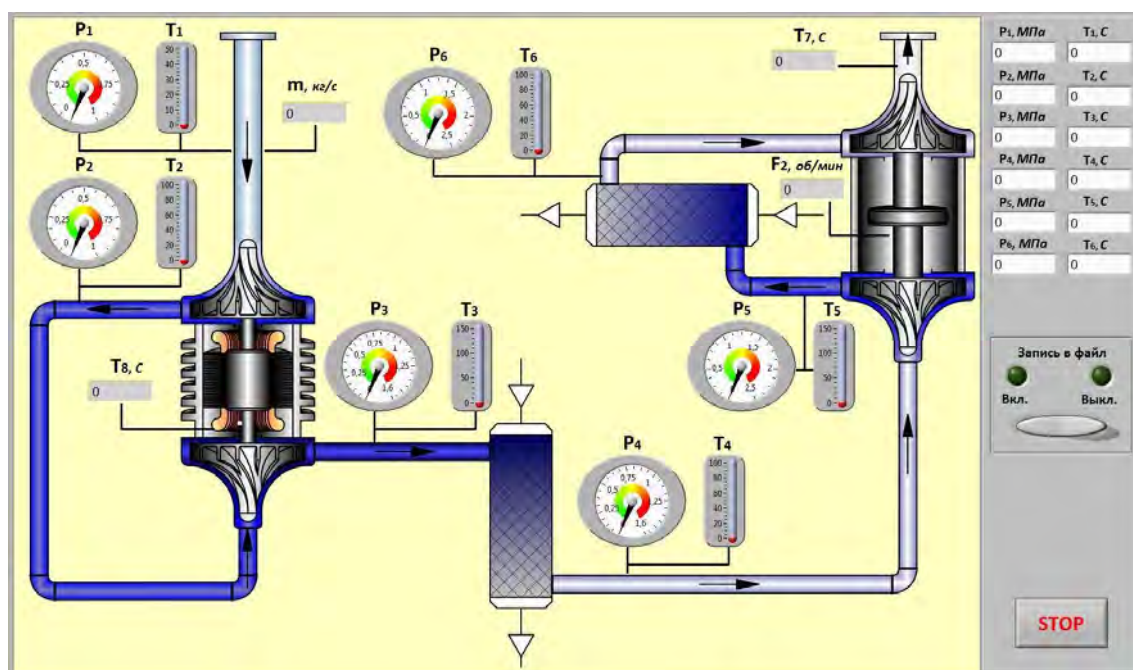


Рис. 1. Интерфейс лицевой панели программы

При включении программы происходит создание директории файла, которая включает в себя папку с именем, соответствующим дате проведения испытаний. Каждый вновь созданный файл именуется программой по порядку. В файл записывается заголовок и обозначение столбцов. Происходит обращение к настроенным каналам входных сигналов. Начинается непрерывное считывание данных, их обработка в соответствующий формат, передача на индикаторы и для записи в файл. Считывание данных происходит до тех пор, пока на вход терминала условия не поступит булевское значение (кнопка «STOP» или вывод сведений об ошибке).

При нажатии кнопки «STOP» на лицевой панели, булевское значение поступает на вход терминала по условию и цикл останавливается. Происходит остановка задачи считывания данных и возвращение ее в состояние, в котором она была до запуска. Непрерывная потоковая запись всех данных в файл нецелесообразна. Поэтому на приборной панели находится блок управления записью в файл, который позволяет записывать информацию с датчиков, когда это будет нужно.

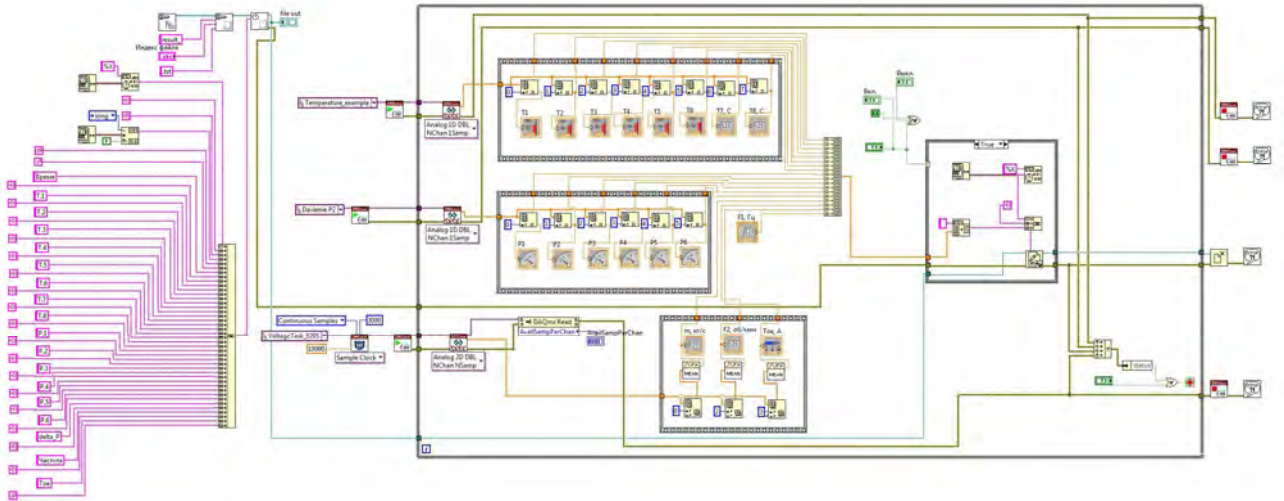


Рис.2. Блок-диаграмма виртуального прибора

Запись в файл начнется тогда, когда значение булевого элемента управления, подключенного к селектору, равно True, т.е. включенной кнопки управления записью, на лицевой панели. Если значение будет равно False (кнопка записи не включена), то запись в файл не производится. При выключенной кнопки управления записью на панели горит световой индикатор красным цветом, а при включении записи, загорается другой индикатор – зеленым.

Запись осуществляется в файл с расширением *.txt. Текстовые файлы не занимают много места и удобны для дальнейшей обработки информации. Файл удобно открыть в программе Microsoft Excel в виде сводной таблицы результатов эксперимента. Табличное представление данных облегчает задачу анализа результатов, т.к. наглядно видны все параметры, интересующие нас в каждый момент времени.

Гибкость платформы «NI compact DAQ-9178» позволяет осуществлять ее достаточно простую адаптацию к любым аналогичным испытаниям, а так же повысить качество измерений. Однако минусом данной системы сбора информации является высокая стоимость оборудования и программного обеспечения.

Библиографический список

1. Кехтарнаваз Н., Ким Н. Цифровая обработка сигналов на системном уровне с использованием LabVIEW./Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 304 с.
2. www.ni.com
3. www.labview.ru

4. National Instruments Corporation. Учебный курс. Системы сбора данных.

5. National Instruments Corporation. LabVIEW Основы 1. Разработка приложений.

УДК 621.45:539.2:226.2

ПОВЫШЕНИЕ РАЗМЕРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

С. А. Букатый, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П.А.Соловьёва»

В связи с повышением требований к параметрам газотурбинных двигателей в настоящее время одной из проблем в энергомашиностроении является обеспечение заданной геометрической точности при изготовлении ответственных деталей. Практика показывает, что ряд деталей ГТД (кольцевые детали, лопатки, диски, валы и др.) претерпевают в процессе механической обработки и после изготовления самопроизвольные деформации – коробление за пределы технологических допусков. Известны случаи, например, когда при изготовлении лопаток компрессора из титановых и алюминиевых сплавов в брак по короблению уходит от 10 до 80 % лопаток в комплекте. Результаты исследований, изложенные в работах [1 – 3], показывают, что коробление деталей обусловлено повышенным уровнем остаточных напряжений (ОН), распределённых в объёме заготовок. При механообработке вместе с технологическим припуском удаляется соответствующая часть ОН, что нарушает равновесие заготовки. Происходит перераспределение ОН в новое равновесное состояние, сопровождающееся в соответствии с законом Гука технологическими деформациями.

Вторая причина деформирования деталей – размерная нестабильность во времени [3 – 5]. Этому явлению подвержены преимущественно детали из титановых и алюминиевых сплавов. Причинами размерной нестабильности являются не только нестабильность фазового и структурного состояния материала, но преимущественно процессы, протекающие на микроуровне – релаксация остаточных напряжений II и III рода, приводящие к продолжению перераспределения ОН I рода. После удаления технологического припуска новое равновесное состояние дета-

лей часто бывает нестабильным из-за больших локальных градиентов ОН, обусловленных искажениями кристаллической решётки материала.

Таким образом, для устранения указанных явлений и процессов необходимо изготавливать заготовки деталей с пониженным уровнем ОН, что не всегда бывает возможно. В последнем случае следует использовать специальные технологии для существенного уменьшения ОН в заготовках. Вопросы совершенствования различных технологических процессов изготовления заготовок рассмотрены в работе [6]. Однако с течением времени – в процессе вылёживания при хранении или транспортировке, что особенно часто наблюдается в заготовках из алюминиевых сплавов, протекают процессы старения и упрочнения, приводящие к возникновению в заготовках объёмных ОН [7]. В таких случаях для уменьшения или снятия ОН необходимо применять специальные технологии. На практике чаще всего используют термические [8] или вибрационные [9] способы обработки. Однако термические методы стабилизации понижают прочностные свойства и коррозионную стойкость алюминиевых сплавов, а вибрационные, в силу малой интенсивности, требуют длительной обработки, либо оказываются недостаточно эффективными. Поэтому для уменьшения коробления высокоточных деталей нами предложен виброударный метод снижения ОН в заготовках [10]. Данный способ был апробирован при изготовлении направляющих лопаток второй ступени компрессора из сплава ВД17 длиной 360 – 420 мм и позволил при обработке в течение всего 5 минут обеспечить 100-процентный выход годных лопаток. Испытания лопаток на выносливость и коррозионную стойкость показали, что после виброударной обработки на оптимальном режиме циклическая прочность и коррозионная стойкость (общая и расслаивающая коррозия) остаются на том же уровне, что и у лопаток без виброобработки. Следовательно, виброударная обработка является эффективным средством снятия остаточных напряжений в деталях и заготовках и может использоваться для стабилизации размеров и формы ответственных деталей ГТД. Аналогичные результаты были получены нами в 1992 г при исследовании коробления при механообработке длинномерных валов на Рыбинском ПО "Полиграфмаш". В обоих случаях было установлено, что при превышении оптимального режима виброударной обработки заготовок после их механической обработки наблюдалось не только неполное снижение, но и в отдельных случаях увеличение коробления деталей. Это свидетельствует о том, что чрезмерная интенсивность виброударной обработки приводит к не полному или неблагоприятному перераспределению и наведению дополнительных ОН. Поэтому для каждой партии заготовок деталей нужно

предварительно оценивать объёмные ОН на макро- и микроуровнях. Для решения этой задачи на основе эффекта нелинейности температурных характеристик материала был разработан неразрушающий метод прогнозирования стабильности размеров и формы деталей, который был использован в работе [11]. Этот метод является интегральным, т.е. позволяет контролировать ОН на макро- и микроуровне весь объём детали в целом, либо по образцам, вырезанным из заготовок с большими размерами. В случае вырезания из заготовки образцов можно сделать сначала оценку ОН I рода отдельно. Например, в заготовках лопаток компрессора остаточное напряжённое состояние (НС) I рода является плоским, за исключением галтельных участков соединения пера с замком. В соответствии с принципом Сен-Венана зона включения ОН имеет порядок толщины заготовки. Поэтому для наиболее полной разгрузки образца от ОН I рода его длина и ширина прямоугольной или диаметр круглой формы не должны превышать двух-трёх толщин заготовки на выбранных участках. Предварительно на размеченных участках наклеивают тензорезисторы обычно в продольном Z и поперечном X направлениях и снимают начальные показания прибора. Если ставится задача более полного исследования остаточного НС заготовок, то нужно наклеивать розетку тензорезисторов, с помощью которой можно определить величину и направление действия главных ОН напряжений [12]. Для повышения достоверности оценки остаточного НС, особенно при значительной толщине заготовок, следует аналогично наклеивать тензорезисторы и на противоположной стороне образцов. После вырезки образцов (предпочтительно электроимпульсным способом, либо фрезой на щадящем режиме с обильным охлаждением, чтобы не наводить новых ОН) измерения повторяют и определяют изменения деформаций в указанных направлениях $\Delta\varepsilon_z$ и $\Delta\varepsilon_x$. Тогда на основе обобщённого закона Гука величину снятых ОН определяют по формулам

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\mu^2}(\Delta\varepsilon_z + \mu\Delta\varepsilon_x), \quad \sigma_x = \frac{E}{1-\mu^2}(\Delta\varepsilon_x + \mu\Delta\varepsilon_z),$$

где E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала заготовки.

При наличии достаточно точного оптического микроскопа вместо использования тензорезисторов можно на размеченных участках каким-либо способом нанести в указанных направлениях метки и по изменению расстояний между метками после вырезки определить искомые относительные деформации и соответствующие ОН.

Изложенный способ контроля остаточного НС существенно проще, чем по [11] и в ряде случаев бывает достаточно им ограничиться, чтобы решить вопрос о необходимости применения технологии [10]. В этом случае для определения рациональных режимов снятия ОН вместо указанного в [10] критерия $\Delta K_{\text{ср}} / K_{\text{ср}}^{\text{исх}}$ можно воспользоваться аналогичным относительным критерием $\Delta \sigma_{\text{ср}} / \sigma_{\text{ср}}^{\text{исх}}$. Здесь $\sigma_{\text{ср}}^{\text{исх}}$ и $\Delta \sigma_{\text{ср}}$ – соответственно средняя величина ОН в исходном состоянии и среднее изменение величины ОН после виброударной обработки, т. к. для поиска рациональных режимов обработки следует вырезать из выборочных контрольных заготовок несколько образцов. При больших сериях изготовления однотипных деталей из одной марки материала можно для эффективного снятия ОН воспользоваться методом многофакторного планирования экспериментов, чтобы построить модель для оперативного определения рациональных режимов виброударной обработки.

Библиографический список

1. Букатый С.А. Изменение размеров и формы деталей после обработки поверхности [Текст] / С.А. Букатый // Рыбинский авиационный технологический институт. – Рыбинск, 1993. –147 с. –Библиогр. 116 назв. – Рус. –Деп. в ВИНТИ –19.07.93, –№ 2023–В93 .
2. Букатый С.А. Коробление и размерная стабильность маложёстких тонкостенных деталей в производстве газотурбинных двигателей [Текст] / С.А. Букатый, И.В.Семенченко // Вестник машиностроения. –1994. –№10. –С. 32–37.
3. Букатый С.А. Природа, прогнозирование и методы повышения размерной стабильности материалов и деталей ГТД [Текст] / С.А. Букатый // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева: Сб. научных тр. – Рыбинск, –2003.–№2. С. 70–77.
4. Букатый С.А. Неразрушающий контроль внутренних напряжений и размерной стабильности материала лопаток ГТД [Текст] / С.А. Букатый // Авиационная промышленность. –1989. –№ 4. –С. 21 – 22 .
5. Букатый С.А. Эффект нелинейности температурных характеристик материалов и деталей и перспективы его применения в производстве деталей ГТД [Текст] / С.А. Букатый // Вестник двигателестроения. –2014. – № 2. –251 с. –С. 201–205.
6. Букатый С.А. Применение эффекта нелинейности температурных характеристик материалов в заготовительном производстве для повыше-

ния точности деталей [Текст] / С.А. Букатый // Заготовительные производства в машиностроении. –2009. –№ 2. С.45–50.

7. Букатый С.А. Изучение структурной и фазовой стабильности в деформированных изделиях из алюминиевых сплавов. Управление строением отливок и слитков [Текст] / С.А. Букатый, В.А. Гришин, С.В. Лобанов, А.В. Гришин // Межвуз. сб. научн. трудов. Нижний Новгород, –1998. – 160 с. – С. 94–96.

8. Букатый С.А. Исследование эффективности режимов термостабилизации алюминиевых и титановых сплавов на основе эффекта нелинейности температурных характеристик [Текст] / С.А. Букатый // Материалы Международной научно-технической интернет-конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения», «Технология–2002». г. Орел, 1марта–10сентября 2002 г. –424 с. –С. 206–209.

9. Рагульскис К.М. Вибрационное старение [Текст] / К.М. Рагульскис, Б.Б. Стульпинас, К.Б. Толутис // –Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. –1987. – 72с.

10. Букатый С.А. Стабилизация размеров и формы деталей ГТД виброударным методом [Текст] / С.А. Букатый // Международная научно-техническая конференция, посвященная памяти генерального конструктора аэрокосмической техники академика. Н.Д.Кузнецова. Доклады. Часть 1. г. Самара. –2001. С. 47–50.

11. Букатый С.А. Физические основы неразрушающего метода прогнозирования стабильности размеров и формы деталей и его применение для совершенствования технологических процессов [Текст] / С.А. Букатый // Вестник Верхневолжского отд. Академии технологических наук РФ. Сер. Высокие технологии в машиностроении и приборостроении. Вып. 2: Сб. науч. тр. / РГАТА. г. Рыбинск. –1995. – С. 51–57.

12. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник [Текст] / Н.И. Пригоровский // –М.: Машиностроение. –1983. –248 с.

УДК 621.45.313

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ
БАНДАЖНЫХ ПОЛОК И ОПТИМИЗАЦИИ ЧИСЛА ОХЛАЖДАЕМЫХ
ЛОПАТОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТУРБИН ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ
СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Ле Тиен Зыонг, аспирант

Научный руководитель: В. Г. Нестеренко, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»

Конструкция и система охлаждения турбин газогенераторов современных и перспективных авиационных ГТД, а также методика их проектирования и доводки требуют дальнейшего совершенствования в связи с тенденцией существенного повышения максимальной величины температуры газа на выходе из камеры сгорания и учётом требований дополнительного запаса этой температуры на критичном режиме «red line», роста величин степени сжатия в перспективных КВД, что снижает эффективность системы воздушного охлаждения, т.к. приводит к повышению температуры охлаждающего воздуха и т.д. Ресурс горячей части большого числа современных авиационных ГТД в ряде конструкций примерно в два раза меньше ресурса его холодной части. Поэтому его увеличение, особенно это относится к рабочим лопаткам ТВД, имеет важное практическое значение с точки зрения снижения стоимости жизненного цикла как самого газогенератора, так и ГТД в целом. Установка бандажных полок на рабочих лопатках турбин позволяет решить две важные задачи. Во-первых, повысить КПД ступени турбины за счёт снижения перетеканий газа в радиальном зазоре. Во-вторых, бандажная полка в местах контакта создаёт натяг, вследствие чего из-за повышенного трения обеспечивается конструкционное демпфирование, снижается амплитуда колебаний. Бандажная полка дополнительно растягивает рабочую лопатку и диск центробежной силой, разгружает рабочую лопатку от кручения, увеличивает её частоту собственных колебаний. Основная проблема, определяющая возможность установки бандажной полки в рабочих лопатках современных высокотемпературных ТВД заключается в необходимости её охлаждения. Известен пример проектирования внешней системы охлаждения бандажной антивибрационной полки для лопатки ТВД ТРДДф Р29-300. Струи охлаждающего воздуха направлялись на полку из полости статора, расположенной над плавающей вставкой. Однако испытания показали большое, примерно трёхпроцентное, снижение КПД этой ступени. Очевидно, что должна быть разработана экономичная встроенная в лопатку система охлаждения бандажной полки. Такая система охлаждения бандажной полки лопатки ТВД представлена на рис.1[1].

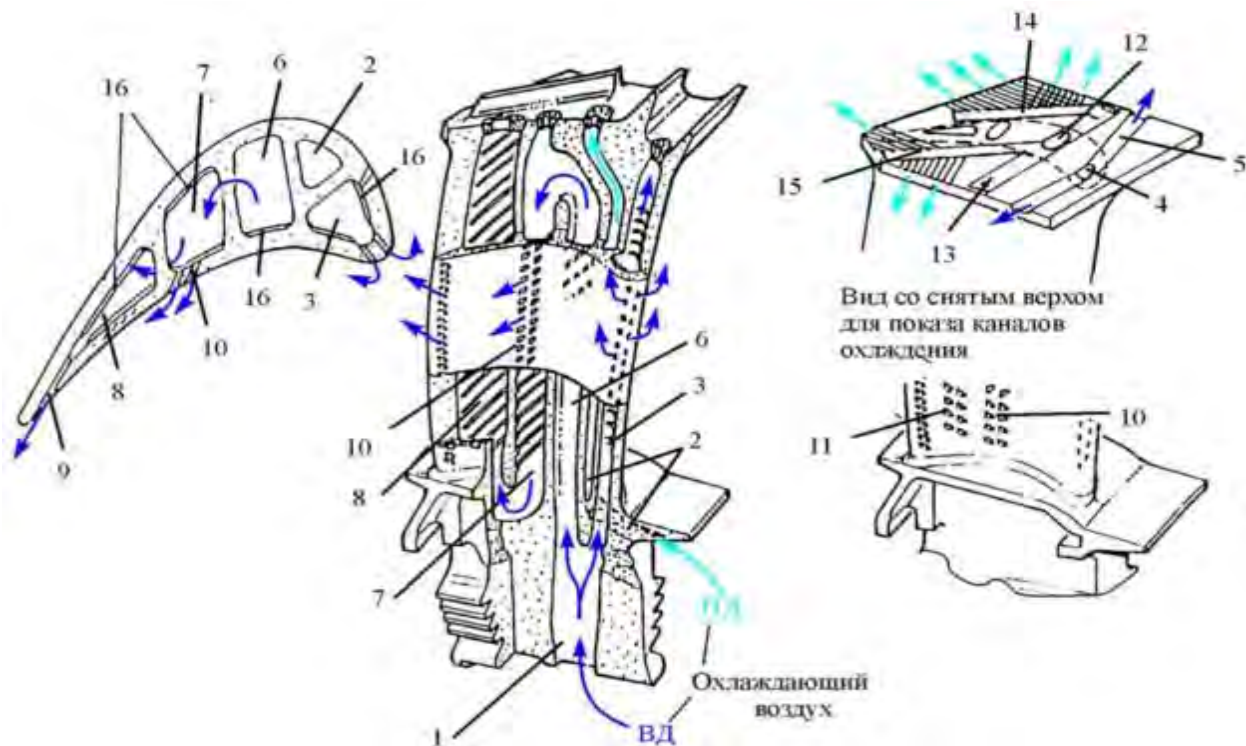


Рис. 1. Схема охлаждения и конструкция рабочей лопатки ТВД Trent 800 (Rolls Royce):
 1-основной вертикальный канал; 2- дополнительный вертикальный канал; 3 – полость входной кромки; 4 – отверстие для воздуха из полости входной кромки; 5 – внутренний канал бандажной 6,7,8 – радиальные каналы охлаждения пера лопатки; 9 – отверстия для выхода охлаждающего воздуха в проточную часть ТВД; 10,11 – ряды отверстий плёночного охлаждения; 12 – отверстие для выхода охлаждающего воздуха из дополнительного канала; 13 – поперечный канал в полке; 14,15 – раздаточные каналы; 16 – пристеночные турбулизирующие рёбра

Как видно из представленной на рис.1 конструктивной схемы бандажной полки, она имеет развитую систему конвективного охлаждения, выполненную литьём, с выходом охлаждающего воздуха в торцы беззиговой бандажной полки, за исключение её передней части. Создание конструкции такой бандажной полки с внутренней системой конвективного охлаждения представляет собой сложную техническую задачу. Однако её эффективность, т.е. увеличение ресурса лопатки ТВД, по данным Роллс-Ройс, оправдывает производимые затраты.

Принципиальным вопросом при проектировании рабочей лопатки ТВД с бандажной полкой является выбор её геометрических размеров и их изменения по высоте лопатки, включая величину хорды профиля и его максимальную толщину в корневой части лопатки, а также величину относительного шага решётки по всей высоте лопатки. Выбор этих параметров во многом влияет на возможное снижение массовых характеристик ротора ТВД, так и уровень его КПД. Рассмотрим геометрические характеристики двух принципиально разных охлаждаемых рабочих лопаток ТВД с бандажной полкой, отличающихся размерами хорды профиля в корне профильной части пера и характером её изменением по высоте лопатки. Эти данные представлены в табл. 1, где лопатка №1

-«узкая», хорда корневого профиля $l = 30,5$ мм; лопатка №2 – широкохордная, хорда корневого профиля $l = 40,0$ мм.

Таблица 1

Геометрические характеристики бандажированных лопаток ТВД

№ п.п.	h/l_{cp}	Корневое сечение		Периферийное подположное сечение	
		t/l	c_{max}/l	t/l	c_{max}/l
1	1,94	0,74	0,30	0,83	0,23
2	1,87	0,625	0,35	0,842	0,256

Как видно из данных табл. 1, ширина обода диска для лопатки №1 может быть меньше примерно на 25%. Однако при этом возрастает количество узких лопаток в роторе. Особое внимание следует обратить на выбор большой величины относительного шага решётки профилей в корневой части лопатки, где осуществляется подвод охлаждающего воздуха. Это связано с высокими значениями относительной толщины профиля в корне охлаждаемой лопатки и необходимостью выполнения конфузорного межлопаточного канала.

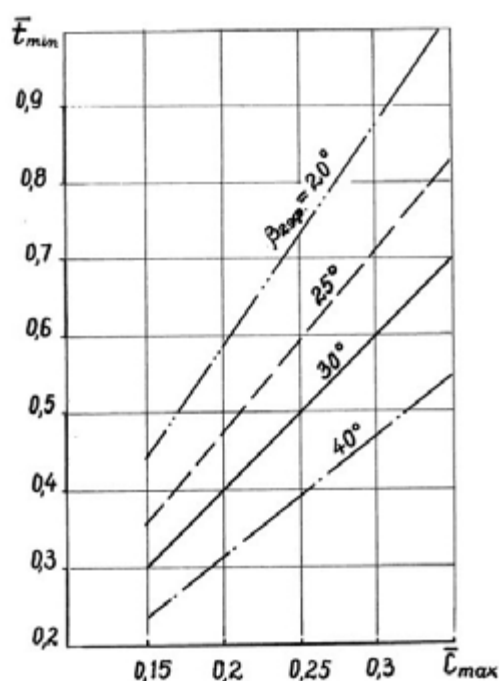


Рис. 2. Расчётная оценка минимального увеличения относительного шага решётки профилей при возрастании относительной толщины профиля охлаждаемой решётки

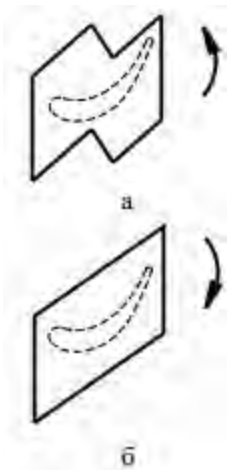


Рис. 3. Схемы закрутки пера рабочей лопатки турбины с Z-образной (а) и беззиговой (прямой, б) бандажной полкой

На рис. 2 представлен график, позволяющий оценивать минимальный относительный шаг решётки турбинных профилей в зависимости от выбранной величины максимальной толщины профиля.

Объём данных тезисов не позволяет рассмотреть проблему рационального проектирования всего пера, от его корневого до периферийного сечения, и возможное разнообразие формы и размеров бандажной полки (см. Рис.3) лопатки рабочего колеса турбины. По возможности подробно была показана техническая возможность рационального охлаждения бандажной полки при высокой температуре газа, соответствующей ТРДД 5-го поколения, и принципы определения критичных геометрических размеров охлаждаемой лопатки ТВД.

Библиографический список

1. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб./- М.: Машиностроение, 2008.- Т.2-368 с.; ил. (Серия: Газотурбинные двигатели).

УДК 539.3

УПРОЩЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ КОНСТРУКЦИЙ С СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ ПОСРЕДСТВОМ ЗАМЕНЫ СОТОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ СЛОЕМ СПЛОШНОГО МАТЕРИАЛА

Н. В. Осадчий, канд. техн. наук, В. Т. Шепель, д-р техн. наук

ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

При анализе напряжённо-деформированного состояния конструкций с сотовым заполнителем в условиях поперечного изгиба, моделирование заполнителя в виде шестигранных сот нецелесообразно, так как это приводит к значительному размеру модели, увеличивает время её построения и расчёта. Поэтому на практике сотовый заполнитель заменяют слоем сплошного ортотропного материала, эквивалентного по упругим свойст-

вам сотовому заполнителю. При этом встаёт задача определения упругих характеристик материала, заменяющего сотовый заполнитель. Этому и посвящена данная работа.

Для расчёта механических характеристик сотового заполнителя используется метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе ANSYS. Используемые при этом расчётные схемы соответствуют схемам механических испытаний сотового заполнителя, которые используются при экспериментальном определении его механических характеристик.

Для оценки точности моделирования на моделях квадратной трёхслойной пластины с сотовым заполнителем и с заполнителем в виде слоя сплошного материала были выполнены сравнительные расчёты:

- перемещений при поперечном изгибе пластины под действием равномерно распределённой по одной из обшивок нагрузки,
- собственных частот и форм колебаний.

При расчётах кромки обшивок имели шарнирное закрепление, препятствующее перемещению кромок в плоскости обшивок.

Сравнение результатов расчётов показало возможность моделирования реального сотового заполнителя слоем сплошного материала с приведёнными упругими параметрами, рассчитанными по методике данной работы.

СЕКЦИЯ «ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА»

УДК 658.562.3:519.2

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНИВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМАХ

Б. М. Бржозовский, д-р техн. наук, профессор,

В. В. Мартынов, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.»

В настоящее время в связи с широким применением дорогостоящих мехатронных систем (МС) формируются новые требования к повышению эффективности управления реализуемыми с их помощью технологическими процессами. Требования базируются на свойствах процессов, основными из которых являются нелинейность, квазистационарность и многорежимность функционирования. Эти свойства, а также разнородность и сложность самих мехатронных систем не позволяют использовать существующие методы и критерии оценивания, и определяют трудности оптимизации и мониторинга процессов в реальном времени. В связи с этим являются актуальными исследования, направленные на разработку новой концепции, которая позволит проводить многофазное оценивание состояния процессов на основе использования статистических методов и эффективных критериев обработки информации с учетом присущих процессам свойств. При этом представляется целесообразным применение интегративных количественных показателей, которые должны напрямую зависеть от изменения параметров процессов и множества возмущений с целью исключения необходимости параметрической или непараметрической идентификации моделей, что значительно упрощает задачу. Вычисление значений этих показателей даст возможность осуществлять целенаправленный поиск условий, в которых будет обеспечиваться не только инвариантность к нежелательным последствиям, связанным с изменением состояния процессов, но и возможность целенаправленно воздействовать на само состояние в случае, если воздействие оценивается как целесообразное.

На методологическом уровне концепцию целесообразно реализовывать в трех направлениях:

- оценивание по результатам измерений перед началом процесса (по входным данным);
- оценивание по результатам измерений в ходе процесса (по текущим данным):

– оценивание по результатам измерений после окончания процесса (по выходным данным).

Методы первой и третьей групп основаны на измерении параметров, характеризующих состояние процессов до начала и после их завершения. Оценивание состояния целесообразно проводить во временной области, рассматривая измеренные параметры как случайные выборки. Преимуществом методов является высокая достоверность информации, характеризующей состояние процессов. Однако при этом имеет место запаздывание в принятии и реализации оптимизационных решений. Кроме этого, в отличие от методов второй группы, оценивание по входным и выходным данным позволяет отслеживать, главным образом, процессы, нелинейность которых обусловлена действием возмущений, носящих систематический характер.

Методы второй группы основаны на измерении параметров, характеризующих состояние непосредственно в ходе процессов. Важная роль в ряду этих параметров принадлежит вибрационным сигналам (вибросигналам) о колебаниях МС, регистрируемых в виде временных рядов динамики. Оценивание состояния по параметрам вибросигналов целесообразно проводить в частотной области, поскольку это позволит оптимизировать процесс по критерию минимизации влияния случайных факторов, особенно в ситуации, когда оно является доминирующим. Для этого необходима разработка специальных методов анализа регистрируемых вибросигналов с целью создания эффективных алгоритмов и критериев, позволяющих формировать «медленные» движения основных элементов упругой системы МС от приводов, нечувствительные к «малым» возмущениям («быстрым» движениям), возникающим при взаимодействии «медленных» движений через виртуальный регулятор – технологический процесс.

Сформировано математическое обеспечение и технология мониторинга рабочего процесса и состояния МС по интегральным показателям вибросигналов и получены следующие результаты:

– обоснована целесообразность использования в качестве интегрального показателя статистики Херста, с помощью которой можно количественно отображать основные закономерности, связанные с формированием структуры сигнала о колебаниях МС, и на этой основе однозначно судить обо всех изменениях рабочего процесса, не прибегая к традиционному спектральному анализу;

– методом статистического моделирования найдены допуски на значения статистики Херста, интервал между которыми задает размеры области работоспособности МС, определено ее оптимальное положение и разработана процедура идентификации фактического положения в пространстве возможных значений статистики Херста для проведения количественной оценки уровня работоспособности МС;

- сформирована стратегия принятия решений в процессе мониторинга как при изменении положения (неслучайном увеличении разброса оценок) статистики Херста относительно области работоспособности МС, так и при смещении самой области относительно ее оптимального положения.

- для проведения диагностики состояния основных подсистем МС разработаны:

- метод оперативной идентификации причин разладки процесса ее функционирования, в основе которого лежит определение в частотной области диапазонов недопустимых относительных изменений статистики Херста, идентифицируемых по результатам последовательной низкочастотной фильтрации вибросигнала и применения непараметрических процедур поиска аномальных выбросов. Практически применение метода исключает необходимость вычисления спектра как при традиционных методах вибродиагностики и делает возможной, во-первых, реализацию процедуры оперативного прогнозирования моментов времени перехода к углубленной проверке МС для диагностики причин обнаруженных изменений ее вибрационного состояния за счет анализа коротких по длительности вибросигналов, во-вторых, корректировку алгоритма управления в интервале времени прогнозирования с целью обеспечения устойчивого функционирования МС с частично проявившимся отказом на основе рассмотрения его как одного из допустимых состояний;

- программный адаптивный фильтр, использующий постоянно накапливаемую информацию о периодических составляющих, для разделения спектра вибросигнала на стохастические и периодические составляющие;

- алгоритм обнаружения составляющих спектра, образуемых собственными частотами колебаний основных элементов МС на основе самоорганизующихся карт Кохонена, позволяющий осуществлять диагностику их состояния с точки зрения оперативного обнаружения появления структурных изменений;

Использование основных положений концепции применительно к технологическим процессам механической обработки на станочных МС различного целевого назначения, а также технологическим процессам магистрального транспорта газа с помощью газоперекачивающих агрегатов (ГПА) в том числе на базе авиационных двигателей, позволило сделать следующие выводы.

1. Привязка технологического процесса к МС, на которой он будет реализован, необходима не только в направлении статической настройки последней (включая поиск оптимальных параметров технологического режима), но и в направлении непрерывного отслеживания ее возможных изменений (прежде всего носящих монотонный характер). Это является методологической основой динамического мониторинга технологического процесса, поскольку позволяет ставить в соответствие закономерностям его изменения закономерности изменения состояния МС.

2. Основной задачей мониторинга является информационное обеспечение процесса формирования оптимального состояния динамической системы МС при ее настройке, а также в ходе последующей работы; здесь объектом мониторинга становится не само состояние, а его изменения. Результаты оценки и прогноза изменений используются для коррекции оптимальных параметров технологического режима, а также идентификации причин его разладки и/или ухудшения динамического состояния МС. Кроме того, по данным мониторинга создаются возможности для диагностирования качества процесса и формирования информационной базы для коррекции динамической настройки после окончания процесса.

3. Оперативная оптимизация параметров технологического режима с учетом динамического состояния позволяет устойчиво адаптироваться к его допредельным изменениям на основе подавления негативных процессов и осуществлять вывод МС в ремонт только тогда, когда ее состояние действительно будет отображать потребность в проведении ремонта, т.е. перейти от обслуживания по регламенту к обслуживанию по состоянию.

Конечным результатом формирования концепции является создание новых информационных технологий с адаптивными свойствами для их универсального использования в системах управления МС различного назначения: станках с ЧПУ, газотурбинных и парогазовых установках, электрогенераторах и т.д.

УДК 621.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЭНТРОПИИ НА РАЗМЕРНУЮ СТОЙКОСТЬ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ

С. В. Старовойтов, аспирант

Научный руководитель: В. Л. Юрьев, докт. техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

Лезвийная обработка металлов сопровождается превращением механической энергии в тепловую. В соответствии со структурно-энергетическим подходом, использующем гипотезу независимости удельной энергии разрушения от вида подводимой энергии [1], всю сосредоточенную в зоне резания энергию можно представить в виде тепловой.

В работе [1] показано, что обрабатываемость материалов определяется широким комплексом известных до опыта параметров и технологических факторов, а также соотношением сил и температур, развивающих-

ся при резании: P_z/θ . На основе этого соотношения в той же работе предложен энергетический критерий $A = \frac{a_1 \cdot b_1 \cdot c_p \cdot \theta}{P_z}$, характеризующий собой тепловую активность стружки по отношению ко всей выделяющейся в зоне резания теплоте.

Оптимизацию процесса резания как процедуру выбора оптимальных технологических условий обработки также осуществляют на основе других энергетических критериев. В работе [2] для чистовой обработки резанием рекомендуется энергетический критерий качества, который представляет собой отношение накопленной энергии деформации или скрытой энергии в поверхностном слое детали к площади поверхности, обработанной в единицу времени: $\eta_2 = \frac{U_2}{v \cdot S}$.

Тепловые процессы при резании металлов сопровождаются накоплением и рассеиванием энергии. Поэтому помимо энергетических критериев, упомянутых выше, целесообразно рассмотреть влияние энтропии процесса резания на интенсивность износа режущего инструмента.

Система резания является открытой, т.е. она связана с окружающей средой и может осуществлять с ней обмен энергией. В работе [1] приводится уравнение баланса механической и тепловой энергий при резании материалов. Значительная часть подводимой механической энергии уходит из зоны резания вместе со стружкой ($dQ_{\text{стр}}$) и в заготовку ($dQ_{\text{заг}}$). Также отвод тепла из зоны резания осуществляется через инструмент ($dQ_{\text{инс}}$). Уравнение баланса механической и тепловой энергий при резании имеет вид:

$$dQ_{\text{мех}} = dQ_{\text{стр}} + dQ_{\text{заг}} + dQ_{\text{инс}} \quad (1)$$

Величину приращения механической энергии можно количественно определить по формуле:

$$dQ_{\text{мех}} = P_z \cdot dl, \text{ Дж} \quad (2)$$

где P_z , Н – тангенциальная составляющая силы резания; dl , м – приращение пути резания.

Рассчитать количество тепловой энергии, аккумулируемой в стружке, заготовке и инструменте можно, применив метод подобия [1].

В отличие от обрабатываемого материала инструмент всегда находится в зоне резания, вступая в контакт с постоянно обновляемыми слоями стружки и обработанной поверхности. Поскольку рассеивание энергии через инструмент имеет конечную скорость, происходит накопление энергии в наиболее нагруженных приповерхностных слоях инструментального материала. В определенный момент времени отвод избыточной

энергии начнет происходить путем отделения перенасыщенных энергией частиц режущего инструмента и их удалением из зоны резания, что по сути является износом инструмента.

На основании этих рассуждений получено следующее выражение мгновенного приращения износа режущего инструмента по задней поверхности:

$$dh = \frac{P_z}{U_{0\phi} \cdot h_z \cdot h_1} \cdot dl - \lambda \cdot \theta \cdot \frac{1,85 \cdot Pe^{0,62} \cdot E^{0,02} + m \cdot \frac{Pe^{0,4} \cdot D^{0,4}}{\sin^{0,22} \alpha \cdot \sin^{0,02} \gamma} + 0,6625 \cdot \frac{Pe^{0,2} \cdot D^{0,472}}{\sin^{0,402} \alpha}}{U_{0\phi} \cdot h_z} \cdot d\tau. \quad (3)$$

где Pe , E , F , D – безразмерные критерии подобия процесса резания, описываемые в работе [1]; m , n – зависящие от критерия Pe числа; P_z , Н – тангенциальная составляющая силы резания; dl , м – приращение пути резания; $d\tau$, с – приращение времени резания; λ , Вт/м·град – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; b_1 , мм – ширина срезаемого слоя; θ , °С – температура резания, определяемая экспериментально; α , рад. – задний угол режущего инструмента; γ , рад. – передний угол режущего инструмента; $U_{0\phi}$, Дж/м³ – удельная энергия формоизменения обрабатываемого материала; h_z , м – величина фаски износа инструмента по задней поверхности.

Условие минимальной интенсивности износа на основании выражения (3) будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{N_{\text{мгн}}}{\theta} = \lambda \cdot b_1 \cdot \left(1,85 \cdot Pe^{0,62} \cdot E^{0,02} + m \cdot \frac{Pe^{0,4} \cdot E^{0,4}}{\sin^{0,22} \alpha \cdot \sin^{0,02} \gamma} + 0,6625 \cdot \frac{Pe^{0,2} \cdot E^{0,472}}{\sin^{0,402} \alpha} \right) \quad (4)$$

где $N_{\text{мгн}}$, Вт – мгновенная мощность резания.

Левая часть выражения (4) представляет собой мгновенную скорость образования энтропии: $N_{\text{мгн}}/\theta = dQ/(\theta \cdot d\tau) = dS/d\tau$. На основании выражения (4) можно рассчитать значение скорости образования энтропии, соответствующее минимально возможной интенсивности износа режущего инструмента при заданных режимах обработки.

На основании экспериментальных данных, приведенных в работе [1], были рассчитаны значения скорости образования энтропии при различных режимах обработки материала ХН73МБТЮ резцом из твердого сплава ВК6М. В выше указанной работе исследования проводились при точении образца резцом со следующими геометрическими параметрами:

$\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ – главный и вспомогательный углы в плане;

$\gamma = \alpha = 12^\circ$ – передний и задний углы;

$r = 1$ мм – радиус при вершине резца.

Обработка велась при глубине $t = 1.5$ мм. Скорость резания v изменялась от 10 до 63 м/мин. Подача s варьировалась в пределах от 0.074 до 0.39 мм/об. На основании измерения тангенциальной силы резания P_z и температуры резания θ были найдены экспериментальные значения скорости образования энтропии. Для данных режимов резания по формуле (4) также были рассчитаны скорости образования энтропии, соответствующие минимально возможной интенсивности износа режущего инструмента. Разность скоростей образования энтропии, полученных экспериментально и рассчитанных по формуле (4), обусловлена износом инструмента. Разделив эту разность на скорость резания $v_{\text{опт}}$, получим интенсивность образования энтропии износа режущего инструмента по пройденному пути dl . В таблице 1 приведены экспериментальные и расчетные данные для одной из использованных при исследовании подач $s = 0.15$ мм/об.

Таблица 1

Расчетные и экспериментальные данные при обработке материала ХН73МБТЮ резцом из твердого сплава ВК6М с подачей 0,15 мм/об

v , м/мин	P_z , Н	$N_{\text{мин}}$, Вт	θ , °C	dS/dt эксп., Вт/°C	dS/dt min, Вт/°C	dS/dt изн., Вт/°C	dS/dl изн., Дж/°C·м
16	680	188	638	0,294	0,272	0,022	0,080
20	685	231	703	0,329	0,301	0,028	0,083
26	654	281	772	0,364	0,341	0,023	0,054
32	636	340	821	0,414	0,394	0,021	0,039
36	632	380	852	0,445	0,419	0,027	0,045
40	636	422	853	0,494	0,441	0,054	0,081
50	637	540	893	0,604	0,505	0,099	0,117

На основе данных таблицы 1 были построены совместные графики скоростей образования энтропии (экспериментальной и расчетной минимальной), интенсивности образования энтропии износа режущего инструмента, а также температуры в зависимости от скорости резания (рис. 1).

Из графика, изображенного на рисунке 1, видно, что как и расчетная минимальная, так и экспериментальная скорости образования энтропии с ростом скорости резания растут. При скорости резания, выше оптимальной по А.Д. Макарову, экспериментальная скорость образования энтропии начинает расти заметно быстрее расчетной минимальной. Из-за этого график интенсивности образования энтропии износа режущего инструмента имеет минимум. Минимуму интенсивности образования энтропии износа режущего инструмента соответствует температура θ_s . Данная температура

немного меньше оптимальной температуры резания по А.Д. Макарову $\theta_{\text{опт}}$ [3] на значение 0-50°C при различных подачах.

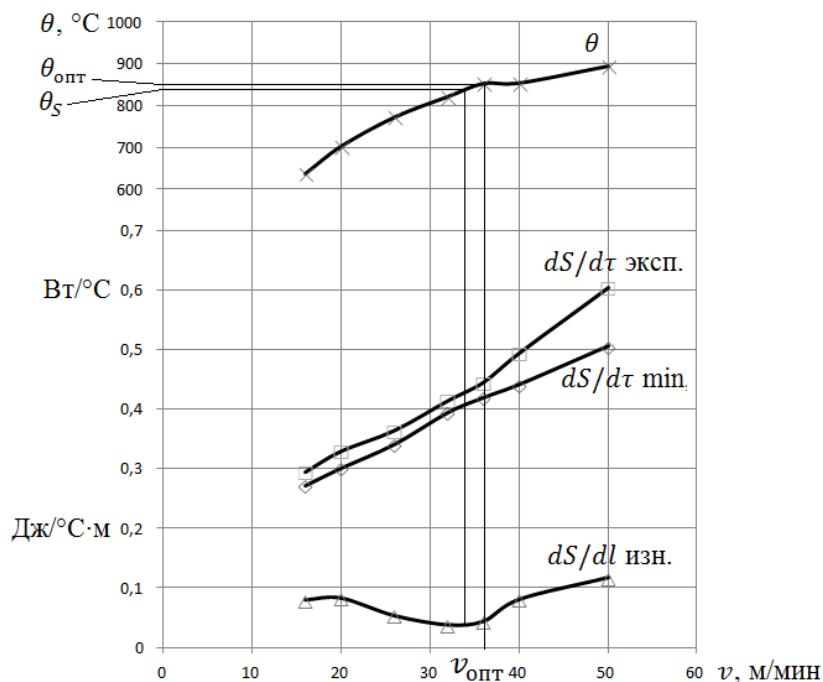


Рис. 1. К исследованию влияния энтропии на интенсивность износа режущего инструмента

Заключение

Проведенный анализ экспериментальных данных показал, что минимальной интенсивности образования энтропии износа режущего инструмента соответствуют режимы резания, близкие к рекомендуемым. Таким образом, для оценки оптимальных условий обработки металлов резанием можно пользоваться критерием интенсивности образования энтропии dS/dl .

Библиографический список

1. Силин С. С. Теория подобия в приложении к технологии машиностроения: Учебное пособие. Ярославль 6 ЯПИ, 1989. 108 с.
2. Старков В. К. Дислокационные представления о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с., ил.
3. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания [Текст] / А.Д. Макаров – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Е. П. Решетникова, аспирант

Научный руководитель: П. Ю. Бочкарев, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.»

Для получения высокого экономического эффекта в современных условиях рыночных отношений машиностроительные предприятия производства работают с широкой номенклатурой деталей. Это требует гибкости производственной системы, и разработки технологических процессов (ТП) на основе технологических возможностей современного оборудования и эффективного использования их функциональных возможностей, способных обеспечить быстрый переход на обработку новых деталей при расширении номенклатуры. Все большее применение в сегодняшней авиакосмической промышленности, приборо- и машиностроении находят детали со сложнопрофильными поверхностями, что в свою очередь предъявляет новые требования к точности, надежности и производительности данных деталей.

Проведенный анализ на машиностроительном предприятии показал несовершенство процесса функционирования производства, а именно обработка деталей со сложными поверхностями представляет собой длительный процесс, контроль ответственных поверхностей осуществляется при помощи универсального измерительного инструмента, а входной и межоперационный контроль несовершенен.

Одной из важных задач является постоянное повышение требований к точности размеров, формы и расположения поверхностей деталей. При анализе существующих методик контроля различного типа деталей была выявлена необходимость создания информационной технологии измерения сложнопрофильных поверхностей для увеличения производительности измерений геометрических параметров поверхностей деталей и создания универсальной методики для автоматизированного контроля, с целью достижения высокого качества проектных решений и сокращения сроков разработки ТП. Неотъемлемыми при разработке ТП обработки сложных поверхностей деталей являются операции контроля, и автоматизация данных операций позволит повысить качество получаемой поверхности, а также приведет к сокращению сроков производства.

Сложность проблемы обусловлена, с одной стороны, разнообразием видов сложнопрофильных поверхностей и их возможным сочетанием на одной детали, с другой стороны, наличием множества показателей отклонений формы и расположения поверхностей.

Предлагаемое решение задачи: использование координатно-измерительных машин (КИМ). Мобильная КИМ представляет собой многоосевую измерительную «руку». В ней отсутствуют приводы перемещений, подвод измерительного наконечника до касания с поверхностью осуществляется вручную и фиксируется нажатием кнопки. В результате оператору не удастся равномерно расположить контролируемые точки на поверхности и подвести щуп со сферой по нормали к ней. Поэтому актуальной является задача разработки методики контроля, независимой от числа контролируемых точек и их расположения на поверхности. Также на первый план выходит проблема обеспечения производительности контроля.

В рамках выполняемой работы разработана методика контроля на основе данных экспериментального исследования на координатно-измерительной машине FARO 9 ARM EDGE, страна - производитель - фирма FARO Swiss Holding GmbH, Швейцария.

Основная задача при контроле с использованием КИМ заключается в создании аналитического эквивалента геометрического образа поверхности (поверхностей) детали по совокупности измеренных точек. Предлагаются неизвестные параметры геометрической модели определять на основе многопараметрической оптимизации функционала Φ , представляющего собой сумму квадратов невязок:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^m u_j(A, B, C, D) - r_i \right)^2 \rightarrow \min,$$

где u_j – базисные функции; A – группа параметров, описывающих номинальную геометрию поверхности; B – группа параметров, описывающих отклонения формы от номинальной геометрии поверхности; C – группа параметров, задающих положение детали в локальной системе координат; D – группа параметров, задающих координатные связи данной поверхности с другими поверхностями на детали; r_i – радиус-векторы измеренных точек поверхности.

В случае измерения нескольких поверхностей на одной детали определение геометрического образа в целом осуществляется в несколько этапов. Вначале следует измерить базовую поверхность или несколько поверхностей, связать с ними новую локальную систему координат, а затем

измерить оставшиеся поверхности. Тогда некоторым параметрам из групп C и D будут присвоены постоянные значения, и они перестанут быть неопределенными на последующих этапах оптимизации.

Для описания поверхностей деталей целесообразно использовать параметрическую форму, которая позволяет однозначно определять и изображать точки на поверхности и выполнять векторно-матричные преобразования. Элементарные поверхности и поверхности, образованные методами копирования или следа, задаются двумя независимыми криволинейными координатами. В описание поверхностей, полученных методами огибания или касания, добавляется один или два параметра относительно движения и соответствующие условия огибания или касания. Также в моделях присутствуют «постоянные» параметры, которые необходимо найти. Например, для такой простейшей поверхности, как сфера, двумя независимыми параметрами будут углы, а искомыми параметрами – координаты центра и радиус. Для конической поверхности необходимо определить любое сочетание двух из следующих «постоянных» параметров: радиус основания, высота конуса, угол конуса.

На номинальную геометрию поверхности накладываются отклонения формы, для математического описания которых предлагается использовать три варианта: степенные ряды, тригонометрические ряды и кубические сплайны. Число членов степенных и тригонометрических рядов выбирается, исходя из вида поверхности и стандартизованных показателей отклонений формы. Особую сложность представляет собой расчет стандартизованных показателей отклонений формы поверхности. Например, даже для элементарной цилиндрической поверхности в международном стандарте ISO 12181-1:2011 рекомендуется три равноценных варианта баз: прилегающая (наружная и внутренняя) окружность, средняя окружность, кольцевая зона наименьшей ширины. Если для определения параметров средней окружности известны формулы, полученные по МНК, то нахождение прилегающих окружностей и кольцевой зоны наименьшей ширины реализуется только численными методами и до сих пор не имеет общепризнанного решения. Предложен простой и очевидно эффективный метод, основанный на параметрической оптимизации собственно величины кольцевой зоны, который надежно зарекомендовал себя при тестировании на многочисленных примерах (рис. 1). Другим примером может служить анализ профиля продольного сечения, для которого, согласно ГОСТ 24642-81, приводятся следующие частные показатели: конусообразность, седлообразность, бочкообразность. Однако численных параметров для их описания стандарт не дает, поэтому оценить указанные показатели можно

было только оператором визуально. Использование степенных рядов для описания профиля продольного сечения тел вращения позволило предложить методику автоматической оценки таких показателей [6]. Пример работы программы показан на рис. 2.

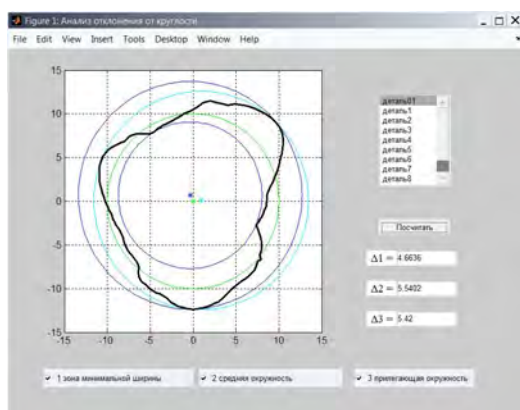


Рис.1. Расчет отклонений от круглости детали

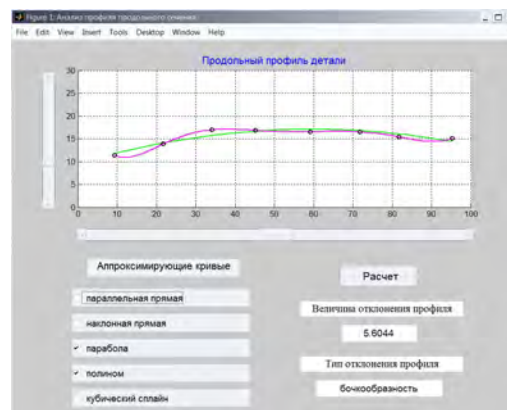


Рис. 2 Автоматизированная оценка отклонений профиля продольного сечения

Предлагаемый подход к информационному обеспечению измерений сложнопрофильных поверхностей заключается в их описании с учетом отклонений формы и одновременном определении на основе оптимизации параметров номинальной геометрии, отклонений формы, положения в пространстве и координатных связей нескольких поверхностей на одной детали. Для достижения требуемой точности изготовления при наименьших затратах необходимо учитывать технологические возможности оборудования, возникающие погрешности обработки, и воздействовать на них, на точность применяемых станков, точность инструмента и приспособления, на выбор технологических баз, на методы и приемы обработки.

Таким образом, в процессе проводимого исследования организации технологической подготовки производства для обработки сложнопрофильных поверхностей, было определено, что задача сокращения сроков разработки ТП и повышение качества проектных решений в современном производстве в полной мере не решена. Предлагаемое решение задачи организации и формирования производственной системы для мелкосерийного и единичного производства позволит определить рекомендации по увеличению точности и производительности выполняемого ТП, а постоянное совершенствование технологических процессов является условием успешной конкурентной борьбы предприятий за рынки сбыта.

Библиографический список

1. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1992.
2. Авдулов А. Н. Контроль и оценка круглости деталей машин / А. Н. Авдулов. М.: Изд-во стандартов, 1974. 176 с.
3. Самарский А.А. Численные методы / А.А. Самарский, А.В. Гулин. М.: Наука, 1989. 430 с.
4. Пекарш А.И., Феоктистов С.И., Коляхалов Д.Г., Шпорт В.И. Координатно-измерительные машины и комплексы / А.И. Пекарш, С.И. Феоктистов, Д.Г. Колыхалов, В.И. Шпорт // CALS-технологии. 2011. № 3. С. 36-48.
5. Безъязычный В. Ф., Матвеев А. С., Рябов А. Н. Разработка методологии обеспечения требуемого уровня производительности изготовления деталей при различных типах машиностроительного производства/В.Ф.Безъязычный, А.С.Матвеев, А.Н.Рябов// Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева №3(30),2014.-С.89-95.
6. А. Н. Сутягин, В. Ф. Безъязычный. Интеграция специальных приложений и подпрограмм в САПР высшего уровня на этапе технологической подготовки производства ГТД//Сутягин А.Н., Безъязычный В.Ф.// Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьева №2 (20), 2011.- С.11-14.
7. Решетникова Е.П. Информационная технология измерения сложных поверхностей на мобильных КИМ/ Е.П.Решетникова// Участники школы молодых ученых и программы У.М.Н.И.К.: сб. тр. XXVI междунар. науч. конф. "Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-26" : в 2 ч. / СГТУ. - Саратов, 2013. - Ч. 1. - С. 51-55.

УДК 658.562.3

ОЦЕНИВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ
КАЧЕСТВА МНОГОЧАСТОТНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕЗАНИИ

И. А. Гришанов, аспирант

Научный руководитель: Б. М. Бржозовский, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.»

В сложных станочных мехатронных системах существуют трудности получения достоверной информации о процессе резания в реальном времени при реализации гибких технологий. Особенностью их функционирования определяется нестационарностью (квазистационарностью) процесса резания, наличием нелинейных элементов в формообразующих узлах станков. Наиболее эффективно процесс резания оценивается по виброакустическим данным, получаемым в ходе обработки изделия [1]. Одним из методов выделения полезного сигнала от шума и лишней информации являются алгоритмы обработки данных обеспечивающие фильтрацию регистрируемых колебаний. В представленной работе апробирована медианная фильтрация. Принцип работы заключается в том, что значения отсчетов внутри окна фильтра сортируются в порядке возрастания или убывания, и значение, находящееся в середине упорядоченного списка, поступает на выход фильтра. В случае четного числа отсчетов в окне выходное значение фильтра равно среднему значению двух отсчетов в середине упорядоченного списка. Окно перемещается вдоль фильтруемого сигнала и вычисления повторяются [2].

В лабораторных и промышленных условиях был проведен эксперимент по оцениванию виброакустических колебаний при резании. Колебания фиксировались на жесткий диск ЭВМ при помощи АЦП La20USB и виброакустических акселерометров D14. Эксперимент заключался в торцевом точении при частоте вращения шпинделя 630 мин^{-1} и постоянной подаче, с целью изучения влияния глубины резания на качество динамических колебаний было принято решение выполнять подрезания 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 7 мм. Дисперсионный анализ показал, что при съеме 1 мм металла присутствует наименьший разброс колебаний, наихудший результат зафиксирован при съеме 5 и 6 мм. Результаты приведены на рис.1.

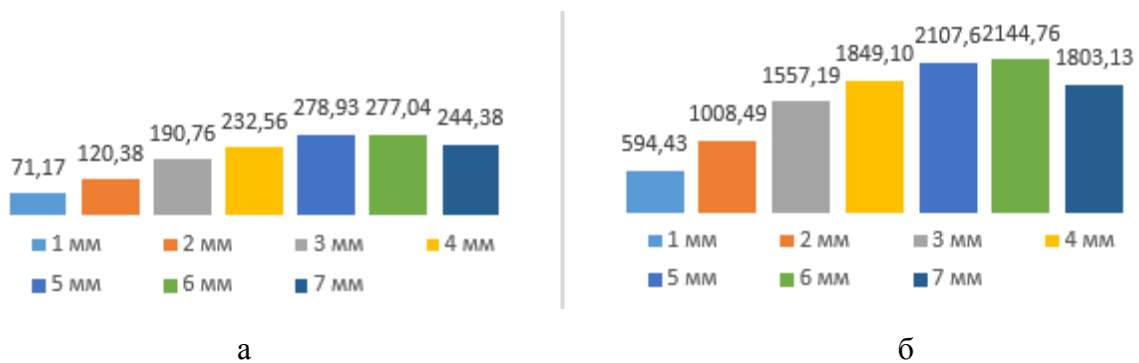


Рис. 1. Результаты дисперсионного анализа: а – радиальный канал; б – тангенциальный

Подрезание 7 мм показывает не самый большой разброс значений, что скорее всего обусловлено конструкцией резца, размеры которого не позволили осуществить врезание на всю длину. Однако следует отметить, что значения дисперсии ближе к операции торцевого точения 4 мм, хотя закономерно предполагать, что они не должны существенно различаться с 6 мм. По результатам исследования можно сделать вывод, что при этом виде обработки ухудшение динамики процесса резания напрямую связано с увеличением припуска.

Для составления более полной картины было определено среднее значение колебаний резца для каждого припуска. Результаты приведены на рис. 2.

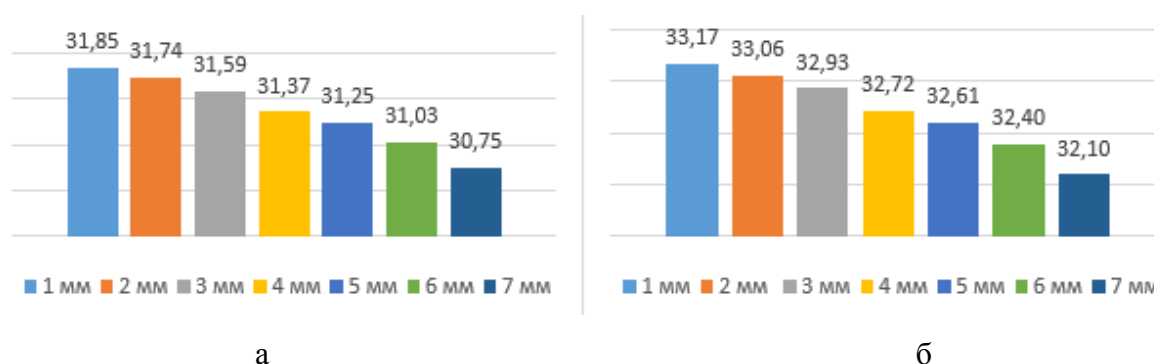


Рис.2. Среднее значение: а – радиальный канал; б – тангенциальный

Как видно, колебания резца имеют тенденцию к уменьшению среднего значения с увеличением снимаемого припуска. Проанализировав полученные результаты, с учетом значений дисперсии можно судить о том, что при съеме больших объемов металла динамика резания существенно падает, что подтверждает уже сформулированный вывод. Определение коэффициента вариации позволит установить, присутствуют ли при обработке неслучайные составляющие. Значения занесены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента вариации

Припуск	1 мм	2 мм	3 мм	4 мм	5 мм	6 мм	7 мм
1 канал	0,26	0,35	0,44	0,49	0,53	0,54	0,51
2 канал	0,74	0,91	1,20	1,31	1,41	1,43	1,52

Значения коэффициента вариации явно указывают на наличие неслучайных составляющих в процессе резания[3]. Анализ сигнала показал наличие аномальных выбросов, имеющих хаотичный характер, и, возмож-

но являющихся помехами оборудования, следовательно, полезной информации не несут (рис. 3).



Рис. 3. Аномальный выброс

С целью устранения таких помех была использована медианная фильтрация. Пример исходного и отфильтрованного сигнала представлен на рис. 4.

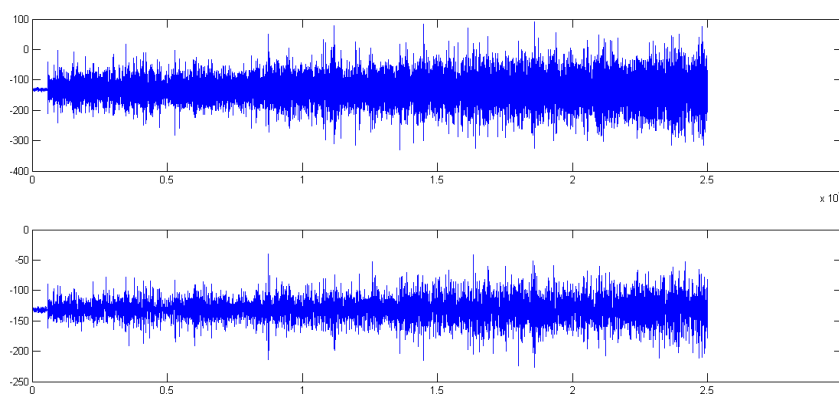


Рис. 4. Медианная фильтрация

Для отфильтрованных сигналов был проведен статистический анализ, с целью выяснить влияет ли медианный фильтр на общую картину колебательного процесса. Так же это связано с необходимостью подтверждения или опровержения наличия неслучайных процессов [3]. Полученные результаты дисперсии и коэффициента вариации приведены в табл.2.

Как видно из рис.5, общая картина после использования медианного фильтра не изменилась, а значит можно утверждать, что выводы, сделанные по результатам статистического оценивания исходного сигнала верны. В процессе обработки сигналов, коэффициент вариации превышал пороговое значение, что свидетельствовало о наличие неслучайных процессов, однако в ходе исследования самих сигналов возникло предположение, что такие результаты были получены в связи с хаотичными аномальными

выбросами. Принятое решение использовать медианную фильтрацию, как наиболее подходящий фильтр для такой задачи, показало, что такие выбросы были обусловлены погрешностью прибора.

Таблица 2

Значения исходных и отфильтрованных данных

Исходный сигнал		Отфильтрованный сигнал		Коэффициент вариации исходный		кф. вариации после фильтрации	
1 канал	2 канал	1 канал	2 канал	1 канал	2 канал	1 канал	2 канал
71,85	594,43	7,8	66,02	0,26	0,74	0,02	0,05
120,38	1008,49	13,27	100,08	0,35	0,91	0,031	0,09
190,76	1557,19	21,1	102,41	0,44	1,20	0,04	0,1
232,56	1843,10	22,71	103,13	0,49	1,31	0,041	0,15
278,93	2107,64	23,01	104,6	0,53	1,41	0,04	0,17
2770,4	2144,76	22,92	104,92	0,54	1,43	0,045	0,15
244,38	1803,13	21,64	99,94	0,51	1,52	0,042	0,09

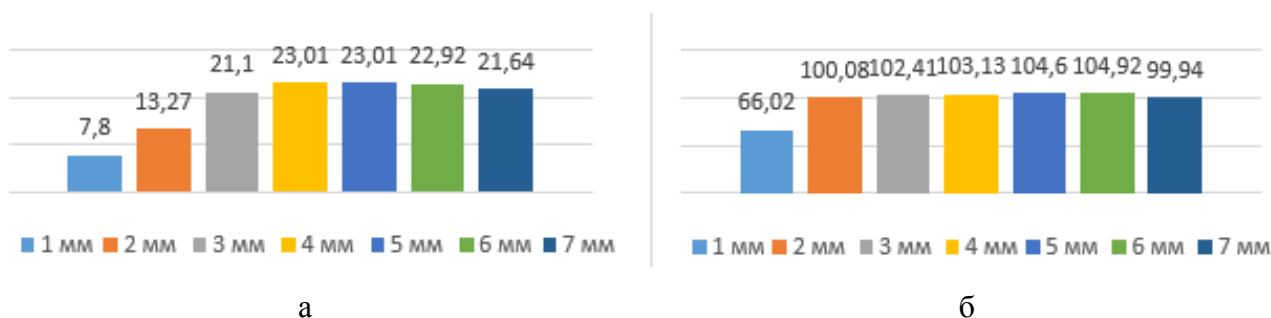


Рис. 5. Значение дисперсии после фильтрации: а – радиальный канал; б – тангенциальный

Проведенное исследование доказывает необходимость применения фильтра способного устранить колебания, существенно влияющие на точность статистического оценивания динамических многочастотных колебаний, но не несущих информацию о действительном характере процесса резания, а также целесообразность применения медианной фильтрации для решения этой задачи.

Библиографический список

1. Статистическое оценивание нелинейных процессов в мехатронных станочных системах / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, В.В. Мартынов и др.; под ред. Б.М. Бржозовского и В.В. Мартынова. – Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2013. – 160 с.

2. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т.С. Хуанг, Дж.О. Эклунд, Г.Дж. Нуссбаумер и др.; под ред. Т.С. Хуанга. – М.: Радио и связь. 1984. – 224 с.

3. Динамический мониторинг технологического оборудования / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин, М.Б. Бровкова. – Саратов: СГТУ, 2008 – 312 с.

УДК 658.514

СОЗДАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ И УПРАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

В. В. Кокарева, аспирант, К. Т. Саттарова, аспирант

Научный руководитель: Н. Д. Проничев, д-р техн. наук, профессор
ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева»

Совершенствование процессов управления организацией производства авиационных изделий является первоочередной задачей современного машиностроительного предприятия в условиях непрерывной конкурентной борьбы, усложнения производственно-технических и организационно-экономических систем, а также бурного роста влияния информационных технологий как на управление технологическими процессами, так и на управление всей сетью бизнес-процессов предприятия. Это, в свою очередь, требует внедрение интегрированной автоматизированной системы управления (ИАСУ), разрабатываемой в СГАУ совместно с ведущими предприятиями аэрокосмического кластера Самарской области. В ИАСУ решаются задачи автоматизации отдельных производственных структур предприятия (механообрабатывающих цех и цех холодной штамповки) и их процессы в едином информационном пространстве (ЕИП). Это позволит планировать производственные ресурсы целого подразделения, отдельного рабочего места (сырье, материалы, оборудование и т. д.) на основе данных, полученных от поставщиков и потребителей, а также вести прогнозирование, планирование и контроль производства.

Для осуществления взаимодействия разных ИАИС, реализующих бизнес-процессы (БП) основных стадий жизненного цикла изделия (ЖЦИ), определяющих эффективность работы машиностроительного

предприятия, в настоящее время до сих пор отмечается использование методов интеграции на основе специальных групп сотрудников для обработки данных бумажной технической документации (БТД) или программного обмена через структурированные файлы данных, приводящие к ошибкам и потере актуальности данных.

Решение этой задачи является актуальным и требует комплексного подхода, позволяющего персоналу отдельных подразделений предприятия не только визуально увидеть графическую модель сети процессов организации производства, но и проводить анализ ее эффективности, постоянно совершенствовать и использовать в текущей деятельности. Причем управление технологическими процессами и всем предприятием ведется через корпоративный портал, представляющий собой:

- единую точку входа к системной совокупности информационных ресурсов для всех уровней управления и унифицированными правилами представления, и обработки информации;
- новую концепцию организации рабочих мест сотрудников (через сеть виртуальных интернет-кабинетов) с доступом ко всей информации, необходимой для выполнения ими предписанных функций;
- интегрированную систему управления распределенными информационными ресурсами и систему информационного сопровождения всей деятельности предприятия, отображающую часть информационной системы в виде электронных пультов руководителей, обеспечивающей пользователей единым авторизованным персонифицированным доступом к внутренним и внешним информационным ресурсам и бизнес-приложениям.

Основные особенности технической подготовки производства в современных условиях проведение многочисленных вариантов предварительных расчетов изделий. Особенностью таких расчетов является минимальный объем исходной конструкторской и технологической документации (отдельные сборочные чертежи или эскизы). В то же время, результаты необходимы для принятия обоснованных решений при участии предприятия в тендерах, заключении договоров (контрактов контрактов); подготовка конструкторской, технологической и планово-экономической документации по изделиям в предельно сжатые временные сроки; проведение многочисленных изменений по конструкторским извещениям и по актам разрешения замен отдела материально материально-технического технического снабжения; обеспечение конструкторской и технологической документацией производственных подразделений предприятия для опережающего запуска унифицированных и заимствованных уз-

лов/компонентов изделий в заготовительное и комплектующее производство; отмена заказов в связи с низким качеством материалов, слишком большие сроки анализа причин дефектов и т.д.

При построении информационной модели автоматизации технической подготовки и управления авиационным производством необходимо установить взаимосвязь свойств материальных объектов с характеристиками их функциональных структурных элементов, которые, в свою очередь, зависят от свойств этих объектов. Указанная взаимосвязь является основным признаком целостности единой информационной системы. Отношения между структурными элементами в информационной системе предлагается фиксировать в виде иерархических представлений. Это позволяет при объединении структурных элементов с формированием системных связей отражать одновременно как структурные, так и параметрические отношения, что исключает необходимость аналитического описания связей посредством уравнений.

Целью работы является разработка и практическая апробация в реальных производственных условиях информационной системы автоматизации технической подготовки и оперативного управления производственным подразделением, интегрированной в единое пространство предприятия, для комплексной автоматизации функций CAD/CAM/CAE/PDM/FRP/MRP/MES-систем.

Были решены следующие задачи.

1. Разработана концептуальная модель информационной системы (ИС) машиностроительного предприятия как матричная многоуровневая автоматизированная система и выявлены этапы ее реализации, для решения задач управления множеством инженерных и производственных бизнес-процессов (БП) производственного подразделения в едином информационном пространстве (ЕИП), материальных объектов и ресурсов.

2. Разработана единая функциональная модель производственного подразделения машиностроительного предприятия, работающего под управлением единого ИС на основе использования результатов реинжиниринга и формализованного описания этапов жизненного цикла изделия, для последующей организации в ЕИП предприятия информационного взаимодействия БП технической подготовки и оперативного управления производством, а также интеграции этапов функционального моделирования и создания программного обеспечения информационной системы.

3. Разработана единая информационная модель ИС подразделения предприятия, описывающая в ЕИП машиностроительного предприятия множество БП, материальных объектов и ресурсов технической подго-

товки и оперативного управления производством, отражающую все основные сущности указанного множества и многообразные отношения, заданные на этом множестве.

Результаты работ.

1. Концептуальная модель ИС подразделения машиностроительного предприятия, основанная на интеграции общенаучных подходов, системных принципов и общих закономерностей построения, планирования, функционирования, развития сложных многоуровневых АИС, отличающаяся инвариантной методологией создания ИАИС и этапов ее реализации.

2. Структура ИС, полученная на основе разработанной методики синтеза, отличающаяся тем, в ЕИП машиностроительного предприятия с дискретным характером производства информационную интегрируются БП технической подготовки и оперативного управления производством, а также информационное взаимодействие с бизнес-процессами, находящимися под управлением ERP-системы.

3. Единая функциональная модель управления подразделением предприятия, разработанная на основе результатов реинжиниринга БП и формализованного описания этапов жизненного цикла проекта ИС, отличающаяся полнотой и корректностью описания БП технической подготовки и оперативного управления производством, их информационного взаимодействия между собой и с ERP-системой в ЕИП, а также возможностью создания и применения этой модели в качестве самостоятельного приложения, определяющего состав, структуру и динамическое поведение ПО ИС.

4. Единая информационная модель подразделения машиностроительного предприятия, содержащая формализованные описания БП, материальных объектов и ресурсов, задействованных в технической подготовке и оперативном управлении производством, представленные в виде множества информационных объектов и определенных на этом множестве связей (отношений) между информационными объектами в виде иерархических представлений, отличающаяся полнотой и корректностью представления всех указанных сущностей при их отображении в ЕИП предприятия.

На данном этапе проводятся экспериментальные исследования и практическая апробация оригинального ПО ИС, разработанного на основе предложенных моделей, методик и базовых информационных технологий, обеспечивающего реализацию в ЕИП машиностроительного пред-

приятия комплексной автоматизации функций CAD/CAM/CAE/PDM/FRP/MRP/MES-систем и информационную интеграцию ИС и ERP-систем.

Практическая ценность работы состоит в следующем: ПО ИС подразделения авиационного предприятия будет представлять собой законченный программный продукт, позволяющий существенно (на 15–30%) сократить сроки подготовки и освоения производства новых наукоемких изделий за счет реализации в ЕИП машиностроительного предприятия параллельных БП технической подготовки и оперативного управления производством на основе интеграции функций CAD/CAM/CAE/PDM/FRP/MRP/MES-систем и информационного взаимодействия ИС с ERP-системой; ПО ИС позволяет также снизить издержки предприятия (себестоимость) при выпуске ранее разработанных и освоенных в производстве изделий; Разработанные организационные схемы взаимодействия подразделений машиностроительного предприятия, повышающие эффективность внедрения ИС и информационного взаимодействия ПО ИС и ERP-систем.

Преимущества и возможности информационной системы автоматизации технической подготовки и управления авиационным производством:

- ✓ Электронная передача данных конструкторской документации из систем параметрической графики;
- ✓ Создание маршрутных «расцеховок»;
- ✓ Материальное и трудовое нормирование по маршрутным расцеховкам;
- ✓ Проектирование технологических процессов для механообработки и холодной штамповки;
- ✓ Планово-экономические расчеты;
- ✓ Возможность проведения предварительных расчетов;
- ✓ Планирование потребности в материальных ресурсах;
- ✓ Оперативное планирование производства, внутрицеховой и междцеховой производственный учет.

УДК 658.514

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ
РЕМОНТНО-МЕХАНИЧЕСКИМ ЦЕХОМ

А. Н. Малыхин, магистр, В. В. Кокарева, аспирант

Научный руководитель: В. Г. Смелов, канд. техн. наук

ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева»

Эффективность современных машиностроительных производств во многом определяется уровнем управления и организации производственных и технологических процессов (ТП), возможностью снижения издержек временных и материальных ресурсов с целью обеспечения конкурентоспособности отечественной продукции. Во многом именно эти требования обуславливают в последние годы актуальность развития и использования таких типов систем управления предприятиями и производствами, как MRPII, ERP, MES. Одним из ключевых элементов этих систем, в плане снижения издержек непосредственно на этапе производства продукции, являются системы и модули оперативно-календарного планирования (ОКП). Именно эти системы обеспечивают оптимальность расписаний работы оборудования во времени и формирование директив для последующего этапа управления. Системы ОКП, по сути, являются организующим звеном между структурой производства, принятыми на производстве организационными особенностями функционирования оборудования, технологическими процессами изготовления номенклатуры деталей и управлением производственного процесса. Тем самым, от точности представления информации, как по номенклатуре изделий, так и по параметрам оперативных планов в ОКП, методов решения задач планирования, от адекватности математических моделей систем ОКП зависят точность формируемых плановых заданий и, в последующем, – управление объектами производства, что влияет на эффективность производственной системы в целом. Поэтому решение задач, направленных на повышение эффективности функционирования автоматизированного производства в машиностроении за счет применения современных методов ОКП, является крайне актуальной проблемой.

Цель данной работы – создание системы мониторинга, оперативного управления и планирования в реальном времени на основе комплексных математических моделей и программно-технических средств их реализации для ремонтно-механического цеха (РМЦ), обеспечивающих повыше-

ние эффективности производственных систем за счет анализа причин простоя оборудования, контроля загрузки оборудования и качества производимой продукции, информирования цеховых служб о текущих технологических параметрах, составления оперативного расписания работы цеха, автоматизации управления и планирования использования производственных ресурсов.

Разрабатываемый программно-технический комплекс (система автоматизированного управления) необходим, в первую очередь, для обеспечения своевременной и адекватной реакции на производственные события (например, на поступление нового заказа, на задержку изготовления, поломку или ремонт станка и т.д.) и распределения новых или оставшихся заказов по имеющимся мощностям в реальном времени посредством передачи технических данных через систему считывания штрих-кодов и терминалов.

Логическая архитектура автоматизированной системы связывает и интегрирует информационные потоки производственного отдела (план, задания), конструкторско-технологического отдела (ТП, маршрутная карта), цеховых рабочих мест (производственные данные), мастера/начальника цеха (выработка, график выполнения и аналитические данные, например, в виде диаграммы Ганта), службы планового отдела (трудоемкость, время). Основная задача разрабатываемой системы обеспечить прозрачность работы всех участников производственного процесса и повышение надежности исполнения планово-экономических показателей за счет своевременного контроля деятельности цеха и увеличения выпуска продукции за счет использования планов, адаптирующихся к текущей ситуации в режиме реального времени.

Реализация программно-технического комплекса оперативного учета и управления производственной деятельностью РМЦ планируется посредством внедрения методики бережливого производства, согласно которой процессы, не добавляющие ценности для производимого изделия (заказа) классифицируются как потери и должны быть устранены. Таким образом, в производственную систему РМЦ будут введены следующие инструменты управления: картирование потока создания ценности (VSM), система производства «точно в срок» (JIT), визуализация (имитационные модели); система 5S, система TPM.

Внедрение предлагаемой системы оперативного управления производством позволит достигнуть следующих экономических эффектов: уменьшить длительность производственного цикла на 45%, увеличить коэффициент загрузки оборудования на 45%, увеличить производительность

работ на 30%, сократить время на ручной ввод данных на 75%, уменьшить объем незавершенного производства на 30%, сократить время на создание отчетов, заполнение бумаг на 60%, снизить объемы материально-производственных запасов на 40%, улучшить соблюдение сроков поставки на 60%, сократить сроки исполнения производственных заказов на 15-20%, снизить производственные издержки на 7-10%, ускорить получение управленческой отчетности в 2-5 раз,

Программно-технический комплекс (ПТК), подлежащий разработке, должен поддерживать решение следующих задач и обеспечивать реализацию следующих возможностей: поддержка эффективной разработки оперативных планов работы РМЦ в условиях неопределенности и высокой динамики событий, связанных с изменением возможностей производства по выполнению заказов, в частности, с учетом загрузки оборудования, поступления новых, возможно, более выгодных заказов, новых технических решений и т.п.; автоматизация основных операций планирования использования ресурсов (рабочих, станков), выполняемых сотрудниками; представление результатов исполнения заказов в наглядной форме в виде диаграмм, мнемосхем с возможностью формирования отчетов; накопление знаний о специфике производственных процессов, позволяющих уточнять и совершенствовать правила принятия решений при обработке заказов, учитывать приоритеты заказов и имеющиеся ресурсы; интеллектуальная поддержка принятия решений по загрузке имеющихся в наличии производственных ресурсов с учетом особенностей поступающих заказов; повышение прозрачности процессов в подразделениях, накопление статистики и обеспечение возможности аудита логики принятия решений.

Логическая архитектура ПТК, отображающая состав системы и связи между ее компонентами, представлена на рисунке 1.

Система оперативного управления производственными процессами является распределённой иерархической системой обработки, анализа данных, работающая в режиме реального времени, и обеспечивающая решение актуальных задач производства – эффективное управление производственными процессами в масштабе цеха на основе целостного анализа производства.

Предлагаемая концепция построения системы мониторинга и управления на производстве предусматривает: интеграцию производственных данных, поступающих в режиме реального времени с разнородных АСУ ТП цеха: терминал ввода данных и устройства считывания штрих-кодов, их агрегирование в соответствии с математически-алгоритмической событийной моделью данных в единую систему сбора, обработки, хранения, анализа и передачи управляющих данных; автоматизацию основных производственных бизнес-процессов, связанных с планированием и учетом производства, контролем качества продук-

ции, расчетом материальных балансов, учетом потребляемых ресурсов и анализом хода производственного процесса, построением производственной отчетности и др.; предоставление оперативному и управляющему персоналу комплексной и достоверной информации о ходе технологического и производственного процесса для принятия своевременных и правильных решений; формирование единой распределенной базы данных, обеспечивающей централизованный контроль основных технологических процессов и процессов управления производством.



Рис. 1. Логическая архитектура ПТК

Примером типичного объекта применения программного решений информационной системы может служить технологический процесс производства муфт.

На рисунке 2 отображена технологическая линия «Изготовление муфт» со всеми входящими в нее оборудованием. Стрелками обозначены возможные технологические маршруты производства. На экране у мастера могут отображаться тревоги – нарушения технологического режима, возникшие при изготовлении партии продукции, количественные показатели партии (количество муфт с начала смены) и качественные показатели работы оборудования (процент эффективности, потери, простои). Предполагается, что в состав программного комплекса входят программные модули **Quality** (контроль качества), **Efficiency** (контроль брака, простоев и производительности), **Production** (контроль выполнения заказов и истории происхождения продукции). Функции визуализации и анализа данных для мастера/начальника цеха реализованы в виде

подсистемы графиков, диаграмм, мнемосхем и отчетов, в том числе и в web-форме. Сбор данных осуществляется через Wi-Fi сеть. Базовый сервер информационно-управляющей системы функционирует на основе реляционной БД Microsoft SQL.

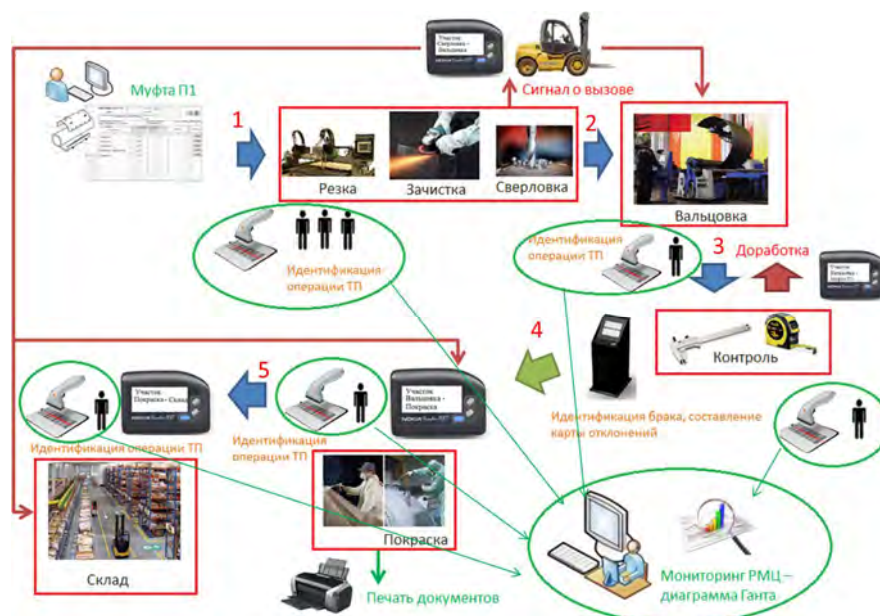


Рис. 2. Технологический процесс производства муфт

УДК 658.5:621.74

АВТОМАТИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ СТАНОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

П. В. Виноградов¹, ассистент

Научный руководитель: К. С. Кульга², д-р техн. наук, профессор

¹Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» в г. Стерлитамаке

²ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Актуальность проблемы. Основа конструкции современного станочного оборудования с числовым программным управлением (далее – СО) – базовые, крупные корпусные детали (ККД), например, станины, колонны и т.п., преимущественно изготавливаются литьем из чугуна, что удовлетворяет условиям стабильности размеров, жёсткости и виброустойчивости СО [1].

Проведенный анализ единичного и мелкосерийного производства отливок ККД СО в литейных цехах станкостроительных предприятия выявил следующие тенденции:

- значительные энергетические, материальные и трудовые затраты в бизнес-процессах (БП) разработки литейной технологии (ЛТ);
- использование малоэффективных, последовательных БП разработки ЛТ;
- необходимость использования совмещенных БП разработки ЛТ, в части проектирования модельных комплектов (МК) для изготовления отливок ККД СО;
- необходимость в нормализации конструкций отливок ККД СО и унификации элементов МК для их изготовления;
- изготовление деталей МК на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Постановка задачи. Для решения актуальной проблемы совмещения БП разработки технологии изготовления отливок ККД СО в едином информационном пространстве станкостроительного предприятия необходимо создание программного (ПО) автоматизированной информационной системы (АИС) *Stalker Cast*, основанной на апробированной методологии проектирования подобного рода АИС [2], функциях 3D - геометрического моделирования и API (*Application Programming Interface*)-функций

CAD (*Computer Aided Design*)-системы среднего уровня.

Анализ рациональных способов получения отливок ККД. В основе разработки ЛТ изготовления отливок ККД СО лежит выбор способа литья [3]. В настоящее время преимущественное применение получили следующие способы:

- литье в песчано-глинистые формы и формы из холоднотвердеющих смесей (ХТС);
- литье по газифицированным моделям (ЛГМ).

Вышеуказанные способы при близких показателях качества, имеют для конкретных отливок ККД СО разные технико-экономические показатели.

Системный анализ БП разработки ЛТ на основе производственного опыта и реинжиниринг существующих БП. Проведенный анализ на НПО «Станкостроение» (г. Стерлитамак) [4] выявил низкую эффективность использования ПО локальных подсистем САХ (*Computer Aided*

Technologies) без их программного взаимодействия как на уровне управления, так и наборов данных.

Реинжиниринг существующих БП разработки ЛТ, в части проектирования МК для изготовления отливок ККД СО, направлен на повышение эффективности работы конструктора, технолога-литейщика и конструктора модельной оснастки в АИС, с поддержкой функций принятия и оптимизации проектных решений.

На рисунке 1 приведена предлагаемая функциональная модель синтеза новой ЛТ для одного из применяемых способов литья. На каждом этапе разработки ЛТ из базы данных (БД) типовых вариантов структур, генерируются базовые конструктивы, представляющие собой параметрические 3D-геометрические модели (ГМ). Следует отметить, что выходными данными каждого из первых трех этапов, являются промежуточные технологические 3D-ГМ используемые в качестве входных на следующих этапах.

Рассмотрим подробнее реализацию этапов синтеза новой ЛТ крупной корпусной отливки (ККО) (рисунок 1).

Этап 1. Синтез конструкции отливки. Задачами этого этапа являются: получение корректной 3D-ГМ отливки с рассчитанными элементами литниковой системы и учтённой усадкой для последующего её использования в *CAM (Computer Aided Manufacturing)* – системе.

Этап 2. Анализ ЛТ средствами *CAE (Computer Aided Engineering)*-системы. На этом этапе генерируется 3D-ГМ формы для гидродинамического анализа, который осуществляется методом конечных разностей. В ходе проведения такого анализа рассчитываются параметры процесса заполнения формы расплавом через литниковую систему с учетом скоростей потоков, а также температуры расплава и формы в процессе её заполнения. Полученные параметры служат входными данными для термодинамического анализа методом конечных элементов (расчёт температурных полей при остывании заполненной формы). На этом этапе выявляются причины появления в отливках возможных дефектов, например, непроливы, усадочные раковины, и определяется направление оптимизации первичной 3D-ГМ и технологических параметров процесса литья.

Этап 3. Синтез конструкции МК и литейной оснастки. Посредством выбора из каталога БД типовых вариантов обобщенной структуры МК для отливок ККД СО, генерируется 3D-ГМ элементы МК и литейной оснастки. Осуществляется фрагментация полученных моделей. В заключении проводится проверка собираемости формы с помощью полученных 3D-ГМ фрагментов.

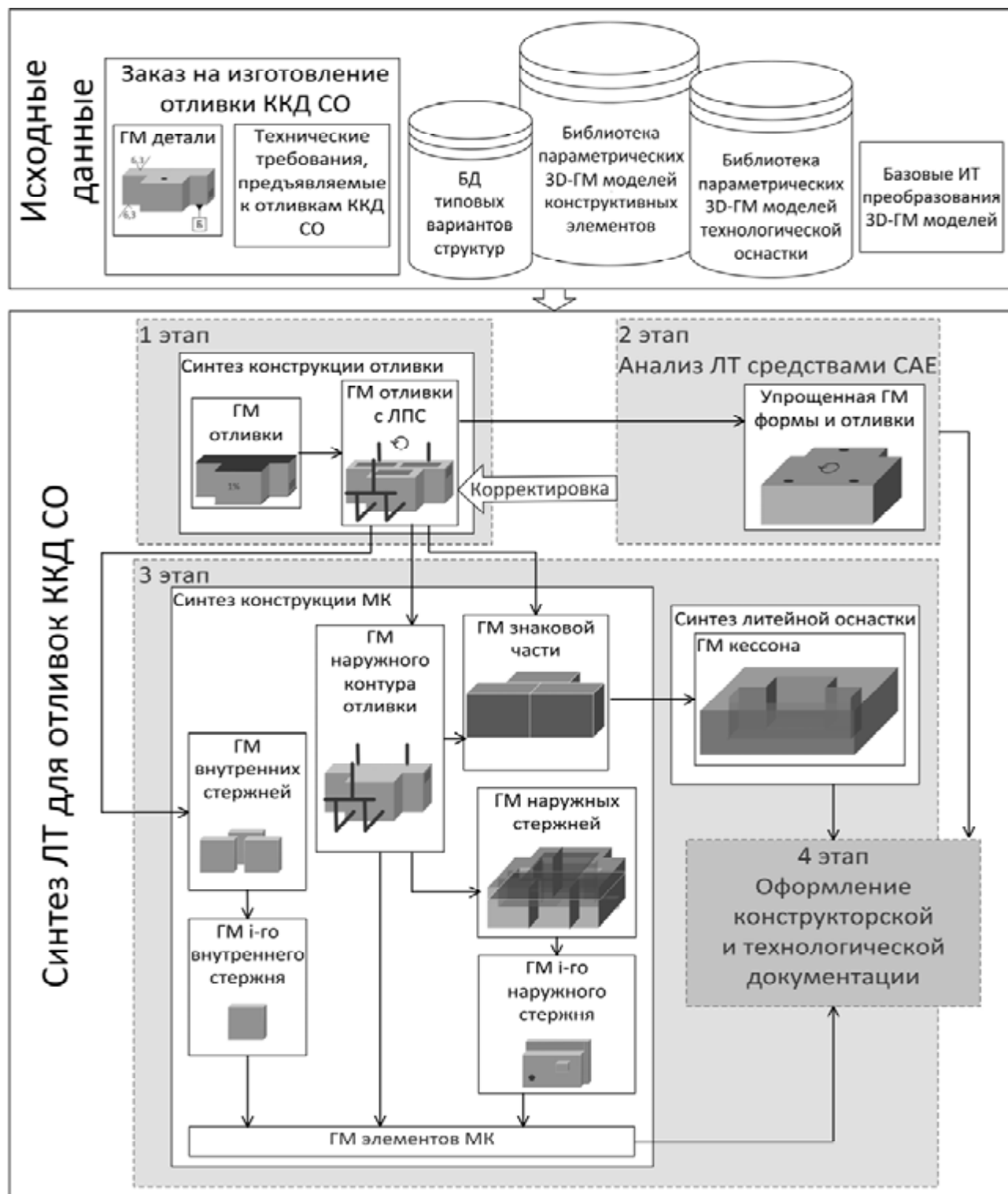


Рис. 1. Функциональная модель синтеза ЛТ ККО (для способа литья в стержнях ХТС собранных в кессонной форме)

Этап 4. Оформление конструкторской (в случае ручного изготовления МК) и технологической документации, подразумевает создание ассоциативных чертежей на элементы МК и литейной оснастки, автоматизированное формирование следующих отчётов (в соответствии ГОСТ 3.1401-85): карт технологической информации, маршрутных карт, ведомости стержней и т.п.

Предложенная функциональная модель АИС *Stalker Cast* содержит декомпозирующие диаграммы деятельности (диаграммы разработаны на основе методологии RUP – *Rational Unified Process*) [5], позволяющие формализовать описание новых БП разработки ЛТ, с целью улучшения качества проектов и уменьшения сроков запуска отливок в производство.

Информационно-математическая модель (ИММ) АИС. Разработанная ИММ АИС позволяет реализовать новый метод автоматизированной разработки ЛТ в части проектирования МК для изготовления отливок ККД СО, основанный на программном преобразовании первичной конструкторской 3D-ГМ в набор параметрических 3D-ГМ элементов МК при помощи API-функций CAD-систем. Этот метод использует входные и выходные наборы данных предшествующих БП разработки ЛТ, связанных с электронной структурой изделия интегрированной АИС *Stalker PLM* [2].

Выводы. Автоматизация проектирования ЛТ для отливок ККД СО на основе разработанного ПО АИС *Stalker Cast* позволяет:

- заменить малопроизводительные, традиционные методы и средства разработки на процедуры автоматизированного синтеза ЛТ с использованием систем 3D-ГМ;
- исключить ошибки в материальном производстве отливок ККД СО, за счет проверки собираемости формы с помощью 3D ГМ, и как следствие, снизить прямые и косвенные затраты в фактической себестоимости СО.

Библиографический список

1. Металлорежущие станки: учебник. В 2 т. / Т.М. Аврамова, В.В. Бушуев, Л.Я. Гиловой и др.; под ред. В.В. Бушуева. Т. 1. – М.: Машиностроение. – 2012. – 608 с.
2. Кульга К.С., Кривошеев И.А. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным и машиностроительным производством: монография. М.: Машиностроение, – 2011. – 377 с.
3. Чугунное литье в станкостроении / Клецкин Г. И., Абрамов Г. Г., Воловик И. М., Гини Э. Ч. ; ред. Клецкина Г. И. – М. : Машиностроение. – 1975. – 320 с.
4. Кульга К.С., Виноградов П.В. Автоматизация проектирования модельных комплектов для отливок базовых деталей мехатронного станочного оборудования. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – №10. – С. 8-16.

5. Рамбо Дж. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка [Текст] / Рамбо Дж. – 2-е изд. – СПб.: Питер. –2007. – 544 с.

УДК 539.4.014.13

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ
ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПРИ
ПНЕВМОДРОБЕСТРУЙНОМ УПРОЧНЕНИИ

А. С. Букатый¹, канд. техн. наук, С. Е. Семенова², аспирант

¹ ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева»

² ФГБОУ ВПО "Самарский государственный технический университет"

Изделия машиностроительных производств работают в условиях повышенных знакопеременных динамических нагрузок. Их ресурс в значительной мере определяется сопротивлением усталости наиболее ответственных деталей. При этом задача повышения долговечности деталей связана с обеспечением качества поверхностного слоя.

В настоящее время на авиационных предприятиях используются различные методы повышения долговечности деталей машин [1]. Среди методов упрочнения наибольшее распространение получили пневмодробеструйная, гидродробеструйная обработка, пневмодинамические камеры. Большинство упрочняемых деталей в авиационном производстве обладают сложной формой и к ним предъявляются высокие требования по геометрической точности и выносливости. Высокая стоимость деталей не позволяет проводить большое количество опытных работ по отладке режимов упрочнения. В связи с этим возникает проблема назначения режимов упрочняющей обработки, обеспечивающих отклонения размеров и формы деталей в пределах технологического допуска. Решение указанной задачи достигается путём применения современного роботизированного упрочняющего оборудования и проведения исследований, позволяющих осуществить расчётное прогнозирование технологических остаточных деформаций (ТОД). По результатам расчётов производится назначение оптимальных режимов дробеструйной обработки на стадии проектирования технологического процесса упрочнения деталей [2, 3].

В настоящей работе расчётно-экспериментальные исследования проводились с деталью типа «Проушина» (рисунок 1). Деталь изготавливает-

ся из материала ВТ-22. Сложность изготовления данной детали обусловлена высокими требованиями по допуску на отверстие – допускаемая величина отклонения диаметра составляет 0,03 мм. Отверстие проушины подвергается пневмодробеструйной обработке стальными микрошариками диаметром 600 мкм. Базовые режимы, применяемые при упрочнении проушины, приводят к ТОД, существенно превышающим технологические допуски. Отклонения диаметра составляют более 0,03 мм, в результате чего установка данной детали на изделие представляется возможным лишь путём дополнительной механообработки и запрессовки втулки, обеспечивающей требуемую точность отверстия.

Назначение режима упрочнения отверстия проушины осуществлялось с помощью подходов [2, 3]. Из материала ВТ-22 был изготовлен образец проушины (рисунок 1). Расчётное прогнозирование ТОД производилось по модели детали (рисунок 2). Посредством методики [3] в системе ANSYS производились предварительные расчёты деформаций детали и выбор режима упрочнения, обеспечивающего изменение диаметра проушины в пределах технологического допуска 0,03 мм.

Упрочнение отверстия осуществлялось посредством вращающегося сопла диаметром 8 мм. Оптимальное время обработки поверхности отверстия выбиралось по кривой насыщения. Параметры режимов и результаты



Рис. 1. Образец проушины



Рис. 2. Модель проушины

замеров представлены в таблице 1. Здесь $G_{\text{дроб}}и$ – расход дроби, $V_{\text{сопла}}$ – скорость перемещения сопла.

Таблица 1

Наименование режимов упрочнения	Параметры режима	Отклонения отверстия диаметром $62^{+0,03}$ мм
Исходные отклонения диаметра (среднее значение)	—	0,01 мм
Упрочнение на базовом режиме	$P_{\text{воздуха}}$ 1,8 Бар $G_{\text{дробь}}$ 0,5 кг/мин $V_{\text{сопла}}$ 0,5 мм/с	0,039 мм
Упрочнение на выбранном режиме	$P_{\text{воздуха}}$ 1,6 Бар $G_{\text{дробь}}$ 1кг/мин $V_{\text{сопла}}$ 1 мм/с	0,022 мм

Выводы

1. Применение разработанных методов и подходов к обеспечению геометрической точности деталей машин при назначении режимов упрочняющей обработки позволило обеспечить точность геометрических размеров и формы детали типа «Проушина» в пределах технологического допуска.

2. Обеспечение геометрической точности ответственных деталей машин необходимо производить на всех стадиях технологического процесса. Это важно для минимизации отклонений и получения необходимого запаса полей допусков на заключительных стадиях изготовления деталей, в т.ч. для обеспечения деформаций деталей в пределах технологического допуска.

Библиографический список

1. Петросов, В. В. Гидродробеструйное упрочнение деталей и инструмента [Текст] / В. В. Петросов // – М.: Машиностроение. –1977. – 163 с.
2. Букатый, А. С. Назначение оптимальных режимов упрочнения деталей ГТД с учетом геометрии упрочняемых деталей [Текст] / А.С. Букатый // Авиация и космонавтика 2008: Тезисы седьмой международной конференции. Тезисы докладов – Москва: МАИ. –2008. – 236 с. – С. 68.
3. Букатый, А. С. Оптимизация режимов дробеструйного упрочнения высокоточных деталей на основе энергии поверхностного пластически деформированного слоя [Текст] / А.С. Букатый, В.С. Стогов, А.А. Иванов // Прочность материалов и элементов конструкций. Тезисы докладов международной научно-технической конференции. Киев, Украина, 28-30 сентября 2010 г. Том 1. – 276 с. – С. 56 – 57.

УДК 621.9.047.7, 621.9.048.4, 621.92

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ УЗКИХ ПАЗОВ

М. В. Ватуев, аспирант, Л. А. Галимова, аспирант

Научные руководители: Р. Д. Агзамов, канд. техн. наук, доцент;

А. Ю. Демин, д-р техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

В настоящее время актуальной проблемой является обеспечение заданных параметров качества поверхности при обработке интерметаллидных и жаропрочных сплавов. Одним из наиболее перспективных методов обработки является алмазное электрохимическое шлифование. Данный метод представляет собой комбинированный процесс, при котором материал снимается в результате одновременно протекающих процессов: анодного растворения, механического резания алмазными зернами и электроэрозионных явлений [1].

Целью работы является определение оптимальных алгоритмов управления технологическим оборудованием для обеспечения необходимых показателей качества пазов на образцах из различных материалов.

В качестве экспериментальной установки выбран станок для плоского шлифования модель 3Б71М. Проведена модернизация станка. Токоподвод осуществляется с помощью щеточного узла, установленного на оси вращения алмазного диска, а также изолированных тисков, установленных на подвижном столе станка.

Для возможности точного управления подачей и плавного регулирования хода стола установлены электродвигатель с сервоприводом, понижающий редуктор и реечная передача. Управление сервоприводом осуществляется с помощью промышленного контроллера по аналоговому интерфейсу. Названная компоновка исполнительных механизмов позволяет добиться стабильной скорости подачи в диапазоне 1 - 500 мм/мин, с отклонением не превышающим 0.05 мм/мин.

Система подачи электролита представляет собой гибкий шланг с изменяемой геометрией сопла, что позволяет с максимальной эффективностью направить поток рабочей жидкости в рабочую зону контакта.

В качестве источника технологического тока применяется источник питания с программируемой вольт-амперной характеристикой. Силовая часть источника выполнена из 64 транзисторных токовых ячеек разви-

вающих ток до 11 ампер каждая. Управление работой ячеек осуществляется промышленным контроллером.

Оригинальные алгоритмы управления позволяют на основании измерения текущего электрического сопротивления рабочего зазора вырабатывать управляющие воздействия на такие технологические параметры обработки, как напряжение в зазоре, величину тока и скорость подачи инструмента.

Исследования проводились на образцах жаростойкого сплава ХН73МБТЮ-ВД. Пазы получены без прижогов и заусенцев, а качество поверхностного слоя увеличилось в 3-5 раз.

Библиографический список

1. И.А. Афанасьева, В.Л. Юрьев. Исследование влияния режимов алмазного электрохимического шлифования на качество рабочих поверхностей щеточных уплотнений. Вестник УГАТУ, Уфа: УГАТУ, 2012, с.30-35.

УДК 621.9.047.7, 621.9.048.4, 621.92

ПОЛУЧЕНИЕ УЗКИХ ПАЗОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

Л. А. Галимова, аспирант; М. В. Ватуев, аспирант,

Научные руководители: Р. Д. Агзамов, канд. техн. наук, доцент;

В. В. Атрощенко, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

Перспективным методом чистовой обработки труднообрабатываемых материалов является метод электрохимического алмазного шлифования, в котором съем металла происходит за счет механической и электрохимической составляющих [1].

Электрохимическое алмазное шлифование представляет собой комбинированный процесс, при котором материал снимается в результате одновременно протекающих процессов: анодного растворения, механического резания алмазными зернами и электроэрозионных явлений. Кроме того, в результате воздействия электролитов происходит адсорбционное

понижение прочности обрабатываемого материала вследствие уменьшения межфазной поверхностной энергии. Благодаря отсутствию сплошного контакта дискретных контактирующих поверхностей детали и инструмента, а также выступанию зерен алмаза из связки, между ними образуется зазор, заполненный электролитом. В зазоре под воздействием электрического тока происходит анодное растворение поверхности детали. Таким образом, поверхностный слой при электрохимическом алмазном шлифовании образуется в результате протекания электрохимического процесса и механической работы круга, производимой зернами алмаза, которые удаляют продукты анодного растворения и срезают обрабатываемый материал, а также выполняют роль депассиваторов, разрушая и удаляя пленку окислов металла, образующуюся на поверхности детали [2].

Достоинство этого метода – быстрый съем металла в сочетании с высокой точностью, отсутствием заусенцев, микротрещин, прижогов на обрабатываемой поверхности. Шероховатость поверхности деталей, обработанных электрохимическим алмазным шлифованием, определяемая в R_a , значительно меньше, чем при обычном алмазно-абразивном шлифовании и может быть равна при определенном сочетании технологических параметров и параметров характеризующих режим обработки, R_a 0,32–0,08 мм. Электрохимическое алмазное шлифование позволяет вести обработку с меньшими силами резания, что является важным аспектом при обработке нежестких деталей [3].

Целью работы является определение влияния технологических режимов и параметров на ширину получаемого паза. Исследования проводились на образцах «Гайка» из жаростойкого сплава на основе никеля ХН73МБТЮ-ВД.

В качестве экспериментальной установки выбран станок для плоского шлифования модель 3Б71М. Проведена модернизация основных узлов станка: токоподвод, установлены электродвигатель с сервоприводом, понижающий редуктор и реечная передача, система подачи электролита, источник технологического тока.

В качестве электролита использовался водный раствор NaNO_3 – 6%, NaNO_2 – 0,5%, Na_2CO_3 – 0,5%, глицерин – 2%, плотность электролита составляла 1040-1080 кг/м³. Режущий инструмент – алмазные круги на медной основе.

Исследования образцов, полученных после обработки методом электрохимического алмазного шлифования на модернизированном плоскошлифовальном станке 3Б71М показали, что пазы получены без прижогов и заусенцев, качество поверхностного слоя увеличилось в 3-5 раз.

Библиографический список

1. И.А. Афанасьева, В.Л.Юрьев. Исследование влияния режимов алмазного электрохимического шлифования на качество рабочих поверхностей щеточных уплотнений. Вестник УГАТУ, Уфа: УГАТУ, 2012, с.30-35.
2. Вайнберг Р. Р., Васильев В. Г. Сила резания при электрохимическом шлифовании жаропрочных сплавов. Научно-технический реферативный сборник «Алмазы». М., НИИМАШ, 1973, № 2, с. 27-29.
3. Ю.А.Стекольников, Н.М.Стекольников, Физико-химические процессы в технологии машиностроения: учеб.пособие. Елец: изд-во Елецк.гос.ун-та., 2008.

РАЗРАБОТКА МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ

Т. Д. Кожина, д-р техн. наук, профессор;

А. В. Курочкин, канд. техн. наук

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева»

Износостойкие покрытия нашли широкое распространение в производстве современных авиационных двигателей и энергетических установок летательных аппаратов. Таким образом, одним из самых эффективных способов создать защиту детали от эрозионного, коррозионного воздействия или высокой температуры является применение твердого износостойкого покрытия. Твердые износостойкие покрытия - класс покрытий, которые применяются для повышения стойкости режущих инструментов. Применение данных покрытий предполагает, что они являются чрезвычайно твердыми, износоустойчивыми и имеют низкий коэффициент трения. В свою очередь, свойства износостойких покрытий зависят от состава и легирующих добавок в покрытие, а толщина и структура покрытий – еще один параметр, характеризующий их свойства. Толщина покрытий может изменяться от нескольких нм до 100 мкм, а структура может быть как однослойной, так и многослойной.

Так как износостойкие покрытия являются защитой основного материала, то важно не только проектировать структуру покрытия, чтобы ми-

минимизировать повреждение основания, но также понять механизмы отказа в пределах системы «покрытие-подслой-подложка».

По сравнению с однослойными покрытиями, многослойные покрытия с чередованием твердых и мягких слоев могут найти большее применение в инструментальном производстве из-за лучших трибологических и износостойких характеристик, однако для оптимизации покрытия необходимо рассмотреть влияние толщины всего покрытия, архитектуру слоев и индивидуальную толщину каждого слоя. Для оценки разрушения покрытий были рассмотрены двумерные конечно-элементные модели, характеризующие повреждение многослойных покрытий под действием сферического углубления. Повреждение в покрытиях характеризовалось как через образующиеся трещины, так и через возникающее расслоение между слоями покрытия.

Для оценки дефектации покрытий рассматривалась двумерная конечно-элементная модель растрескивания системы «покрытие –подслой–подложка» под действием растягивающей нагрузки. Была рассмотрена составная модель, представляющая собой твердое износостойкое покрытие с промежуточным слоем титана и твердосплавным основанием. Для изучения распределения напряжений и образования трещин свойства материала покрытия и промежуточного слоя были выбраны различными. Распределение напряжений неравномерно через всю толщину покрытия. Для решения данной задачи использовался программный комплекс ABAQUS6.1 предназначенный для конечно-элементных прочностных расчетов, с помощью которого можно получать точные и достоверные решения для самых сложных линейных и нелинейных инженерных проблем.

Чтобы получить сведения о напряженно-деформированном состоянии многослойного покрытия методом конечно-элементного моделирования был рассмотрен ряд покрытий в условиях контактного взаимодействия со сферическим индентором. Для моделирования данных условий, также использовался программный комплекс прочностного анализа ABAQUS 6.1.

Проведенный анализ свидетельствует, что растрескивание в покрытия чувствительно к свойствам материала покрытия и промежуточного слоя. Установлено, что новые трещины не появятся на поверхности с увеличением деформации растяжения. Проведенное моделирование показывает, что, не смотря на то, что рост трещины может происходить вблизи поверхности покрытия, могут появиться внутренние трещины, которые не распространились полностью к поверхности покрытия.

Рассмотренные модели позволили оценить реакцию системы «покрытие-подслой-подложка» на возникающие растягивающие напряжения. Из проведенного анализа видно, что зарождение трещины происходит в поверхности раздела с последующим ее распространением к поверхности покрытия, и часто останавливается около поверхности покрытия из-за наличия сжимающих напряжений. Система «покрытие-подслой-подложка» чувствительна к свойствам входящих в нее компонентов, что дает возможность принять меры по оптимизации покрытия.

Проведенное моделирование показало, что система «покрытие-подслой-основание» чувствительна к свойствам входящих в нее компонентов, что дает возможность принять меры по оптимизации покрытия.

Двумерные конечно-элементные модели позволили имитировать реакцию многослойной системы покрытие-подслой-подложка в различных ее вариациях на нагружение, характеризующее работу режущего инструмента. Из проведенного анализа следует, что многослойное покрытие общей толщиной 2.5 мкм состоящее из восьми чередующихся слоев Ti (играющего роль демпфирующего слоя) и AlTiN с изменяющейся толщиной каждого слоя, выдерживает наибольшую нагрузку и менее подвержено разрушению.

Эффективное сопротивление распространению отслоения может быть временно повышено или понижено за счет термоупругих напряжений, вводимых посредством резкого изменения температуры поверхности или адгезионного слоя. В случае периодического теплового воздействия можно получить инструмент контроля скорости распространения отслоения как в режиме докритического подрастания, так и в закритическом режиме, что может иметь технологические приложения.

При разработке технологической операции осаждения многослойного покрытия монокристаллических твердосплавных концевых фрез режимы обработки и распределение слоев покрытия на поверхности инструмента во многом определяют стратегию построения технологических переходов. Основные преимущества применения инструмента с покрытием связаны с увеличением скорости резания, значительным периодом стойкости инструмента и повышением точности обработки.

Методика оптимизации архитектуры многослойного износостойкого наноструктурированного покрытия разработана на основе математического анализа механических явлений, сопровождающих процесс резания с применением инструмента с многослойным износостойким покрытием и с учетом свойств покрытий. В результате предложен научно-обоснованный аналитический подход оптимизации нанесения многослойного износо-

стойкого наноструктурированного покрытия монокристаллических твердосплавных концевых фрез по граничному комплексу отслоения, позволяющий без проведения длительных и трудоемких экспериментальных исследований с высокой степенью достоверности определить основные характеристики процесса синтеза и обеспечить подбор оптимизированного покрытия, для достижения его наибольшей стойкости на инструменте, что дает возможность увеличить количество переточек применяемого инструмента, продлить период стойкости инструмента между переточками и повысить качество обрабатываемой поверхности, используя возможности многослойного износостойкого покрытия и станочного оборудования.

УДК 621.7:658.512

ПРИНЦИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ КОНСТРУКТОРСКОГО И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УЧЁТА ОСОБЕННОСТЕЙ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

П. Ю. Бочкарёв, д-р техн. наук, профессор

С. Г. Митин, канд. техн. наук, доцент

Л. Г. Бокова, канд. техн. наук

ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.»

В настоящее время повышение производительности при различных типах производства является актуальной задачей [1]. В условиях многономенклатурного производства, которое преобладает в современном машиностроении, значительные затраты времени приходится на проектирование и технологическую подготовку производства, поэтому одним из наиболее актуальных направлений развития технологии машиностроения является разработка новых методов проектирования и оптимизации технологических процессов, позволяющих максимально автоматизировать проектную деятельность, сократить сроки технологической подготовки производства и повысить производительность.

В настоящее время сложилась традиционная последовательность этапов проектирования и производства изделия. Одними из ключевых этапов являются:

- 1) разработка конструкции изделия и деталей;
- 2) оценка технологичности деталей;

- 3) разработка технологических процессов механической обработки;
- 4) реализация технологических процессов.

Задачи на каждом из предшествующих этапов, как правило, решаются независимо и без учёта каждого последующего этапа, а также не учитываются особенности и возможности конкретной производственной системы. При конструкторском проектировании часто это приводит к возникновению необоснованных завышенных требований к точности и качеству поверхностей деталей с точки зрения последующей механической обработки. При технологическом проектировании не предусматривается эффективное использование технологических возможностей конкретной производственной системы. При формировании производственного задания сформированная номенклатура продукции не позволяет полностью реализовать потенциальные возможности конкретного машиностроительного предприятия.

Для устранения этих недостатков существует необходимость создания комплексных систем автоматизации конструкторского и технологического проектирования, интегрированных в производственную систему и обеспечивающих принятие рациональных решений в реальном времени в соответствии с технологическими возможностями и складывающейся производственной ситуацией.

В настоящее время указанные задачи решаются в ходе создания системы автоматизированного планирования технологических процессов, которая даёт возможность полностью автоматизировать разработку технологических процессов, в том числе на уровне технологических операций. Это обеспечивает эффективное использование технологических возможностей каждого конкретного предприятия, и, главное, позволяет в короткие сроки перестраивать, адаптировать технологические процессы в соответствии с изменениями производственных условий [2].

С использованием системы автоматизированного планирования технологических процессов поддержка принятия рациональных конструкторских решений может быть обеспечена путём предоставления конструктору информации о технологических возможностях производственной системы, в которой предполагается изготовление проектируемого изделия. Владея этой информацией, конструктор на этапе проектирования конструкции деталей имеет возможность варьировать требования к точности, качеству и расположению поверхностей в рамках рекомендованных в справочной литературе диапазонов. Соответствующие механизмы взаимодействия, описанные в [3, 4], позволяют принимать рациональные кон-

структорские решения, опираясь на возможности конкретной производственной системы.

Инструментом для количественного выражения степени соответствия конструкции деталей условиям и возможностям производства является оценка производственной технологичности. Нами разработаны дополнительные показатели и методики их расчёта, которые в реальном времени помогают сформировать рекомендации по оптимизации конструкции деталей. Вместе с тем, эффективность использования технологических возможностей производственной системы и экономическая эффективность напрямую зависят от сформированной номенклатуры выпускаемых изделий. Поэтому дополнительные показатели оценки производственной технологичности направлены на обеспечение поддержки принятия решений при формировании рационального комплекта деталей, которые могут быть изготовлены в рамках рассматриваемой производственной системы [5].

Ключевой особенностью методик оценки производственной технологичности по указанным показателям и процедур взаимодействия между конструкторской и технологической системами подготовки производства является необходимость быстрой разработки технологических процессов на уровне технологических операций. Поскольку технологическая операция выступает в качестве управляющего алгоритма, обеспечивающего механическую обработку заданной номенклатуры деталей, именно оценка эффективности его работы позволит сформировать рекомендации для принятия рациональных конструкторских решений. Для оценки эффективности того или иного решения требуется проанализировать альтернативные варианты. Это ведёт к необходимости создания полностью автоматизированной системы проектирования технологических операций, которая позволит генерировать возможные варианты и выбирать из них рациональные с точки зрения максимально эффективного использования технологических возможностей производственной системы и минимальной себестоимости изготовления. Нами проведены работы по формированию состава и формализации проектных процедур проектирования технологических операций, выполняемых на различных группах оборудования [6, 7, 8]. В результате полностью автоматизирован процесс проектирования технологических операций и обеспечено взаимодействие подсистем проектирования и реализации технологических процессов.

Таким образом, на этапе конструкторской подготовки с учётом полученных из системы технологической подготовки производства рекомендаций формируются конструкторские решения, которые обеспечивают

рациональную стратегию механической обработки и эффективное использование технологических возможностей конкретной производственной системы. Разработанная система показателей для оценки производственной технологичности обеспечивает возможность создания рациональной конструкции деталей с точки зрения соответствия возможностям производственной системы и позволяет сформировать производственное задание, предусматривающее максимальное использование производственного потенциала.

На этапе технологической подготовки обеспечиваются рациональные решения по разработке технологических операций механической обработки за счёт полной автоматизации проектирования и наличия актуальной информации о технологических возможностях и текущем состоянии технологического оборудования и оснастки.

В результате система автоматизированного планирования технологических процессов в совокупности с новыми подходами к конструкторско-технологической подготовке производства позволяют резко сократить длительность подготовки производства и значительно повысить эффективность работы обрабатывающих производственных систем.

Библиографический список

1. Безъязычный, В. Ф. Исследование путей повышения производительности при различных типах производства / В. Ф. Безъязычный, А. Н. Рябов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева.-2012.- № 2 (23).-С. 148-152.
2. Бочкарёв, П. Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки / П.Ю. Бочкарёв // Технология машиностроения.– 2002. №1.– С.10-14.
3. Митин, С. Г. Разработка механизмов взаимодействия между конструкторской и технологической подготовкой производства для принятия рациональных проектных решений / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарёв // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2014. Т. 2. № 1. С. 130-137.
4. Митин, С. Г. Поддержка принятия решений при назначении размерно-точностных характеристик деталей с учётом возможностей производственной системы / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарёв // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьева.-2014.-№ 4 (31).-С.26-30.
5. Митин, С. Г. Разработка дополнительных показателей оценки производственной технологичности для учёта особенностей многономенкла-

- турных механообрабатывающих систем / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев, Л. Г. Бокова // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П. А. Соловьева.-2014. № 4 (31).-С.10-15.
6. Митин, С. Г. Формирование рационального комплекта режущего инструмента с применением аппарата динамического программирования / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // СТИН. - 2012. - № 6. - С. 20-24.
7. Митин, С. Г. Генерация возможных вариантов структур технологических операций с применением аппарата теории графов / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарёв // Технология машиностроения.- 2012.-№ 4.- С. 69-73.
8. Разманова, Т. И. Автоматизация проектирования структуры технологической операции для оборудования сверлильной группы / Т. И. Разманова, С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарёв // Известия вузов. Машиностроение.-2012.- N 11.- С. 74-78.

УДК 621.3.08

ЛИНЕЙНЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ РЕЗАНИЕМ

Б. Ф. Усманов, аспирант

Научный руководитель: В. Л. Юрьев, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Внедрение новых материалов и технологий изготовления изделий, совершенствование существующих видов резания вызывают необходимость оценки обрабатываемости. Это технологическое свойство материала заготовки определяет возможность достижения заданных технических и технологических требований при минимальной стоимости и необходимой производительности механической обработки резанием [1]. Обрабатываемость материала резанием можно оценить одним или несколькими показателями. К ним относятся: качество обработанной поверхности; стойкость режущего инструмента; силы, возникающие при резании; допустимая скорость механической обработки; тип стружки; условия ее отвода из зоны резания и т.д [2].

Уровень сил резания при обработке алюминиевых сплавов в 2-4 раза ниже, чем при обработке конструкционных сталей. Алюминиевые сплавы склонны к наростообразованию. Этот процесс протекает чрезвычайно ак-

тивно в связи с повышенной адгезионной активностью алюминия к инструментальным материалам. Максимальная высота нароста и его исчезновение отмечаются для алюминиевых сплавов при относительно более низких скоростях резания, чем для сталей.

Выбор оптимальных условий обработки затруднен из-за совместного действия целого ряда факторов. Высокая вязкость ряда алюминиевых сплавов интенсифицирует налипание частиц на рабочие поверхности режущего инструмента. Это затрудняет отвод стружки и может вызвать образование задиров на обработанной поверхности.

Математические методы планирования эксперимента позволяют включать в получаемые модели не только технологические параметры, но и характеристики, обусловленные физико-механическими свойствами материала детали. При переменных значениях глубины резания, геометрических параметров резцов и т.д. значительную роль в повышении эффективности исследований может сыграть применение математических методов планирования эксперимента. В этом случае процесс резания рассматривается как «плохо организованная» система, а режимы и прочие технологические параметры, как факторы, влияющие на нее. Экспериментатор получает возможность более правильно оценивать концепцию случая в эксперименте, существенно уменьшить число экспериментов (не уменьшая точности), иметь четкую логическую схему (стратегию) на всех этапах исследования и возможность эффективного использования ЭВМ.

Реализация плана (матрицы и результаты эксперимента) позволила получить следующую модель относительного поверхностного износа по задней поверхности, адекватно описывающую исследуемую зависимость:

Т15К6 с покрытием:

$$y = \lg \alpha(Ra) = 0,052 - 0,001v + 0,041s - 0,036t + 0,062vs + 0,016vt + 0,023st + 0,016v^2 + 0,078s^2 + 0,023t^2$$

Т15К6 без покрытия:

$$y = \lg \alpha(Ra) = -0,008 - 0,031v + 0,014s - 0,001t + 0,005vs + 0,034vt + 0,028st + 0,021v^2 - 0,021s^2$$

Расчет по этим формулам позволил получить графики изменения величин шероховатости (Ra) в зависимости от скорости, подачи и глубины резания. С повышением скорости резания уменьшается высота неровностей обработанной поверхности (рис. 1).

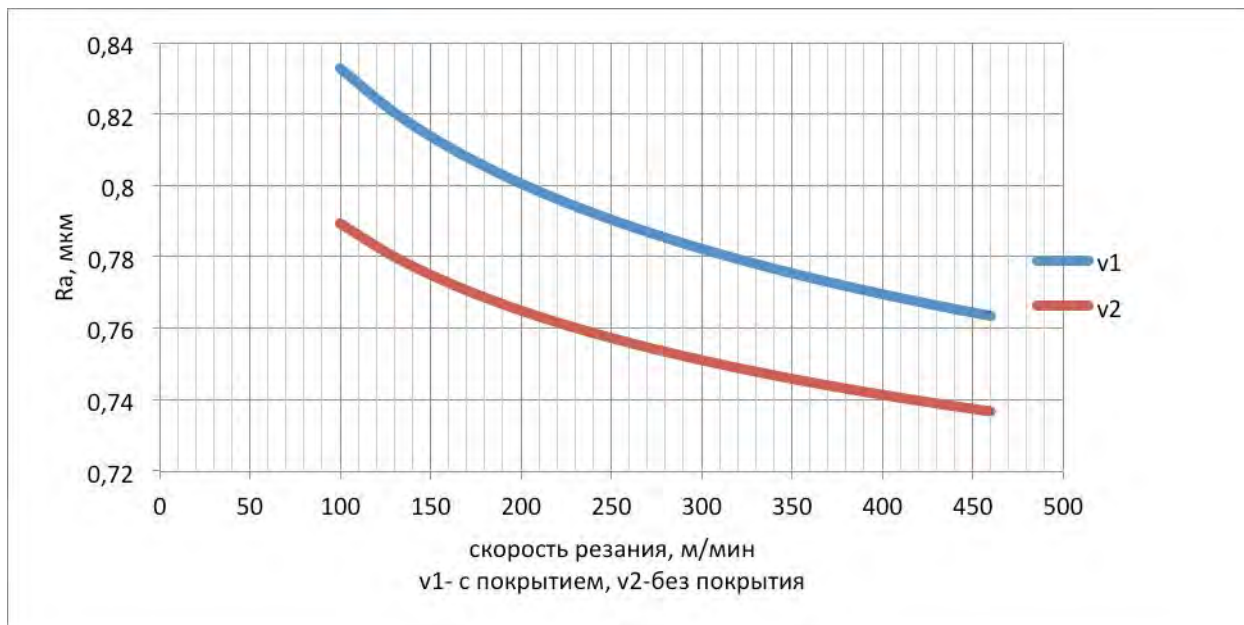


Рис. 1. Зависимость шероховатости от скорости резания

Глубина резания, как геометрический фактор не может изменять профиль и высоту неровностей обработанной поверхности. Глубина резания влияет на высоту неровностей при изменении температуры резания, условий наростообразования, деформаций срезаемого слоя, жесткости системы СПИД, интенсивности срезания вершин гребешков и деформации вершин гребешков сходящей стружкой.

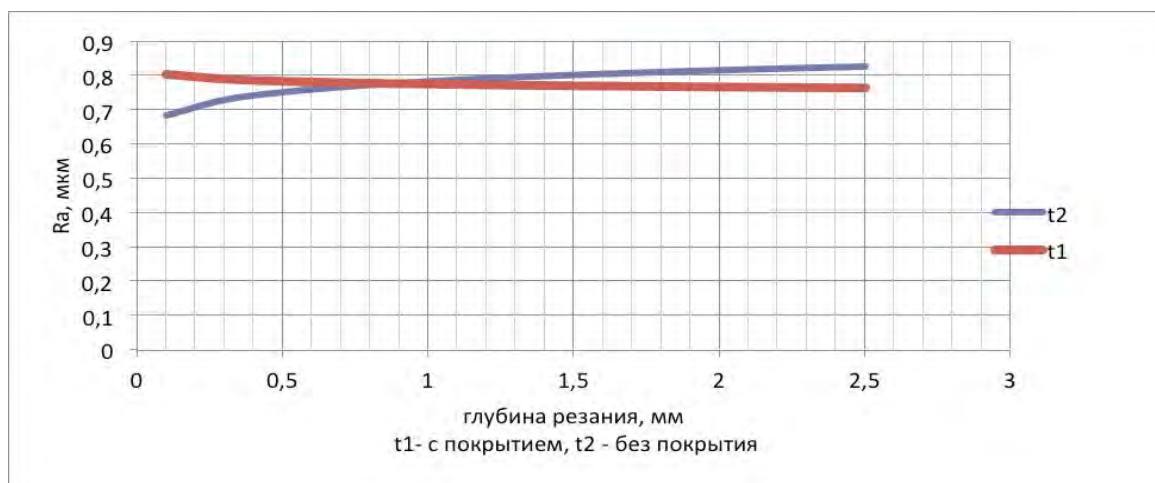


Рис. 2. Зависимость шероховатости от глубины резания

На рисунке 2 показано что, глубина резания слабо влияет на температуру резания, усадку стружки и геометрические параметры нароста, и значит высота неровностей изменяется незначительно.

Подача является важным элементом режима резания, влияющим на производительность процесса обработки. При чистовой обработке повышение подачи чаще ограничивается шероховатостью обработанной поверхности.

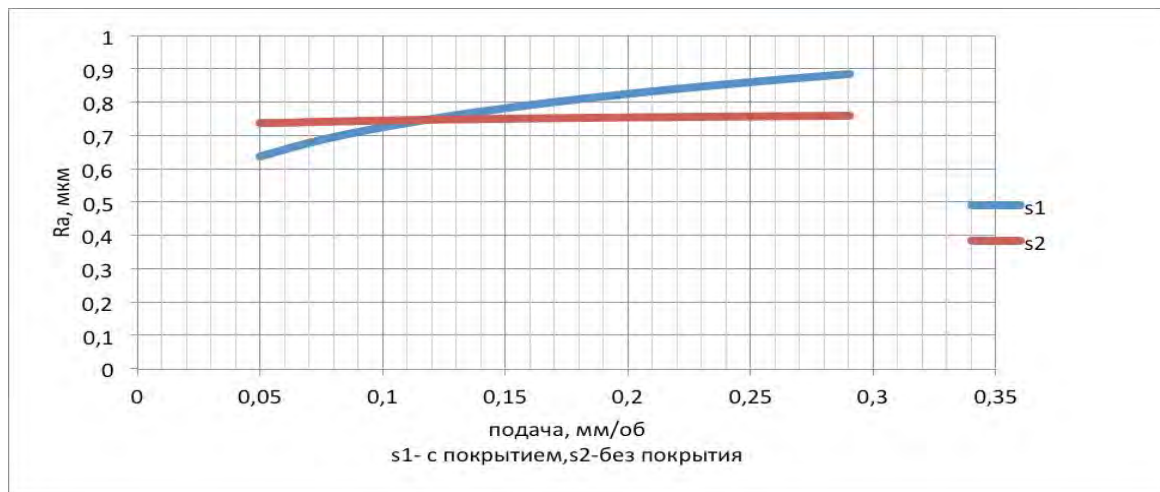


Рис. 3. Зависимость шероховатости от подачи

С повышением подачи (рис. 3) при сохранении постоянства оптимальной температуры резания ширина контакта стружки с передней поверхностью и нормальное напряжение на передней поверхности увеличиваются, а усадка стружки и касательное напряжение на передней поверхности снижаются. Снижение усадки стружки повышает высоту неровностей. Металл, превращаемый в стружку, подвергается усадке не только по толщине, но и по ширине. Увеличенная по ширине стружка при сходе по передней поверхности непрерывно срывает (срезает) вершины гребешков, образуемых на поверхности среза. Под влиянием срыва вершин гребешков общая высота неровностей уменьшается. Чем больше усадка стружки, тем больше ее уширение и значительно уменьшается высота неровностей. Следовательно, повышение подачи как фактор, уменьшающий усадку стружки, должно увеличивать высоту неровностей.

ВЫВОДЫ

1. С повышением скорости резания уменьшается высота неровностей обработанной поверхности.
2. В области низких подач шероховатость поверхности обработанной детали меньше, если применять инструмент с покрытием, а в области более высоких подач, наоборот, шероховатость меньше при обработке инструментом без покрытия. При увеличении подачи высота неровностей обработанной поверхности повышается.
3. При изменении глубины резания в пределах 0,5-2 мм высота неровностей изменяется незначительно.

Работа выполнена в рамках планового государственного задания на оказание услуг «Инновационные мехатронные и ионоплазменные нанотехнологии высокоточного формообразования и упрочнения деталей газотурбинных двигателей и энергетических установок» АТ-ТМ-04-14-ОЗ.

Библиографический список

1. Постнов В.В., Хадиуллин С.Х., Старовойтов С.В., Малахов Е.Н. Исследование показателей, определяющих режущие свойства инструментальных твердых сплавов при обработке труднообрабатываемых материалов. Вестник УГАТУ. Науч. журнал. – Уфа: УГАТУ, – 2012, – №8. – С. 118-125.
2. Постнов В.В., Хадиуллин С.Х., Старовойтов С.В. Оценка эффективности эксплуатации твердосплавного инструмента на основе прогнозирования его режущей способности. Журнал «СТИН» №5/2013, Москва: СТИН, 2013, с.15-19.

ГЕОМЕТРИЯ КЛИНОВЫХ РЕБЕР ДЛЯ ПРОЦЕССА ЧИСТОВОЙ ВЫРУБКИ СОБАЧКИ ЗАМКА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ DEFORM – 2D

А. В. Улюкин, студент

Научный руководитель: С. Ю. ЗВОНОВ

ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королева»

В настоящее время для уменьшения времени разработки технологического процесса, повышения качества и снижения цены продукции в кузнечно-штамповочном производстве широко применяются системы автоматизированного проектирования (САПР), которые во многом определяют облик и темпы развития современной промышленности. При моделировании процесса чистовой вырубки собачки замка был выбран программный комплекс Deform -2D. Программный комплекс Deform -2D обладает возможностью моделирования разделительных операций.

При изготовлении собачки замка из стали AISI 1045, одним из основных требований: замятие кромки не должно превышать 10%. При чистовой вырубке с плоским инструментом замятие кромки достигает 15%, что не допустимо. Поэтому принято решение использовать на матрице и прижмем клиновые рёбра.

Геометрия инструментов создана в программе Компас – 3D и импортирована в Deform- 2D (рис. 1).

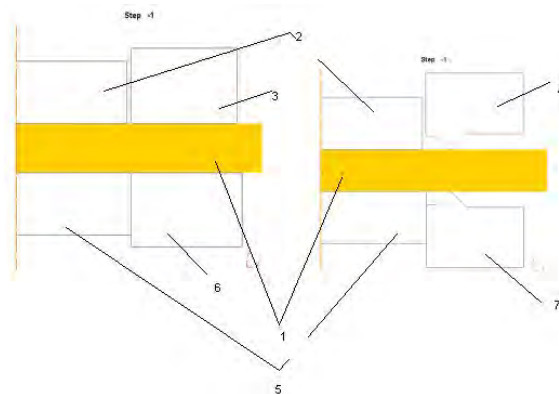


Рис. 1. Геометрия инструментов в программном комплексе DEFORM-2D: 1 – заготовка; 2 – пуансон; 3 – плоский прижим; 4 – прижим с клиновым ребром; 5 – выталкиватель; 6 – плоская матрица; 7 – матрица с клиновым ребром

Схема геометрии матриц и прижимов с клиновыми рёбрами для заготовки толщиной 4 мм показана на рисунке 2.

Величина одностороннего зазора берется в пределах 0,005 - 0,01 мм. Режущие грани матрицы притуплены или закруглены радиусом $r = 0,1 \div 0,2$ мм. Высота клина и расстояние до его вершины зависят от толщины материала и приведены в табл. 1.

Таблица 1

Размеры клиновых ребер

Для листов толщиной до 4 мм				Для листов толщиной свыше 4 мм			
S, мм	a	h	b	S, мм	a	h	b
0,5	0,5	0,20	0,25	4,5	3,2	0,50	0,55
1	0,7	0,30	0,35	5,0	3,7	0,55	0,60
2	1,4	0,40	0,45	6,0	4,2	0,60	0,65
3	2,1	0,45	0,50	8,0	5,0	0,70	0,75
4	2,8	0,50	0,5	10,0	6,0	0,85	0,90

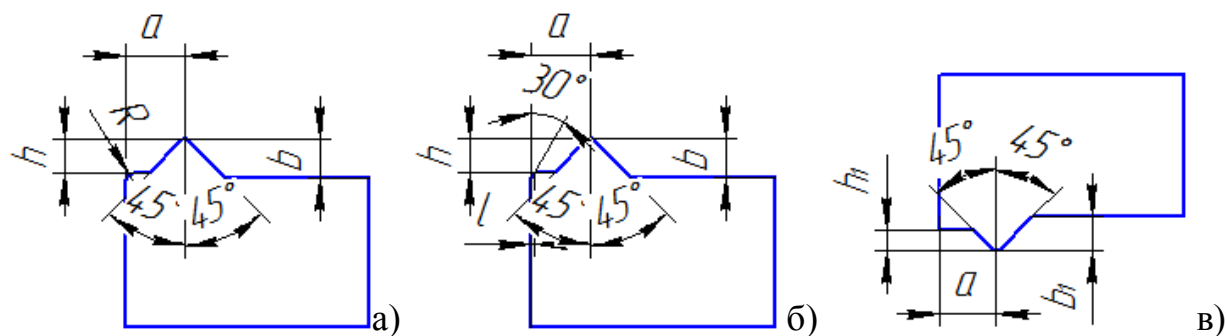


Рис. 2. Схема геометрии матриц и прижима с клиновыми рёбрами:
а – матрица с радиусным скруглением; б – матрица с фаской; в - прижим

Материал заготовки AISI 1045 есть в базе программного комплекса DEFORM-2D. Зазор между матрицей и пуансоном 0.2 мм. Для создания качественного реза при вырубке в программном продукте Deform 2D требуется, построение окон плотности в зонах пластической деформации (сечение реза и сечение вхождения клиновых рёбер). Движение инструментов во всех случаях принималось одинаковое.

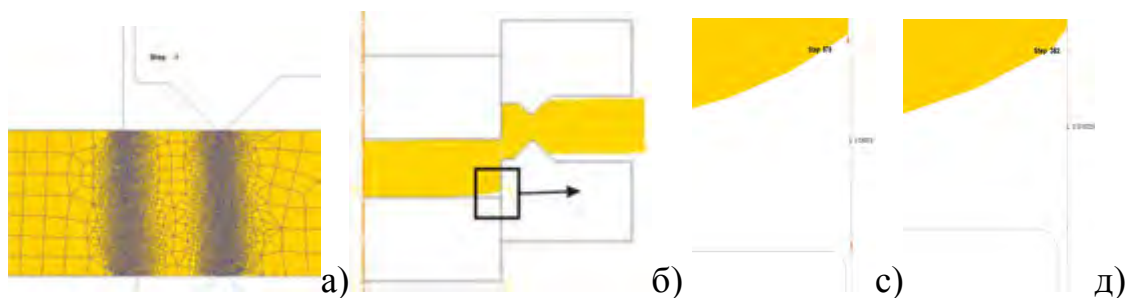


Рис. 3. Замятие кромки в процессе чистовой вырубкис клиновыми ребрами: а – начальная стадия с зонами повышенной плотности конечных элементов; б – завершающая стадия, с – замятие с режущей кромкой в виде фаски; д – замятие с режущей кромкой в виде радиусного скругления

Результаты работы:

разработана геометрия режущей кромки матрицы позволяющая уменьшить завал кромки менее 10% от толщины детали.

Библиографический список

1. В. П. Романовский, Справочник по холодной штамповке. Л., «Машиностроение», 1971 г. – Стр. 782.

УДК 681.3.06,658.512.2.011.56

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

А. В. Половинкин¹, инженер-конструктор

Научный руководитель: К. С. Кульга², д.-р техн. наук, профессор

¹ОАО «НПП «Мотор»

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический
университет»

Актуальность проблемы. Детали авиационных двигателей характеризуются сложностью и разнообразием конструкций, что приводит к необходимости разработки значительного количества станочных приспособлений (СП).

Системный анализ существующих бизнес-процессов (БП) проектирования СП, основанных на применении стандартной функциональности программного обеспечения (ПО) CAD (*Computer Aided Design*)-систем, выявил следующие недостатки:

- создание нового СП основано на экспертных оценках конструкции, включает значительные затраты времени на изучение проектной и справочной информации, а также на проектирование СП;
- учитываются только общие вопросы базирования заготовок с профильными посадочными поверхностями;
- не учитываются особенности проектирования и технологичности базовых деталей СП, что приводит к снижению качественного уровня конструкции СП;
- проектирование деталей и сборочных единиц (ДСЕ) СП выполняется без автоматизации построения параметрических 3D-геометрических моделей ДСЕ СП, чертежей СП, а также формирования спецификаций СП. В этом случае CAD-система используется только в качестве «электронного кульмана».

Таким образом, создание и экспериментальная апробация автоматизированной информационной системы (АИС), предназначенной для повышения эффективности проектирования СП является актуальной научной задачей.

Теоретическая часть.

Функциональная модель АИС. Объектно-ориентированная функциональная модель АИС разработана с применением методологии *Rational Unified Process (RUP)* и платформенно-независимого объектно-ориентированного языка *UML (Unified Modeling Language)* [2].

Этапы разработки объектно-ориентированной ФМ АИС [1, 5]: бизнес-моделирование; определение функциональных и нефункциональных требований; анализ и проектирование; реализация; тестирование; развертывание.

Разработанная ФМ является основой для создания информационно-математической модели и базовых информационных технологий АИС проектирования СП.

Информационно-математическая модель (ИММ) АИС. Основой для создания ИММ являются разработанная объектно-ориентированная

ФМ АИС, математические модели и методы для проведения размерных характеристик, точностных и силовых расчётов конструкций СП [3], а также алгоритмическое обеспечение для автоматизации построения параметрических 3D геометрических моделей и ассоциативных чертежей, формирования спецификации на основе API (*Application Programming Interface*)-функций CAD-системы. Точность обработки детали оценивается сопоставлением расчетной погрешности с допустимой величиной TA .

$$TA \geq \frac{1}{K_{СТ}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (1)$$

где TA – допустимая погрешность (чертёж ДСЕ); $K_{СТ}$ – коэффициент, учитывающий долю статической составляющей суммарной погрешности [3]; Δ_i – элементарная статическая составляющая. Величина Δ_i определяется в зависимости от типа СП, схемы выверки и допусков на деталь и приспособление [3].

Усилия закрепления заготовки детали в СП определяется путём составления расчетной схемы и решения системы уравнений равновесия сил и моментов. На рисунке 1 приведен пример расчетной схемы для СП «Оправка токарная».

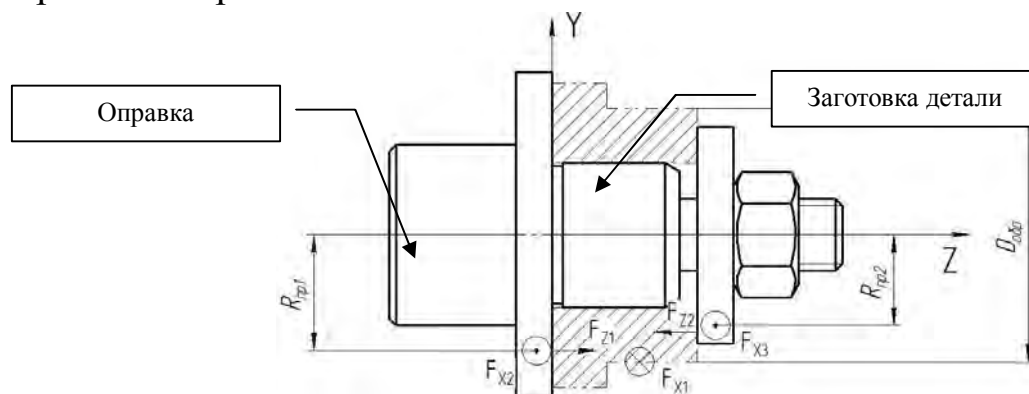


Рис. 1. Расчетная схема для силового расчета СП «Оправка токарная»

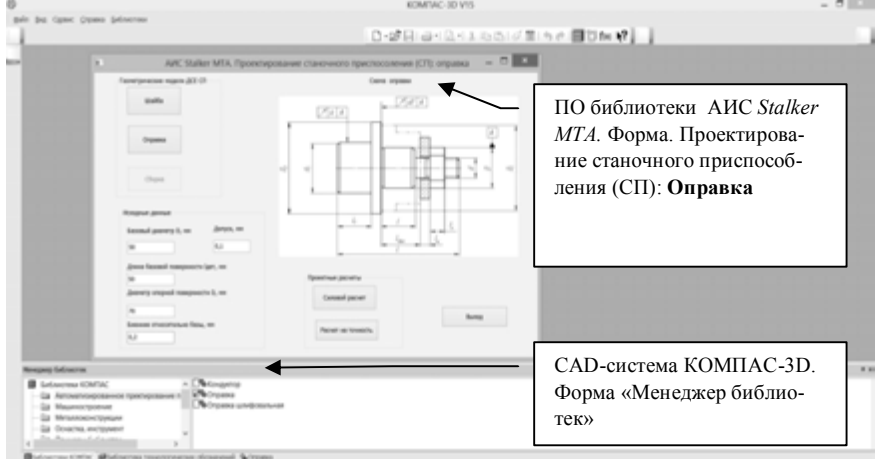
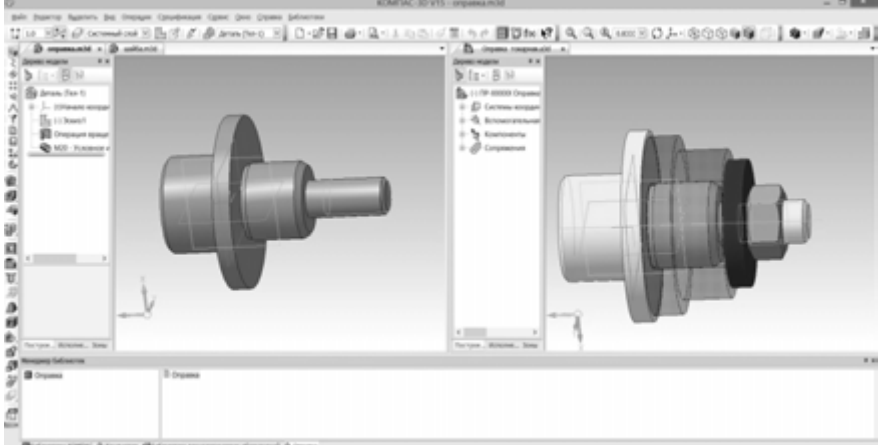
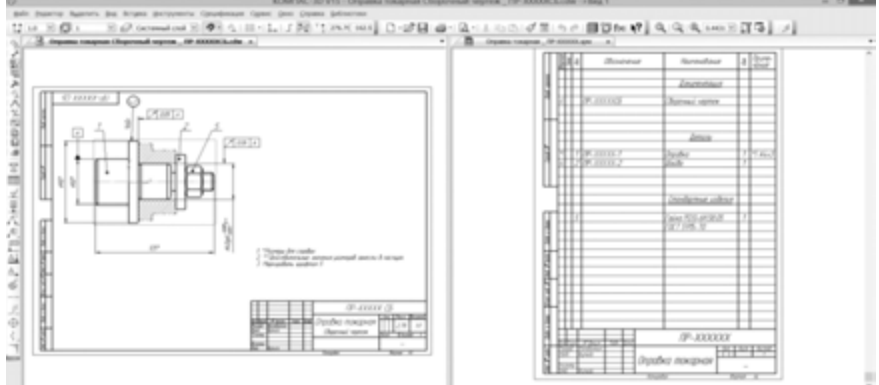
На рисунке 1 приняты следующие обозначения: F_{X1} – проекция силы резания на ось X; F_{Z1} , F_{Z2} – силы, действующие на заготовку; F_{X2} , F_{X3} – силы трения; $R_{пр1}$, $R_{пр2}$ приведенные радиусы трения; $D_{обр}$ – диаметр обрабатываемой поверхности. Исходя из полученного усилия закрепления, определяется тип зажима и его конструкция.

Базовые информационные технологии АИС. Для реализации этого этапа методологии [1] разработано ПО АИС *Stalker MTA* [5] с использованием API-функций CAD-системы *КОМПАС-3D* [4, 6]. Рассмотрим пример автоматизированного проектирования СП «Оправка токарная», предна-

значенного для механической обработки детали «тело вращения» на токарном станке, на основе разработанного ПО библиотеки «Проектирование станочного приспособления: оправка» (таблица 1).

Таблица 1

Базовые информационные технологии библиотеки АИС Stalker MTA

№ п.п.	Описание базовой информационной технологии АИС	Реализация базовой информационной технологии АИС
1.	Интеграция АИС <i>Stalker MTA</i> и CAD-системы <i>КОМПАС-3D</i> на уровне управления и наборов данных	 ПО библиотеки АИС <i>Stalker MTA</i>. Форма. Проектирование станочного приспособления (СП): Оправка CAD-система КОМПАС-3D. Форма «Менеджер библиотек»
2.	Автоматическое построение параметрических 3D геометрических моделей ДСЕ СП	
3.	Автоматическое построение сборочного чертежа СП и формирование его спецификации	

ПО библиотеки АИС *Stalker MTA* подключается к менеджеру библиотек CAD-системы *КОМПАС-3D* (см. п.1, таблица 1). Для проектирования СП в АИС *Stalker MTA* используются наборы данных электронной структуры изделия, которой управляет интегрированная АИС (ИАИС) авиационного предприятия [1]. В частности, для проектирования СП ис-

пользуются следующие данные технологического процесса изготовления ДСЕ: операционные эскизы (схема базирования); сведения об режущих инструментах и режимах резания; последовательность технологических переходов в операциях. На основе автоматически построенной геометрической модели сборки СП (см. п. 2, таблица 1), ПО библиотеки АИС *Stalker MTA* формирует сборочный чертеж СП и его спецификацию (см. п. 3, таблица 1).

Вывод.

На основе предложенных моделей и методов авторами разработано и экспериментально апробировано ПО АИС *Stalker MTA*, отличающиеся реализацией автоматизированного проектирования СП на стадии технической подготовки производства деталей авиационных двигателей и информационным взаимодействием с ИАИС *Stalker PLM v7.x* [1] в едином информационном пространстве предприятия.

Библиографический список

1. Кульга К. С. Модели и методы создания интегрированной информационной системы для автоматизации технической подготовки и управления авиационным и машиностроительным производством [Текст] / Кульга К. С., Кривошеев И. А. – М. : Машиностроение, 2011. – 377 с.
2. Рамбо Дж. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка [Текст] / Рамбо Дж. – 2-е изд. – СПб. : Питер, 2007. – 544 с.
3. Станочные приспособления [Текст]: Справочник. В 2-х т./ ред. Вардашкин Б. Н. – М. : Машиностроение. – 1984. – 430 с.
4. Компания АСКОН. Комплексные решения для машиностроения – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ascon.ru> (Дата обращения 12.01.2015).
5. Кульга К.С., Половинкин А.В. Автоматизация проектирования станочных приспособлений для изготовления деталей авиационных двигателей [Текст] // Сборник научных трудов V-й международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные аспекты современной науки»/ Белгород: АПНИ. – 30.11.2014. – Часть III., – с.87-91.
6. C3D Labs. The Core 3D. Комплексные решения для машиностроения – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://c3dlabs.com/ru/> (Дата обращения 12.01.2015).

УДК 621.9.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПРЕРЫВИСТОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, ОБРАБОТАННОЙ ИНСТРУМЕНТОМ ИЗ
КОМПОЗИТА 10

И. М. Смирнов, канд. техн. наук., доцент

ОАО «Научно-исследовательский инженерный институт», г. Балашиха

В конструкциях деталей машин и механизмов часто встречается сочетание элементарных поверхностей первого или второго порядка (поверхности вращения и плоскости) с элементами прерыва (пазы, вспомогательные отверстия, выточки и т.п.), образующие прерывистые поверхности, обработка которых сопровождается технологическими трудностями. К прерывистым поверхностям следует отнести и изношенные поверхности подлежащие восстановлению с последующей обработкой резанием для придания наплавленной поверхности размеров и показателей качества, соответствующих параметрам нового изделия.

В процессе нанесения покрытий при восстановлении изношенного слоя происходят изменения формы и размеров детали, а также структуры и физико-механических свойств, в первую очередь – твердости поверхностного слоя. Для обеспечения требуемой конструктивной точности и шероховатости поверхности детали необходимо применение оптимального для выполнения условий исследования метода механической обработки.

Исследования в области технологического обеспечения качества обработки поверхности показывают, что геометрические и физико-механические характеристики поверхностного слоя, сформированные в деталях на операциях финишной механической обработки, являются конечными и определяющим образом влияют на эксплуатационные характеристики обработанных деталей.

Тенденции развития механообработки в машиностроении определяют конкурентность на операциях финишной обработки восстановленных деталей методов шлифования абразивными или алмазными кругами со способами более производительной лезвийной обработки (точение, растачивание, фрезерование) с применением режущих инструментов, оснащенных твердыми сплавами и композитами.

Обработка шлифованием наряду с преимуществами по обеспечению требуемой точности формы детали имеет и свои недостатки. В частности, наблюдаются так называемые локальные прижоги обработанной поверхности, в области которых происходят структурно-фазовые превращения,

приводящие к появлению зон с остаточными напряжениями растяжения, которые могут стать концентраторами напряжений и приводят к образованию микротрещин, снижению износостойкости и усталостной прочности детали. Другим существенным недостатком процесса шлифования является шаржирование поверхности детали абразивом шлифовального круга. Шаржированная абразивом поверхность при эксплуатации детали взаимодействует с сопряженным изделием, при этом частицы абразива внедряются в поверхность сопряженной детали и образуют дефекты в ее поверхности. При небольших относительных смещениях такие локальные зоны контакта являются концентраторами фреттинг-коррозии и при развитии фреттинг-износа абразивные частицы и зерна осуществляют царапание и микрорезание контактирующих поверхностей, приводя такое соединение в негодность.

Твердость наплавленных порошковых материалов составляет HRC 58-63, а на поверхности наплавленного слоя вследствие взаимодействия флюсов с металлами основы и проволоки образуется твердая корка шлаков, представляющих собой смесь карбидов, оксидов, боридов и нитридов металлов. Образованный поверхностный слой отличается плохой способностью к шлифованию и склонен к появлению прижогов, трещин и значительной глубины дефектного слоя; даже при оптимальных режимах шлифования.

Анализируя эти сведения делаем вывод, что выбор метода окончательной обработки наплавленной поверхности детали существенно влияет не только на технологическое обеспечение шероховатости, но и на эффективность самого процесса восстановления утраченных показателей качества и точности из ношенной детали. Учитывая технологические возможности композитов выбираем в качестве метода окончательной обработки наплавленной поверхности точение композитом 10.

Для получения комплексных зависимостей, связывающих перечисленные факторы процесса точения с физико-механическими характеристиками поверхностного слоя, использован метод планирования экспериментов.

Результаты исследования шероховатости с использованием однофакторного и многофакторного метода планирования эксперимента позволили получить уравнение регрессии условий резания на параметр шероховатости поверхности Ra :

$$Ra = \frac{0,11 \cdot S^{0,2} \cdot \gamma^{2,0} \cdot r^{0,3}}{V}, \text{ мкм}$$

где S – подача, мм/об; V – скорость резания, м/с; γ – передний угол; r – радиус при вершине резца, мм.

В исследуемом диапазоне режимов резания с увеличением скорости резания высота микронеровностей снижается. Увеличение подачи, радиуса при вершине инструмента и уменьшение переднего угла приводит к росту высоты микронеровностей обрабатываемой поверхности. Влияние скорости больше влияния подачи на высоту микронеровностей, при меньших скоростях резания влияние подачи проявляется сильнее. Влияние радиуса при вершине инструмента на показатель шероховатости обрабатываемой поверхности усиливается с увеличением переднего угла резца. С ростом его отрицательного значения ухудшается R_a , поскольку имеет место увеличение объема деформируемого обрабатываемого материала. С возрастанием радиуса округления режущей кромки после завершения периода приработочного износа инструмента шероховатость уменьшается и стабилизируется, причем наблюдается уменьшение углов наклона профиля и увеличение радиусов выступов микронеровностей. Это объясняется возрастанием доли пластических деформаций в процессе формирования поверхностного слоя скругленной режущей кромкой и установившейся площадкой износа. При таких условиях обработки инструмент помимо снятия стружки выполняет функции выглаживателя, снижая шероховатость обработанной поверхности.

Таким образом, шероховатость обработанной поверхности наплавленных деталей при чистовом точении резцами из композита 10 зависит, в основном, от следующих технологических факторов, перечисленных в порядке убывания степени их влияния на параметры микропрофиля: условия контакта резец-деталь, скорость резания, подача, радиус при вершине резца, передний угол резца. Влияние исходной шероховатости также значимо, и при недостаточной жесткости технологической системы является определяющим фактором.

Исследования показали, что при обработке чистовым точением наплавленной поверхности композитом 10 в поверхностном слое не происходят существенные фазовые превращения. На дифрактометре УРС-50 ИМ в кобальтовом $K\alpha$ -излучении зафиксирована лишь α -фаза ($HRC < 30$), α и γ -фазы ($HRC > 30$). Происходит упрочнение металла до 15 процентов на глубине 80...120 мкм.

На поверхности детали возникают растягивающие тангенциальные и осевые напряжения. Учитывая характер процесса точения наплавленной поверхности (колебание припуска, чередование впадин и выступов наплавленного металла, их неравномерное расположение по периметру на-

плавленной поверхности, посторонние включения и др.), с увеличением продолжительности резания уменьшается глубина залегания остаточных напряжений и величина растягивающих напряжений на поверхности.

При увеличении скорости резания и подачи тангенциальные напряжения возрастают, растет и глубина их проникновения.

Увеличение износа по задней поверхности инструмента способствует росту тангенциальных напряжений, глубина их проникновения уменьшается.

Предварительная обработка наплавленной поверхности резцом твердого сплава Т15К6 уменьшает высоту неровностей.

На основании анализа качественного состояния поверхностного слоя изношенных поверхностей деталей, восстановленных наплавкой и прошедших предварительную обработку точением твердым сплавом с последующим чистовым точением композитом 10, можно сделать вывод о целесообразности замены метода абразивного и алмазного шлифования новой технологией, способной повысить производительность и обеспечить требуемое качество обработанной поверхности восстановив утраченную работоспособность изношенных деталей в целом.

Библиографический список

1. Смирнов И.М. Повышение эффективности процессов механической обработки конструктивно сложных деталей машин: Монография. – М.: Триумф, 2012 – 224 с.
2. Смирнов И.М. Инструментальное обеспечение процессов механической обработки конструктивно сложных деталей машин: Монография. – М.: Триумф, 2014. – 128 с.

УДК 658.512

НАЗНАЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «СИСТЕМА АНАЛИЗА ТКИ» ПРИ ЗАПУСКЕ В ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ АТ

Д. О. Токарев, студент

Научный руководитель: А. С. Говорков, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет»

В статье рассматривается подход к решению задачи автоматизированного анализа изделия АТ с учетом технологических рекомендаций его

проектирования и изготовления на примере деталей из листового полуфабриката, реализованный в описываемом программном комплексе (системе поддержки принятия решений - СППР).

Система анализа ТКИ является обратной связью от технологических модулей к конструкторским, т.е. дает возможность проектировщику обнаруживать нетехнологические сочетания конструктивных форм в детали и изменять её конструкцию в соответствии с технологическими рекомендациями в диалоговом режиме, а технологу – представлять рекомендации, направленные на обеспечение ТКИ, в формализованном виде. Общая структура разрабатываемой системы представлена на рисунке 1.

В традиционной конструкторской практике анализ и отработка изделия на технологичность ведется квалифицированными технологами на основе большого опыта, с привлечением информации из различных нормативных документов, справочников, рекомендаций и других источников. Такая практика использования субъективных знаний высококвалифицированных специалистов имеет свои недостатки: носителями знаний являются индивидуальные субъекты, что не позволяет тиражировать такие знания на широкий круг специалистов. За предыдущие десятилетия наметился «разрыв поколений», который во многом нарушил преемственность передачи опыта и знаний от старших поколений младшим.

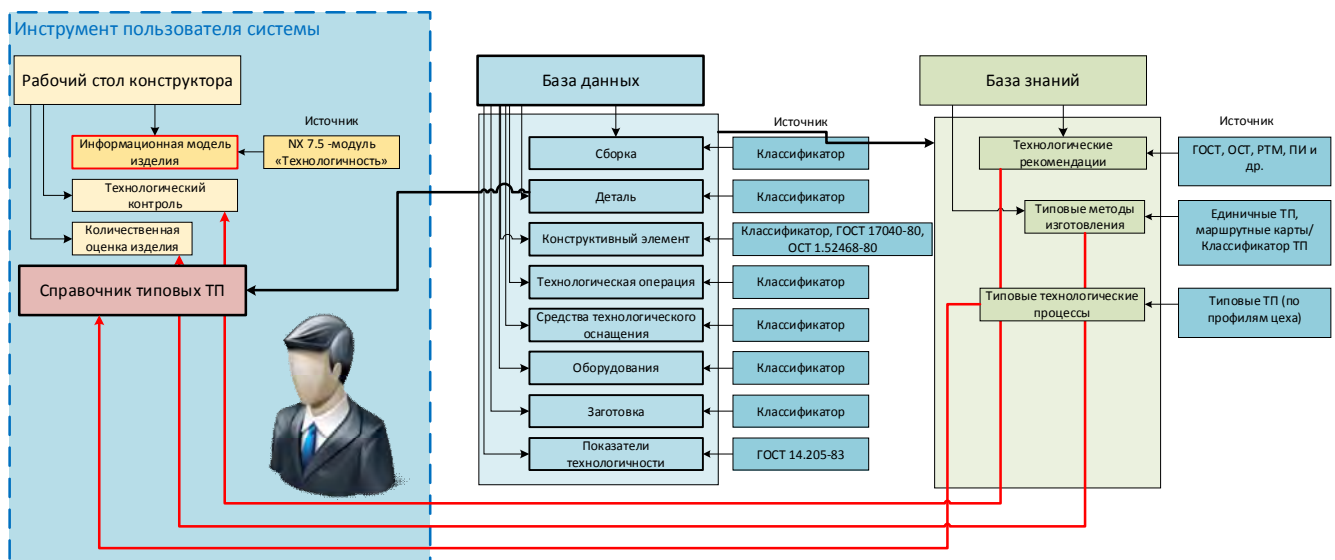


Рис. 1. Структура «Системы анализа ТКИ»

В основу проекта положена идея формализации знаний технолога и построения на их основе системы поддержки принятия решений в процедурах конструкторского проектирования. Это позволит снизить количество ошибок при проведении технологического контроля изделия при запуске в производство, и уменьшить издержки в производстве за счет предварительного анализа

нескольких проектных решений для выбора оптимальной по составу конструктивных элементов конструкции изделия с учетом заданного уровня технологичности и заданной стоимости. Проект обладает гибкостью в настройке, возможно применение на различных машиностроительных предприятиях.

Результатом выполнения проекта является система поддержки принятия решений для технолога, внедрение которой позволяет увеличить прибыль предприятия за счет привлечения к работе технологов с меньшим опытом, и обеспечения более технологичного и экономичного производства изделий авиационной техники. Гибкая архитектура приложения делает возможным внедрение системы на различных предприятиях машиностроительной отрасли. Интеграция с системой автоматизированного проектирования Siemens NX позволяет импортировать структуры проектируемых моделей изделия в программу и производить анализ технологичности конструкции изделия в полуавтоматическом режиме. Модуль “База данных” предоставляет возможность заносить информацию об оборудовании, деталях, сборочных единицах и типовых технологических процессах, которые используются на конкретном предприятии. Модуль “База знаний” позволяет каждому специалисту добавлять правила оценки технологичности конструкции изделия, а также формализовать типовые технологические операции изготовления отдельных КЭ детали. Результатом работы системы является сравнительная таблица различных способов изготовления проектируемого изделия, с оценкой времени и стоимости с учетом заданного уровня технологичности конструкции изделия.

Внедрение разработанной системы поддержки принятия решений позволит сократить издержки при производстве изделий на 5-8%, за счет анализа нескольких проектных и технологических решений и выбора конструкции детали оптимальной по составу конструктивных элементов, и обеспечения более технологичного и экономичного производства изделий машиностроительной техники.

Дальнейшее развитие системы предполагает предоставление возможности производить оценку технологичности изделия непосредственно в среде проектирования, а также интеграцию с пакетом Siemens Teamcenter. Это позволит выполнять следующие задачи:

- решение задачи инженерного анализа конструкции изделия на технологичность непосредственно в среде системы NX с использованием баз данных и знаний «Системы анализа технологичности конструкции изделия»;
- снижение ошибок до 25% в ходе конструкторской и технологической подготовки производства изделия, благодаря отсеву экономически затратных и нерациональных вариантов проектных решений в конструкции изделия;
- снижение цикла запуска изделия в производство на 5-10% за счет уменьшения времени проведения технологического контроля, а именно выявление технологических противоречий на этапе проектирования изделия, а не на этапе запуска;

- подготовка технологических данных для разработки типовых технологических процессов изготовления изделия на основе модели в NX с учетом технологических возможностей предприятия и заданного уровня технологичности.

На сегодняшний день создана информационная модель на основе метода представления и анализа трехмерной модели изделия (на примере системы NX), позволяющая произвести комплексный инженерный анализ будущего изделия с учетом заданных исходных показателей технологичности конструкции изделия (ТКИ) на этапе конструкторской и технологической подготовки производства. Данный метод анализа изделия на технологичность является уникальным, поскольку оценивается его трехмерная модель на наличие коллизий и технологических противоречий между используемыми конструктивными элементами (КЭ) в общей структуре изделия и теми методами и вариантами технологических процессов изготовления КЭ в составе изделия, которые предлагаются Системой или определяются технологом. При этом анализ ведется по составу и значениям показателей технологичности принятых пользователем Системы.. Преимущества данной технологии проведения технологического анализа и контроля изделий является универсальность применяемых алгоритмов. Недостатком предлагаемой технологии является то, что все анализируемые изделия должны иметь компьютерное представление (модель, образ).

В конечном виде все алгоритмы реализованы в программе «Система анализа ТКИ», в которой все КЭ, применяемые в рассматриваемой отрасли (на примере авиастроения), описываются в базе данных системы, а технологические рекомендации и типовые тех. процессы изготовления КЭ описываются в базе знаний системы. Таким образом, разработанная система поддержки принятия решений, позволяет проводить анализ изделий на технологичность в зависимости от «актуализированной» базы данных и знаний конкретного предприятия.

Данный продукт имеет дидактическое значение помощи молодым конструкторам при проектировании изделий (подсказка оптимального применения КЭ), а также технологам – для проведения технологического контроля изделий при подготовке и запуске производства изделий.

В рамках проекта определены следующие потенциальные возможности от внедрения:

- снижение влияния субъективного фактора при принятии решений в ходе технологической подготовки производства изделия, благодаря использованию выявленных формальных критериев оценки технологичности изделия;

- разработанная информационная модель изделия содержит минимально необходимый объем данных, в отличие от ЭМ изделия, вследствие чего требует меньшего объема аппаратных ресурсов ПК;

– создаваемая для подготовки информационной модели изделия информационная структура Системы построена с учетом не только информационных ресурсов предприятия, заложенных в ее PDM-системе, но и тех бизнес-процессов, которые определяют процедурную базу конструкторско-технологической подготовки производства, а именно:

- выбора и описания структуры конструкции изделия;
- выбора состава объектов технологической системы (ТО, СТО, оборудования);
- проведения комплексной оценки изделий на основе заданных критериев технологичности.

Целевой аудиторией пользователей системы являются:

1) конструктор, решающий задачи:

- формирование электронной модели изделия в системе NX с учетом разработанной базы данных типовых конструктивных элементов и формализованных технологических рекомендаций;
- отработка технологичности конструкции изделия на этапе проектирования в системе NX при работе в разработанном модуле «Технологический контроль»;

2) технолог, решающий задачи:

- проведение технологического контроля при запуске в производство изделий с использованием модуля «Технологический контроль»;
- автоматизированной расцеховки изделия на основе её информационной модели в NX;
- формирование технологических рекомендаций при разработке технологических процессов для ДСЕ в базе знаний системы.

Таким образом, разработанная СППР позволяет технологу-эксперту формализовать в БЗ имеющиеся на предприятии РТМ, СТЦ, ОСТ, ГОСТ и другие нормативные документы, используемые при технологическом контроле изделий на этапе ТПП. Технологию предоставляется инструмент, в котором он может выбрать в диалоговом режиме область применения ТР (вид полуфабриката, тип деталей, тип КЭ). Разработанная и структурированная определенным образом БЗ в СППР позволяет проводить технологический контроль конструкции изделия в полуавтоматизированном режиме. Использование СППР при проектировании изделия на ранних стадиях позволяет конструктору проверять геометрические параметры изделия с учетом имеющихся технологических возможностей предприятия.

**Представленная в рамках данной статьи работа проводится при финансовой поддержке правительства Российской Федерации (Минобрнауки России) по комплексному проекту 2012-218-03-120 «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства из-*

делий АТ нового поколения на базе НПК «Иркут» с научным сопровождением ИрГТУ» согласно Постановлению Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218.

УДК 621.9

ПРОБЛЕМЫ В СОВРЕМЕННОМ ПРОТЯГИВАНИИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ

Г. Д. Петухов, инженер-технолог ОАО «ПМЗ»

Научный руководитель: В. Ф. Макаров, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Пермский научно-исследовательский политехнический
университет»

В современном машиностроении процесс протягивания является высокопроизводительным методом обработки металла резанием и получения высокого качества обрабатываемой поверхности. По трудоёмкости протягивание превосходит такие виды обработки как фрезерование и шлифование. Получаемая шероховатость $Ra \leq 1,25$, погрешность получаемой точности размера $\Delta = 0,02 \text{ мм}$, погрешность прямолинейности $\angle = \pm 5'$. Однако главной проблемой протягивания в современной промышленности является применение протяжек из быстрорежущей стали, соответственно, ограниченных скоростей резания $V \approx 1,5\text{--}2 \text{ м/мин}$.

В данный момент в нашей и зарубежной промышленности при обработке жаропрочных и титановых сплавов (ВТ8, ВТЗ-1, ЭИ 787ВД, ВЖЛ-14 и их аналогов) используются протяжки из быстрорежущей стали, с напайными твердосплавными пластинами, а также сборные протяжки со специальными режущими элементами. Во втором варианте для обработке титана используются пластины ВК8. Хотя современный уровень сменных твердосплавных пластин позволяет более гибко подбирать режимы резания, увеличивать скорость резания при обработке лопаток компрессора из титана и жаропрочных сплавов. Сборные протяжки со специальными режущими элементами позволяет решить эту проблему, но ведет к удорожанию инструментального хозяйства, увеличению номенклатуры режущих и крепежных элементов. Также за отсутствием развитой конкуренции является дорогим, могут возникать проблемы с поставками ввиду специфичности инструмента. Решением этих проблем является применение сбор-

ных протяжек со сменными твердосплавными пластинами. Предлагаемые варианты имеют свои достоинства и недостатки.

В целом, недостатки использования цельного и напайного режущего инструмента можно свести к следующему:

- В процессе напайки и заточки зубьев протяжек наблюдаются трещины в твердом сплаве от напряжений при нагреве и охлаждении;
- Переточка протяжек проводится неравномерно по передней и задней поверхности индивидуально для каждого зуба, что изменяет перепады между зубьями, приводит к преждевременному выходу протяжки из работы;
- Разрушение катастрофическое одного – двух зубьев протяжки приводит к съему и замене всей протяжки;
- Износ зубьев протяжек неравномерный, а замена протяжек проводится по самому слабому зубу, хотя остальные зубья могут еще длительно работать;
- Корпус протяжки повторно не используется, а отправляется в металлолом;
- В механическом цехе для переточки протяжек требуется иметь заточное отделение с квалифицированными заточниками, высокоточным оборудованием и высококачественными абразивными кругами и др. [1]

Применение протяжек сборной конструкции со сменными твердосплавными пластинами дает ряд преимуществ:

- Значительное увеличение срока службы самой протяжки;
- Максимальная унификация и взаимозаменяемость составных элементов, сокращение номенклатуры режущих пластин;
- Исключение из производственного процесса трудоемких операций пайки и заточки, требующих дополнительных трудозатрат специальных участков, технологической оснастки, оборудования и абразивного инструмента;
- Сокращение времени смены режущих кромок пластин путем замены или переустановки твердосплавной пластины. При использовании цельных и напайных протяжек приходится снимать поврежденную протяжку и устанавливать новую (переточенную), что занимает много времени;
- Сокращение расхода дорогих твердых сплавов и увеличение их возврата при утилизации до 90%;
- Возможность повышения режимов обработки при сохранении качества обрабатываемой поверхности за счет использования пластин с износостойким покрытием.

Также основной целью в современной промышленности является обеспечение качества и усталостной износостойкости при минимальных затратах. В частности для снижения затрат основными решениями является снижение трудоемкости и удешевление инструментального хозяйства. Снижение трудоемкости достигается увеличением скорости резания.

Опыт ОАО «ПМЗ» показывает, что одним из путей повышения эффективности финишной механической обработки деталей ГТД является разработка, исследование и внедрение такого высокопроизводительного процесса, как скоростное протягивание сборными протяжками со сменными твердосплавными пластинами. Также применение режущего инструмента с твердосплавными пластинами позволяет уйти от проблемы заточки зубьев, которая в свою очередь требует высокую квалификацию заточника и высокоточное дорогое оборудование. К тому же, большим недостатком является наличие остаточных напряжений в пластинах после пайки и переточке зубьев. Однако для получения точных геометрических параметров протяжки требуется очень точная обработка посадочных мест под пластины. Но затраты на изготовление корпуса протяжки окупаются из-за многократного использования, т.к. после износа пластин корпус не выбрасывается в металлолом.

Разрабатываем узел крепления выбранных пластин для титана и сталей с учетом действующих сил

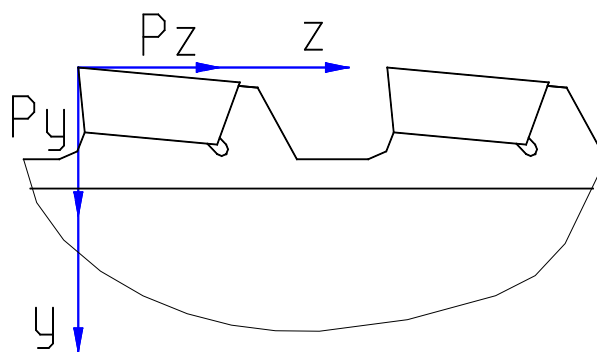


Рис. 1

Для проведения экспериментальных исследований жесткости различных схем крепления в качестве испытательной установки использовался вертикально - фрезерный станок HECKERT FSS 315 V/2. Рассматривались схемы крепления винтом сверху, методом косой тяги, клиновое крепление, напайное крепление, крепление силами упругой деформации и др.

По результатам испытаний, наилучшие результаты показали образцы, методом крепления пластин которых были напайная конструкция и винтом сверху. На рис.1 рассмотрены нагрузки, действующие на режущие

кромки в процессе протягивания. В данном примере нагрузки компенсируются жесткими поверхностями корпуса протяжки, нагрузки на регулируемые или подвижные опоры отсутствуют. Крепление производится винтом сверху с утопающей головкой, что не препятствует движению протяжки, сходу стружки (рис. 2)

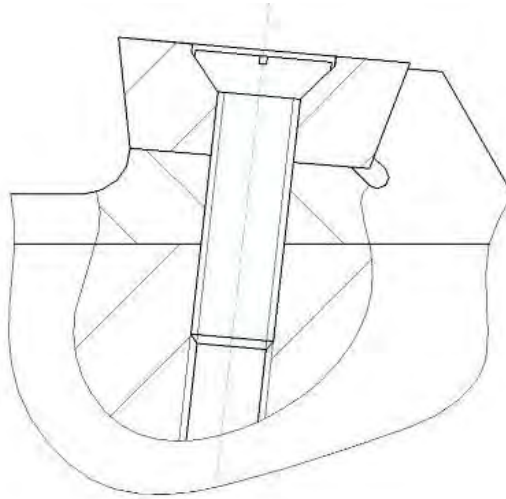


Рис. 2

Данный способ крепления пластины ранее широко использовался в режущих инструментах при сверлильных и фрезерных работах. Применим его при проектировании протяжки.

Вывод.

1. Применение протяжек из быстрорежущей стали ограничивает процесс протягивания максимальной скоростью резания $V=1,5-2$ м/мин.

2. Протяжки с напайными твердосплавными пластинами имеют следующие недостатки: износ одного зуба приводит к переточке всех зубьев или забраковке всей протяжки, наличие остаточных напряжений в пластинах после пайки и переточке зубьев.

3. Решением проблем современного протягивания является применение сборных протяжек со сменными твердосплавными пластинами.

4. В результате эксперимента найден оптимальный метод крепления твердосплавных пластин на протяжке.

5. Данное решение позволяет спроектировать и изготовить протяжки с обработкой замка одновременно с 5-ти сторон.

ОБРАБОТКА ТОКОПРОВОДЯЩИХ МАТЕРИАЛОВ

И. И. Хафизов, канд. техн. наук, доцент, заместитель директора
по образовательной деятельности Инженерного института

ФГАОУ ВПО "Казанский (Приволжский) федеральный университет"

Заготовительные операции по разделению всех видов материалов включают ручное и машинное разрезание на оборудовании различного назначения. Для этого используются как традиционные способы (прессы, металлорежущее оборудование с металлическим и абразивным инструментом и др.) так и новые виды обработки (лазерная и плазменная резка, электроэрозионное разделение, ультразвуковые процессы).

В машиностроении имеется достоверная информация об освоенных методах, их предельных возможностях и недостатках. С увеличением доли затрат на материалы возникала проблема изыскания новых видов разделения материалов, особенно это коснулось дефицитных и дорогих сплавов типа драгоценных металлов, вольфрама, магнитных сплавов, хрупких полупроводников, где выход годных деталей после обработки становился менее половины исходной массы, а дефекты, вносимые в поверхностный слой при разрезке, сохранялись в изделии и снижали его характеристики.

Совмещение различных воздействий на объект обработки позволяет спроектировать комбинированные методы, в частности электроабразивный (электроалмазный). Особенности электроплазменной резки являются высокая производительность при минимальной ширине, менее одного миллиметра и глубины изменённого слоя обработанной поверхности. Эти методы применяются для резки при получении заготовок с последующей обработкой, которая в ряде случаев (изготовление деталей приборов, радиотехники, средств управления) нежелательна, т.к. приводит к неоправданным потерям материала, вторичным погрешностям и дефектам, резко повышает стоимость изделий. Установление однозначных связей между свойствами обрабатываемых материалов, сочетанием воздействий комбинированного процесса позволяет создать современное автоматизированное оборудование с управлением механической, химической, эрозионной составляющей в едином процессе, обеспечивающим получение после разделения материалов готовых деталей с погрешностью не выше 30 мкм и с шероховатостью не выше 0,32 мкм. При этом устраняются негативные воздействия на окружающую среду и до 2 раз ускоряется цикл изготовления деталей.

Известно изобретение № 2333820, сущность которого заключается в следующем. Способ комбинированного разделения токопроводящих материалов, включающий прямую подачу электроабразивного инструмента на разделяемую заготовку под технологическим током, подачу электролита в зону разделения заготовки и разделение заготовки, отличающийся тем, что после разделения заготовки отключают подачу электроабразивного инструмента и разделенную заготовку перемещают в направлении, перпендикулярном направлению подачи электроабразивного инструмента, до достижения стабильной величины технологического тока, после чего осуществляют обратную подачу электроабразивного инструмента до выхода его из зоны разделения. К недостаткам устройства, на котором реализован известный способ, является то, что в момент контакта абразивного инструмента с заготовкой происходит резкий удар инструмента о заготовку, что приводит к износу инструмента и снижению точности обработки изделия.

Целью заявленного технического решения является устранение недостатков прототипа и одновременное обеспечение следующих задач:

1-снижение износа инструмента за счет уменьшения ударного воздействия при подводе к заготовке, посредством подачи использования датчиков (преобразователей биения), работающих в противофазе и синхронно, по принципу—больше биение—больше подача электролита и наоборот,

2-повышение точности обработанных изделий при их разделении (комбинированным способом),

3-также повышение производительности процесса,

4-повышение качества обработанной поверхности,

5-достижения высокой надежности способа, за счет реализации первого пункта вследствие минимизации износа инструмента,

6-значительное упрощение управления и контроля протекающих процессов.

Сущность заявленного технического решения заключается в том, что устройство для комбинированного разрезания токопроводящих материалов, включающих анодное растворение поверхности обрабатываемой заготовки с одновременной подачей электроабразивного инструмента на разрезаемую заготовку, подачу электролита в зону разрезания заготовки, контактирующих с кавитационным потоком технологической жидкости в зоне резания и разрезания заготовки, отличающийся тем, что с целью повышения точности резания за счет уменьшения биений дискового электрода—инструмента, давления электролита изменяют по сигналу преобра-

зователя биений пропорционально амплитуде биений электрода-инструмента через одну форсунку синхронно, через другую – противофазно, а с целью снижения износа инструмента за счет уменьшения ударного воздействия при его подводе к заготовке, на участке подвода инструмента к заготовке на них подают регулируемое напряжение технологического тока, где после разрезания заготовки отключают подачу электроабразивного инструмента и разрезанную заготовку поворачивают в направлении, перпендикулярном направлению подачи электроабразивного инструмента, до достижения стабильной величины технологического тока, после чего осуществляют обратную подачу электроабразивного инструмента до выхода его из зоны разрезания.

Таким образом, поставленная цель в целом обеспечивается подачей необходимой величины напряжения на инструмент и заготовку в период их сведения до контакта, выбираемая из условия его равенства 0,6–0,9 от значения пробойного напряжения для зазора инструмент–заготовка в каждый момент времени. Введение электрохимического растворения заготовки в период подвода инструмента к заготовке образует в месте входа инструмента в заготовку канавку, которая значительно смягчает удар инструмента о заготовку и производит его центровку диска и как следствие повышает качество обработки.

При этом после разрезания заготовки отключают подачу электроабразивного инструмента и разрезанную заготовку перемещают в направлении, перпендикулярном направлению подачи электроабразивного инструмента до достижения стабильной величины технологического тока, после чего осуществляют обратную подачу электроабразивного инструмента до выхода его из зоны разрезания.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что высокая производительность резки может быть достигнута лишь при интенсивных электрических режимах, которые характеризуются напряжением и силой тока. Напряжение, необходимое для анодно-механической резки, составляет 20–28В, и его выбирают в зависимости от размеров поперечного сечения заготовки, сила тока колеблется в значительных пределах и в зависимости размеров заготовки и интенсивности процесса может достигать несколько сотен ампер.

При малой скорости инструмента малое количество электрических разрядов, при большей - сокращается продолжительность их действия. Введение процесса разрезания на максимально допустимых скоростях снижает величину электрохимического растравливания сторон паза, что ведет к повышению точностных характеристик процесса, при этом точ-

ность повышается за счет уменьшения деформации круга при разрезании. Нормальный режим обработки предусматривает также и оптимальное давление электрода–инструмента на разрезаемую заготовку. Давление инструмента на заготовку должно находиться в пределах 0,08–0,2МПа.

Преимущество анодно–механического способа резки металла по сравнению с механическим способом состоит в том, что он создает возможность резки металла, независимо от их химического состава и твердости, а также резку всех твердых металлов. Обычный дорогостоящий режущий инструмент заменяется более дешевым - стальным диском, значительно возрастает производительность резки.

Введение электрохимического растворения заготовки в период подвода инструмента к заготовке образует в месте входа инструмента в заготовку канавку, которая смягчает удар инструмента о заготовку и производит её центровку и повышает качество обработки.

Специфическая особенность данного способа состоит в том, что одновременно плавятся небольшие участки обрабатываемой поверхности, возникающие в точках контакта заготовки и электрода–инструмента. В тоже время сам процесс является кратковременным.

Режимы разделения зависят от условий протекания процесса под каждым диском и управление при такой схеме возможно, если оборудование оснащено адаптивной системой подачи блока инструментов с обратной связью по сигналам датчиков положения дисков. Схема используется на предприятиях при наличии специального оборудования.

Таким образом, повышение точности обработки с минимальными потерями материала при разделении возможно, если использовать закономерности процесса разделения дисковыми инструментами с расчетными геометрическими параметрами с адаптивным управлением по нескольким координатам, создании новых способов управления положением различных частей инструмента и калибровке паза после разделения заготовки с минимальным припуском.

Исключение последующих операций по обработке мест разделения деталей позволяет в несколько раз ускорить процесс обработки, значительно повысить точность и качество деталей, снизить расход дефицитных материалов.

Использование подобных процессов ускоряет создание новых конкурентоспособных изделий, расширяет технологические возможности производства, способствует снижению дефицита и затрат на материалы. Это актуально для современного машиностроения и отвечает мировым требованиям к новой продукции.

Библиографический список

1. Устройства для разрезания токопроводящих материалов Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы-2014»(МНТК «ИМТОМ-2014»). Ч.1.-Казань, 2014.-360с. С.346-350.

2. Сборный электрод-инструмент для комбинированной обработки хрупких и сверхтвердых материалов. Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики «АНТЭ-2013»: международная научно-техническая конференция, 19 – 21 ноября 2013 г.: сборник докладов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2013.– 584 с. 159-161С.

3. Хафизов И.И. Средства технологического оснащения для комбинированного малоотходного чистового разделения материалов/ И.И. Хафизов// Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т16. №17. С.220-224.

4. Хафизов И.И. Схемы разделения материалов электро абразивным кругом/ И.И. Хафизов// Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т16. № 3. С.222-225.

5. Пат.134097 Российская Федерация, МПК В23Н 5/04(2006.01), В23Н 3/00(2006.01) Устройство для комбинированного разрезания токопроводящих материалов/ И.И. Хафизов № 2013118839/02; заявл.23.04.2013; опубл. 10.11.2013, Бюл. №31.

6. Пат.142793 Российская Федерация, МПК В23Н 7/12(2006.01), В23Н 5/10(2006.01) Устройство для комбинированного разрезания токопроводящих материалов/ И.И.Хафизов, А.Р.Закирова, З.Б.Садыков № 2013130578/02; заявл.02.07.2013; опубл. 10.07.2014, Бюл. №19.

УДК 621.9.048.4

О ПРИМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И СВС-ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ

А. Е. Кудряшов, канд. техн. наук

Е. А. Левашов, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой
ПМиФП, директор НУЦ СВС

ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Снижение себестоимости выпускаемой продукции является приоритетной задачей предприятий в условиях рыночной экономики. Для машиностроительных предприятий увеличение ресурса работы штамповой оснастки позволяет существенно снизить себестоимость готовой продукции и, способствует повышению эффективности производства.

В процессе эксплуатации поверхность штампов подвергается интенсивному износу (таблица 1) [1], а штампы для горячей обработки дополнительно подвержены трещинообразованию.

Методы повышения стойкости штампов можно классифицировать на 5 различных групп: конструкторские, металловедческие, технологические, эксплуатационные и смешанные. Наиболее значимыми для повышения стойкости штампов, являются методы, входящие в металловедческую группу: выбор новых материалов для штампов и обработка штампов технологиями поверхностной инженерии (химико-термическая обработка, карбонитрация, поверхностно-пластическое деформирование рабочих частей алмазным выглаживанием, электроискровое легирование, лазерная обработка, ионное азотирование и т.д.) [2].

Технология электроискрового легирования (ЭИЛ) является универсальной для упрочнения всех видов штампов [2-4]. К достоинствам технологии относятся: высокая адгезия формируемых покрытий, возможность локальной обработки поверхности крупногабаритных изделий, относительная простота, не требующая применения труда высококвалифицированного персонала, отсутствие жестких требований к подготовке поверхности. Технологический процесс нанесения покрытий относится к экологически чистым, характеризуется низким энергопотреблением, высокой рентабельностью и быстрой самоокупаемостью инвестиций.

В качестве электродов для упрочнения штамповой оснастки применяют твердые сплавы марок ВК (WC-Co), ТК (TiC-WC-Co), ТТК (TiC-WC-TaC-Co), получаемые по традиционной технологии порошковой металлургии [4]. Однако стандартные твердые сплавы не всегда обеспечивают высокие эксплуатационные свойства сформированных покрытий. В связи с этим имеется потребность в создании более прогрессивных электродных материалов, в том числе наноструктурированных твердых сплавов. Принципиально новый подход получения электродов для ЭИЛ открылся в связи с освоением технологии самораспространяющегося синтеза (СВС) и его разновидностей силового СВС-компактирования, СВС-экструзии, СВС-литья [5].

Условия эксплуатации и характер износа штампов

Тип инструмента, детали	Условия эксплуатации	Вид и преобладающий характер износа
Разделительные штампы листовой штамповки из инструментальных сталей	Трение в контакте с материалом заготовки при высоких локальных давлениях и температурах на режущей кромке и вприкромочной зоне, локальный контакт с ювенильной поверхностью материала заготовки	Затупление (механический износ) режущей кромки, абразивный, адгезионный, усталостный ифреттинг-износ рабочих поверхностей
Формообразующие штампы горячей штамповки	Трение в контакте с разогретым до пластического состояния металлом заготовки и окалиной	Изменение формы и размеров деформирующих элементов (механический, усталостный и тепловой износ), трещинообразование

В качестве электродных материалов для обработки штамповой оснастки, изготовленных из штамповых сталей (X12МФ, 5ХНМ, ДИ22, ЭИ 958), применяют СВС-сплавы на основе карбида или диборида титана марки СТИМ (синтетический твердый инструментальный материал), покрытия из которых характеризуются высокой износостойкостью и жаростойкостью.

Введение тугоплавкого нанодисперсного компонента в СВС-шихту способствует модифицированию структуры сплавов, что способствует получению покрытий с еще более высокими эксплуатационными свойствами (износостойкость, жаростойкость) по сравнению с немодифицированными (базовыми) сплавами [5].

Разработанные в НИТУ МИСиС материалы соответствуют техническим условиям ТУ 1984-012-11301236-2008 «Электроды композиционные с нанокристаллическими добавками для электроискрового легирования». Для обработки изотермических штампов (материал ЖС6У), перспективны электродные материалы марки ЖС-НТ ($\text{NiAl-X\% TiN}$, где $X = 0, 3, 5, 10, 20 \%$) (ТУ 1984-012-11301236-2008) и ХТН-61 СВС-Ц (ТУ 1798-323-04860509-2005) (Co-основа, 19–20% Cr, 15–16 % Nb, 1,8–2,2 % Mo, 0,8–1,2 % Al, 2,7–3,3 % W, 1,95–2,30 % C).

Особенности формирования покрытий, полученных с помощью СВС-электродов, а также их структура, состав и свойства изучены в работах [3, 6–8].

На основе результатов научных исследований была разработана технология упрочнения штамповой оснастки.

При обработке штамповой оснастки необходимо учитывать, что толщина нанесенного покрытия не должна превышать установленные допуски, а шероховатость покрытия не должна влиять на качество поверхности получаемых изделий.

Технология ЭИЛ-обработки штампов реализуется при оптимальной скорости обработки 1 - 3 мин/см², а в местах, наиболее подверженных износу, возможно увеличение скорости до 5 - 7 мин/см². Для увеличения производительности процесса упрочнения обработке подвергаются только участки в большей мере подверженные износу, а остальная поверхность обрабатывается полосами шириной 1-3 см.

Электроискровая технология упрочнения штамповой оснастки и СВС-электроды были апробированы на различных предприятиях РФ.

В качестве электродов использовали сплавы: СТИМ-40НА (TiC-NiAl), СТИМ-3Б5У (TiC-C₃C₂-Ni-УДА(ультрадисперсный алмаз)), Т2 (TiC-TaC-X18H9Т), СТИМ-3Б (TiC-C₃C₂-Ni), СТИМ-39НА2,5У (TiC-NiAl-УДА), СТИМ-9/20АВн (TiB₂-TiAl-W^{нано}) СТИМ-40НАКНн (TiC-NiAl-NbC^{нано}).

Проведенные испытания, упрочненных по разработанной технологии штампов, показали увеличение стойкости:

- штампов для горячей штамповки – в 2 - 2,5 раз (ОАО «Ступинский металлургический комбинат», ОАО УМПО); в 2,7 раз (ФГУП «ММПШ «САЛЮТ»); в 1,9 раз (ОАО «Контур» г. Новгород); в 1,7 раза (Завод турбинных лопаток, г. С-Петербург);
- штампов вырубных - более в 1,5 раза (завод НИИАП, г. Москва; Авиационно-производственное объединение, г. Н. Новгород);
- штампов вытяжных в 2,0 – 2,2 раза (ОАО «Машиностроительный завод «ЗиО-Подольск»)); более 12 раз (АМО ЗиЛ);
- штампов обрезных в 1,5 раза; штампов гибочных в 3 – 3,5 раза (ОАО «Машиностроительный завод «ЗиО-Подольск»));
- штампов выдавливания – в 3,75 - 5 раз; штампов для изотермической штамповки - в 2,4 раза (ОАО УМПО).

На ряде предприятий проведены работы по внедрению технологии упрочнения штамповой оснастки в действующий технологический процесс.

Для дальнейшего увеличения стойкости штамповой оснастки в ЭИЛ-покрытия можно вводить твердую смазку (MoS₂, WSe₂, графит). Например, с помощью такого приема удалось в 12 раз повысить срок службы матрицы «Вытяжка» (АМО ЗиЛ).

Таким образом, показана эффективность применения технологии электроискрового легирования и новых электродных материалов для повышения стойкости штамповой оснастки. Технология ЭИЛ и СВС-электроды рекомендованы к практическому применению в металлообрабатывающих цехах (производствах) предприятий машиностроения и металлургии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 г.г. (проект № К2-2014-012) в части проведения промышленных испытаний штамповой оснастки.

Библиографический список

1. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х. Упрочнение и увеличение ресурса объектов электроискровым методом: классификация, особенности технологии. / Электронная обработка материалов, 2010, № 5, с. 27-36.
2. Иванов В.И. Повышение ресурса разделительных штампов путем упрочнения и восстановления их электроискровым легированием. / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.20.03-«Эксплуатация, восстановление и ремонт сельскохозяйственной техники», Саранск, 2000, с. 236.
3. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Шевейко А.Н., Вакаев П.В., Замулаева Е.И., Столин А.М. Об успехах применения технологии электроискрового легирования в металлургии и машиностроении. // Цветные металлы, № 6, 2003, с 73-77.
4. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я. и др. Электроискровое легирование металлических поверхностей. // Кишинев: Штиинца, 1985, 195 с.
5. Левашов Е.А., Рогачев А.С., Курбаткина В.В., Максимов Ю.М., Юхвид В.И. Перспективные материалы и технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Учебное пособие. ISBN 978-5-87623-463-6. М.: МИСиС, 2011, 377 с.
6. Левашов Е.А., Кудряшов А.Е., Замулаева Е.И., Погожев Ю.С., Санин В.Н., Андреев Д.Е., Юхвид В.И. Особенности формирования, структура, состав и свойства электроискровых покрытий на никелевом сплаве ЖС6У при использовании сплава ХТН-61 СВС-Ц. // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия, № 2, 2009, с. 33 – 38.

7. Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Аксенов Л.Б., Петров В.М. Разработка технологии электроискровой обработки штамповой оснастки с применением перспективных наноструктурированных твердосплавных электродных материалов.// Труды международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов (НФМ'10)», 22-24 сентября 2010 г, Санкт-Петербург, издательство политехнического университета, с. 232-233.

8. Кудряшов А.Е., Левашов Е.А., Аксенов Л.Б., Петров В.М. Применение технологии ЭИЛ и перспективных наноструктурированных электродных материалов для повышения стойкости штамповой оснастки.// Металлург, №8, 2010, с.44-50.

УДК 629.73.02

АЛГОРИТМ ПРОГРАММИРОВАНИЯ МАРШРУТА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛЕПКИ ПАНЕЛЕЙ ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ

Н. Р. Мустакаев, студент

Научный руководитель: П. Л. Людоговский, канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический
университет имени А.Н.Туполева»

Клепанные соединения по прогнозам остаются основными на ближайшие 20 лет, поэтому развитие автоматизации клепки и связанных с ней техпроцессов является одной из приоритетных задач ведущих авиастроительных компаний. Наиболее совершенной в настоящее время установкой, успешно функционирующей на одном из предприятий отрасли является установка 5013 ТТХ-128/G86 фирмы Gemcor (рис. 1 а).

При программировании маршрута клепки возникает ряд проблем, связанных с большой трудоемкостью ввода исходных данных большого массива координат точек клепки на поверхности собираемого изделия (СИ), а при реализации разработанной таким методом управляющей программы периодически возникают погрешности позиционирования, величина которых превышает их допустимые значения. Это в значительной мере снижает эффективность использования данной установки. Целью работы является разработка эффективного алгоритма программирования маршрута клепки и обеспечение точности и производительности процесса

позиционирования панелей двойной кривизны при их автоматической клепке с моделированием этого процесса.

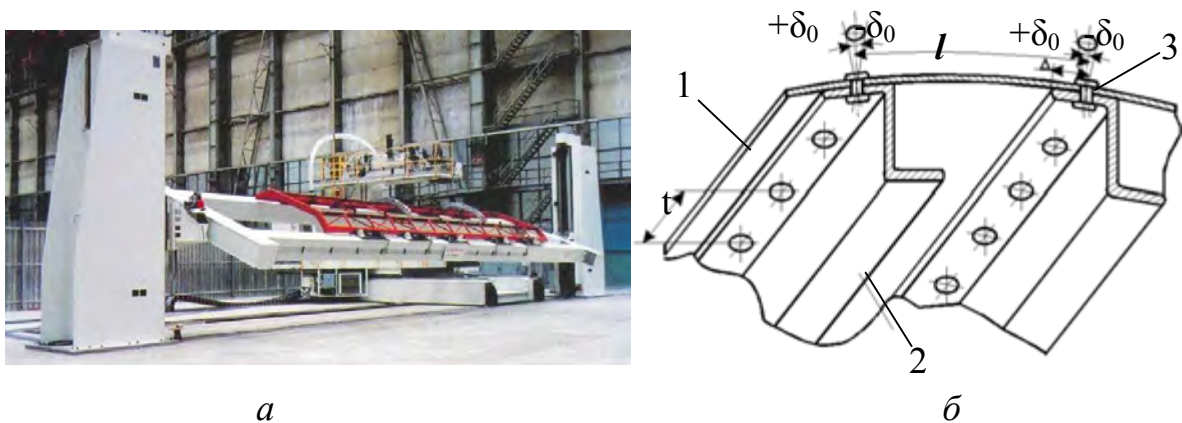


Рис. 1. Установка Gemcor 5013 TTX-128/G86: *а* - общий вид установки; *б* - зона клепки собираемого изделия: 1- обшивка; 2 – стрингер; 3 – заклепка

При позиционировании СИ в процессе автоматической клепки основными контролируемыми параметрами являются:

- допуск на величину перемычки Δ ;
- допуск на шаг клепки t ;
- допуск на перпендикулярность оси заклепки к поверхности клепки δ_0 ;
- допуск на дистанцию l между рядами клепки Δl (рис. 1 б).

Моделирование процесса шагового позиционирования оси клепки с одновременным выравниванием по нормали к ней поверхности СИ на заданный шаг клепки t выполняется по разработанной методике с необходимыми ограничениями на допуски контрольных параметров заклепочных соединений. В моделях процесса позиционирования представлены типовые сечения панелей двойной кривизны современных самолетов.

При моделировании позиционирования СИ измеряются расстояния до поверхности СИ в зоне клепки с помощью датчиков выравнивания 3, 4, 5, а дистанция L между датчиками регулируется в зависимости от допуска на неперпендикулярность оси клепки O_1O_1 к поверхности 1 СИ и определяется граница зоны клепки. Для достижения заданного маршрутом клепки значения шага клепки t в процессе перемещения оси клепки O_1O_1 сверльно-клепального автомата с одновременным выравниванием поверхности СИ в зоне клепки в позицию клепки вычисляется аналитическое численное значение этого перемещения по соответствующей формуле. Это значение вводится в программу маршрута клепки с дальнейшей ее реализацией в автоматическом режиме (рис. 2).

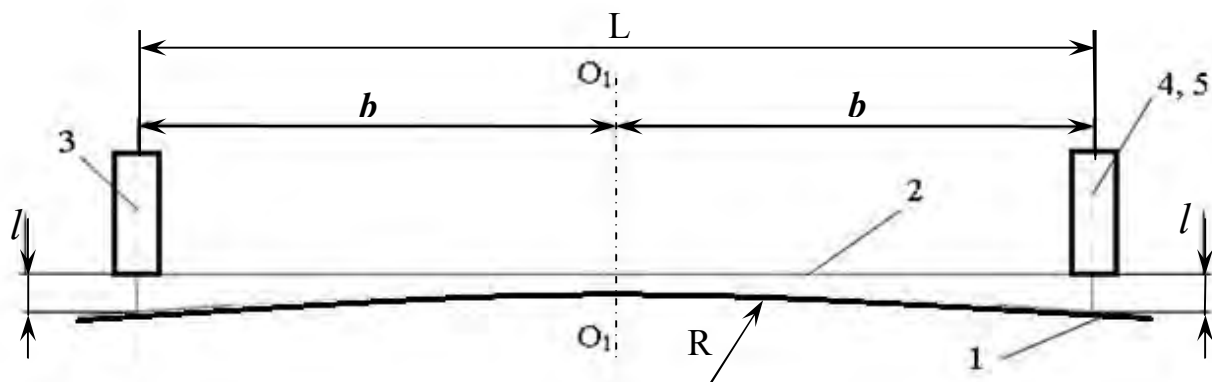


Рис. 2. Варьируемые параметры датчиков управления позиционированием

Расстояние между осью клепки O_1O_1 (параметр b) при моделировании принималось $b_1=210$ мм и $b_2=100$ мм. Измеряемое датчиками 3, 4 и 5 значение расстояния, при котором считается выровненной поверхность СИ по нормали к оси клепки O_1O_1 (параметр l) соответствует значению $l=10,2$ мм, установленному на действующем оборудовании.

Для систематизации моделей процесса позиционирования и анализа этих моделей по критерию точности позиционирования разработаны таблицы-матрицы, в которых цифрами обозначались номера моделей. Каждый номер соответствует процессу позиционирования, при котором зафиксированы значения варьируемых параметров:

- R - кривизна модели;
- b - параметр настройки датчиков выравнивания ($b_1=210$ мм, $b_2=100$ мм);
- N - количество шагов виртуальной клепки ($N_1=10$; $N_2=20$) при заданном значении шага клепки $t=20$ мм.

На рис. 3 представлена одна из моделей позиционирования при $R_1=\text{const}$ при $b=210$ мм, $N=10$.

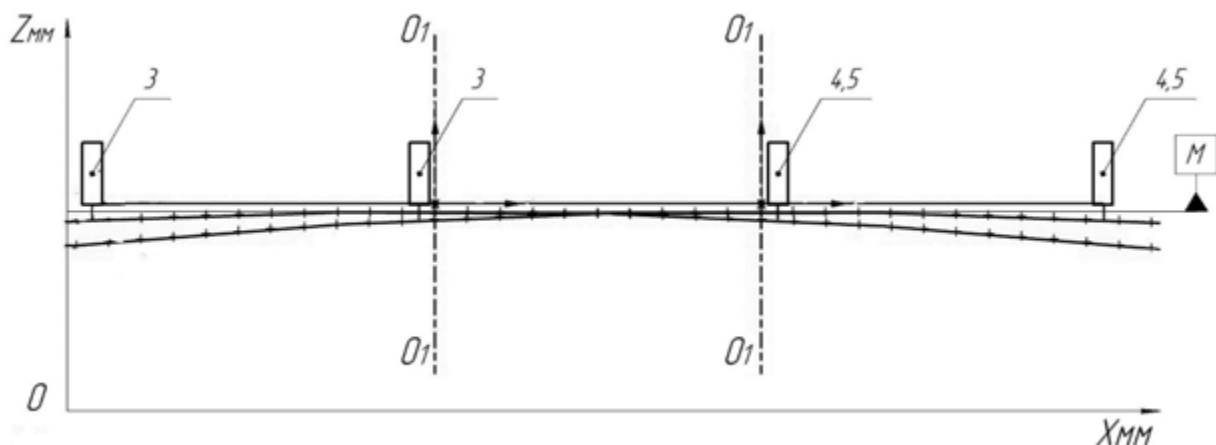


Рис.3. Моделирование процесса позиционирования

По соответствующим графическим значениям погрешности позиционирования δ_{ti} для каждой модели позиционирования построены диаграммы анализа точности процесса позиционирования (рис. 4).

$$\delta_{tij} = f(N),$$

где j - номер модели; i - номер шага позиционирования j -той модели; N - количество шагов клепки.

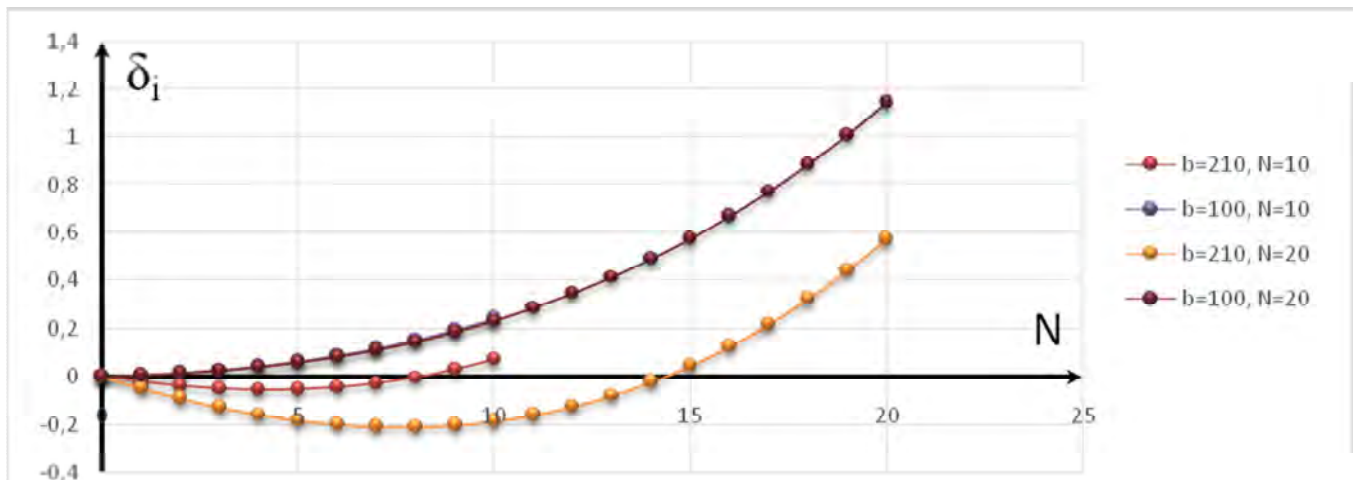


Рис. 4. Пример диаграммы $\delta_{ti}=f(N)$

Предлагаемый алгоритм программирования позиционирования автоматической клепки криволинейных панелей позволяет исключить из этого процесса трудоемкий ввод большого массива координат точек клепки на поверхности СИ, а использование расчетных параметров позиционирования по разработанному алгоритму делает процесс программирования маршрута клепки простым и малотрудоемким при выполнении всех технических требований точности позиционирования маршрута клепки.

УДК 621.793

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХАНОДНОГО ПЛАЗМОТРОНА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ГТУ

А. М. Ахметгареева, научный сотрудник;

А. Б. Березовский, начальник аналитического отдела;

Р. И. Исмагилова, инженер-технолог Научный руководитель:

С. Л. Балдаев, канд. техн. наук, нач. отдела НИР

ООО «Технологические системы защитных покрытий», г. Москва

Энергетические ГТУ работают по различным режимам в зависимости от назначения конкретной установки: если у базовых может быть всего один цикл включения-выключения за год, то у пиковых может быть от одного до трёх циклов в день. Необходимо отметить и тот факт, что энергетическая ГТУ, в отличие от авиационного ГТД, практически всё время работает на максимальных режимах. Вследствие небольшого количества термических циклов, максимальная толщина покрытий на деталях энергетических ГТУ может в 5 раз превышать соответствующую толщину покрытий для авиационных ГТД [1].

Газотермическое напыление является одним из самых мощных инструментов для нанесения термобарьерных покрытий. Необходимо учесть разницу в габаритах деталей – рабочие лопатки, камеры сгорания и другие детали энергетических ГТУ значительно больше авиационных. Это влияет на выбор методов нанесения покрытий – производительность и предельные габариты камеры вакуумных методов осаждения из газовой фазы всегда ниже, чем у методов газотермического напыления.

Технология атмосферного плазменного напыления применяется для получения широкого диапазона покрытий — от металлов и сплавов до тугоплавких керамик [2]. Указанные материалы в виде порошка вводятся в плазменный поток, температура которого на выходе из плазмотрона составляет порядка 15000К, при этом скорость частиц может достигать 300 м/с [3]. Плазменный поток получают при помощи плазмотронов или плазменных горелок, основными частями которых является конусообразный вольфрамовый катод и медный полый цилиндрический анод, за которым расположено сопло. Газ, подаваемый между катодом и анодом, нагревается движущейся электрической дугой, образуя раскалённый поток (рисунок 1).



Рис. 1. Принцип работы плазмотрона

Несмотря на то, что плазменное напыление является установившейся технологией, по-прежнему существуют определенные проблемы, решение которых может привести к значительному усовершенствованию процесса нанесения теплозащитных покрытий. Одна из основных проблем заложена в самой конструкции плазмотрона. Место контакта дуги с ано-

дом меняется из-за сильного потока газа. Это может привести к перегреву или плавлению поверхности анода, а также изменениям длины дуги и, как следствие, флуктуациям мощности и напряжения. Это, в свою очередь, приводит к неравномерному прогреву частиц в потоке и сильно сказывается на качестве покрытия. С целью решения этой проблемы были сконструированы новые плазмотроны различной конструкции.

Разработка плазмотрона с фиксированным местом контакта дуги осуществлена компанией GTV GmbH, продукт получил название DeltaGun (рисунок 2). В плазмотроне DeltaGun единственная дуга образуется между катодом и тремя независимыми анодами. Разделение дуги происходит лишь на выходе из плазмотрона. Катод и аноды разделены увеличенным слоем изолятора. Три независимых анода получены разделением традиционного «анодного кольца» изолирующими пластинами. Подача порошка осуществляется радиально, в фиксированных местах. Кроме того, может быть использовано сопло любого диаметра, в отличие от систем с тремя катодами.

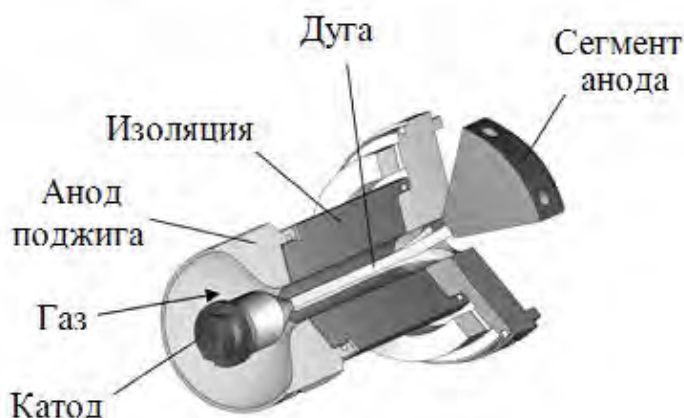


Рис. 2. Схема треханодного плазмотрона

Данная разработка объединяет в себе преимущества ранее известных решений — можно варьировать параметры дуги (и, следовательно, газового потока) количеством изолирующих слоёв; отсутствие флуктуаций из-за фиксированного места контакта дуги с анодом дает необходимое качество покрытий. Уровень флуктуации напряжения составляет ± 3 В, что почти на порядок ниже по сравнению с традиционными горелками. При этом производительность и коэффициент эффективного использования материала значительно выше, чем при использовании традиционных плазмотронов.

В результате отработки режимов нанесения подслоя и керамики были получены следующие результаты (рисунок 3):

- возможность нанесения толстых покрытий из керамических материалов без расслоения и поперечных трещин;
- относительно малое тепловое воздействие на подложку (нагрев не превышает 150°C), что позволяет наносить покрытия на поверхность различных материалов;
- достаточно высокая производительность процесса нанесения: при расходе порошка 150 г/мин КИМ (коэффициент использования материала) может достигать 70% (в зависимости от аэродинамических характеристик частиц порошка).

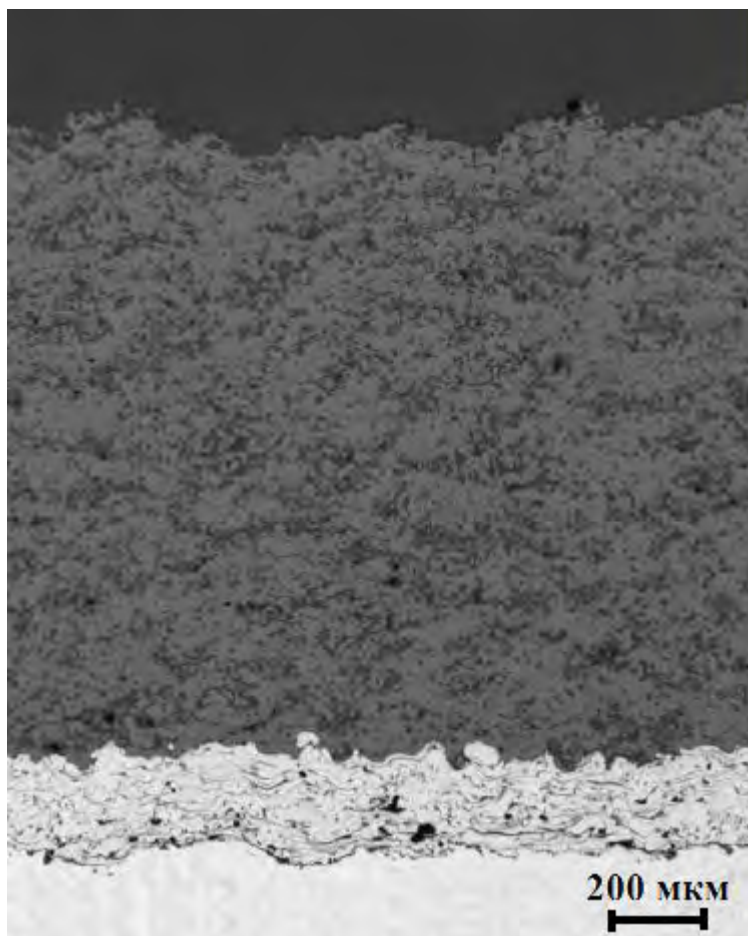


Рис. 3. Микроструктура теплозащитного покрытия, нанесенного с применением треханодного плазмотрона

Библиографический список

1. W.A. Nelson, R.M. Orenstein / TBC Experience in Land-Based Gas Turbines // Journal of Thermal Spray Technology, Vol.6, No.2 (1997), pg.176-180.
2. Fauchais P, Montavon G, Vardelle M, Cedelle J. Developments in direct current plasma spraying. Surf Coat Technol 2006; 201: 1908-21.
3. Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings. Hoboken: John Wiley & Sons 2007.

УДК 621

ПРОЦЕССНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ КАЧЕСТВОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Н. В. Румянцева, канд. техн. наук,
М. Н. Ситникова, канд. техн. наук

Научный руководитель: В.Ф. Безъязычный, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева»

В настоящее время процессный подход к управлению предприятиями, а более детально - управлению небольшими производственными группами и службами – дело совершенно новое и неизведанное. В современной практике остро стоит проблема перехода к управлению организацией на основе процессного подхода. Имеется довольно много методической литературы по типовым подходам к организации процессов, но отсутствует практические примеры по процессному управлению.

Директором по качеству ОАО «НПО «Сатурн» (гарант) были инициированы проекты по моделированию процессов, которые можно разделить на два направления. Первое направление – повышение эффективности работы участков контролей, которое преследовало достижение реальных целей и конкретного результата от внедрения тех или иных мероприятий. Другое направление – совершенствование процессов организации, направленное на улучшение методики управления, либо схемы процесса, которое не предусматривает получение срочного экономического эффекта.

Для достижения цели использовали принципы и инструменты бережливого производства, а также методику «6σ», не предусматривающие инвестиционные вложения.

После того как гарантом были озвучены темы и цели проектов, произошло назначение руководителей рабочих групп (пилоты) проектов из числа руководителей отделов и специалистов службы.

Затем было проведено «начальное» обучение пилотов основам и инструментам лин-преобразований. Надо понимать, что для выполнения проекта нужны специальные знания и методики, поэтому обучение проводится непрерывно на протяжении всего проекта. Кроме обучения пилота, обучение проходят и члены рабочей группы. Во время учебы создается специальная корпоративная культура команды, нацеленная на вовлечение

всего персонала в систему преобразований, в противном случае, проект будет обречен на провал.

Как пример рассмотрим проект по повышению пропускной способности участка рентген-контроля. В связи с увеличением объемов по выпуску продукции, стала актуальной задача проанализировать возможности имеющихся ресурсов и предложить мероприятия по исключению потерь, используя инструменты бережливого производства. Пилот полностью отвечает за полноту и корректность выполнения проекта. Он создает рабочую группу, отбирая сотрудников с определенными знаниями, которые желают работать в проекте и улучшать деятельность производственного участка. Рабочая группа была сформирована из работников участка рентген-контроля, специалистов механо-сварочного цеха и службы главного инженера предприятия. Кроме того, к работе привлекались специалисты других служб.

На первом совещании гарант проекта объявил о целях и задачах запускаемого проекта по преобразованиям, и рабочая группа приступила к выполнению поставленной цели.

Был проанализирован технологический процесс изготовления деталей, предъявляемых на рентген-контроль.

Для анализа технологического процесса были построена карта потока создания ценности, которая помогает выявить узкие участки производства. Поскольку мы рассматриваем процесс как метод производства, то необходимо:

- 1) ..определить процесс;
- 2) проконтролировать наличие ресурсов перед началом процесса;
- 3) реализовать процесс в пределах контролируемых параметров;
- 4) зарегистрировать выход процесса.

При изготовлении деталей сформированный листовый материал сваривают в деталь, представляющую сложную конструкцию. В ходе анализа выявлено, что рентген-контролю подвергаются сварные швы. Уровень дефектности определялся по «6σ» - методология улучшения процессов, основанная на применении теории вероятности и математической статистики.

Собирая данные о процессе и его характеристиках, возникает возможность измерить эффективность процесса, изучить причины дефектов, улучшить процесс, наблюдать и контролировать выход. Выборка составила 105 деталей. Собрали информацию по всем изготовленным и проверенным деталям (количество сварных швов на детали, количество дефектов на сварном шве, фамилия исполнителя и т.д.). Детали сваривали четыре

сварщика на двух постах, работая в две смены. Определили дефекты сварных швов, используя биномиальное распределение вероятностей. Уровень качества процесса определяли по среднему числу дефектов на единицу продукта (dpu). Для моделирования этого случая служит распределение Пуассона. Вероятность дефектов $P(x)$ рассчитывалась по формуле:

$$p(x) = \frac{e^{-dpu} dpu^x}{x!}$$

где x – целое число не меньше нуля; dpu – число дефектов на единицу продукции (больше нуля); $0!$ – равно 1 по определению.

Подставив в формулу $x=0$, упростим выражение:

$$p(x) = e^{-dpu}$$

Данные полученных расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

№ детали	1	2	3	4	5	6
dpu	0,54	1,7	1,7	0,1	0,12	0,9
$P(x)$	0,42	0,82	0,82	0,1	0,12	0,89

Результаты показали, что детали № 4 и 5, независимо от исполнителя, имели выход годной продукции около 90%. У деталей 2, 3 и 6 выход годной продукции составил менее 20%. Дефекты сварки деталей 2, 3 и 6 ранжировали по значимости и выявили, что 82% из выявленных дефектов составил непровар сварных швов рис. 1, который связан с отсутствием удобной оснастки.

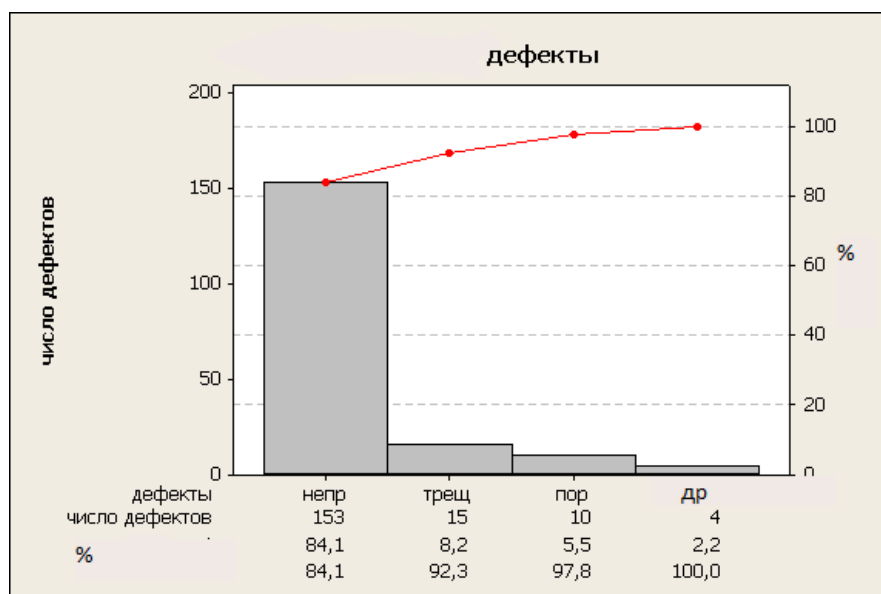


Рис. 1. Диаграмма Парето

По результатам анализа разработан и выполнен план, направленный на улучшение процесса, результаты которого постоянно контролируются. Процессный подход позволяет не только выявить проблемы, улучшить процесс, но и обеспечивает понятные и ясные цели.

Библиографический список

1. Репин В. В., Елиферов В. Г. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2004. – 404 с.

УДК 621.91.01

ВЛИЯНИЕ ПОКРЫТИЙ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДЕТАЛИ ПРИ КОНЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

М. С. Елкин, аспирант

М. В. Тимофеев, канд. техн. наук, доцент

Научный руководитель: В. Ф. Безъязычный, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Обработка материала лезвийным инструментом до настоящего времени есть и останется в обозримом будущем одним из основных способом формообразования. Использование методов концевой фрезерования в таких областях производств как авиа и ракетостроение, а также безальтернативность этого метода при получении деталей сложных форм мотивирует проведение исследований в этой области. Стоит отметить важность создания, в процессе изготовления ответственных деталей, требуемых параметров качества поверхностного слоя. К ним относятся шероховатость поверхности, остаточные напряжения, глубина и степень наклепа. Они в значительной степени определяют надежность высоконагруженных деталей авиационного двигателя. В настоящее время параметры качества поверхностного слоя, как правило, формируются на доводочных операциях, что удорожает технологический процесс. Существуют зависимости, позволяющие расчетным путем назначать режимы обработки, обеспечивающие требуемые параметры качества поверхностного слоя, а, следова-

тельно, управлять ими [1]. Таким образом, при назначении оптимальных режимов резания можно уменьшить количество доводочных операций.

На данный момент широкое распространение инструментов с покрытием, в том числе и наноструктурированными покрытиями, приводит к повышению производительности обработки изделий, в то же самое время отсутствуют исследования, позволяющие учесть влияние наноструктурированных покрытий при фрезеровании концевыми фрезами на процессы формирования поверхностного слоя.

Для решения задачи теоретического расчета параметров качества поверхностного слоя деталей при концевом фрезеровании инструментами с наноструктурированными покрытиями была использована методика Безъязычного В.Ф. [1], учитывающая отдельно силовой и температурные факторы в зоне резания, с расчетом основных параметров резания для процесса фрезерования концевыми фрезами.

Покрyтия значительно снижают силы и температуры в зоне резания, что обусловлено снижением коэффициента трения материала покрытия с материалом детали. Раздельный учет этих факторов позволит с большей точностью рассчитывать остаточные напряжения. Учет покрытия легко провести, по методике, изложенной в работе [2], где указано влияние покрытия на безразмерный комплекс B , характеризующий тангенс угла наклона условной плоскости сдвига стружки.

Известно, что в зоне резания действует объемный быстродвижyщийся источник тепла, представленный на рис. 1 [3]. В зоне резания возникает температурное поле, которое перемещается по всей поверхности детали вдоль оси x совпадающей с вектором скорости резания.

Однако для расчета напряжения от теплового фактора необходимо рассматривать сечение данного температурного поля с его максимальными значениями. Для этого методом итерации определяются координаты, соответствующие максимуму температуры. Данное нововведение увеличивает точность расчетов, так как в зависимости от различных условий три источника тепла действующие в зоне резания будут по-разному определять максимум температурного поля, что не позволяет использовать какое либо фиксированное значение координаты x , при которой температура максимальная.

Далее проводится расчет температурных остаточных напряжений с учетом упрочения обрабатываемого материала. Границы, в которых напряжения переходят из упругой области в пластическую при нагревании и охлаждении определяются методом итерации, что также является ново-

введением по сравнению с исходной методикой и позволяет производить расчет без упрощений исходных зависимостей.

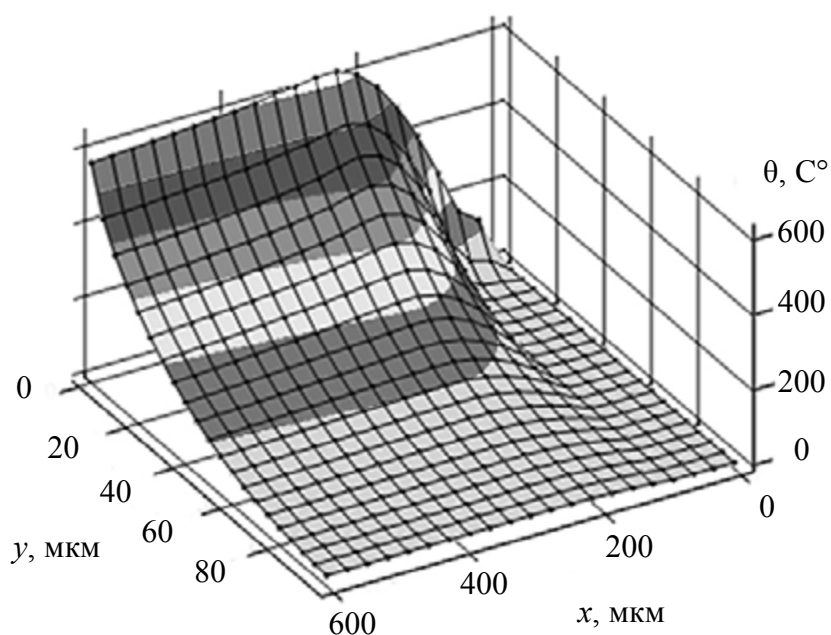


Рис. 1. Температурное поле объемного источника тепла в поверхности детали при фрезеровании

Напряжения от силового фактора определяются по методике, изложенной в [4]. Существенным нововведением в данной работе является то, что граница, в которой напряжения остаются в материале детали определяется методом итерации из теоремы Хубера-Мизеса для плоского напряженного состояния.

На основе вышеперечисленного были проведены исследования влияния различных параметров обработки на величину остаточных напряжений при концевом фрезеровании. Расчеты проводились при следующих режимах обработки: материал детали ХН77ТЮР, материал фрезы В10ХОМ; диаметр фрезы 8 мм, $\gamma=15^\circ$; $\alpha=5^\circ$; $\delta_1=0,05\text{мм}$; $n=5000$ об/мин; $t=3$ мм; $h_{\text{поп}}=3$ мм; угол наклона оси фрезы $\lambda=10^\circ$. Расчеты представлены на рис. 2.

Как можно заметить из графика покрытия значительно снижают остаточные напряжения. Расчетное определение параметров качества поверхностного слоя при концевом фрезеровании позволит более рационально назначать последующие доводочные операций, а также повысить производительность не в ущерб качеству изделий.

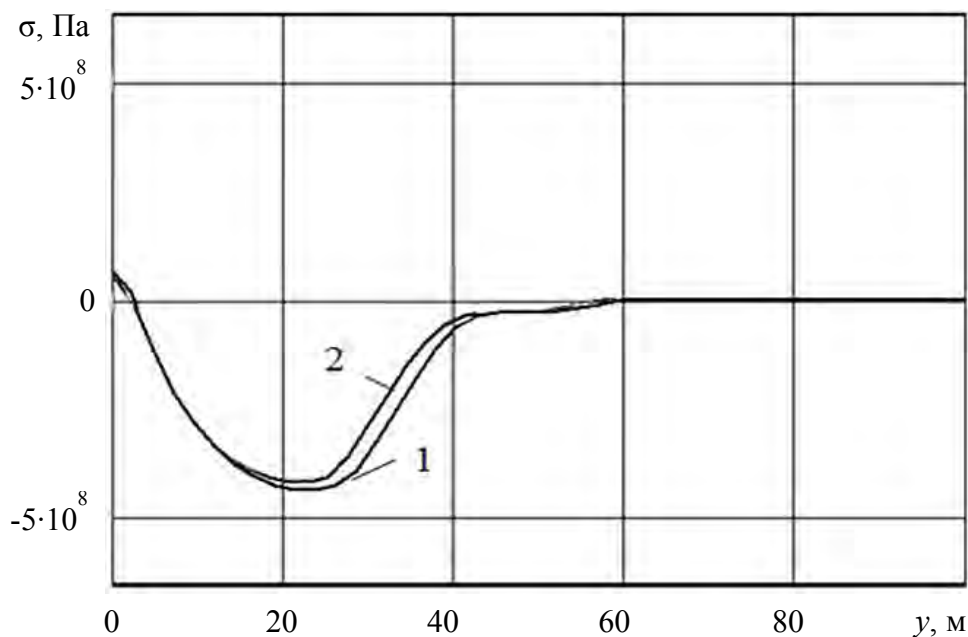


Рис. 2 График отражающий изменение остаточных напряжений при фрезеровании инструментом без покрытия – 1 и с покрытием (Ti,Si)N - 2

Библиографический список

1. Безъязычный, В.Ф. Метод подобия в технологии машиностроения [Текст] / В.Ф. Безъязычный. – М.: Машиностроение. – 2012. – 320 с.
2. Фоменко, Р.Н. Исследование процесса обработки точением инструментами с нанопокровтиями с целью обеспечения требуемого качества поверхностного слоя деталей [Текст]: Дисс. ... канд. техн. наук /Р.Н. Фоменко. – Рыбинск, 2010. – 227 с.
3. Резников, А.Н. Теплофизика процессов механической обработки [Текст] / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение. – 1981. – 279 с.
4. Кравченко, Б.А. Повышение выносливости и надежности деталей машин и механизмов [Текст] / Б.А. Кравченко. // Труды КПТИ. – 1980. – № 2. – с. 17.

УДК 006.7

СОЗДАНИЕ ОСНОВ ПО НОРМАМ ТОЧНОСТИ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Д. Н. Крюков, аспирант

Юго-Западный Государственный Университет, г. Курск

В настоящее время важным этапом развития экономики России является выпуск новых видов продукции в машиностроительном, космическом и авиационном комплексах. В условиях жесткой конкуренции предприятий требуется значительное сокращение цикла технологической подготовки производства. Широкое применение малогабаритного металлообрабатывающего оборудования (ММО) подразумевает под собой ресурсосбережение, энергоэффективность, сокращение финансовых затрат на приобретение и содержание данного оборудования предприятиями. Детали миниатюрного размера и их компоненты требуют высокой точности обработки. Предположим, что доля геометрической погрешности не зависит от размера обрабатываемой детали, и составляет примерно 30-40 % в общем балансе погрешности обработки. Согласно действующим нормам и стандартам, определено – чем меньше размер обрабатываемой детали, тем больше погрешность.

В настоящее время разработка основ по нормам точности малогабаритного металлообрабатывающего оборудования не осуществлена.

С уменьшением размеров обрабатываемой детали увеличивается допуск на обработку. Следствием этого будет являться работа с применением доводочных и подгоночных операций для достижения заданных показателей точности.

В данной работе рассмотрены подходы к обоснованию норм точности ММО:

- на основе действующих стандартов;
- на основе вариационного метода расчета точности станков.

Задачей определения параметров погрешностей металлообрабатывающих станков является расчет точности при обработке деталей, после чего требуется провести оценку реальных погрешностей полученного результата.

Учитывая связи аргументов, уравнение обработанных цилиндрической и торцовой поверхности имеет вид (1):

$$r_{0u} = \begin{pmatrix} R \cos \varphi \\ R \sin \varphi \\ z \end{pmatrix}, \quad r_{0T} = \begin{pmatrix} x \cos \varphi \\ x \sin \varphi \\ c \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Схема обработки поверхностей детали (1) на станке представлена на рис. (2):

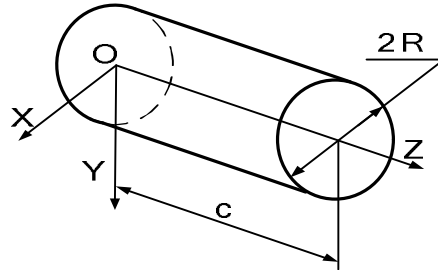


Рис. 1. Цилиндрическая и торцевая поверхность, обрабатываемая на станке

Используя известные уравнения нормалей к цилиндрической и торцевой поверхностям (1), в работе [1] представлены балансы нормальных погрешностей при обработке цилиндрической и торцевой поверхности (3).

$$n_u = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix}; \quad n_T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (2)$$

Балансы нормальных погрешностей цилиндрической и торцевой поверхностей (3):

$$\begin{cases} \Delta r_{m_{\text{ц}}} = \delta_{x0} \cos \varphi + \delta_{y0} \sin \varphi - \alpha_0 z \sin \varphi + \beta_0 z \cos \varphi + \beta_1 z + \sum_{i=1}^3 \delta_{xi} \\ \Delta r_{m_{\text{т}}} = \alpha_0 x \sin \varphi - \beta_0 x \cos \varphi - (\beta_1 + \beta_2)x + \sum_{i=0}^3 \delta_{zi} \end{cases} \quad (3)$$

Анализ системы действующих нормативных документов показал существенную неполноту стандартов на нормы геометрической точности малогабаритного металлообрабатывающего оборудования [2].

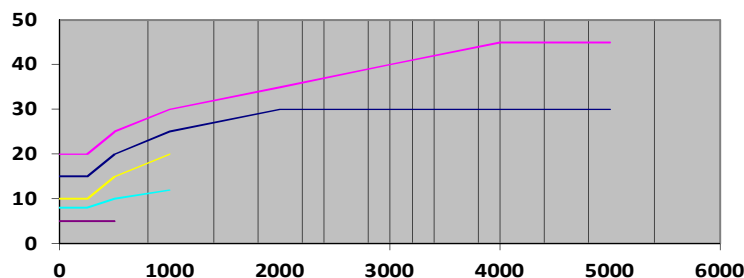


Рис. 2. Прямолинейность движения продольного перемещения суппорта в горизонтальной плоскости по ГОСТ 18097-93

Действующие стандарты по нормам точности металлообрабатывающего оборудования рассчитаны на диаметр обработки от 0 до прибли-

тельно 4000 мм, т.к. у всех рассмотренных выше станков точность обработки остается неизменной от начальной точки обработки изделия до следующей [5].

Для примера, рассмотрен станок фирмы Tsugami B0265- II. Станок предназначен для производства высокоточных мелких компонентов, таких как запчасти для оргтехники, медицинского оборудования, цифровых камер, сотовых телефонов, оптической связи, автомобильных деталей и т.д. Схема станка находится на рисунке 3, структура формообразующей системы станка – рис.4. Станок обрабатывает детали от 8 до 30 мм.

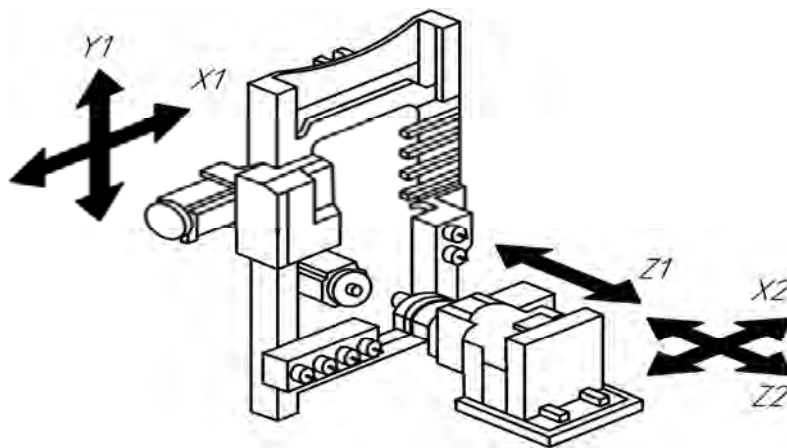


Рис. 3. Схема станка Tsugami B0265- II

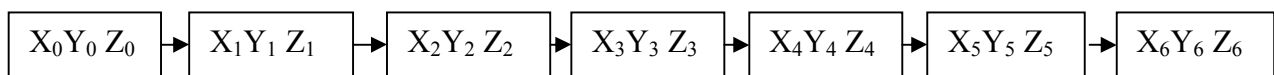


Рис. 4. Структура формообразующей системы станка Tsugami B0265- II

В формообразующей системе станка происходят два процесса – точение и шлифование поверхностей. Обработка осуществляется при процессе точения – точечным режущим инструментом (резцом расточным), при процессе шлифования – фрезой прямозубой. Функция формообразования станка при обработке отверстий детали имеет вид (4):

$$\begin{cases} r_{01} = A^1(x_2) A^3(z_2) A^2(y_1) A^1(x_1) A^3(z_1) A^6(\varphi) r_{u1}; \\ r_{02} = A^1(x_2) A^3(z_2) A^2(y_1) A^1(x_1) A^3(z_1) A^6(\varphi) r_{u2} \end{cases} \quad (4)$$

где A^1 – матрица перемещения по оси X; A^2 – матрица перемещения по оси Y; A^3 – матрица перемещения по оси Z; A^6 – матрица вращения вокруг оси Z; r_u – радиус-вектор режущего инструмента.

С учетом связей аргументов и нормалей функции формообразования, и уравнений обрабатываемых на данном станке поверхностей, балансы точности, включающие в свой состав только геометрические погрешности, имеют вид:

$$\begin{cases} \Delta r_2 = \sum_{i=0}^5 \Delta z - x_1 \sum_{i=0}^3 \beta - y_1 \sum_{i=0}^2 \alpha - \beta_0 x + \sum_{i=0}^5 \beta + \sum_{i=0}^5 \alpha (\sin(f)x(\sin(f) + \cos(f)) + c \operatorname{sgn}(\cos(2f))) \\ \Delta r_1 = (-x_1 \sin(2f) \sum_{i=0}^5 \gamma) - y_1 (\sum_{i=0}^2 \gamma) + (z_1 + z_2)(\beta_0 + \beta_1) + z_1 (\sum_{i=2}^4 \Delta \beta) + \sum_{i=0}^5 \Delta x \cos(2f) - \sum_{i=0}^5 \Delta y - \\ - z_1 \sum_{i=0}^3 \alpha + z_2 \sum_{i=0}^1 \alpha + x_1 \sum_{i=0}^3 \gamma + \gamma_0 x_2 + x_1 (\cos(f)^2 - \sin(f)^2) \sum_{i=0}^5 \gamma \sin 2f \end{cases}$$

В балансы точности станка входят как компенсируемые, так и некомпенсируемые погрешности станка, причем нормирование точности осуществляется только для некомпенсируемых погрешностей.

В связи с этим проанализированы табличные данные [3], которые находятся в ГОСТ 18097-93 «Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности» и параметры геометрической точности станка. Анализ данных дает возможность рассмотреть представленные кривые (рис. 5).

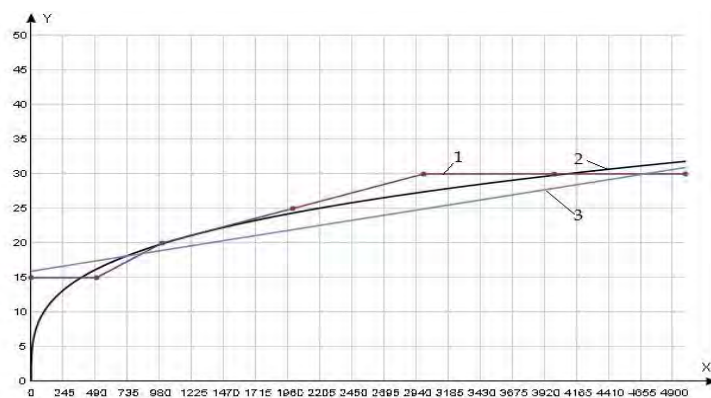


Рис. 5. Зависимость качества точности от диаметра обрабатываемой детали для прямолинейности движения продольного перемещения суппорта в горизонтальной плоскости по ГОСТ 18097-93 точности Н1

Линия 1 на графике показывает табличные данные, которые представлены в ГОСТ 18097-93. Линия 3 графика показывает функцию $y = a + x * b$, где, $a=15,938$, $b= 0,0034$. Данную расчетную функцию не рассматриваем, так как она не максимально подходит к табличным данным. Линия 2 показывает функцию регрессии сгенерированной с помощью $y = a \times x^b$, где, $a=2,646$, $b=0,292$. Отсюда следует вывод, о том, что при заданных табличных данных максимально подходящая функция определения нормы точности для деталей подходит функция $y = a \times x^b$. Средняя ошибка аппроксимации при заданном расчете равна 13 %.

Рассмотрен второй нормативный документ и проанализированы приведенные кривые по DIN 8606:1976-06 [4] и сгенерированная функцию $y = a \times x^b$, где, $a=0,1835$, $b=0,6404$ (рис. 7). Зависимость установленных значений представлена на рисунке 8. Средняя ошибка аппроксимации в исследуемом анализе равна 24%, но большая часть её идет по распределе-

нию обработки деталей до 500 мм, поэтому ошибка аппроксимации имеет значительный вес.

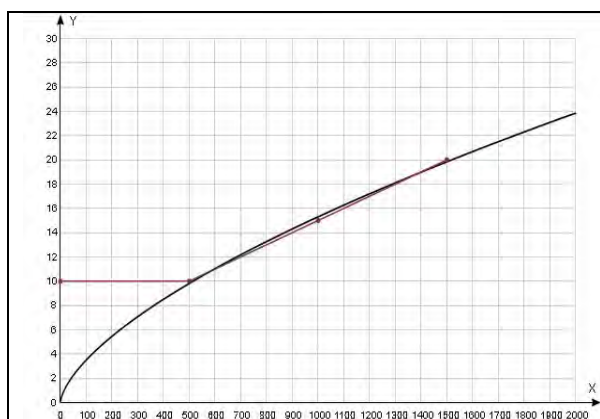


Рис. 6. Зависимость качества точности от диаметра обрабатываемой детали для прямолинейности движения продольного перемещения салазок суппорта в горизонтальной плоскости по DIN 8606:1976-06, диаметр обработки от 0 до 2000мм

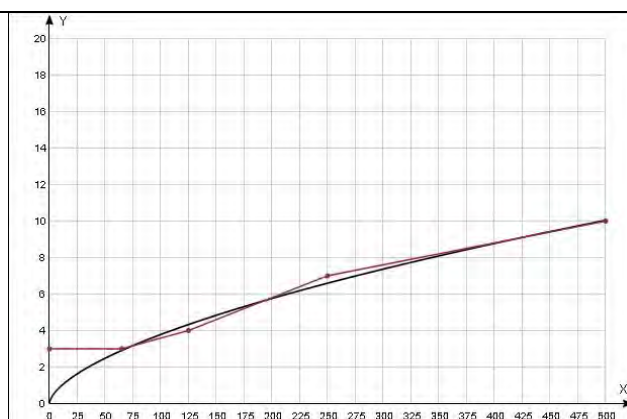


Рис.7. Зависимость качества точности от диаметра обрабатываемой детали для прямолинейности движения продольного перемещения салазок суппорта в горизонтальной плоскости, диаметр обработки от 0 до 500мм

В связи с этим уменьшены рассматриваемые диаметры и проанализированы приведенные кривые по DIN 8606:1976-06 и сгенерированную функцию $y = a \times x^b$, где, $a=0,2313$, $b=0,6078$. Рассмотренная зависимость представлена на рисунке 8. Средняя ошибка аппроксимации равна 19%. В связи с этим уменьшены обрабатываемые детали до мини-размеров (рис. 9).

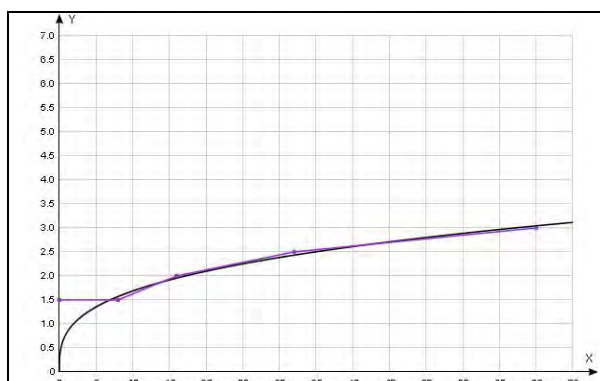


Рис. 9. Зависимость качества точности от диаметра обрабатываемой детали для прямолинейности движения продольного перемещения салазок суппорта в горизонтальной плоскости, диаметр обработки от 0 до 100мм

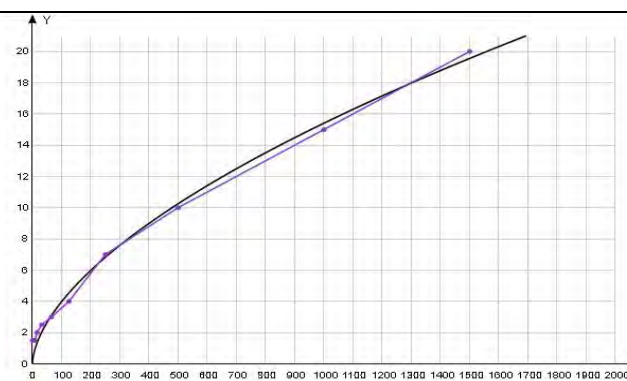


Рис.10. Зависимость качества точности от диаметра обрабатываемой детали для прямолинейности движения продольного перемещения салазок суппорта в горизонтальной плоскости, диаметр обработки от 0 до 2000мм

Проанализирована приведенная кривая по DIN 8606:1976-06 и сгенерированная функция $y = a \times x^b$, где, $a=0,8151$, $b=0,3156$. Средняя ошибка аппроксимации равна 11%.

Построена полная (обобщающая) функция по точкам и сгенерированная общая ошибка аппроксимации (Рис. 10). Сгенерированная функция $y = a \times x^b$, где, $a=0,2655$, $b=0,5879$. Средняя ошибка аппроксимации равна 9,86 %. Вывод: Рассмотренные документы и стандарты на металлообрабатывающее оборудование отечественной и зарубежной станкостроительной промышленности показывают, что параметры геометрической точности ММО на предприятиях не учтены. Проведенный анализ сгенерированных функций показал, что средняя ошибка аппроксимации находится в интервале от 8 до 10 % и точность обрабатываемых деталей на исследуемом металлообрабатывающем оборудовании уменьшена до мини-размеров. Таким образом, учёт и стандартизация параметров геометрической точности малогабаритного металлообрабатывающего оборудования позволит получить всестороннюю оценку предельно достижимой точности обработки деталей и повышение качества выпускаемых деталей.

Библиографический список

1. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
2. ГОСТ 18097-93 «Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности».
3. Крюков Д.Н., Ивахненко А.Г. Разработка норм точности на малогабаритное и миниатюрное металлообрабатывающее оборудование/ Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 1. – Ч.1. – С. 16-21.
4. DIN 8606:1976-06 «Станки токарные нормальной точности для обработки деталей диаметром до 800 мм. Условия приемки»
5. Крюков Д.Н., Ивахненко А.Г., Аникеева О.В. Стандартизация параметров геометрической точности агрегатных станков// Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии №3-2 (299), 2013.

УДК 621

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ПУТЕМ УЛУЧШЕНИЯ РАБОТЫ С ПРЕДПРИЯТИЯМИ-ПОСТАВЩИКАМИ

В. Н. Ситников, аспирант

Научный руководитель: В. В. Непомилуев, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева»

В настоящее время российское машиностроение в области производства газоперекачивающих агрегатов переживает этап подъема.

Мировой лидер по добыче и транспортировке газа ОАО «Газпром» нацелен на создание новых магистральных газопроводов, в том числе строительство газопровода по проекту «Южный поток».

Проект «Южный поток» направлен на укрепление энергетической безопасности Европы. Это очередной реальный шаг в реализации стратегии «Газпрома» по диверсификации маршрутов поставок российского природного газа. Новая газопроводная система, отвечающая самым современным экологическим и технологическим требованиям, значительно повысит безопасность энергоснабжения всего европейского континента.

Для реализации данного проекта ОАО «Газпром» планирует закупить у машиностроительных компаний ряд газоперекачивающих агрегатов, соответствующие современным требованиям по качеству, экологическим характеристикам, топливной эффективности, автоматике, внешнему виду и прочим параметрам. Таким образом, чтобы стать поставщиком ОАО «Газпром» нужно изготавливать продукцию соответствующую его требованиям или он найдет себе кого-то другого, способного это сделать быстрее и лучше.

Проблема качества в любой отрасли, в том числе и машиностроении, становится актуальной тогда, когда развитие технологии и рынка приводит производителя к необходимости более внимательно относиться к требованиям общества и потребителя. Проблема качества становится ключевой для российских организаций.

Затраты компании на закупку сырья и комплектующих деталей у предприятий - поставщиков составляют в среднем 50 – 70 % себестоимости выпускаемой продукции, поэтому производство продукции, отвечающей требованиям покупателя, находится в прямой

зависимости от качества поставляемой продукции предприятий - поставщиков.

От эффективности системы по работе с поставщиками во многом зависит успешное выполнение производственной программы, а также достижение экономических показателей всего предприятия. В связи с этим эффективная работа с предприятиями - поставщиками имеет большое значение для изготовителя продукции.

В настоящее время для получения заказа от ОАО «Газпром» на современных машиностроительных компаниях применяется ряд методов работы с поставщиками с целью контроля, улучшением качества закупаемой продукции и развития партнерских отношений.

1. Анализ и заключение договора на закупаемую продукцию.

Качество продукции напрямую зависит от качества составления договора. Следует рассматривать два аспекта работы с договором до его заключения: разработка договора заказчиком и анализ договором поставщиком.

В договоре с поставщиком должны быть обязательно отражены следующие аспекты:

- технические требования и требования по качеству предъявляемые к продукции,
- гарантийный срок на продукцию,
- возможность проведения аудитов системы качества поставщика поставщика,
- предоставление с продукцией обязательных сопроводительных документов (сертификаты, паспорт или декларация соответствия).

Лучшим вариантом оформления требований к продукции поставщиков является разработанная инструкция, в которой будут учтены все требования по качеству. Инструкция должна быть адаптирована для каждого вида продукции и включена в договора с поставщиками.

2. Оценка предприятия – поставщика.

В соответствии со стандартом ИСО 9001 организация должна оценивать и выбирать поставщиков на основе их способности поставлять продукцию в соответствии с требованиями организации.

В настоящее время существует четыре способа получения информации о поставщике:

- анкетирование;
- телеконференция;
- поиск информации о поставщике в Интернет;
- проведение аудита системы качества поставщика.

Аудиты предприятий - поставщиков проводятся с целью:

- определения способности поставщиков обеспечить поставку продукции требуемого уровня качества;
- предупреждения снижения уровня качества закупаемой продукции;
- установления системы взаимоотношений с поставщиками по реализации совместных программ в области качества.

Эффективность проведенных проверок выражается в снижении уровня дефектности продукции, поставляемой предприятиями-поставщиками.

3. Входной контроль продукции.

Сам процесс входного контроля не имеет непосредственного влияния на количество продукции с несоответствиями, поставленной поставщиками. Однако данные, полученные по результатам входного контроля, являются средством управления качеством работы поставщиков.

Главная цель входного контроля – накопление данных для выбора поставщиков и для совершенствования эффективности работы действующих поставщиков.

Процесс контроля не добавляет ценности продукту, он призван не допустить в производство покупную продукцию, не соответствующую требованиям компании.

4. Постоянный мониторинг качества закупок.

Вся информация по входному контролю продукции должна быть наглядной и понятной (графики, диаграммы) для анализа. Анализ необходим для разработки корректирующих и предупреждающих действий, направленных на улучшение закупаемой продукции, нельзя довольствоваться только коррекцией.

5. Приемочный контроль на поставщике.

Приемочный контроль на поставщике, осуществляемый заказчиком с целью подтверждения ее соответствия до отгрузки.

Приемочный контроль на предприятии - поставщике значительно снижает уровень дефектности поставленной продукции. Кроме того, приемочный контроль представляет собой быстрый способ предотвращения поставки некачественной продукции, решает проблемы потребителя, но не производителя товара. В качестве альтернативы предлагается делегирование полномочий надзора за качеством специалисту по качеству поставщика. Для этого представитель поставщика проходит специальное обучение. Представитель с делегированными полномочиями будет собирать реальную информацию

по уровню дефектности для осуществления анализа стабильности процесса.

Нахождение такого специалиста на предприятии - поставщике позволяет контролировать процесс, срочно принимать корректирующие воздействия в случае обнаружения разлаженности процесса, а, следовательно, снизить количество продукции с несоответствиями от данного поставщика.

6. Передача технической и нормативной документации поставщикам и обмен информацией.

Значительное влияние на качество продукции поставщиков оказывает своевременный обмен актуальной информацией. Непредставление или несвоевременное доведение информации по заказываемой продукции до служб, взаимодействующих с поставщиками, и до поставщиков может привести к непреднамеренному невыполнению поставщиками требований заказчика. В данном контексте вопрос обмена актуальной информацией можно рассматривать в трех аспектах: обмен информацией внутри предприятия между подразделениями, доведение поставщиком актуальной информации до предприятия, доведение до поставщика актуальной информации.

Для своевременного обмена информацией и наиболее эффективного взаимодействия с поставщиками в настоящее время применяются информационно-обменные порталы для управления взаимоотношениями с поставщиками – E-SRM (Electronic Supplier Relationship Management). Функционирование портала распространяется, как на обмен информацией между заказчиком и поставщиками, так и на обмен данными, связанными с взаимодействием со службами внутри предприятия по вопросам качества закупок.

7. Конференция поставщиков

Конференция поставщиков представляет собой масштабное мероприятие организованное компанией заказчиком с участием представителей нескольких предприятий – поставщиков объединенных одной целью.

Задачи конференции:

- обмен опытом по управлению качеством, сокращению циклов изготовления, снижению себестоимости продукции;
- построение взаимовыгодных отношений, направленных на совершенствование производственных систем предприятий;
- доведение до поставщиков требований и ожиданий потребителя.

Все вышеперечисленные методы по работе с поставщиками частично или полностью используются на всех предприятиях машиностроения, но в настоящее время не до конца ясна результативность и тем более эффективность данных методов.

Необходимость применения мирового опыта и комплексного подхода к совершенствованию системы качества по работе с поставщиками ставит задачу применения новых концепций, позволяющих интегрировать данные методы и модели системы работы с поставщиками.

Библиографический список

1. Адлер Ю. П. Возлюби своих поставщиков // Методы менеджмента качества. - 1999. - № 8. - с. 3-15.
2. Баркалов, С.А. В.Н. Бурков, П.Н. Курочка, Н.Н. Образцов Задачи управления материально-техническим снабжением в рыночной экономике. М.: ИПУ РАН, 2000. - 58 с.
3. Майкл Донован, Управление цепочками поставок в соответствии с принципами Лиин, 2010.- 142 с.
4. Мастер класс: «Развитие поставщиков в соответствии с принципами ЛИН». - М.: Оргпром, 2010. - 112 с.
5. Смирнов А.Ю. Управление эффективными поставками. Кн. 5: Учеб. Пособие. - Жуковский: МИМ ЛИНК, 2003. - 90 с.

КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РЕНТАБЕЛЬНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОСЛОЙНОГО СИНТЕЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОПЫТ ФГБОУ ВПО «УГАТУ» В ОБЛАСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

П. В. Ладнов, инженер, аспирант

В. В. Смирнов, ведущий инженер

В. В. Барзали, ассистент, аспирант

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Принимая во внимание тот интерес к аддитивным технологиям, лавинообразно возросший за последние 3-5 лет, и учитывая объективные технологические преимущества такого метода производства изделий,

встает вопрос об экономической эффективности применения аддитивного производства в реальном секторе.

В настоящее время в России аддитивное производство рассматривается, чуть ли не как панацея, пользователи воодушевлены теми возможностями, которые дает послойный синтез, однако публикаций, посвященных проблемам, встречающимся при переходе предприятия на аддитивное производство крайне мало. Стоит отметить, что, несмотря на это на прошедшей 10 февраля в ФГУП «ВИАМ» научно-практической конференции «Аддитивные технологии в российской промышленности», часть докладов была посвящена именно тем проблемам, с которыми уже сейчас, при относительно нераспространенном на Российских предприятиях послойном синтезе, сталкивается реальное производство.

Одним из ключевых критериев при выборе технологии получения той или иной детали является экономическая эффективность технологического процесса. Перед руководителем предприятия всегда стоит проблема выбора наиболее подходящего в данных условиях процесса. В этой связи встает вопрос о количественной оценке экономической эффективности применения аддитивного производства на предприятии.

Для оценки такой эффективности нужно выработать определенные критерии, позволяющие определить применимость АТ к данной конкретной детали и виду производства.

В большинстве случаев, производители продукции обращают свое внимание на такой параметр как время изготовления изделия. Не секрет, что подчас послойный синтез, или более раннее характерное название «быстрое прототипирование», просто феноменально быстр при изготовлении, как прототипов, моделей, так и уже готовых функциональных изделий. Другим, наиболее распространенным критерием является сложность самих изделий. Определенно, эти критерии подчас являются ключевыми, однако не единственными, а оценка, например, сложности изделия носит порой чисто умозрительный характер.

Ввиду вышеизложенного, коллектив исследователей лаборатории аддитивных технологий и перспективных литейных технологий кафедры «Машин и технологии литейного производства» Уфимского авиационного технического университета, предлагает выработать алгоритм объективной оценки возможности изготовления той или иной детали методами послойного синтеза, учитывая экономическую целесообразность и особенности производства.

Представлена классификация типов производств и их типичных экономических моделей, показаны характерные возможности задействования аддитивных технологий для каждого типа производств.

На основе характерной номенклатуры были определены критерии оценки сложности изделия, учитывающие не только геометрические параметры, но и параметры файла объемной математической модели (STL); сделан регрессионный анализ и определен комплексный взвешенный фактор сложности, позволяющий оценить рентабельность использования технологий послойного синтеза.

УДК 621.923

УПРАВЛЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЕМ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ХВОСТОВИКОВ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ

Д. И. Волков, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П. А. Соловьева»

В современном производстве процесс глубинного шлифования находит широкое применение при обработке профильных хвостовиков лопаток турбины авиационных двигателей и тепловых энергетических установок. Основным и наиболее опасным скрытым дефектом, который достаточно часто встречается на деталях после обработки, является образование мелких очагов зарождения разрушения материала и соединение их в микротрещины, которые обнаруживаются лишь при контроле методом люминесцентной дефектоскопии.

Исследование закономерностей формирования напряжённого состояния в поверхностном слое детали и предупреждение разрушения материала является важным этапом управления выходными параметрами качества деталей и их эксплуатационных характеристик.

Согласно современным представлениям выделяют три фактора, оказывающих основное влияние на распределение остаточных напряжений в поверхностном слое:

- пластическая деформация поверхностного слоя под действием сил резания абразивных зерен;
- упругопластические деформации, обусловленные неравномерным тепловым расширением металла в поверхностном слое при его

нагреве в результате трения и пластических деформаций, производимых абразивными зёрнами;

- структурно-фазовые превращения в металле при его нагреве и быстром охлаждении.

Формирование растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое деталей обычно объясняется превалирующим действием теплового фактора, а сжимающих – силового. Однако, известен ряд работ, посвященных термоупрочнению поверхностного слоя, когда под действием специфических тепловых условий в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения. Аналогичные тепловые условия создаются и в процессе глубинного шлифования, но, кроме того, проявляется силовое действие абразивных зёрен, что усложняет процесс и требует совместного учета нескольких факторов.

Экспериментальные исследования формирования напряжённого состояния поверхностного слоя при глубинном шлифовании проводились на образцах из никелевого сплава ХН77ТЮР, который не подвержен структурным изменениям, но обладает высокой чувствительностью к пластическим деформациям. Изучалось влияние различных факторов глубинного шлифования на величину и характер распределения остаточных напряжений, степень и глубину наклёпа, физическое уширение рентгеновских дифракционных линий.

Исследование параметров качества проводилось на установках: Пирон-4, ПМТ-3, Дрон-2. Образцы исследуемого материала подвергались предварительному 2-х часовому отжигу в вакууме при температуре 850оС, после чего проводилась их обработка на плоскошлифовальном станке для глубинного шлифования. Характеристика абразивного инструмента 24AF120G12V (24A10ПВМ212K5), в качестве охлаждающей среды применялась синтетическая СОТС с концентрацией 1,5 %.

Результаты проведённых исследований показывают, что экспериментальные данные полностью согласуются с существующими представлениями о формировании напряжённого состояния поверхностного слоя при абразивной обработке. В тоже время имеется ряд особенностей, которые характерны в основном для глубинного шлифования: во-первых, на формирование напряжённого состояния оказывают влияние в равной степени силовой и тепловой факторы, причём действие теплового фактора подобно термоупрочнению; во-вторых, пластическая деформация слоёв металла, остающихся после обработки происходит под действием абразивных зёрен при достаточно низкой температуре; в-третьих, существенным является тот факт, что наибольшему тепловому и силовому воздей-

вию подвергаются слои срезаемого металла; в-четвёртых, снижение скорости подачи СОЖ приводит к затруднённому проникновению её в зону обработки, что нарушает правильное протекание процесса глубинного шлифования и может способствовать формированию растягивающих остаточных напряжений.

Возможности управления формированием остаточных напряжений при глубинном шлифовании ограничены и могут эффективно осуществляться только в достаточно узком диапазоне, что не может удовлетворить все потребности, встречающиеся в производстве. Тем не менее, в сочетании с другими методами, включающими термообработку, термопластическое упрочнение или упрочняющую обработку микрошариками, можно добиться необходимого состояния поверхностного слоя, которое обеспечивало бы повышение ресурса и эксплуатационной надёжности деталей. На операциях же глубинного шлифования хвостовиков лопаток ГТД следует стремиться получить минимальные различия напряжений с требуемыми из эксплуатационных соображений величинами, уделяя основное внимание глубине распространения пластических деформаций и рассматривая мгновенное напряжённое состояние материала в процессе обработки с точки зрения возможных повреждений поверхности детали, в том числе за счёт образования микротрещин.

УДК 621.9.01

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН ИЗ КЕРАМИКИ И КНБ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТОЧЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

С. Л. Проскуряков, канд. техн. наук.

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Производственное применение высокоскоростного точения для обработки заготовок из жаропрочных никелевых сплавов позволяет многократно повысить производительность процесса резания. В качестве инструмента для осуществления этого процесса используются резцы с механическим креплением режущих пластин из кубического нитрида бора (КНБ) и режущей керамики на основе нитрида кремния. Такие пластины позволяют производить процесс точения подобных материалов со скоростями 5

м/с и выше. Следует отметить, что традиционные скорости при использовании твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями не превышают 0,5 м/с.

Повышение скорости на порядок относительно обычных скоростей резания приводит к значительному увеличению интенсивности теплообразования в зоне контакта и росту температуры резания примерно до 1100 °С. Такие тяжелые условия работы пластин требуют от них высоких показателей по стабильности их свойств и к качеству изготовления. Испытания по износостойкости показали, что режущие пластины даже из одной заводской партии могут отличаться в 2-4 раза по стойкости при одинаковом критерии износа (площадка износа по задней грани резца $h_z = 0,35$ мм.).

Такой разброс по стойкости связан с особенностями производства режущих пластин из КНБ и керамики, как правило, это спекание исходных зерен размером около 1 мкм в поликристалл при высоком давлении и температуре. Повторяемость условий спекания трудно обеспечить с высокой степенью точности, так как это приводит к увеличению себестоимости самих пластин. Следовательно, возникает необходимость диагностики режущих свойств пластин как говорится «до опыта». Одним из эффективных методов неразрушающей диагностики является акустический метод.

Проведенные в РГАТУ им. П. А. Соловьева исследования показали, что пластины с высокими акустическими показателями, а именно, если скорость звука в пластине из КНБ составляет более 15 800 м/с, а для керамики более 10 500 м/с то они имеют наилучшие результаты по стойкости. Для определения скорости звука – C_l применялся косвенный метод по резонансной частоте пластины, он основан на известной зависимости частоты собственных колебаний любого изотропного тела, в общем виде формулу можно представить так:

$$f_i = F_i \cdot C_l,$$

где F_i – коэффициент формы, зависящий от геометрических размеров тела, его формы и коэффициента Пуассона; C_l – скорость распространения упругих колебаний в бесконечно длинном стержне, материал которого аналогичен материалу рассматриваемого тела.

Следовательно, зная коэффициент формы F_i , конкретной пластины, можно по частоте собственных колебаний f_i определить величину C_l . В литературе нет данных для определения F_i для формы, которую имеют инструментальные пластины, а именно важно соотношение толщины и диаметра. Поэтому были проведены дополнительные исследования для получения расчетных формул, которые учитывают различную конфигура-

цию пластин (круглые, квадратные, треугольные и др.). Также была разработана и изготовлена соответствующая аппаратура и методика для определения собственных частот колебаний пластин. Для получения более высоких показателей по амплитудно-частотным характеристикам пьезопреобразователи применяемые в оригинальных устройствах были модернизированы.

Автором проведены измерения скорости звука для пластин разных марок КНБ и керамики, а также разных геометрических размеров, результаты приводятся в докладе. Также установлены диапазоны скоростей звука для пластин разного качества, которые позволяют прогнозировать стойкость платистин.

В завершение хотелось отметить, что при правильной организации высокоскоростное точение жаропрочных никелевых сплавов значительно повышает коэффициент использования станка, сокращает время на обработку. Чем выше стоимость технологического оборудования, тем экономически более целесообразно применение высоких скоростей резания, обеспечивающих многократное увеличение производительности. Следовательно, на одном станке, где правильно организована высокоскоростная обработка, можно выполнять производственную программу, рассчитанную примерно на пять аналогичных станков с традиционно применяемыми скоростями резания. Еще один существенный эффект от применения высоких скоростей резания, это обеспечение устойчивого стружкодробления, так как стружка состоит из отдельных элементов.

УДК 621.81

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ЭВОЛЬВЕНТНЫМ ПРОФИЛЕМ ЗУБА

В. В. Михрютин, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Конические зубчатые передачи нашли широкое применение в различных машинах и механизмах для передачи вращения между валами с пересекающимися осями. Широкое внедрение систем трехмерного геометрического моделирования требует использования автоматизированных методов создания моделей зубчатых колес.

В тех случаях, когда для изготовления зубчатых колес применяются специальные станки, работающие по методу обката, для изготовления или контроля детали трехмерная модель обычно не используется. В таких случаях вполне достаточно использование приблизительных методов построения профиля зуба в модели зубчатого колеса, либо вообще применение фальш-геометрии для формирования корректного изображения зубьев на чертеже.

В последнее время в связи с развитием и широким распространением многокоординатного оборудования, а также методов быстрого прототипирования появилась возможность изготовления зубчатых колес с более сложной формой зуба, например, в виде логарифмической спирали. Для изготовления зубчатого колеса данными методами необходимо наличие точной трехмерной геометрической модели.

Известен ряд программных продуктов, позволяющих строить модели конических зубчатых колес, например, GearTrax, GWJ eAssistant, Gleason CAGE, KISSsoft и другие. Недостатками данных программ является высокая стоимость и закрытость процесса создания модели.

Процесс построения геометрических моделей цилиндрических зубчатых колес достаточно хорошо известен [1]. Построению моделей конических колес в известной литературе уделено недостаточно внимания.

Параметры зубчатого зацепления определяются исходным контуром. Для колес с прямыми зубьями устанавливается внешний торцевой номинальный исходный контур [2], для колес с круговыми зубьями – средний нормальный номинальный [3].

Точки сопряженных профилей зубьев конических колес лежат на сферической поверхности, которая не разворачивается на плоскость. Стан-

дартные методики расчета параметров передач [4] и профилирования зубьев конических зубчатых колес основаны на замене сферической поверхности боковых профилей зубьев конической, что позволяет упростить расчеты. Следует также учитывать, что перенос рассчитанного по стандартной методике профиля на развернутую коническую поверхность торцевого сечения приводит к возникновению погрешности [5]. Считается, что данная погрешность достаточно мала, что позволяет использовать данный метод для построения моделей конических зубчатых колес. Стандартная методика позволяет рассчитать толщину зуба в различных сечениях по его высоте [6].

В связи с тем, что системы трехмерного геометрического моделирования реализуются для достаточно мощных компьютеров, проблема сложности расчетов теоретически правильного профиля зуба конического колеса в последнее время становится малозначимой. Появился ряд работ, посвященных созданию трехмерных геометрических моделей конических зубчатых колес, имеющих точный эвольвентный профиль зуба [7, 8].

Следует учитывать, что при построении геометрической модели в системе трехмерного моделирования операцией натягивания поверхности профиль зуба может быть искажен. Это делает целесообразным вывод уравнений боковых эвольвентных поверхностей винтовых зубьев конических зубчатых колес.

Рассмотрим задание профиля зубьев конических колес на внешней сферической поверхности (рис. 1). Выберем линию зацепления в виде дуги окружности, лежащей в плоскости, проходящей через центр сферы и касающейся основных конусов колес. Угол основного конуса шестерни равен

$$\delta_{b1} = a \sin(\cos(\alpha) \sin(\delta_1)), \quad (1)$$

где α – угол зацепления; δ_1 – угол делительного конуса.

Радиус основной окружности на пересечении внешней сферы и основного конуса определится как

$$r_{bs1} = R_e \sin \delta_{b1}, \quad (2)$$

где R_e – радиус внешней сферы.

Уравнение сферической эвольвенты найдем в результате преобразования координат, задающего движение дуги окружности, обкатывающейся по основному конусу шестерни

$$p(R, \varphi) = R_z(\mp \varphi - \varphi_0) R_x(-\delta_b 1) R_y(\mp I \varphi) \begin{bmatrix} 0 & 0 & R \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix} \mp R [\cos(\mp \varphi - \varphi_0) \sin(I \varphi) \pm \sin(\mp \varphi - \varphi_1) \cos(I \varphi) \sin \delta_{b1}] \\ \mp R [\sin(\mp \varphi - \varphi_0) \sin(I \varphi) \mp \sin(\mp \varphi - \varphi_1) \cos(I \varphi) \sin \delta_{b1}] \\ R \cos(I \varphi) \cos \delta_{b1} \end{bmatrix}^T, \quad \begin{matrix} R \in (0, R_e) \\ \varphi \in (0, \varphi_a) \end{matrix} \quad (3)$$

где $R_x R_y$ – матрицы поворота вокруг осей x, y ; R – радиус рассматриваемой сферы, φ – параметр уравнения, имеющий смысл угла поворота дуги окружности вокруг основного конуса, $I = \sin \delta_{b1}$ – соотношение углов поворота дуги окружности относительно основного конуса и центра колеса; φ_0 – угловое смещение кривой относительно оси зубчатого колеса; φ_a – значение углового параметра, соответствующего пересечению кривой эвольвенты внешнего конуса; знак « $-$ » соответствует уравнению левой эвольвенты, « $+$ » – правой.

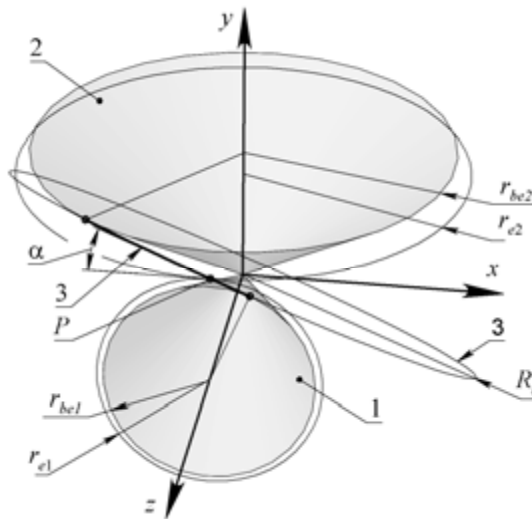


Рис. 1. Расчетная схема для определения параметров линии зацепления
1, 2 – основные конусы конической шестерни и колеса; 3 – линия зацепления зубьев

Наибольший интерес представляет построение моделей конических зубчатых колес с винтовым зубом, обеспечивающим наибольшую плавность работы. Винтовая кривая задается в плоскости производящего колеса. Одной из наиболее благоприятных кривых, задающей направление зубьев считается логарифмическая спираль. Для боковых поверхностей шестерен с направлением зубьев по логарифмической спирали получено следующее уравнение

$$p(\psi, \varphi) = R_z(\mp \varphi - \varphi_0) R_x(-\delta_b 1) R_y(\mp I\varphi) \begin{bmatrix} 0 & 0 & e^{k\psi} \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix} \mp r e^{k\psi} [\cos(\mp \varphi - \varphi_0) \sin(I\varphi) \pm \sin(\mp \varphi - \varphi_1) \cos(I\varphi) \sin \delta_{b1}] \\ \mp r e^{k\psi} [\sin(\mp \varphi - \varphi_0) \sin(I\varphi) \mp \sin(\mp \varphi - \varphi_1) \cos(I\varphi) \sin \delta_{b1}] \\ r e^{k\psi} \cos(I\varphi) \cos \delta_{b1} \end{bmatrix}^T, \quad \begin{matrix} \psi \in (0, \psi_e) \\ \varphi \in (0, \varphi_a) \end{matrix}, \quad (4)$$

где r – параметр логарифмической спирали, задающий плотность расположения витков; знак « $\leftarrow$ » соответствует уравнению левой эвольвенты, « $\rightarrow$ » – правой.

Для удобства построения зуба определим величину угла φ_0 задающего положение эвольвент для левой и правой сторон зуба. Вычислим угол, соответствующий точке профиля зуба на пересечении с основной окружностью

$$\varphi_P = \arctan \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha \cos \delta_1} \quad (6)$$

Далее найдем величину угла φ_0 , задающего положение эвольвент для левой и правой сторон зуба

$$\varphi_{01} = \pm \left[\arctan \frac{p(\varphi_P)_0}{p(\varphi_P)_1} + \frac{s_{e1}}{m_e z_1} \right], \quad (7)$$

где s_{e1} – внешняя окружная толщина зуба на делительном диаметре шестерни; m_e – внешний окружной модуль, z_1 – число зубьев шестерни. Параметры s_{e1} и m_e определяются по стандартной методике [4].

Проверка адекватности разработанных моделей проверялась путем выполнения трехмерных построений. Разработана трехмерная геометрическая модель зубчатого колеса (рис. 3).

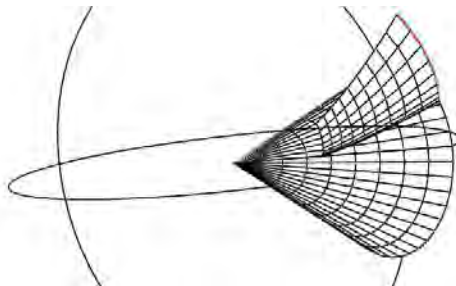


Рис. 2. Эвольвентная поверхность зуба конического колеса

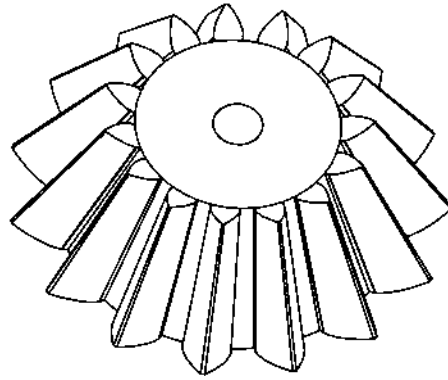


Рис. 3. Геометрическая модель прямозубого конического колеса

Предложенные уравнения боковых поверхностей винтовых эвольвентных зубчатых колес позволяют производить построение моделей в автоматизированных системах трехмерного геометрического моделирования.

Библиографический список

1. Рамзаева Е. А. Параметрическое моделирование зубчатых колес в SIEMENS NX// Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, №3(34), 2012. С. 109 – 114.
2. ГОСТ 13754-81 Передатки зубчатые конические с прямыми зубьями. Исходный контур. Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР; М. : Изд-во стандартов, 1983. – 4 с.
3. ГОСТ 16202-81 Передатки зубчатые конические с круговыми зубьями. Исходный контур. Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР; М.: Изд-во стандартов, 1981. – 4 с.
4. ГОСТ 19624-74 Передатки зубчатые конические с прямыми зубьями. Расчет геометрии. М.: Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР; М. : Изд-во стандартов, 1974. – 30 с.
5. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений/ М.: Наука, 1968. 584 с.
6. Ramana Rao A. V., Bhanu Prakash CH., Sivaram.K. M. N. V. S. A. Parametric Modelling of Straight Bevel Gearing system and Analyze the Forces and Stresses by Analytical Approach// International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – Volume 4 Issue 9- September 2013. Pp. 3837 – 3841.
7. Wang Y., Yang Z., Li L., Zhang X. The Equation of Meshing of Spiral Bevel Gears Manufactured by Generating-Line Method// The Open Mechanical Engineering Journal, 2011, 5. Pp51-55.
8. Zhaojun Y., Zhaobin H., Baichao W., Xuecheng Z. New Tooth Profile Design of Spiral Bevel Gears with Spherical Involute// International Journal of Advancements in Computing Technology(IJACT), Volume4, Number19,October. 2012. Pp. 462 – 469.

УДК 621.914

ПРИМЕНЕНИЕ РАСТРОВОГО МЕТОДА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЛЯ
АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ГЛУБОКИХ ПАЗОВ

А. В. Пепельшев, аспирант

Научный руководитель: В. Ф. Макаров, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский университет»

Постоянный рост требований к точности и качеству поверхностей деталей приводит к увеличению трудоёмкости и себестоимости изготовления изделия в целом. Без внедрения инновационных методов обработки и использования современного оборудования невозможно выполнять всё возрастающие требования по точности изготовления деталей.

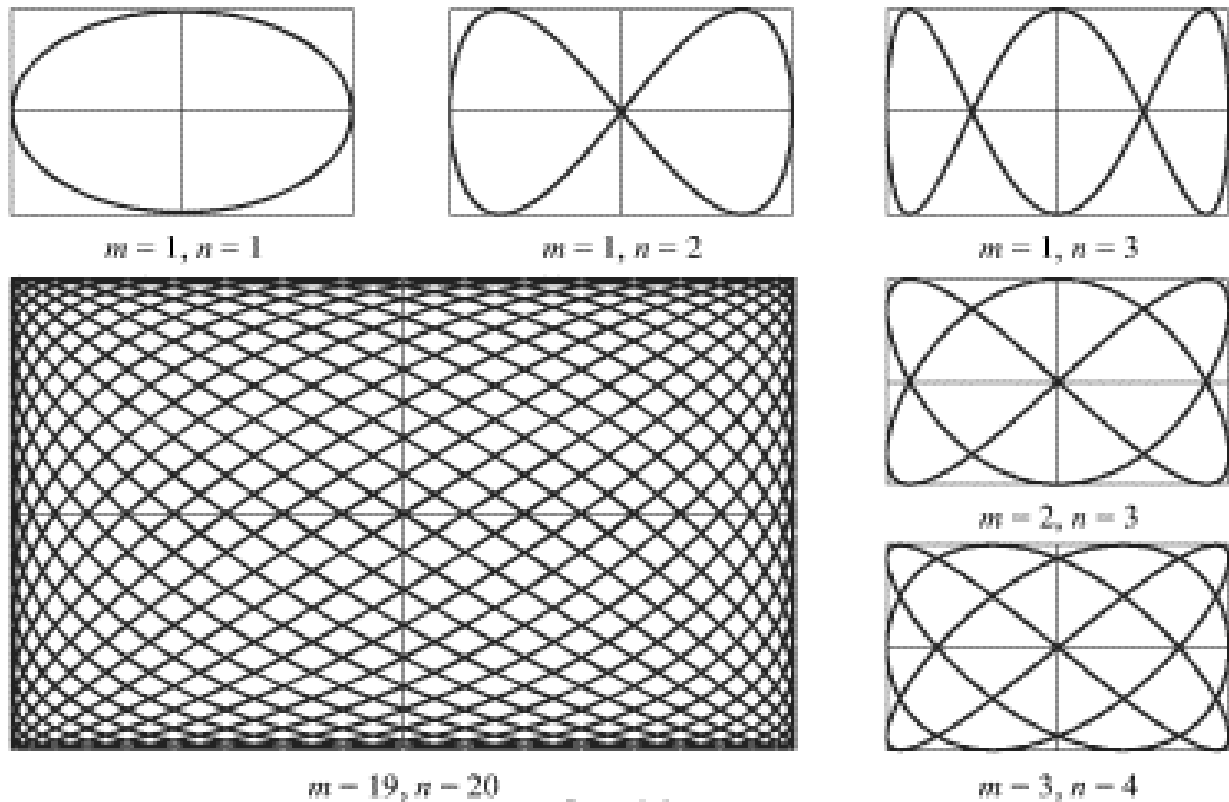
Одной из наиболее остро стоящих проблем специального машиностроения является обработка прецизионных плоских поверхностей глубоких пазов. В настоящее время обработка глубоких пазов включает следующие операции: сверление, фрезерование, долбление, шлифование, ручное шабрение. Общая трудоёмкость процесса составляет около 30 часов. При этом не всегда удастся получить требуемую шероховатость $Ra \leq 0,8$ мкм и точность по отклонению от плоскостности до 0,05 мм при ручной окончательной обработке. Ручное шабрение процесс достаточно трудоёмкий и требует высокую квалификацию рабочего. Поэтому задача автоматизации обработки прецизионных плоских поверхностей глубоких пазов является актуальной и требует глубокого изучения и научного подхода.

Для решения данной проблемы автором предложен новый метод растрового фрезерования [1, 3]. Название метода следует из траектории движения инструмента (по аналогии с названием сложных сеток в электрооптических устройствах). Траектория представляет собой сложение двух ортогональных гармонических колебаний (фигуру Лиссажу).

$$\begin{cases} x = A \sin \omega_1 t \\ y = B \sin(\omega_2 t + \varphi_0) \end{cases} \quad (1)$$

где A, B - амплитуды колебаний; ω_1, ω_2 - частоты колебаний по осям;

В зависимости от сочетаний параметров колебаний траектория может принимать самый различный вид: от прямой и окружности до многократно пересекающейся сложной сетки (рисунок 1).

Рис. 1 Виды траекторий ($n/m = \omega_1/\omega_2$)

А.Г. Лойцянский и А.И. Лурье показали, что если между периодами взаимно перпендикулярных колебаний существует соотношения $T_1/T_2 = m/n$, где m, n – целые взаимно простые числа, то за время $T = mT_1 = nT_2$ повторится целое число периодов как T_1 , так и T_2 . Это значит, что точка вернется в исходное положение и кривая замкнется. После этого движение начнет повторяться. Если же периоды несоизмеримы (наиболее общий случай), то такого значения T нельзя указать, и точка никогда не вернется в исходное положение. Уравнение траектории в этом случае Л.И.Мандельштам относит к почти периодическим функциям, такая кривая не замкнута, она подходит как угодно близко к любой точке внутри прямоугольника, заполняя его «всюду плотно».

В.П. Некрасов в своих работах подробно изучил параметры растровой траектории. Выделим основные из них:

1. Плотность сетки $q = \frac{1}{2\sqrt{A^2 + B^2}} \frac{\omega_2 + \omega_1}{\omega_2 - \omega_1}$
2. Угол наклона сетки $\tan \gamma = \frac{2}{\frac{A\omega_1}{B\omega_2} - \frac{B\omega_2}{A\omega_1}}$
3. Длина траектории $L = \int_0^T \sqrt{(A\omega_1 \cos \omega_1 t)^2 + (B\omega_2 \cos(\omega_2 t + \varphi))^2} dt$

Однако при перемещении инструмента по зависимости (1) скорость и ускорения оси инструмента также изменяются по гармоническому закону. Это приведёт к неоднородной шероховатости поверхности. Для компенсации данного эффекта найдём функцию параметра траектории в зависимости от времени, при котором подача будет постоянна.

$$\frac{S_M \cdot t}{60} = \int_0^{T(t)} \sqrt{(A\omega_1 \cos \omega_1 t_1)^2 + (B\omega_2 \cos(\omega_2 t_1 + \varphi))^2} dt_1 \quad (2)$$

В отличие от классических интегральных уравнений в уравнении (2) неизвестная функция расположена в пределе интегрирования $T(t)$. Поэтому решим данную задачу численно.

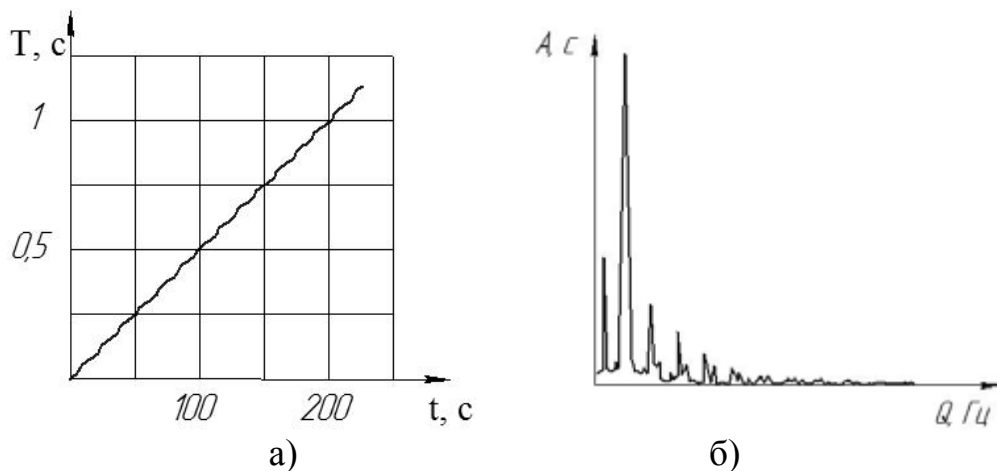


Рис. 2. Результаты численного решения а) зависимость параметра t от времени; б) амплитудно-частотная характеристика

Как видно из амплитудно-частотной характеристики сигнал имеет ряд частот, но превалирует высокочастотная составляющая, поэтому решение задачи будем искать в виде:

$$T = a_0 \cdot t + a_1 \cdot \sin(a_2 \cdot t + a_3) \quad (3)$$

Неизвестные коэффициенты находим с помощью ЛПт метода. ЛП-метод широко используется при решении задач оптимизации с несколькими неизвестными.

Суть метода заключается в «зондировании» пространства параметров. При этом в каждой точке сформированного пространства определяются значения целевой функции - среднеквадратического отклонения.

Пространство параметров оптимизации представляет собой многомерный куб (для n параметров строится n -мерный куб). Многомерный куб заполняется точками, которые представляют собой последовательности, формируемые по определенному закону. В качестве равномерно-распределенных последовательных последовательностей точек применяются ЛПт-последовательности, обладающие наилучшими характери-

ками равномерности среди всех известных равномерно-распределенных последовательностей.

Таким образом, функция траектории перемещения по фигуре Лиссажу примет вид:

$$\begin{cases} x = A \sin(\omega_1(a_0 \cdot t + a_1 \cdot \sin(a_2 \cdot t + a_3))) \\ y = B \sin(\omega_2(a_0 \cdot t + a_1 \cdot \sin(a_2 \cdot t + a_3)) + \varphi_0) \end{cases} \quad (4)$$

Данная зависимость перемещения инструмента позволит обеспечить однородную шероховатость поверхности.

Экспериментальные исследования проводились на обрабатывающем центре Mates 40HV угловой фрезерной головкой BENZ WWX 07 HSK 100 ER32. Обработка проводилась торцевой фрезой фирмы Seco R220.69-0063-09-8AN, оснащённой восьмью пластинами XOMX090308TR-ME06 F40M. [2]

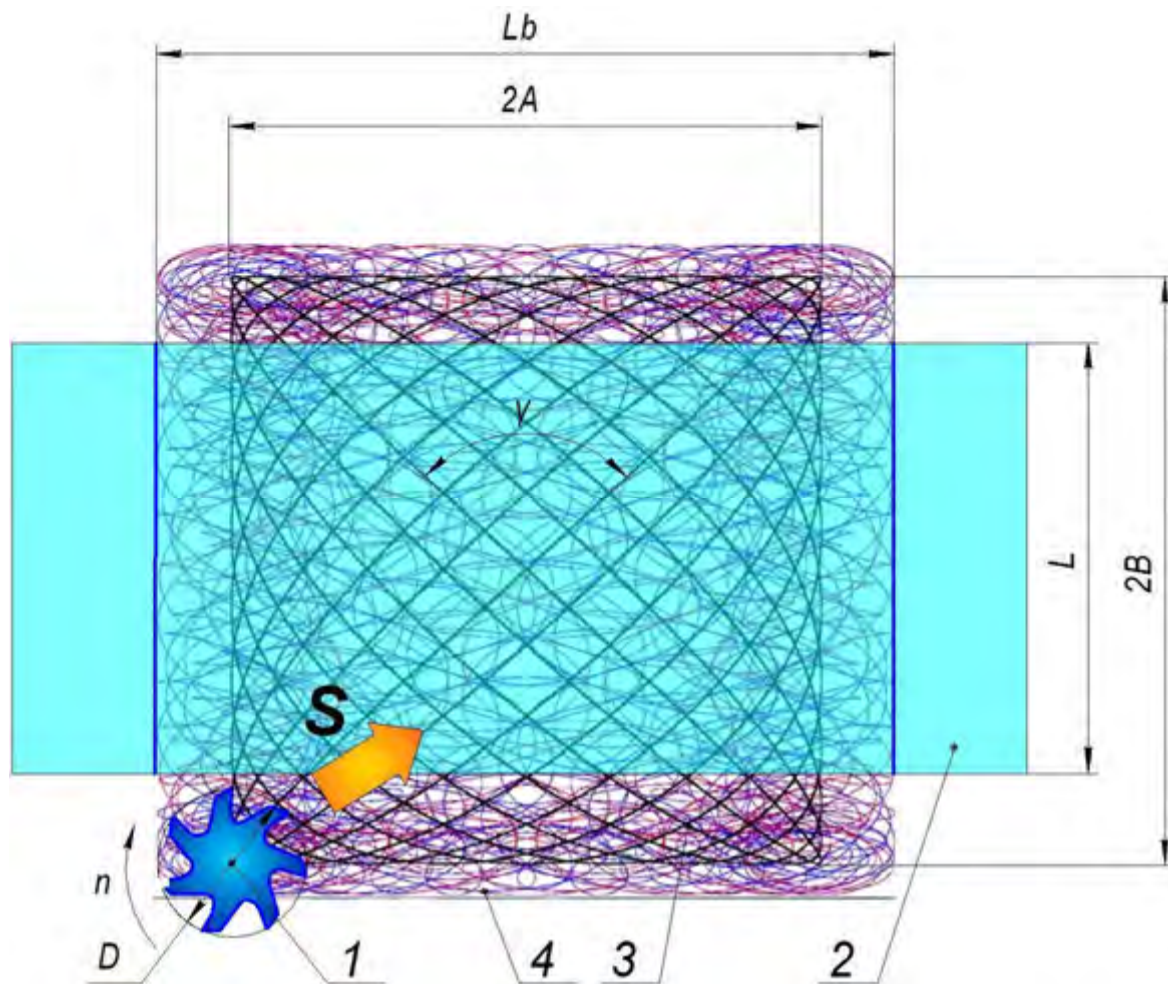


Рис. 3 Обработка паза

Фреза 1 диаметром D выходит в плоскость обработки и начинает своё движение с отрицательного параметра траектории T (как показано на рис. 3), подобранного таким образом, чтобы рабочая подача S включалась за пределами заготовки 2. Это позволяет исключить зарез в центре растра (что происходит при нулевом начальном значении параметра T) и вести

обработку торцевыми фрезами, т. к. врезание осуществляется с радиальной подачи, а не по центру растра с осевым врезанием.

Фреза вращается с частотой n и перемещается по фигуре Лиссажу 3, при этом траектория движения вершины режущего лезвия представляет собой гипоциклоиду 4. Такая траектория позволяет равномерно покрыть всю площадь обработки, но в некоторых случаях возникают краевые эффекты. Экспериментально доказано, что их воздействие минимально для угла сетки $\gamma = 90^\circ \pm 50$.

При фрезеровании паза инструмент работает в условиях недостаточной жёсткости, следовательно, увеличивается риск возникновения вибраций. В этом случае необходимо установить плотность сетки 50% от диаметра фрезы. Данная плотность обеспечивает достаточную производительность обработки без значительного ухудшения качества.

Растровое фрезерование является перспективным направлением в обработке материалов резанием и позволяет улучшить параметры качества поверхности за счет использования сложной траектории движения рабочих органов станка. Внедрение растрового фрезерования позволило исключить операцию ручного шабрения и обеспечить стабильное качество и геометрическую точность прецизионных плоских поверхностей глубоких пазов. Производительность при этом возросла в 2,5-3 раза.

Библиографический список

1. В.Ф. Макаров, А.В. Пепелышев Инновационный подход к решению задачи прецизионной обработки на станках с ЧПУ // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XX междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 16-21 сент. 2013 г. / М-во образования и науки, молодёжи и спорта Украины [и др.]. – Донецк: Технополис, 2013. – Т.2 – с. 105-108.

2. Макаров В.Ф. Пепелышев А.В. Разработка управляющей программы для растрового фрезерования с применением методов гибкого программирования // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научно-технической конф., (22-24 мая 2013 г., г. Одесса) / Ассоц. Технологгов-машиностроителей Украины [и др.]. – Киев: АТМ Украины, 2013. – с. 110-113.

3. Макаров В.Ф., Пепелышев А.В. Растровый метод фрезерования на станках с ЧПУ // Инновации в машиностроении – основа технологического развития России: материалы VI междунар. науч.-техн. конф., 23-26 сент. 2014 г.: в 2 ч. / М-во образования и науки Рос. Федерации [и др.]. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – ч. 1. – с. 222-225.

УДК 658.62.018.012

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ШЕСТИОСЕВЫХ
КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНБ. М. Бржозовский¹, д-р техн. наук, профессор,
А. Г. Лаптев², А. А. Лаптев², И. В. Белицкий²¹ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»²ООО «ЛАПИК», г. Саратов

Координатно-измерительные машины (КИМ) являются неотъемлемой частью промышленности развитых стран. Сейчас в мире эксплуатируется более 350 000 КИМ. Треть этого количества эксплуатируется в США, столько же приходится на долю Германии, Великобритании, Японии и Италии. Оставшаяся часть приходится на развивающиеся страны. Бурное промышленное развитие Китая, Южной Кореи, Индии сопровождается активным внедрением КИМ в промышленность этих стран.

Разработками шестиосевых машин занимаются ведущие западные компании. Однако лучшие достижения США и Германии в «параллельной кинематике» (в России принято название «шестиосевые») – погрешность 5-10 мкм, в то время как в КИМ «ЛАПИК» она составляет 0,5-1,0 мкм.

Конструкция КИМ ООО «ЛАПИК» обеспечивает шесть степеней свободы рабочего органа, шесть одновременно и согласовано управляемых осей перемещения. Измерительная система отделена от силовой, что обеспечивает долговременную стабильность характеристик в повышении точности измерений. Выбор шестистержневой конструкции позволил на много уменьшить массу подвижных частей, увеличить быстродействие.

КИМ «ЛАПИК» имеет оригинальный корпус, смоделированный по специальной программе. Геометрия октаэдра обеспечивает жесткость рамы, в 5 раз превышающую жесткость традиционных машин.

Кинематическая схема измерительной машины представляет собой параллельную структуру в виде перевернутой пирамиды. В основании пирамиды располагаются сферические шарниры, которые служат точками отсчета для следящей системы.

Следящая система состоит из излучателя и шести лазерных интерферометров с дискретностью отсчета перемещений 0,05 мкм, определяющих расстояния между соответствующими сферическим шарниром на непод-

вижной раме и элементом, расположенным на каретке. Оптическая схема излучателя когерентного света обеспечивает деление светового потока от лазера на 6 равнозначных каналов; световая энергия передается от излучателя к интерферометрам по 6 одномодовым оптоволоконным линиям. Каретка перемещается с помощью шести мехатронных приводов. Штанги приводов работают только на растяжение-сжатие, деформация изгиба отсутствует. Конструктивно лазерные интерферометры отделены от исполнительных приводов. Это обстоятельство исключает прямое воздействие деформаций и нагрузок в приводах на следящую систему и обеспечивает точность и повторяемость измерений на уровне 1 мкм и менее. Чувствительность измерительного датчика составляет 0,1 мкм.

Программное обеспечение КИМ представляет собой собственную разработку, что дает надежную гарантию против утечки секретных сведений, получаемых в процессе измерения деталей, за рубеж.

Конструкция КИМ сохраняет паспортную точность 10 и более лет эксплуатации благодаря реализации системы самокалибровки, которая позволяет учитывать структурные изменения во времени и износ механических частей.

Конструктивные, схемные и технологические решения, программное обеспечение КИМ ООО «ЛАПИК» защищены более чем 20 патентами.

КИМ «ЛАПИК» являются официальным средством измерения по стандартам ISO и включены в Госреестр средств измерений Российской Федерации и позволяет контролировать: внутренние полости, узкие криволинейные каналы и глубокие отверстия, недоступные 3-х осевым; сложные изделия с минимумом перестановок при 100% охвате поверхностей; небольшие изделия (или фрагменты больших) с погрешностью в 2-3 раза точнее паспортной.

Характеристики КИМ «ЛАПИК» в сравнении с импортными аналогами приведены в табл.1. При их рассмотрении необходимо обратить внимание на следующие моменты.

1. Контроль размеров, поверхностей и их взаимное расположение на КИМ «ЛАПИК» осуществляется в 6-ти осях в отличие от 3-х осевого контроля на импортных КИМ. Таким образом, обеспечивается высокопроизводительный контроль, в том числе сложных изделий.

Таблица 1

Сравнительные характеристики координатно-измерительных машин

Модель оборудования	GLOBAL 7 10 7 Performance	Prismo 7.0.7	Wenzel LH 87	КИМ-1000
Фирма-изготовитель	Hexagon Metrology, США	Carl Zeiss, Германия	Wenzel, Германия	ООО "ЛАПИК", Россия
Конструкция	портального типа, 3-осевая	портального типа, 3-осевая	портального типа, 3-осевая	Платформенный Спартан, 6-ти осевая конструкция
Кинематическая схема	последовательная	последовательная	последовательная	параллельная
Число одновременно и согласованно управляемых координат	3	3	3	6
Максимальное перемещение по осям X, Y, Z	700x1000x860	700x900x700	800x1000x700	1000x750x800
Системы отсчета перемещений	стальные линейки	стеклокерамические; стальные линейки и температурные датчики	дискретная масштабная линейка	лазерно-интерферометрическая
Дискретность отсчета линейных перемещений по координатам	—	0,2 мкм	0,5 мкм	0,05 мкм
Погрешность измерения формы MPE_{form}	не указана	1,6 мкм	2,5 + L/450 мкм	1,1 + L/360 мкм
Погрешность линейного измерения, MPE_L	1,5 + L/333 мкм	1,6 + L/333 мкм	2,0 + L/500 мкм	0,0 + L/500 мкм
Погрешность локального измерения (в выделенной зоне с повышенной точностью)	—	—	—	1,0 + L/50 мкм
Температурный диапазон, обеспечивающий заявленную точность	18-22°C	18-22°C	18-22°C	16-27°C без установки в температурной камере (адаптация к температуре системы калибровки)
Температурная коррекция КИМ (компенсация температуры детали и машины)	в базовой комплектации	в базовой комплектации	не указана	встроенная система самокалибровки поддерживает постоянные параметры КИМ при различных условиях эксплуатации в течение длительного периода (свыше 10 лет)
Расход воздуха	150л/мин	10л/мин	min 70 л/мин	пневмосистема не требуется
Измерительные головки	Tesastar; (Tesastar-m); TesastarTi, LSP1X3; Renishaw PH10MQ	RDS; VAST XXT	Renishaw, WENZEL µStar	"Лепик" с токовым и механическим режимами измерения; "Renishaw" PH10M, PH10MQ
Диапазоны вращения поворотной головки по осям	Ось X, Y: +90° - -115°; Ось Z: ±180°	±180° по каждой оси вращения	Ось X, Y: 0° - 105°; Ось Z: ±180°	Ось X, Y: 0° - 165°; Ось Z: ±180°
Дискретность угла поворота	3° (Tesastar-m)	2,5° (базовое оборудование RDS)	7,5° ("Renishaw" PH10M/MQ)	0°0'01"
Поворотный стол	используется для измерения тел вращения (зубчатых колес)	используется для измерения тел вращения (зубчатых колес)	используется для измерения тел вращения (зубчатых колес)	не применяется, в особом движении обеспечивается 100% подход к труднодоступным поверхностям детали
Интенсивность измерения, точек в секунду	0,5	0,5	0,5	10
Плавное-управляемый наклон шупа как непрерывный процесс при измерении детали	нет	нет	нет	да
Опция калибровки всех угловых положений шупа	производится после каждого изменения положения шупа	производится после каждого изменения положения шупа	производится после каждого изменения положения шупа	является встроенной и неотъемлемой частью 6-осевых КИМ (бесконечное множество положений шупа откалибровано)
Min диаметр шарика шупа	0,3 мм	0,3 мм	0,3 мм	0,03 мм
Измерительное усилие	0,6 Н	0,05 Н	0,6 Н	0,003 Н

2. КИМ «ЛАПИК» работает в более широком диапазоне температур без требований к термостабилизированности помещений, имеют двухступенчатую систему защиты от вибраций.

3. КИМ «ЛАПИК» не требует подвода сжатого воздуха и, следовательно, значительных затрат на его очистку.

4. Минимальный радиус измерительного щупа у КИМ «ЛАПИК» в 10 раз меньше, что позволяет контролировать изделия приборной номенклатуры (мелкомодульные колеса, зубчатые колеса $M \geq 0,2$ мм; резьбы $H \geq 0,2$ мм, внутренние радиусы $R \geq 0,03$ мм и т.п.)

5. КИМ «ЛАПИК» могут контролировать сложные изделия без применения поворотных столов. Этим достигается более высокая точность контроля за счет сокращения измерительной цепи.

Целевой сегмент рынка КИМ «ЛАПИК»:

– по отраслям промышленности: машиностроение, приборостроение, двигателестроение; предприятия оборонной промышленности: авиационная, ракетостроительная, тактическое вооружение и другие;

– по виду контролируемых деталей: корпусные детали; зубчатые колеса: цилиндрические прямо- и косозубые, зубчатые секторы; конические прямозубые и с круговым зубом; червячные; шлицы (прямобоочные и эвольвентные); аэродинамические формы (лопатки, турбинки); резьбы (метрические, дюймовые, трапецеидальные, трубные и т.д.); микроструктурные изделия: зубчатые колеса с модулем $M \geq 0,2$ мм; резьбы с шагом $H \geq 0,2$ мм; детали подшипников (качения, скольжения) и многое другое.

Модельный ряд производимых ООО «ЛАПИК» КИМ: КИМ-500, КИМ-750, КИМ-1000, КИМ-1200, КИМ-1400.

УДК 621.753.2

РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАТЯГА В ПРЕССОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ УЗЛОВ ГТД НА ОСНОВЕ УЧЕТА ШЕРОХОВАТОСТИ И СТЕПЕНИ НАКЛЕПА ПОВЕРХНОСТЕЙ СОЕДИНЯЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ

С. В. Чугуевская, магистрант

Научный руководитель: В. Ф. Безъязычный, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева»

Надежную работу изделия в целом во многом определяет качество прессовых соединений, которые имеют широкое применение в различных изделиях машиностроения и составляют 10 – 17% от общего количества соединений в современных машинах. Это объясняется их высокой надежностью, простотой конструкции и технологии изготовления, а также обеспечением хорошего центрирования.

Улучшение качественных показателей прессовых соединений сдерживается в настоящее время отсутствием научно-обоснованных методик расчета их эксплуатационных свойств, выбора и нормирования параметров качества рабочих поверхностей в зависимости от технологических факторов воздействующих на соединение. В этой связи, безусловно, актуальными являются исследования, направленные на решение задач по технологическому обеспечению качества прессовых соединений на основе анализа влияния различных технологических факторов на прочность, жёсткость, несущую способность соединения и получение расчетных зависимостей для определения величины расчетного и номинального натягов с учетом параметров шероховатости и степени наклепа на поверхностях соединяемых деталей.

Различают следующие способы сборки деталей при посадках с натягом: продольно - прессовое соединение, поперечно - прессовое соединение, гидропрессовая сборка, соединения с применением анаэробных материалов, соединение клеетепловым методом, соединения с натягом, осуществляемые наложением ультразвуковых колебаний на собираемые детали.

Продольно - прессовые соединения (рисунок 1) – соединение осуществляемое под действием внешнего осевого усилия P , создаваемого прессом. Получение таких соединений является наиболее простым, вследствие чего они получили наибольшее распространение.

Рассмотрим расчетное определение силы запрессовки с учетом наклепа при продольно - прессовой сборке соединений (рисунок 1) [1,2].

Сила запрессовки определяется:

$$P = f\pi dlp, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения при запрессовке; d – номинальный диаметр соединения; l – длина запрессовки; p – давление на поверхности контакта.

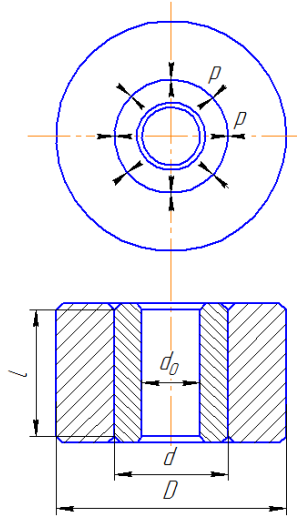


Рис. 1. Схема продольно - прессового соединения

Давление на поверхности контакта:

$$p = \frac{1}{d} \cdot \frac{\delta_p}{\left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right)}, \quad (2)$$

где δ_p – расчетный натяг, мм; E_1 и E_2 – модули упругости материалов охватываемой и охватывающей поверхностей, МПа; C_1 и C_2 – безразмерные коэффициенты, зависящие от свойств материалов сопрягаемых деталей, которые определяются по формуле:

$$C_1 = \frac{d^2 + d_0^2}{d^2 - d_0^2} - \mu_1; \quad C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2, \quad (3 \text{ и } 4)$$

где μ_1 , μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов сопрягаемых деталей; D – диаметр наружной поверхности втулки, мм; d_0 – диаметр отверстия пустотелого вала, мм. При сплошном вале $d_0 = 0$ и $C_1 = 1 - \mu_1$.

Расчетный натяг определяется по формуле:

$$\delta_p = \delta_n - 1,2Rz_1 + Rz_2, \text{ мм} \quad (5)$$

где δ_n – номинальный натяг, выбираемый из таблиц для конкретного соединения или задаваемый на чертеже изделия; Rz_1 и Rz_2 – шероховатость поверхностей сопрягаемых деталей.

Согласно [1] степень наклепа определяется

$$N = \frac{\alpha \sqrt{WG}}{\sigma_{0,2}}, \quad (6)$$

откуда после преобразования

$$G = \frac{1}{W} \cdot \left(\frac{N \sigma_{0,2}}{\alpha} \right)^2, \quad (7)$$

где W – удельная накопленная энергия деформации Дж/мм³;

$\sigma_{0,2}$ – словный предел текучести, МПа; N – степень наклепа; α – параметр междислокационного взаимодействия;

G – модуль сдвига материала детали, учитывая, что модуль сдвига определяется следующим образом

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \text{ МПа} \quad (8)$$

где E – модуль упругости материала детали, МПа;

μ – коэффициент Пуассона материала детали.

Подставив значение G в формулу (8), получим

$$\frac{E}{2(1 + \mu)} = \frac{1}{W} \cdot \left(\frac{N\sigma_{0,2}}{\alpha} \right)^2, \quad (9)$$

откуда после преобразования получим

$$E = \frac{2(1 + \mu)}{W} \cdot \left(\frac{N\sigma_{0,2}}{\alpha} \right)^2, \text{ МПа} \quad (10)$$

Тогда, в соответствии с формулой (2)

$$p = \frac{1}{d} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\left[\frac{C_1 W_1}{2(1 + \mu_1) \left(\frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1} \right)^2} + \frac{C_2 W_2}{2(1 + \mu_2) \left(\frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2} \right)^2} \right]}, \quad (11)$$

где W_1 и W_2 , α_1 и α_2 , N_1 и N_2 , $\sigma'_{0,2}$ и $\sigma''_{0,2}$ – величины для материалов первой и второй сопрягаемых деталей, соответственно.

Если материал контактных деталей одинаков, тогда

$$p = \frac{1}{d} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\left[\frac{C_1 W_1}{2(1 + \mu) \left(\frac{N_1 \sigma'_{0,2}}{\alpha_1} \right)^2} + \frac{C_2 W_2}{2(1 + \mu) \left(\frac{N_2 \sigma''_{0,2}}{\alpha_2} \right)^2} \right]}, \quad (12)$$

$$\text{или } p = \frac{2(1 + W)\sigma_{0,2}^2}{\alpha^2 d} \cdot \frac{\delta_n - 1,2(Rz_1 + Rz_2)}{\frac{C_1 W_1}{N_1^2} + \frac{C_2 W_2}{N_2^2}}. \quad (13)$$

Степень наклепа определяется по формуле [1]

$$N = \frac{h_n}{1,25 \left(\frac{\sigma_{\epsilon}}{\sigma_{\epsilon 3}} \right)^{0,8}}, \% \quad (14)$$

где h_n – глубина наклепа, мкм; σ_s – предел прочности материала, МПа;
 $\sigma_{сэ}$ – предел прочности электротехнической стали, МПа.
 Глубина наклепа определяется по формуле:

$$h_n = \frac{2,36 \cdot 10^{-8} \tau_p^{0,75} S^{0,6} t^{0,06} \rho_1^{0,17} \varphi^{0,35}}{v^{0,28} r^{3,5} \alpha^{0,09} \gamma^{0,33}}, \text{ м} \quad (15)$$

где τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Н/м²; S – подача, м/об; t – глубина резания, м; ρ_1 – радиус округления режущей кромки инструмента, м; r – радиус при вершине резца в плане, м; α и γ – задний и передний углы резца, градус; φ – главный угол резца в плане, градус; v – скорость резания, м/с.

Выводы

1. Проведённый анализ литературных источников показал, что на прочность посадки с натягом в существенной мере влияют шероховатость контактных поверхностей деталей и качество сопрягаемых поверхностей, в особенности наклёп и остаточные напряжения. При этом отсутствуют конкретные зависимости, устанавливающие взаимосвязь величины расчетного натяга и параметров шероховатости и качества поверхностей.

2. Технологические условия обработки контактных поверхностей деталей определяют параметры шероховатости и качество сопрягаемых поверхностей, поэтому установленные расчетные зависимости, связывающие величины расчетного и номинального натягов с параметрами шероховатости и качеством поверхностей при различных методах сборки, а также режимами резания, позволяют использовать их в инженерных расчетах.

Библиографический список

1. Безъязычный, В.Ф. Теория подобия в технологии машиностроения. - М.: Машиностроение, 2012. - 320 с.
2. Гречищев, Е. С. Соединения с натягом: расчеты, проектирование, изготовление [Текст]/ Е. С. Гречищев, А. А. Ильященко. - М.: Машиностроение, 1981. - 247 с.

УДК 621.01

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГРУЗОВОГО АВТОПАРКА ДЛЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ РАБОТ

Н. В. Королев, студент

Научный руководитель: В. Д. Корнеев, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический
университет имени П. А. Соловьева»

В новых условиях рыночной экономики России необходимо более рационально подходить к перевозке грузов. У руководителя группы по осуществлению погрузочно-разгрузочных работ имеется несколько вариантов решения поставленных перед ним задачи. В настоящее время, как правило, прибегают к физической человеческой силе, и за несколько часов производят загрузку автомобиля. После разгрузки выполняют обратные действия, а возможно и подъем груза на высоту. Такой вид работ является совершенно неэффективным в современном мире, и людей, желающих выполнять такую работу на основе официального трудоустройства (каждый день) становится все меньше. Удельный вес погрузочно-разгрузочных работ в общем балансе времени, а также трудовых и материальных затрат растет с каждым годом.

Работы, связанные с погрузкой и разгрузкой грузов делятся на:

- ручные (50%);
- механизированные (25%);
- комплексно-механизированные (15%);
- автоматизированные (10%).

К началу XXI столетия весь мир пришел к пониманию того, что лучше грузового автомобиля может быть только грузовой автомобиль с кран - манипуляторной установкой (КМУ). Предприниматели давно подсчитали выгоду, которую можно извлечь из грузового автомобиля, имеющего КМУ. Применение физического труда при таком оснащении погрузочно-разгрузочных работ сводится к минимуму. Грузовой автомобиль с КМУ выполняет работу сразу двух машин – собственно транспортного средства и подъемного крана (или экскаватора – в случае, если кран – манипуляторная установка оборудована грейферным ковшом).

Да и места автомобиль с КМУ займет вдвое меньше, чем грузовик и кран. Для плотной городской застройки это особенно актуально.

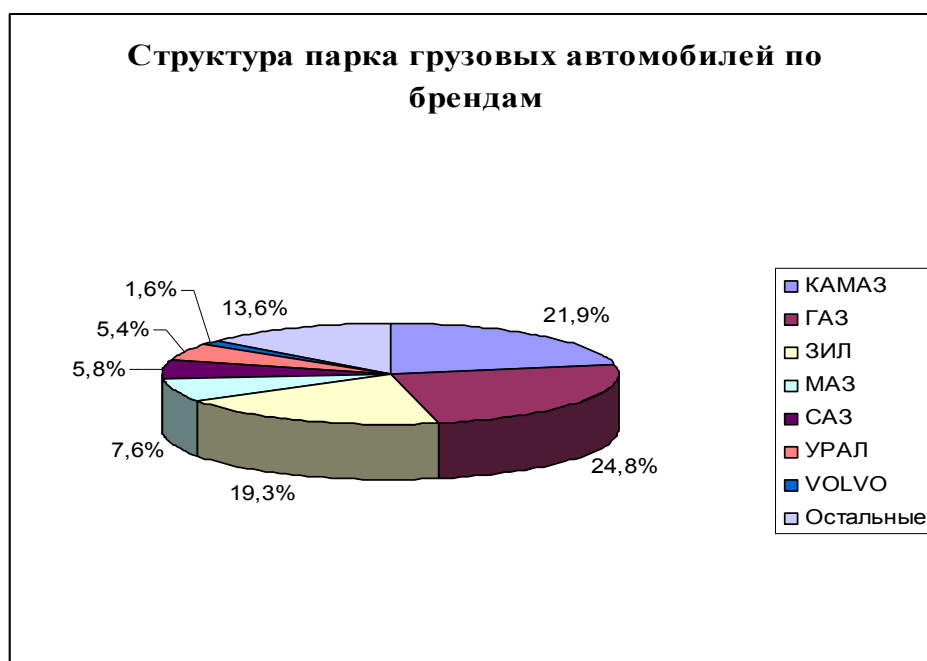
По объему автомобильные перевозки стоят на первом месте. По данным Минтранса на автомобильный транспорт приходится 68 % общего объема перевозок грузов в России.

Всего лишь 4-5 лет назад присутствие зарубежных производителей КМУ на российском рынке было весьма скромным. Однако, бум в экономике в целом и в строительстве в частности стимулирует иностранцев, которые теперь значительно опережают по объему поставок отечественного производства.

Производителей кран – манипуляторных установок у нас совсем немного, и выпускают они весьма скромное количество установок. Импорт тоже имеет место быть. Его объем значительно превышает местное производство, правда, в основном за счет техники, бывшей в эксплуатации.

По данным агентства «Автостат», на начало 2013 г. российский грузовой автопарк составил 3,68 млн. единиц. Более 80 % этих автомобилей (порядка 3 млн.) было произведено на постсоветском пространстве.

При этом сам парк имеет довольно высокий средний возраст: порядка 68 % грузовиков (почти 2, 5 млн.), эксплуатируемых сегодня по России, были выпущены ранее 1988 года. Кроме этого, 23, 2 % российского парка грузовиков (851, 9 тыс.) произведены на Горьковском автозаводе, около 20 % (758, 7 тыс.) – на КАМАЗе, 18 % (657, 9 тыс.) – на ЗИЛе. Наглядно процентную зависимость можно показать в виде круговой диаграммы.



На долю КАМАЗа, ГАЗа и ЗИЛа приходится две трети рынка грузовиков.

О том, что грузовому автопарку модернизация нужна, как воздух человеку, говорят давно. Имеются возможности по модернизации таких автомобилей путем подбора и монтажа на их несущую базу необходимой кран – манипуляторной установки. С выбором кран – манипуляторной установки особых вопросов не возникает, т.к. имеется определенное количество модификаций кран – манипуляторных установок, которые могут быть установлены на автомобиль любой грузоподъемности. Но вот зачастую грузовой автомобиль не готов к такому виду модернизации по причине несоответствия параметров несущих конструкций к требованиям по установке и дальнейшем использовании его в качестве полноценного крана.

Таким образом, можно выделить три задачи:

- 1) изменение конструкторской документации на типовые грузовые автомобили с целью установки на них кран – манипуляторных установок;
- 2) модернизация действующего парка грузовых автомобилей для оснащения их кран – манипуляторными установками;
- 3) возможность повышения эффективности погрузочно-разгрузочных работ за счет более рационального использования кран – манипуляторных установок.

Библиографический список

1. Автомобили. Специализированный подвижный состав: Учебное пособие/ М. С. Высоцкий, А. И. Гришкевич, Л. Х. Гилелес и др.: Под. ред. / М. С. Высоцкого, А. И. Гришкевича. – Минск: Высшая школа, 1989 – 240 с.
2. Родичев В. А. Грузовые автомобили: Устройство и техническое обслуживание.
3. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов-манипуляторов ПБ 10-257-98; Типовая инструкция для операторов (машинистов) по безопасной эксплуатации кранов-манипуляторов РД 22-330-093, плакаты по безопасной эксплуатации грузоподъемных машин издательства «СОУЭЛО» Кузнецов А. Н.
4. Игумнов С. Г. – «Типы грузоподъемных кранов. Параметры грузоподъемных кранов».
5. Беляев В. М. «Организация автомобильных перевозок, безопасность движения», учебное пособие.
6. Перепон В. П. – «Организация перевозок грузов»: Учебник для техникумов и колледжей, 2003. – 614 с.
7. Драчук Л. И. – «Автомобильные грузоперевозки», 104 с.

8. Ершов В. А. – «Международные грузоперевозки». Справочник для импортеров и экспортеров - «ГроссМедиа: РОСБУХ», 2008 г.
9. Свиридов Ю. П. – «Внутренние грузоперевозки автотранспортом». – Ульяновск, 2005. – 142 с.
10. Александров М. П. – «Грузоподъемные машины». Издательство: МГТУ им. Н.Э. Баумана - Высшая школа, 552 с.
11. <http://www.inman.ru/>
12. <http://promtehuu.ru/katalog/>
13. <http://www.chaika-service.ru/kmu/>

УДК 621.3.08

СОЗДАНИЕ СНЕГОХОДНОЙ ТЕХНИКИ С УЧЕТОМ РОССИЙСКИХ УСЛОВИЙ

С. С. Малиновский, студент

Научный руководитель: В. Д. Корнеев, канд. техн. наук, доцент

ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Россия – северная страна, 3 млн. кв. км или 25% территории находятся за полярным кругом, 1,5 млн. человек – самое большое количество людей проживающих за 67 параллелью из северных стран. Плотность населения в среднем по Северу, Сибири и Дальнему Востоку составляет 2 чел. на кв. км. Согласно «Стратегии-2020» приоритетными условиями для развития Заполярья, Сибирского и Дальневосточного регионов, является развитие транспортной, энергетической, социально-хозяйственной инфраструктуры.

В суровых условиях для населения необходима техника, позволяющая вести охоту, перевозить грузы, передвигаться по тундре. Государство также заинтересовано в специальной технике, которая может применяться для геологоразведки, патрулирования территории по берегам рек, охраны приграничных территорий, передвижению к труднодоступным местам происшествий и т.д. Все эти задачи с легкостью может решить снегоход.

В Европе и России продажи снегоходов неуклонно растут – с 40 233 до 52 043 единиц в 2013 году. В нашей стране снегоходы представляют такие мировые гиганты как Yamaha Motor Corporation - Япония, Arctic Cat

- США, Bombardier Recreational Products (BRP) – Канада/Финляндия, Polaris Industries - США.

Основными потребителями снегоходной техники в России являются: Тюменская обл., Республика САХА (Якутия), Республика Коми, Красноярский край, Хабаровский край, Пермская обл., Республика Татарстан и Архангельская обл.

Таким образом лидерами спроса на снегоходную технику являются регионы с низкой плотностью населения, удаленностью населенных пунктов, низкоразвитой дорожной инфраструктурой и особыми экстремальными условиями окружающей среды.

Российские производители снегоходной техники представлены очень скудно, едва ли мы насчитаем две-три серьезных компании. Техника которую они выпускают является морально устаревшей, производившейся на протяжении 40 лет (напр. Буран СБ-640 (сейчас Буран А) – копия Ski-Doo Valmont к. 60-х гг.), имеет низкие потребительские свойства либо не отвечает условиям эксплуатации и малодоступна, таким образом целесообразно создание нового отечественного конкурентоспособного снегохода на уровне мировых производителей.

Согласно ГОСТ Р 50944-2011, снегоход – самодвижущееся транспортное средство, предназначенное для передвижения вне дорог преимущественно по снегу. Снегоходная техника относится к механическим внедорожным мототранспортным средствам. Различают лыжно-гусеничные, колесные, на шинах низкого давления, лыжные аэросани и прочие (напр. катково-гусеничные) снегоходы. Наиболее популярной конструкцией является лыжно-гусеничная с гусеничным двигателем.

Требования предъявляемые к конструкции снегоходов изложены в ГОСТ Р 50944-2011. У снегоходов должны быть предусмотрены фары, сидение, ветровое стекло, системы остановки в виде аварийного выключателя при падении человека со снегохода и УБСД и т.д.

Принцип работы снегохода основан на том, что двигатель снегохода передает вращение не колесам (как на автомобилях), а гусеничной ленте с выступами (грунтозацепами). Ведущий вал с колесами с зубчатым профилем, равномерно совпадающим с отверстиями гусеницы, вращаясь, приводит во вращение гусеницу и, следовательно, движется сам снегоход. Для передачи крутящего момента от двигателя к гусенице широко используют схему бесступенчатой регулировки скорости вращения ведущего вала гусеницы с помощью фрикционного клиноременного вариатора.

Основные части лыжно-гусеничного снегохода:

1. Рама

2. Двигатель
3. Трансмиссия
4. Гусеничный движитель.
5. Передняя подвеска.
6. Рулевое управление.
7. Элементы наружного обвеса.

Самой распространенной схемой построения снегохода является схема 3х1 – трехточечная схема, две лыжи – одна гусеница, такая схема обеспечивает устойчивость, низкий вес и доступность основных узлов для ремонта. Уменьшение ширины гусеницы повышает управляемость и маневренность, увеличение – улучшает проходимость. Распределением полной массы между лыжами и гусеницей добиваются оптимальной управляемости и проходимости снегохода. Нагрузка на переднюю подвеску позволяет делать ее длинноходной для повышения комфорта. В настоящее время распространена компоновка снегохода с передним расположением двигателя.

Снегоходы имеют отличия в зависимости от назначения их применения и делятся на классы: утилитарные, туристические, спортивные, горные, детские. В России до 90% покупаемых снегоходов являются утилитарными. Тогда как в США, Европе лишь 10%. Утилитарные машины предназначены для профессиональной деятельности в жестких условиях: глубокий снег, необходимость перевозить тяжелые грузы и т.д. Они отличаются хорошей проходимостью, которую им обеспечивает широкая (до 600 мм) и длинная гусеница. Как правило, это двухместные машины с объемистыми багажниками и прицепным устройством для саней. Они имеют ограниченный набор необходимых функций, минимальный уровень комфорта.

Россия представляет снегоходный рынок во всех категориях снегоходов: от детских, компактных мини-снегоходов (малогабаритных транспортных средств) до утилитарно-туристических машин с повышенным уровнем комфорта, однако отсутствие производства высокотехнологичных компонентов двигателей и электроники вынуждает предприятия закупать их в Европе, странах АТЭС. Хотя очевидно, аутсорсинг позволяет применять более качественные компоненты вследствие специализации фирм-изготовителей.

По этой же причине российские производители снегоходов существуют в зависимых условиях - в связи с нестабильной экономической ситуацией и санкционными ограничениями поставки импортных комплектующих могут быть прекращены.

Сравнивая российские и зарубежные модели можно прийти к выводу что, российская техника проигрывает по основным техническим, экономическим, эргономическим и психолого-эстетическим показателям. Однако неоспоримым преимуществом отечественной техники остается цена на изделие.

Эксплуатация снегоходной техники в экстремальных природных условиях предъявляет к ней ряд требований: безотказность, сохраняемость, ремонтпригодность, а эксплуатация в российских условиях, при температуре до -60°C , в районах с низкой плотностью населения, без быстрого доступа к запасным частям, топливу, техпомощи, предъявляет исключительные требования к снегоходам.

Из этого следует, что отечественный снегоход должен обладать необходимыми и исключительными характеристиками для условий российской эксплуатации:

- иметь повышенный ресурс безотказной работы;
- иметь высокий уровень ремонтпригодности в полевых условиях;
- иметь модульное строение для быстрой замены или ремонта вышедшего из строя агрегата;
- низкий уровень шума;
- низкое удельное давление на поверхность, повышенную проходимость;
- необходимые опции: двухместное сиденье, вместительный багажник, задний ход, дополнительное освещение, обогревы и т.д.;
- повышенный запас хода и расход топлива не более 15-20 л/100 км.

Вывод: сейчас существует проблема создания отечественного утилитарного снегохода с учетом российских условий эксплуатации с характеристиками не хуже продукции мировых лидеров снегоходостроения.

В качестве примера предлагается спроектировать снегоход со следующими данными.

1. Снегоход должен использоваться в качестве внедорожного транспортного средства, обеспечивающего передвижение двух человек и перевозку грузов по снежному бездорожью.

2. Установленный ресурс снегохода до первого капитального ремонта не менее 8000 км.

3. Внешний уровень шума снегохода должен быть не более 80 дБ.

4. Давление на опорные поверхности снегохода неснаряженной массы должно быть не более 4 (0,041) кПа (кгс/см^2), полной массы – 6 (0,061) кПа (кгс/см^2).

5. Снегоход с прицепом, при плотности снежного покрова от 0,3 до 0,35 г/см³, должен обеспечивать максимальную скорость не менее 80 км/ч.

6. Максимальный подъем, преодолеваемый с места без остановки снегоходом полной массы, при протяженности подъема 10⁺² м с плотностью снежного покрова от 0,3 до 0,35 г/см³ должен быть не менее 20 градусов.

7. На снегоходе должно быть установлено электрооборудование по однопроводной схеме на номинальное напряжение 12 В.

8. Снегоход должен быть оборудован встроенной системой контроля основных параметров (скорости, пути, показания оборотов двигателя).

9. Другие требования к снегоходам по ГОСТ Р 50944-2011 «Снегоходы. Требования безопасности».

Предлагаются основные задачи для решения проблемы:

1. Синтез новой конструкции снегохода с учетом условий российской эксплуатации и новейших достижений в области снегоходостроения.

2. Проектирование новой конструкции утилитарного снегохода, исходя из минимальной цены на изделие.

3. Модернизация выпускаемых машин для повышения потребительских свойств.

4. Усовершенствование конструкции выпускаемой техники с учетом производства с помощью средств автоматизации.

5. Создание технологии изготовления выпускаемых машин, обеспечивающей минимальную себестоимость изделия.

6. Анализ несущей рамы и элементов конструкции снегохода для снижения массы машины.

7. Повышение показателей эргономичности и эстетичного облика выпускаемой техники.

8. Применение новейших подходов к проектированию снегоходов для повышения показателей качества.

9. Анализ использования модульной конструкции снегохода, расчет коэффициента модульности.

10. Применение российских компонентов при производстве снегохода (карбюраторы, детали двигателя, электронные компоненты).

В ходе работы были сформулированы задачи по решению проблемы создания конструктивного облика отечественного утилитарного снегохода, выявлены преимущества и недостатки снегоходов российских и зарубежных производителей, выработаны требования к созданию отечественного конкурентоспособного утилитарного снегохода.

СЕКЦИЯ «МЕТРОЛОГИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ»

УДК 533.6.08

ПРИМЕНЕНИЕ PIV/PLIF МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ ЗА ФРОНТОВЫМ УСТРОЙСТВОМ КС ГТУ

В. М. Дулин^{1,2}, А. В. Бильский^{1,2}, Л. М. Чикишев^{1,2},
А. С. Лобасов^{1,2}, Д. К. Шараборин^{1,2}, В. В. Цатиашвили³,
В. Г. Августинovich³, Д. М. Маркович^{1,2}

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН,

²Новосибирский государственный университет,

³ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь

Перемешивание топлива и окислителя играет одну из ключевых ролей в стабилизации пламени и образовании вредных выбросов. Данная работа направлена на исследование структуры течения и процессов турбулентного переноса пассивной примеси в изотермическом потоке, организованном перспективным фронтным устройством в камере сгорания ГТУ. Для валидации расчетных кодов вычислительной газодинамики, используемых для расчета сложных закрученных течений в промышленных устройствах, необходимы надежные экспериментальные данные. Известно, что лазерно-индуцированная флуоресценция паров ацетона (acetone PLIF) может быть использована для проведения количественных измерений локального соотношения топливо/окислитель при постоянной температуре и давлении в отсутствие химической реакции [1]. Так, например, авторы работы [2] исследовали турбулентный массоперенос для струйных течений лабораторного масштаба в сносящем потоке используя одновременные измерения методами acetone PLIF и PIV. Данные оптические панорамные методы являются весьма работоспособными для проведения измерений при реалистичных значениях расхода газа.

В рамках данной работы одновременные PIV/PLIF измерения проводились в изотермической модели камеры сгорания ГТУ при повышенном давлении и расходе воздуха до 0,5 кг/с. Фронтное устройство камеры сгорания было разработано ОАО Авиадвигатель (г. Пермь). Диаметр выходного сопла составлял 80 мм, диаметр цилиндрической камеры сгорания 120 мм. Число Рейнольдса составляло 300 000 (построено по среднерасходной скорости и выходному диаметру сопла). Из соображений безопасности вместо природного газа, в качестве среды, моделирующей топливо, использовался неон, что позволило смоделировать стратификацию в

сильно-закрученном потоке. Измерения проводились в продольной плоскости (соответствующей плоскости симметрии установки). Размер измерительной области составлял 50x120 мм.

Для измерения полей скорости применялась система основанная на методе PIV. Поток освещался второй гармоникой двойного импульсного Nd:YAG лазера (Quantel EverGreen 200) с энергией каждого импульса 200 мДж. Задержка между импульсами составляла 5 мкс. Частота съемки составляла 5 Гц, таким образом можно считать ансамбль полей скорости, измеренных в эксперименте статистически независимым. Регистрация трассерных изображений осуществлялась цифровой ПЗС-камерой (ImperX IGV-B2020), оснащенной объективом SIGMA AF 50 mm (F2,8 EX DG Macro). Объектив камеры оснащался узкополосным оптическим фильтром (Edmund Optics) с пропускающей способностью в 60% на длине волны 532 нм и полной шириной пропускания на полувысоте, составляющей 10 нм. Генератор аэрозоля (частицы водо-глицеринового раствора) подключался в поток основного воздуха по байпасной схеме, перепад давления между входом и выходом данного устройства составлял 0,5 атмосферы.

Для измерения концентрации пассивной примеси методом PLIF в поток, поступающий в камеру сгорания через топливный канал подмешивались пары ацетона. Устройство для засева потока парами ацетона представляло собой емкость, в которой испарялся жидкий ацетон, помещенную в термостатированную водяную "рубашку", температура потока с парами ацетона на выходе из питателя составляла 50 °С.

Для возбуждения флуоресценции ацетона использовалась четвертая гармоника твердотельного Nd:YAG лазера (Brilliant B). Энергия импульса лазера на длине волны 266 нм составляла 70 мДж. УФ-излучение направлялось системой прямоугольных призм в специальную оптику, разворачивавшую лазерный луч в коллимированный нож размером 50 мм и толщиной менее 0,8 мм. Порядка 30 % УФ-излучения отводилось в измеритель энергии (Coherent LabMax), что позволяло регистрировать энергию каждого импульса лазерного излучения. Учёт изменения энергии лазера от импульса к импульсу необходим при анализе и сравнение мгновенных изображений полей концентрации. Регистрация сигнала флуоресценции осуществлялась ПЗС-камерой с усилителем яркости изображения на основе электронно-оптического преобразователя (PI-MAX4, Princeton Instruments) снабженную набором оптических фильтров.

Две эти измерительные системы были синхронизованы при помощи восьмиканального генератора импульсов (Berkeley Nucleonics BNC 575 TTL). Пространственное совмещение измерительных областей достига-

лось за счет использования двух оптических систем формирования лазерного ножа (коллимированного ножа для PLIF и расходящегося для PIV). Для повышения качества соотношения сигнал/шум полученные изображения подвергались ряду процедур обработки, направленных на устранение влияния неоднородной засветки измерительной области. Перед проведением измерений в объем камеры сгорания помещалась плоская калибровочная мишень, что позволило провести пространственную калибровку и согласование PIV и PLIF камер.

После нескольких минут работы экспериментальной установки в заданном режиме стенки кварцевой камеры сгорания становились непрозрачными, вследствие оседания частиц водо-глицеринового раствора и образования тонкой пленки. Определенную трудность представляло наличие отражений, поглощение излучения, а также выбор режима засева в попытках найти компромисс между прозрачностью стенок камеры сгорания и необходимой плотностью засева.

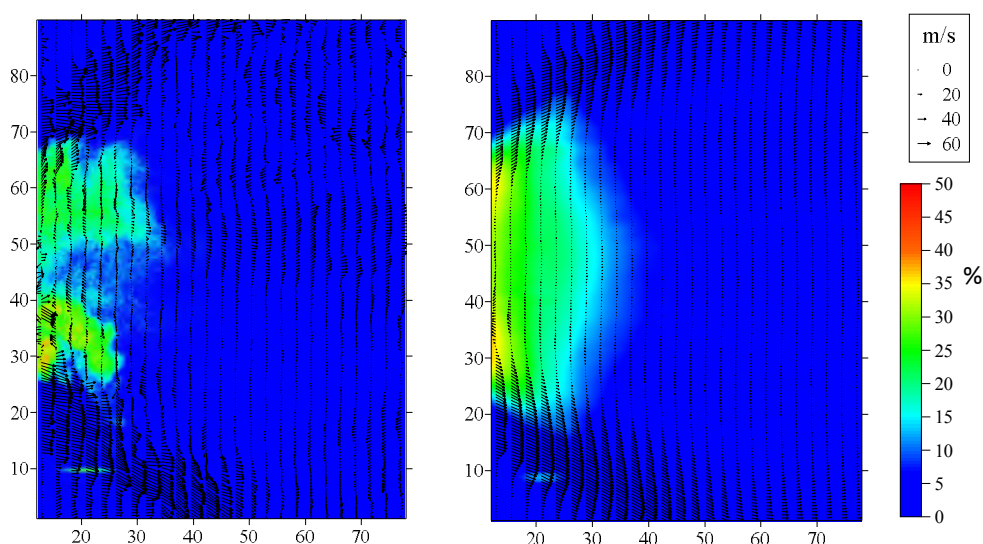


Рис. 1. Мгновенные (слева) и осредненные по ансамблю (справа) поля скорости и концентрации пассивной примеси в центральной плоскости камеры сгорания ГТУ ($Re=300\,000$)

На рис. 1 представлены результаты совместных измерений поля скорости и концентрации пассивной примеси для в камере сгорания ГТУ, работающей по принципу сжигания предварительно перемешанной смеси. Применение панорамных оптических методов позволило получить информацию, которая чрезвычайно необходима для верификации численного расчетного кода, и не может быть получена в ходе точечных измерений. Качество экспериментальных данных, а также алгоритмы обработки изображений позволили измерить турбулентный поток пассивной приме-

си. Результаты работы были использованы для верификации газодинамического расчета для предсказания распределения поля скорости и концентрации топлива в камере сгорания газотурбинного типа.

Библиографический список

1. Lozano, A., Smith, S. H., Mungal, M. G., and Hanson, R. K. Concentration measurements in a trans-verse jet by planar laser-induced fluorescence of acetone // AIAA J. 1993, Vol. 32, P. 218-221.
2. Su L.K., Mungal M.G. Mixing in cross-flowing jets: Turbulent quantities // 43rd Aerospace Science Meeting and Exhibit 10-13 January, Reno, Nevada, AIAA 2005-305

УДК 533.6.08, 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОСТНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕАГИРУЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

А. С. Лобасов^{1,2}, Д. К. Шараборин^{1,2}, В. М. Дулин^{1,2},
И. М. Верещагин³, Ш. А. Пиралишвили³, Д. М. Маркович^{1,2}

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

² Новосибирский государственный университет

³ ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

С развитием оптоэлектронных технологий панорамные оптические методы диагностики пламён стали стандартными инструментами в экспериментальных исследованиях. Наиболее распространенные из них основаны на регистрации лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), рассеяния Релея (РР), спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) и анемометрии по изображениям частиц (PIV) [1-3]. Панорамные ЛИФ методы применяются для измерения полей температуры и концентраций как для пассивной примеси (например, для паров ацетона) в горячем газе (вплоть до 900°K), так и для радикалов (ОН*, СН*, НСНО* и др.) в пламени. Преимущества ЛИФ заключаются в высокой интенсивности сигнала (по сравнению с РР и СКР) и регистрацией свечения в спектре, отличном от длины волны возбуждающего лазерного излучения. Последнее обстоя-

тельство, позволяет проводить комбинированные ЛИФ измерения с методом PIV. Ограничение в использовании метода ЛИФ заключается в сложной количественной интерпретации сигнала. Сигнал РР, и более того СКР, намного менее интенсивен (на 6 и 10 порядков, соответственно), но количественная интерпретация уже не так сложна. Целью данной работы являлось детальное экспериментальное исследование газодинамической картины течения и режимов горения (режим стехиометрического соотношения подачи топлива и окислителя, и режим со значительным избытком воздуха) в вихревом форсуночно-горелочном модуле перспективной камеры сгорания газотурбинного двигателя.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. В качестве зондирующего излучения в экспериментах по регистрации интенсивности СКР и РР использовалась третья (355 нм) гармоника мощного импульсного Nd:YAG лазера (Quanta-Ray). Для проведения измерений методом ЛИФ, вторая (532 нм) гармоника этого лазера использовалась для накачки перестраиваемого импульсного лазера на красителях (Sirah, в качестве красителя использовался Rhodamine 6G). Средняя энергия лазерного излучения в случае СКР/РР (355 нм) и ЛИФ (283 нм) составляла 600 мДж и 5 мДж, соответственно, со среднеквадратичным отклонением менее 5 %. В случае РР и ЛИФ лазерный луч разворачивался в коллимированный нож, размером до 50 мм в вертикальном направлении и толщиной менее 0,8 мм, а в случае СКР луч фокусировался в пучок диаметром менее 0.8 мм. Нож проходил через ось симметрии горелочного устройства, возбуждая флуоресценцию молекул в плоскости измерения.

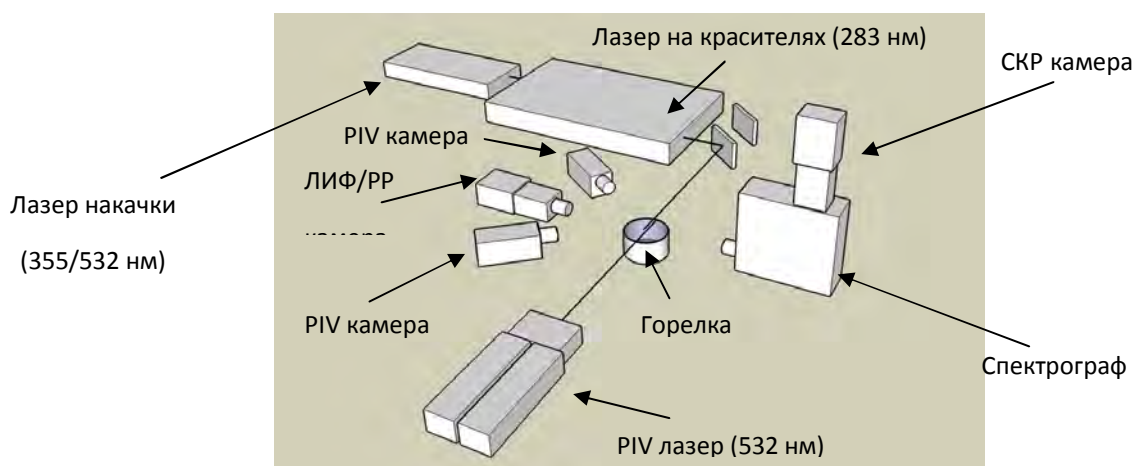


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для регистрации сигнала ЛИФ и РР использовался электронно-оптический преобразователь с мультиканальным усилителем (LaVision IRO) с фотокатодом S20 (multialkali), имеющим квантовую эффективность

порядка 25% в исследуемом диапазоне длин волн (280-360 нм). После усиления, фосфорное покрытие преобразователя освещало гибридную ПЗС-КМОП матрицу (sCMOS) 16-битной камеры (разрешение: 2560×2160 пикселей, размер пикселя: 6.5×6.5 мкм). Для регистрации сигнала СКР использовалась интенсифицированная ПЗС камера PCO DICAM Pro (12 бит) на основе аналогичного электронно-оптического преобразователя с квантовой эффективностью около 20% в исследуемой области длин волн (320-380 нм). Камера подключалась к спектрографу, построенному по схеме Черни-Тернера (Newport MS127i 1/8 м, 1200лин./мм). Для повышения соотношения сигнал-шум, сигнал РР и СКР регистрировался для двух перпендикулярных поляризаций излучения Nd:YAG лазера. Время экспозиция каждого кадра в случае СКР/РР и ЛИФ составляло 30 нс и 200 нс, соответственно. Во время регистрации спектральной картины СКР использовался оптический полосно-заграждающий фильтр, который позволил уменьшить негативное влияние РР на спектр СКР сигнала и тем самым существенно увеличить динамический диапазон измерительной системы. ЛИФ измерения проводились с применением полосно-пропускающего оптического фильтра, который позволяет избавиться от нежелательного фона вследствие рассеяния лазерного излучения, а также переотражений от горелочного устройства. Более того, фильтр был необходим для проведения одновременных измерений методами ЛИФ и PIV. Для PIV измерений использовалась система в стереоскопической конфигурации, состоявшая из импульсного Nd:YAG лазера Quantel EverGreen 200 (с двумя излучателями, энергия импульсов каждого 200 мДж) и двух ПЗС камер ImperX IGV-B2020 (размер кадра 2060×2056 пикселей).

Скоростная PIV система состояла из скоростного двухканального Nd:YLF импульсного лазера (Photonics DM-100 DH), восьмиканального генератора импульсов (BNC 575) и одной скоростной камеры Photron SA5. Частота работы системы в двухкадровом режиме составляла 3,5 кГц. Скоростная камера располагалась таким образом, чтобы оптическая ось была строго перпендикулярна плоскости лазерного ножа. Плоскость лазерного ножа проходила через ось симметрии объекта исследования. Толщина лазерного ножа в измерительной области составляла 0,8 мм.

Из результатов PIV измерений можно видеть, что для приосевой области поля скорости характерно наличие возвратного течения, которое сформировано из закрученного потока, истекающего вдоль внутренних стенок горелочного устройства, а также вовлекаемого внешнего воздуха. На рисунке 2 показаны поля средней скорости и относительной концентрации пассивной примеси паров ацетона в случае режима без горения

(пространственные координаты нормированы на диаметр горелочного устройства, $D = 62$ мм). Для поля скорости цветом показана компонента направленная по нормали к исследуемой плоскости.

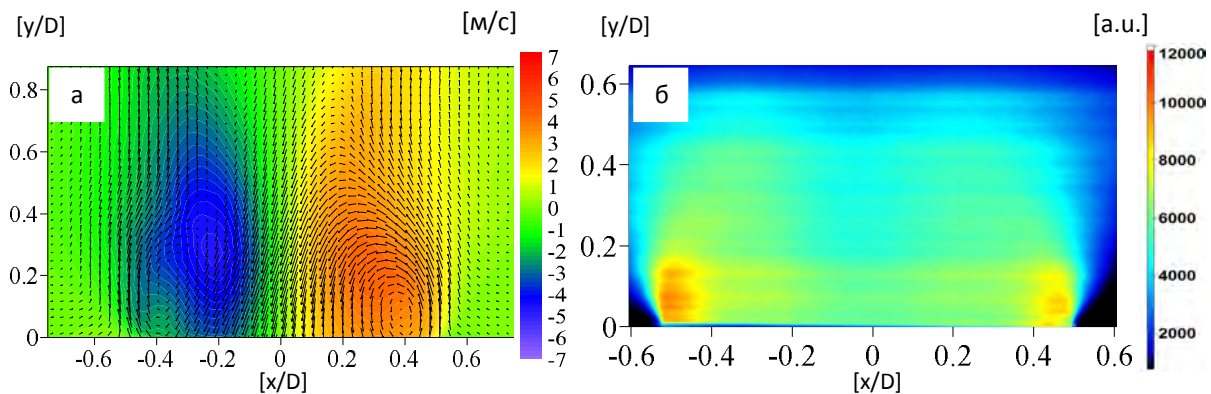


Рис. 2. Поля средней (а) скорости и (б) относительной концентрации пассивной примеси

Проведение измерений методом PIV с высокой частотой съемки показало, что для течения также была характерна нестационарная динамика, соответствующая прецессии закрученного ядра потока на частоте ≈ 44 Гц. На рисунке 3 показано периодическое изменение знака поперечной скорости в когерентной составляющей пульсаций скорости, которая соответствует прецессии потока.

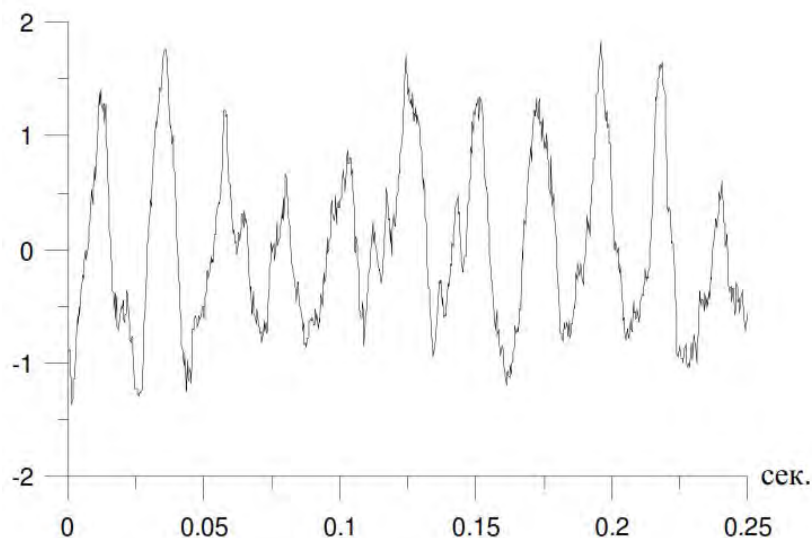


Рис.3. Периодическое изменение знака поперечной скорости в когерентной составляющей пульсаций скорости, которая соответствует прецессии потока

На рисунке 4 показаны поля средней скорости и интенсивности ЛИФ радикала OH^* в случае горения пропано-воздушного пламени со значительным избытком воздуха.

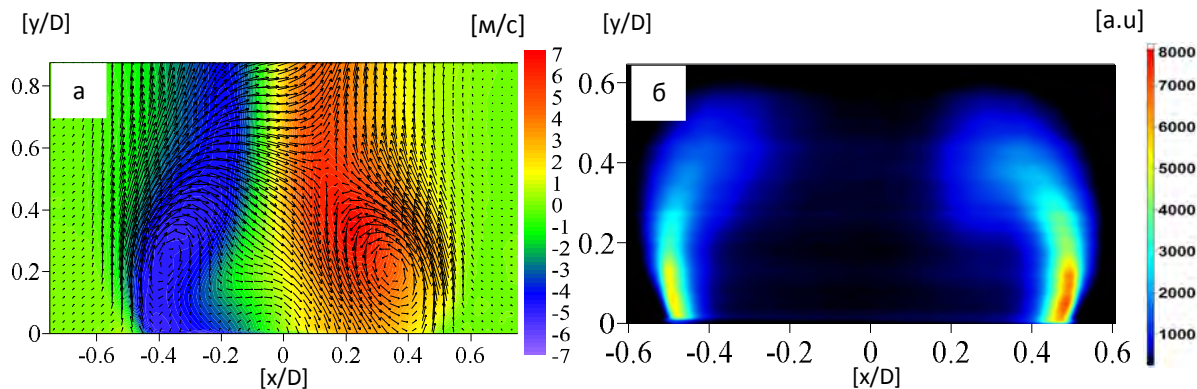


Рис. 4. Поля средней (а) скорости и (б) поле интенсивности ЛИФ радикала OH^* .

Концентрация компонент была измерена в нескольких точках над горелкой методом СКР. Пример спектра представлен на рисунке 5а. Для оценки полей температуры сигнал рассеяния Рэлея регистрировался для двух случаев: с горением и без. Для случая без горения сигнал рассеяния представляет собой опорное значение с известной плотностью. Результирующее сечение рассеяния для компонент газовой смеси в пламени было оценено на основании результатов СКР измерения. Среднее поле температуры представлено на рисунке 5б.

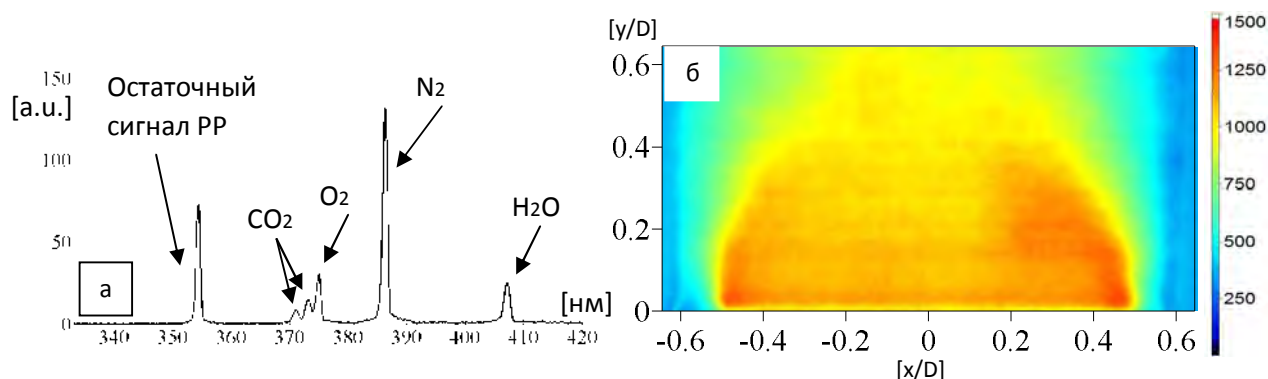


Рис. 5. (а) – пример спектра СКР на оси вблизи среза горелочного устройства, (б) – среднее поле температуры продуктов горения пропано-воздушного пламени со значительным избытком воздуха

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ (НШ-5984.2014.8) и РФФИ (грант № 15-38-21003 и грант № 14-38-50911).

Библиографический список

1. E. P. Hassel and S. Linow, "Laser Diagnostics for Studies of Turbulent Combustion," Measurement Science and Technology, Vol. 11, No. 2, 2000, pp. R37-R57. doi:10.1088/0957-0233/11/2/201.

2. Eckbreth A. C., Laser Diagnostic for Combustion Temperature and Species (Gordon and Breach, Netherlands 1996).
3. Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J. (1998). Particle Image Velocimetry, Springer, Berlin Heidelberg, New York.

УДК 53.082.54, 53.088.4

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Ю. А. Ложкин, м.н.с.

Научный руководитель: Д. М. Маркович, чл.-корр. РАН, зам. директора

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Новосибирский государственный университет

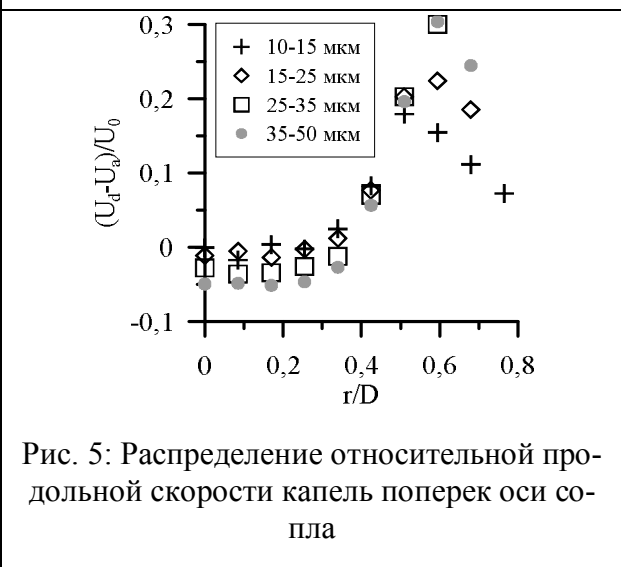
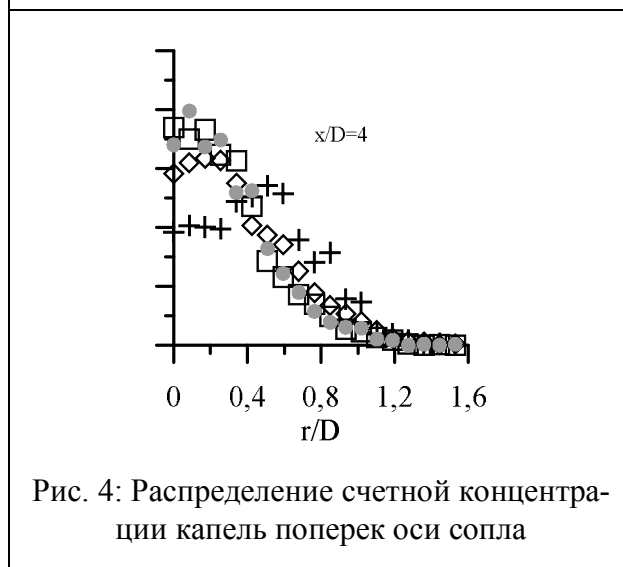
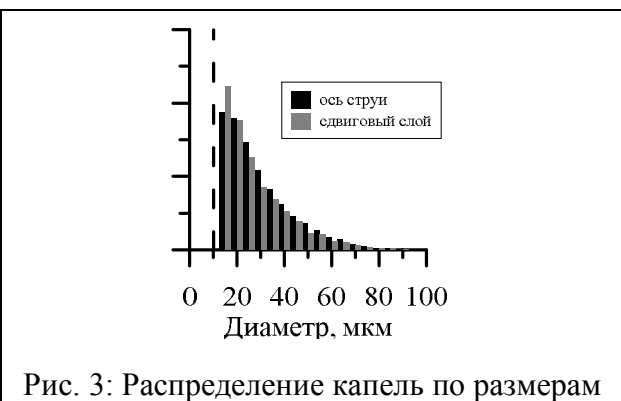
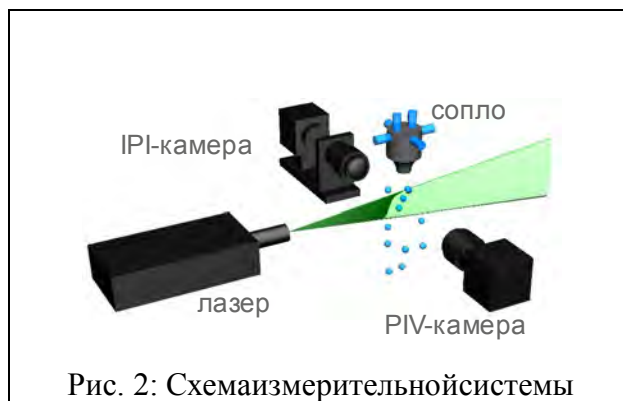
Работа посвящена применению современных панорамных оптических методов исследования InterferometricParticleImaging (IPI), ParticleImageVelocimetry (PIV), ShadowPhotography (SP) и BackgroundOrientedShlieren (BOS) для исследования газокапельных течений, в том числе для изучения влияния параметров газового потока на пространственное распределение и движение частиц дисперсной фазы. Основным преимуществом указанных методов является возможность получения мгновенных пространственных распределений величин, одновременное измерение параметров несущей и дисперсной фазы, и простота сравнения результатов с данными численного моделирования.

В докладе рассматриваются особенности применения методов PIV/IPI/SP/BOS для измерения скорости газового потока и скорости и размера капель полидисперсного аэрозоля (среднемассовый размер около 20 мкм), определения волновой структуры потока и формы капель в дозвуковом газокапельном струйном течении и в газокапельном течении в сверхзвуковом сопле (режим течения со скачком внутри сопла).

Известно, что взаимодействие непрерывной и дисперсной фаз включает в себя движение частиц различного размера в турбулентном потоке, генерацию турбулентности крупными частицами, подавление вихрей ансамблями мелких капель, распад, слияние и испарение капель в условиях их неоднородного распределения в потоке. На распределение частиц в потоке наибольшее влияние оказывают крупномасштабные вихревые струк-

туры: частицы аккумулируются в областях низкой завихренности, на периферии крупных вихрей, при этом распределение частиц в пространстве зависит от размера этих частиц.

В данной работе исследуется воздушная струя с добавлением полидисперсных капель, истекающая из профилированного сопла, обеспечивающего заданный профиль скорости на выходе. Анализируются скорости движения и пространственное распределение капель различного размера. Варьируются число Рейнольдса газового потока и степень закрутки, концентрация частиц. Используются методы IPI/PTV для измерения размеров и скоростей капель и PIV для измерения скорости газа. Также рассматриваются особенности реализации данных методов применительно к решению описанной задачи.



В случае сверхзвуковых потоков, в том числе с разрывами, значения аэродинамических сил, действующих на капли, оказывается достаточным для деформации и распада капель размером в десятки мкм. Измерение таких капель становится возможным только с применением «прямых» методов измерения, основанных на использовании микроскопической техники.

Одновременное измерение скорости несущей фазы и капель осложнено вследствие высокой концентрации капель в потоке.

Для исследования динамики капель в высокоскоростном течении в сверхзвуковом сопле (режим со скачком внутри сопла) использовалась комбинация методов SP/BOS для измерения параметров капель и визуализации волновой структуры потока, а также диагностики для процесса формирования капель, и PIV для измерения скорости газового потока. Для капель диаметром около 20 мкм наблюдалась деформация в потоке, но не разрушение, хотя число Вебера оказывалось достаточно большим.

Работы выполнены при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-01411 и № 14-08-31718)

УДК 620.19:004.93

О ПРИМЕНЕНИИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

С. С. Юлин¹, инженер-программист

И. Н. Паламарь², канд. техн. наук, профессор

¹ ОАО «КБ «ЛУЧ», г. Рыбинск

² ФГБОУ ВПО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева»

Контроль состояния поверхностного слоя высоконагруженных деталей машин является одним из важных этапов при оценке технического состояния деталей, который выполняется на основных этапах жизненного цикла изделия. На этапе изготовления решаются задачи совершенствования технологических процессов для достижения требуемого качества поверхностного слоя, выявления дефектов и контроля их устранения. По результатам дефектации принимаются решения либо о возможном продолжении эксплуатации, либо о необходимости ремонта с последующей эксплуатацией. Операции контроля связаны как с анализом изображений макро- и микроструктуры, так и с измерением параметров качества поверхностного слоя, определяющими эксплуатационные характеристики детали, такие как прочность, износостойкость, жаропрочность и коррозионная стойкость.

Повышение эффективности операций контроля состояния поверхностного слоя высоконагруженных деталей машин требует разработки интеллектуальных средств принятия решений на основе моделей искусст-

венного интеллекта. Среди множества областей искусственного интеллекта для данной задачи наиболее подходящей является область машинного обучения. Это обусловлено тем, что нет четкого формального математического описания понятия «дефект деталей машин», соответственно нет четких формализованных правил для определения того или иного вида дефекта. Теория машинного обучения не требует наличия таких правил, а состоит в том, чтобы по нескольким имеющимся экземплярам дефектов сформировать правила для всех остальных возможных экземпляров.

Машинное обучение – процесс, в результате которого машина (компьютер) способна показывать поведение, которое в нее не было явно заложено (запрограммировано). Машинное обучение позволяет повышать эффективность сложных промышленных систем за счет обнаружения неизвестных связей между компонентами системы, изучения тренда изменения параметров системы, а также прогнозирования будущего поведения системы на основе текущих и предыдущих значений параметров системы. За последние пять лет наблюдается тенденция к выходу систем машинного обучения и анализа данных из рамок лабораторных исследований и использование их в промышленности для повышения качества изготавливаемой продукции. Компания «HARMAN», специализирующаяся на производстве автомобильной радиоэлектроники, использует механизм линейной регрессии, прогнозирующий ресурс аккумулятора, в системе управления батареями (BMS) для гибридных транспортных средств [1]. Компания «The Boeing Company» второй год подряд является организатором конференции «Machine Learning and Data Analytics Symposium» и разрабатывает методы раннего выявления отклонений от штатного функционирования авионики, анализируя данные со всех бортовых датчиков, включая отклонения в результате попыток скомпрометировать систему криптозащиты бортовой аппаратуры [2]. Компания «Siemens Metals Technologies» разработала систему «SIROLL HM» для компактных станов горячей прокатки полосы, в которой использует методы адаптивного управления температурой плавления на основе подходов из области машинного обучения [3]. Компания «Siemens Corporate Technology» используют машинное обучение для оптимизации работы газовых турбин. Широко известен их проект «ALICE» состоящий в оптимизации работы ветровых турбин на основе математического аппарата нейронных сетей [4]. Анализ таких параметров как направление и скорость ветра, температура, ток и напряжение, а также вибрации лопастей помогают ветряным турбинам генерировать большее количество энергии. На основе метеорологических датчиков программное обеспечение вычисляет оптимальные настройки для различных погодных

условий, которые включают целый ряд факторов, таких как продолжительность солнечного сияния, туман, грозы. Если возникают знакомые погодные условия (на которых было произведено обучение нейронной сети), блоки управления лопастями сразу же активируют оптимальные настройки для данных погодных условий, которые были установлены в результате машинного обучения.

Особо важной разработкой компании «Siemens», в сфере промышленного изготовления деталей машин, является автоматизированная система контроля качества поверхности «SIROLL SIAS» [3]. Система предназначена для оперативного контроля поверхности металлов в целях обнаружения и классификации дефектов, таких как закатанная окалина и шлак, периодических дефектов, таких как следы проката и вдавливания, а также отдельных дефектов, таких как газовые пузыри, плен, расслоения и риски. Результаты выдаются в режиме реального времени для обеспечения незамедлительных решений, обеспечивающих оптимизацию затрат, повышение производительности и удовлетворение требований конечных пользователей.

Разработка таких систем носит крайне актуальный характер и представляет как научный, так и практический интерес. Еще одним примером является метод анализа износа поверхности режущего инструмента на основе нейронной сети, разработанный в КНР [5]. Метод состоит из следующих шагов: получение оптического снимка структуры поверхности исследуемого объекта; выборка и обработка фрагментов поверхности; обучение нейронной сети методом обратного распространения ошибки; выполнение классификации для качественного и количественного анализа износа режущего инструмента.

Исходными данными для классификации дефектов поверхностного слоя деталей машин могут являться два типа данных: профилограмма поверхности и фотоизображение поверхности. Выходными данными системы классификации дефектов является один из классов дефектов. Помимо дефектов классифицируемыми данными могут быть различные параметры качества поверхности, такие как неровности поверхности, физико-механические свойства, структура и структурно-фазовый состав поверхности и поверхностного слоя. Анализируемые классы дефектов определяются на этапе обучения системы по заранее подготовленным исходным данным (например, профилограммам и изображениям) содержащим определённый дефект. С точки зрения теории машинного обучения такая задача формулируется как задача обучения по прецедентам в гетерогенном пространстве признаков. Одним из вариантов решения данной задачи яв-

ляется построение независимых классификаторов для каждого типа исходных данных и последующего их объединения существующими методами формирования ансамблей классификаторов (методом голосования, шаблонами решений, классификацией в пространстве ответов классификаторов («мягких меток»)).

Обучающие данные для системы должны быть представлены в виде полной и непротиворечивой информации и отражать исследуемые физические процессы. Сбор обучающих данных выполняется на экспериментальных образцах, моделирующих воздействие внешних и внутренних факторов, влияющих на качество поверхностного слоя детали. Дообучение системы может проводиться по данным, накапливаемым в процессе жизненного цикла детали.

Система классификации дефектов поверхностного слоя деталей машин состоит из трех основных блоков.

Блок 1 – формирование признаков. Для выделения признаков для классификации профилограмму можно представить как сигнал и применить стандартные методы частотного анализа сигналов, путем формирования спектрограммы сигнала методом MFCC (Mel Frequency Cepstral Coefficient) на основе быстрого преобразования Фурье. Полученные частотные коэффициенты являются исходными данными для алгоритма классификации дефектов. Извлечение признаков из изображения производится путем применения оператора LBP (Local Binary Patterns) и многомасштабного вейвлет-анализа с вычислением вейвлет-статистик.

Блок 2 – обучение классификаторов. Классификация MFCC коэффициентов полученных по профилограммам производится ранее разработанным нами методом классификации временных последовательностей на основе главных нелинейных многообразий малой размерности и цепей Маркова. Данный метод показывает хорошее качество классификации последовательностей наблюдений большой длины при малом количестве обучающих данных. Классификация вектора признаков состоящего из LBP коэффициентов и вейвлет-статистик производится методом опорных векторов SVM. Данный метод показывает хорошее качество классификации при использовании признакового пространства большой размерности и достаточно большого количества обучающих данных. Подразумевается, что обучающий набор данных фотоизображений значительно больше и обладает большей статистической значимостью, чем набор профилограмм, в силу трудоемкости процесса их получения.

Блок 3 – объединение классификаторов. Объединение выполняется путем обучения нейронной сети (однослойного перцептрона) в простран-

стве ответов базовых классификаторов. Выходом каждого базового классификатора является вектор решений (вектор, содержащий в качестве значений «мягкие метки», степень соответствия образа тому или иному классу). Эти значения подаются на вход нейронной сети (она должна быть обучена объединению решений классификаторов базового уровня), выходом которой является решение в пользу того или иного класса. Базовые классификаторы на выходе выдают только меру принадлежности образа одному из классов, окончательное решение о принадлежности образа конкретному классу дефектов принимает нейронная сеть.

В заключение следует отметить то, что нет никаких научных и технических ограничений для построения такой системы. Проблема состоит только в составлении обучающей выборки для классификаторов (сбор профилограмм и изображений с разными видами дефектов) и в подборе оптимальных параметров алгоритмов, обеспечивающих заданный баланс точности и полноты классификации. На начальном этапе разработки желательная точность может не соответствовать действительной, поэтому целесообразно реализовывать автоматизированную, а не автоматическую систему и оставлять возможность окончательного принятия решений за оператором. В процессе эксплуатации система может дообучаться, исходя из решений оператора.

Библиографический список

1. Harman Innovation Hub. Применение методов машинного обучения в автомобильной промышленности, 2013.
<http://harmaninnovation.com/blog/ru/application-machine-learning-automotive-3-2/> (дата обращения: 1.01.2015).
2. Boieng. Featute Story. An experience to remember, 2012.
http://www.boeing.com/Features/2012/08/corp_intern_08_28_12.html (дата обращения: 1.01.2015).
3. Industry Siemens. Компактные станы горячей прокатки полосы, 2012. <http://www.industry.siemens.com/verticals/metals-industry/ru/metals/hot-rolling/compact-hot-strip-mill/pages/home.aspx> (дата обращения: 1.01.2015).
4. PHYS. Optimizing how wind turbines work with machine learning, 2014. <http://phys.org/news/2014-10-optimizing-turbines-machine.html> (дата обращения: 1.01.2015).
5. Патент – № CN 101670533 – Cutting-tool wear state evaluating method based on image analysis of workpiece machining surface / *Yonghong Zhang* Оpubл. 17.03.2010.

УДК 658.562.3

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ПРИВодОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. Н. Попов, генеральный директор

ОАО КБПА, г. Саратов

Повышение эксплуатационной надежности прецизионных приводов, используемых в системах управления летательных аппаратов, представляет собой сложную задачу, решение которой может быть найдено только в направлении повышения эксплуатационных свойств входящих в их состав деталей, поскольку к ним предъявляются достаточно высокие требования по обеспечению и длительному сохранению параметров, характеризующих геометрическую точность. Решение этой задачи вызвало развитие многих технологических направлений, одним из которых является физико-химическое модифицирование поверхностного слоя воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда пониженного давления [1], обеспечивающее повышение прочности и, как следствие, износостойкости.

Результаты предварительных исследований по практической оценке возможностей данного направления на примере деталей одного из механизмов привода позволили сделать следующие основные выводы.

1. Значения основных геометрических параметров деталей после модификации не изменяются.

2. Распределение значений микротвердости по глубине поверхностного слоя после модификации отображает ее связь со спецификой предварительных технологических воздействий на материал, изменяющих его физико-механические свойства. Говоря иначе, данные свойства у модифицированного поверхностного слоя изменяются в соответствии с закономерностями технологического наследования и проявляются в повышении в различной степени его локальной плотности.

3. Повышение микротвердости поверхности после модификации составляет, в среднем, 1,2 раза, достигая значений 60 по HRC.

4. Изменения микрорельефа поверхности свидетельствуют как о сохранении его исходной структуры, так и о ее улучшении, в частности, по параметру шероховатости. Возможности улучшения могут гарантироваться, если для конкретных начальных физико-механических свойств поверхностного слоя будут найдены конкретные значения параметров режима модификации.

5. Осветление поверхности свидетельствует об изменении химического состава материала в результате его насыщения легирующими элементами с более высокими атомными номерами, предположительно близкими или входящими в состав растворенной карбидной фазы, а также атомами внедрения – азота.

Результаты изучения свойств модифицированных деталей позволили также сделать вывод о том, что качество процесса модификации может служить не только критерием стабильности условий их эксплуатации, но и определять характер их изменений, формирующих физическую картину и определяющих основные закономерности протекания процессов, приводящих к ухудшению состояния и, как следствие, снижению эксплуатационной надежности привода, прежде всего его механической системы. Для установления этих закономерностей представляется целесообразным создание информационно-измерительного канала о состоянии механической системы привода, основанного на регистрации вибросигналов о ее колебаниях, которые возбуждаются при протекании рабочих процессов и динамического взаимодействия между собой входящих в ее состав деталей. Состав колебаний отражает совокупность возмущений, связанных с режимом функционирования системы, и реакций на эти возмущения ее деталей в соответствии с их динамическими характеристиками.

Сложность выделения информации из сигнала колебательного процесса заключается в том, что его закономерная часть представляет собой совокупность как гармонических, так и импульсных составляющих. Если гармонические составляющие можно выделить путем спектрального преобразования, то циклические составляющие в виде ударных импульсов вводят нелинейные искажения в сигнал колебаний и увеличивают его зашумленность. Поэтому выделение циклических составляющих целесообразно осуществлять по временному сигналу колебаний по его пиковым значениям и далее использовать полученную информацию на этапе частотного анализа, для реализации которого предполагается использовать следующие способы и показатели [2].

1. Способ спектральных поверхностей, позволяющий в виде трехмерного изображения получить полную информацию об амплитудно-частотном составе колебательного процесса и о том, как изменяется его качественный состав за исследуемый период времени наблюдения. Применение методов статистического анализа к системам спектральных и полосных сечений спектральной поверхности позволяет рассчитать количественные характеристики колебательного процесса – коэффициенты динамичности и пикообразности, коэффициенты корреляции между отдельными формами колеба-

ний и т.д., т.е. позволяет осуществить прогноз выхода функционирования механической системы на критический режим.

2. Способ фильтрации случайных составляющих позволяющий отслеживать соотношение в колебательном процессе случайной и неслучайной составляющих. По изменению указанного соотношения так же можно выявить переход механической системы в область ее недопустимого состояния.

3. Способ оценивания плотности траекторий движений на фазовой плоскости, основанный на исследовании фазовых диаграмм колебательного процесса, который позволяет по изменению скорости нарастания показателя плотности траекторий выйти на предупреждение о переходе механической системы в область опасного режима функционирования.

Библиографический список

1. Бржозовский Б.М. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. – 176 с.

2. Статистическое оценивание нелинейных процессов в мехатронных станочных системах / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, В.В. Мартынов и др. – Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2013. – 160 с.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ НА ПРОИЗВОДСТВЕ И В ЛАБОРАТОРИИ

Ю. В. Могильников, ведущий продукт-менеджер

ООО «Ниеншанц-Сайнтифик», г. Санкт-Петербург

Использование традиционных методов, таких как удар, царапание твердыми минералами, метод «скотча», тест по Роквеллу и др. для контроля прочности для современных материалов фактически неприемлемо из-за субъективности оценки и отсутствии количественно измеряемых параметров, характеризующих твердость, упругость, адгезию, износостойкость покрытий и материалов.

Современные методы контроля этих свойств объектов исследования реализуют количественные характеристики, а условия проведения иссле-

дований позволяют создавать реальные условия эксплуатации элементов изделий.

Метод Скретч-тестирования (измерительное царапание) одно- или многослойного покрытия позволяет определить критическую нагрузку, при которой происходит первичное растрескивание, полное растрескивание, первичное отслоение или полное разрушение покрытия при царапании его алмазным индентором известной геометрии (или индентором из другого твердого материала), а также определить силу трения на каждой из стадий тестирования. Кроме того данный эксперимент можно проводить при нагреве, охлаждении, наличии жидкости, в условиях контролируемой влажности или в вакууме. Приборная база позволяет проводить данные исследования автоматически без влияния «человеческого фактора», что обеспечивает точность и воспроизводимость условий.

Методика исследования износа или времени «жизни» покрытия (Трибологический эксперимент) при вращении или возвратно-поступательном движении обеспечивает получение объективных количественных данных о времени и скорости износа покрытия при заданной нагрузке, коэффициенте трения пар «шар-образец», «штифт-образец» или «плоскость – образец». Метод позволяет количественно определить износостойкость покрытий различной толщины и твердости – от наноразмерных пленок до толстых защитных покрытий. Образцы-свидетели или изделия небольших размеров можно тестировать в условиях вакуума, контролируемой влажности, нагрева, в присутствии смазки.

Различная геометрия тел трения, одно из которых имеет правильную геометрическую форму, а другое имеет плоскую поверхность, при достаточных сведениях о твердости и упруго-пластических свойствах исследуемых материалов позволяет провести моделирование напряжений в покрытиях и спрогнозировать поведение материала при нагрузках, вызывающих разрушение или износ поверхности покрытия или материала.

РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ЛОПАТОК ГАЗОТРУБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Б. А. Чичигин, канд. техн. наук

ООО «Турбодиагностика»

Надежность газотурбинных установок в значительной степени зависит от надежности работы лопаток, так как они являются наиболее нагруженными деталями.

В процессе эксплуатации лопатки как турбин так и компрессоров подвергаются воздействию силовых, вибрационных, температурных факторов. На целостность лопатки также оказывает влияние коррозия, изменение температуры, эрозия, износ и т. д.

Лопатка газотурбинной установки представляет собой изделие с очень сложной геометрической формой, и задача контроля формы лопаток и ее изменений во времени в процессе эксплуатации стоит очень остро.

В настоящий момент специалистами ООО «Турбодиагностика» осуществляется разработка прототипа системы бесконтактного измерения формы лопаток газотурбинных двигателей на остановленном двигателе, не требующая их демонтажа.

Предполагаемый эффект от внедрения данной разработки:

- сокращение времени на обследование лопаток газотурбинных двигателей в 20 раз;
- быстрое получение измерительной информации о форме пера лопаток включая количественные параметры износа без разбора турбины и демонтажа лопаток;
- возможность ведения баз данных с результатами измерений, рассчитывать скорость износа, прогнозировать время ремонта, предотвращать поломки.

Предлагаемая к разработке система позволит контролировать форму пера лопаток без проведения их демонтажа с осевого колеса и без разбора корпуса турбины. С помощью данной системы можно проводить как эксплуатационный контроль, так и использовать ее при продлении ресурса.

Система представляет из себя гибкое средство доставки, снабженное лазерным осветителем, формирующем на поверхности лопатки облако точек. Поверхность лопатки осматривается многоканальной миниатюрной оптической системой, состоящей из двух оптических каналов. Используя полученную информацию компьютерный алгоритм формирует количественный критерий, отражающий степень соответствия конкретной лопатки

эталонному профилю, так же возможно восстановление трехмерного профиля пера лопатки.

На рынке существуют эндоскопы с измерительными функциями, например General Electric XL G3 с функцией измерения 3D Phase, могут проводить только 5 измерений по одному изображению, отсутствует возможность восстановления полностью трехмерной поверхности лопатки, измерения выполняются оператором, путем постановки курсоров на изображении, освещение меняется во времени, не пригодны для работы на вращающемся роторе.

Эндоскопы использующие стереометод, например General Electric XL G3, General Electric XL GO, Olympus IPLEX, могут проводить только 5 измерений по одному изображению отсутствует возможность восстановления полностью трехмерной поверхности лопатки, измерения выполняются оператором, путем постановки курсоров на изображении, разрешение изображения хуже в два раза из-за разделения светочувствительной ПЗС-матрицы логически на две независимые зоны. Дистальный конец должен находиться на расстоянии в 1-5 см от лопатки для проведения корректных измерений.

Система по своим габаритам должна доставляться в конструктивные отверстия в корпусе турбины. Процесс получения измерительных данных осуществляется при вращающемся роторе газотурбинной установки, частота вращения 0,5 – 10 об/мин. Процесс измерения – автоматизированный.

УДК 621.01

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В НОРМИРОВАНИИ ТРЕБОВАНИЙ ТОЧНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ

П. А. Карепин, д-р техн. наук, профессор

Е. П. Мышелов, канд. техн. наук, профессор

ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)»

Качество изделий машиностроения определяется множеством их свойств, проявлений, особенностей и пр., но, прежде всего, свойствами, отражающими пригодность этих изделий удовлетворять определенным

потребностям в соответствие с их назначением. Существенную роль в удовлетворении требованиям потребителей играет соответствие изделия своему функциональному назначению. Поэтому при производстве изделий во главу угла ставится возможность их бесподгонной сборки (собираемость) и надлежащее выполнение изделиями своих функций в соответствии с назначением, установленным в техническом задании на разработку изделия (функциональность). Большое значение в обеспечении собираемости и функциональности как изделий в целом, так и их частей имеет обоснованное назначение и последующее соблюдение требований к точности изготовления элементов деталей. В целях рационального изготовления и сборки изделий требования к точности элементов нормируют, т.е. устанавливают в виде стандартных значений.

Оценка качества на основе измерения (контроля) геометрических элементов, широко осуществляемая на предприятиях отечественной промышленности, опирается на существующий подход в нормировании требований к точности. Данный подход восходит к «принципу Тейлора», в соответствии с которым дается трактовка понятия «предельные размеры». Сформулированная Ф.Тейлором идея, в общем-то, искусственной дискретизации деталей по их размеру вопреки действительно существующему непрерывному изменению свойств деталей в зависимости от их размера позволила ввести понятие «допуск» и реализовать взаимозаменяемость, как основу современного проектирования, производства и ремонта. Появление данного принципа неразрывно связано с оценкой качества деталей по их геометрическим элементам в виде контроля. Именно необходимость контроля геометрических элементов деталей и особенности средств контроля подвели к существующей по настоящее время концепции нормирования и установления требований к точности. С помощью предельных калибров проверялось качество деталей по соответствующим геометрическим элементам, а установленные значения предельных размеров являлись критериями качества, с которыми сравнивались действительные размеры изготовленных деталей. На основе принципа Тейлора контроль предельными калибрами позволял оценивать совокупную точность размера и формы поверхности проверяемого геометрического элемента. Допуск в такой интерпретации ограничивает изменчивость как размера, так и отклонения формы поверхности. Причем непроходной калибр осуществляет контроль на основе точечного контакта, т.е. в основу контроля положена двухточечная схема (определение расстояния между двумя точками).

Более жесткие требования к отклонению формы и относительному положению геометрических элементов деталей потребовало отдельного установления требований к размерам элементов, к геометрической форме поверхностей и взаимному положению поверхностей элементов. Существующий подход, отраженный в действующих отечественных национальных стандартах, позволяет отдельно нормировать требования к точности относительно названных групп параметров. Такой подход требует в каждом отдельном случае устанавливать свою базу отсчета отклонений. Для оценки точности размера такой базой является номинальный размер, для оценки точности формы и взаимного расположения в качестве базы принимается прилегающий элемент (поверхность или профиль). Применение в качестве базы отсчета показателей точности формы и положения прилегающих элементов вызывает определенные трудности. Они связаны со сложностью практической реализации таких элементов. При применении средств измерений на основе двухточечной схемы для последующего контроля очень часто не удается отыскать положение прилегающего элемента, что вносит существенную погрешность в полученный результат. В связи с этим, в некоторых случаях в зависимости от специфики измерений, допускалось вместо прилегающего элемента в качестве базы применять или средний элемент, или элемент минимальной зоны. Но нормирование при этом всегда осуществляется относительно прилегающего элемента, это приводило к тому, что при проведении оценки качества в случае установления другой базы необходимо непременно осуществлять пересчет полученных результатов.

Совершенствование измерительной техники, внедрение новых подходов к проведению измерений и др. причины, связанные с контролем точности геометрических элементов привели необходимости пересмотра всей концепции нормирования точности геометрических элементов деталей. Такая работа велась рядом зарубежных и отечественных ученых, работы которых были обобщены и на их основе были разработаны новый подход к нормированию точности геометрических элементов. Этот подход оформлен в виде комплекса международных стандартов GPS (геометрические характеристики изделий), которые объединяются на основе единых принципов и рамках единой концепции построения. В настоящее время уже введен ряд стандартов ИСО из этого комплекса в качестве национальных, например, ГОСТ Р 31254-2004, ГОСТ Р 53089-2008, ГОСТ Р 53090-2008, ГОСТ Р 53440-2009, ГОСТ Р 53441-2009 и некоторые другие. С 1 июля 2015 года вступят в силу ГОСТ 25346-2013 и ГОСТ 25347-2013, в которых устанавливается система допусков и посадок на размеры

геометрических элементов деталей. Поэтому так важно рассмотреть особенности и принципы нового подхода к нормированию точности, изложенные в новой концепции установления требований к точности.

УДК 535.36: 621.43.056

ПРИМЕНЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В НОЦ ГДИ СГАУ

А. А. Диденко, С. Г. Матвеев, М. Ю. Анисимов,
С. Ю. Мишенков, Д. Н. Дмитриев, А. Б. Соколов,
А. В. Ахтерьяков

ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королева»

В ведущих аэрокосмических НИЦ и университетских лабораториях для изучения термогазодинамических и химических процессов, протекающих в тепловых двигателях, широко применяются лазерно-оптические измерительные методы [1, 2]. Для измерения скорости газа и характеристик турбулентности используются лазерные доплеровские анемометры (LDA); скорости, число и размеры капель распыленного топлива измеряются с помощью фазо-доплеровских анемометров (PDA). Измерители LDA и PDA предоставляют данные о параметрах в точке или некоторой последовательности точек исследуемого потока. Для определения поля скорости в плоскости или в пространстве применяются PIV-измерители. Они позволяют за одну сдвоенную засветку потока плоским лучом от импульсных лазеров получить для изучаемой области потока мгновенное векторное поле скорости, а по нескольким картинам – осреднённое по времени поле. Для измерения концентраций молекул газа – компонентов химических реакций, а также температуры пламени применяются методы лазерной молекулярной спектроскопии: спонтанного комбинационного рассеяния (Рамана, SCS), лазерно-индуцированной флуоресценции (LIF), когерентной антистоксовой рамановской спектроскопии (CARS) и их разновидности. Для измерения размеров и концентрации частиц сажи применяется метод лазерно-индуцированной инкандесценции (LII). Перечисленные методы широко апробированы и дают надёжные результаты как для нормальных атмосферных условий в рабочих камерах экспериментальных установок, так и для условий с повышенными давлениями и тем-

пературами воздуха ($P_k \sim 6...16$ бар, $T_k \sim 400...600$ К) и высокими их значениями ($P_k \sim 20...50$ бар, $T_k \sim 800...1000$ К).

В НИЛ-49 СГАУ в конце 1980-х годов была создана экспериментальная установка УПФ-372 для проливок форсунок, оснащенная измерительными системами для определения расходных характеристик форсунок, расходно-геометрических и дисперсных характеристик факелов распыла жидкого топлива [3, 4]. Давление и температура воздуха в рабочей камере установки соответствуют нормальным атмосферным условиям. Для определения средних диаметров капель (СДК) и функции распределения капель по диаметрам $f(D)$ применяется лазерно-оптический измеритель, который был изготовлен СГАУ на основе методических рекомендаций и опыта разработок ЦИАМ. Принцип действия прибора основан на реализации метода малоуглового дифракционного рассеяния коллимированного лазерного излучения на оптически крупных частицах - каплях (рассеяние Ми). Этот метод предоставляет данные о СДК и $f(D)$ капель, которые в среднем по времени пролетают через измерительный объем, «вырезаемый» лазерным пучком в факеле распыла. То есть, данный метод относится к интегральным по пространству и времени методам лазерной диагностики и называется интегральным методом малых углов (ИММУ-СГАУ).

Методика и технология применения ИММУ были в СГАУ творчески освоены и частично модернизированы [3]. Так, СДК по-Заутеру определяется по обновленному методу обобщенной индикатрисы Доббинса, Гласмена, Крокко. Величина СДК может быть проконтролирована по расчетному варианту метода интегрирующей диафрагмы (ЦИАМ, В.И. Ягодкин, А.Г. Голубев). Функция распределения $f(D)$ находится путем решения обратной задачи светорассеяния. Она состоит в том, что по измеренному распределению интенсивности в потоке рассеянного каплями света (индикатриса рассеяния) математическими методами отыскивается $f(D)$. Как известно, эта задача относится к классу некорректных, плохообусловленных задач. Для её надежного решения были реализованы и используются несколько взаимодополняющих методов. Это: метод матричного псевдообращения Гревилля, метод аналитически точного интегрального обращения К.С. Шифрина, вариационный метод минимизации обобщенной невязки методом условного градиента, а также один из вариантов метода регуляризации А.Н. Тихонова. Для отладки методик оптических измерений и тестирования программ обработки данных решались прямые (расчет индикатрисы рассеяния света) и обратные (определение $f(D)$ из обращения

индикатрисы) задачи светорассеяния (Рис. 1). Также использовались специально приготовленные математические модели и физические макеты полидисперсных сферических и круглых частиц, заменяющие капли распыленного топлива.

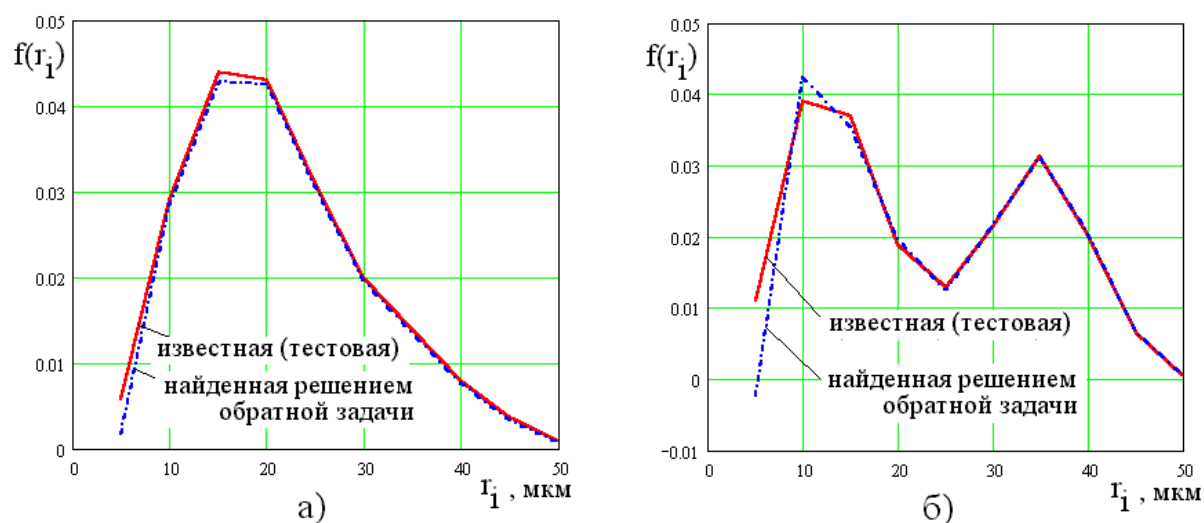


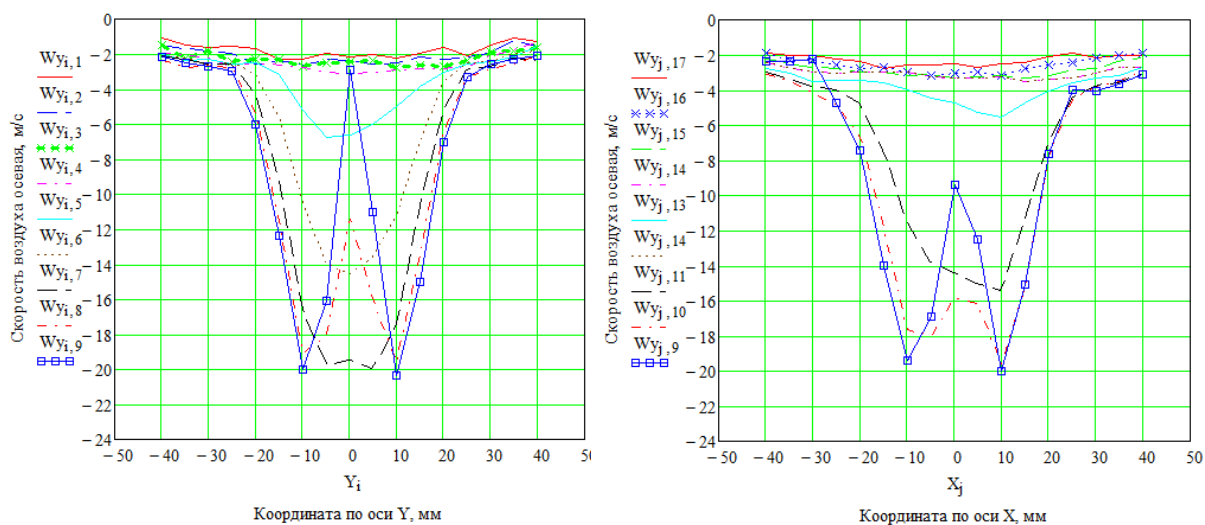
Рис. 1. Функции распределения капель по радиусам – сравнение найденной из решения обратной задачи светорассеяния и известной тестовой функций распределения

В Научно-образовательном центре газодинамических исследований (НОЦ ГДИ) СГАУ для измерения локальных значений средней и пульсационной составляющей скорости газового потока в факеле форсунки или в камере сгорания широко применяются 3D-LDA ЛАД-056С (г. Новосибирск, ИТ СО РАН). Для измерения размеров и скоростей капель распыленного топлива, а также для измерения скоростей и характеристик турбулентности несущего газового потока интенсивно применяется 3D-LDA-PDA (Dantec Dynamics, Дания). 3D-LDA-PDA и ЛАД-056С установлены вокруг рабочей камеры экспериментальной установки УПФ-372, доступ их лазерных лучей к изучаемым потокам осуществляется через боковые окна рабочей камеры установки.

Оба измерителя, 3D-LDA-PDA и ЛАД-056С, широко применяются для измерения кинематических и фазодисперсных характеристик одно- и двухфазных струй, в том числе закрученных потоков и факелов распыла жидкого топлива, создаваемых форсунками ГТД. С их широким применением были выполнены НИР по договорам с ФГУП «ЦИАМ» (2012 г.), ОАО «Климов» (2013 г.), ОАО «Кузнецов» (2011-2014 гг) и ФГУП «ЦАГИ» (2014 г).

В одной из НИР (2012 г.) выполнен большой цикл измерений характеристик факелов распыла, создаваемых разными по типу и конструкции форсунками ГТД. На рис. 2 приведён фрагмент результатов данной рабо-

ты; видно, что эпюры осевой скорости в факеле распыла пневматической форсунки, полученные с помощью 3D-LDA-PDA и ЛАД-056С, имеют хорошее качественное и количественное согласие.



а) применение 3D-LDA-PDA

б) применение ЛАД-056С

Рис. 2. Радиальные эпюры осевой скорости в факеле пневматической форсунки (перепад давления по воздуху 3 %, топливо не подаётся)

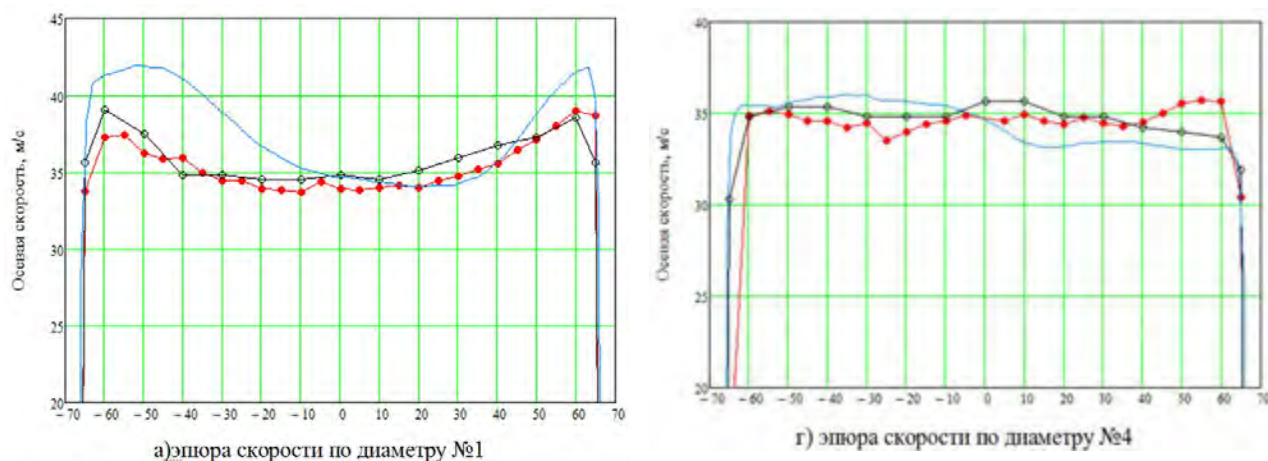


Рис. 3. Радиальные эпюры осевой скорости в потоке газа на выходе из камеры сгорания

В 2013 г. на экспериментальном стенде камер сгорания в СГАУ выполнен большой объём измерений полей скорости в струе на выходе из одnogорелочной трубчатой камеры сгорания (КС) ГТД для режимов «холодная продувка» и «с горением топлива» (керосина типа ТС-1). Рисунок 3 демонстрирует хорошее качественное и удовлетворительное количественное согласие результатов, полученных из детальных лазерных измерений (с ЛАД-056С, линии закрашенными с кружками), пневмометрических измерений (линии с не закрашенными кружками) и из сквозного 3D-численного моделирования процессов в камере сгорания (линии без значков), выполненного в ANSYS Fluent на суперкомпьютере СГАУ «Сергей Королёв».

В продолжение лазерных измерений скоростей в горячем потоке на выходе из КС, выполненных в рамках одной из хоздоговорных НИР (2013 г.), выполняется подготовка к осуществлению лазерных измерений параметров потока на выходе из одногогорелочного отсека КС при повышенных давлениях и температурах газа на входе в камеру. Для этого сконструирован и изготовлен отсек с системой боковых окон с жаропрочными оптическими стеклами для прохода лазерного излучения (рис. 4 б). В 2014 г. на стенде заказчика осуществлены подготовительные продувки отсека СГАУ на режимах «без горения топлива».



а) измерения с помощью ЛАД-056С; б) отсек для испытаний при высоком давлении;

Рис. 4 Экспериментальные отсеки СГАУ одногогорелочных камер сгорания ГТД

В 2012-2013 гг. в НОЦ ГДИ СГАУ был установлен лазерно-оптический измерительный комплекс PLIF-RR (фирма LaVision, Германия). Он реализует три метода молекулярной спектроскопии: PLIF, Рамана и Рэлея. В настоящее время ведётся освоение измерителя с применением тестовой пламенной горелки (CH_4 +воздух). Данный комплекс планируется применять для измерения концентраций OH , NO , CO , CH_2O , сажи (факультативно), ПАУ и температуры пламени.

В 2007-2009 гг. при поддержке учёных из ИОФ РАН (г. Москва) и с посещением германского аэрокосмического центра (DLR) начато изучение возможностей и физико-методических основ лазерно-оптического CARS-измерителя и метода молекулярной спектроскопии. Для этой цели на основе известных из литературы сведений разработана квантово-механическая математическая модель энергетического состояния двухатомных молекул и их взаимодействия с лазерным излучением (на основе Трудов ИОФ РАН, DLR и материалов справочников под редакцией академика В.П. Глушко) [5]. В целях апробации и начальной проверки разработанной модели для нескольких температур газа рассчитаны необходи-

мые теплофизические характеристики H_2 , находящегося в основном электронном состоянии, и N_2 , для которого учитываются вклады семи электронных состояний. Получено хорошее согласие рассчитанных значений изобарной теплоемкости и изобарно-изотермического потенциала со справочными данными (расхождение менее 1 %). Рассчитанный для метода CARS -диагностики колебательно-вращательный спектр H_2 (Рис. 5) хорошо согласуется с спектром, полученным экспериментально в DLR ($T_r = 1290$ K) [5].

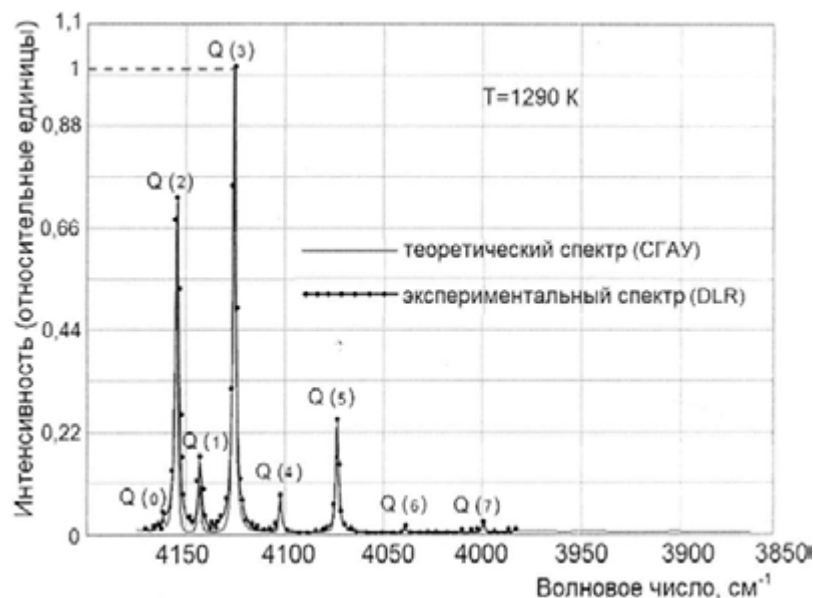


Рис. 5. Сравнение рассчитанного и экспериментально полученного КАРС-спектров H_2

В математической модели LIF-спектроскопии используются коэффициенты Эйнштейна, которые определяют вероятности оптических переходов между электронно-колебательно-вращательными энергетическими уровнями молекулы. Для их расчета требуется вычисление интегралов перекрытия волновых функций верхнего и нижнего состояний электронных уровней – факторов Франка-Кóндона. В разрабатываемой методике расчёта используются волновые функции для нескольких электронных состояний атома водорода. Каждая из них представляется произведением радиальной и угловой составляющей. Для разрешённых переходов построены графики перекрытия волновых функций и вычислены факторы Франка-Кóндона. Их значения удовлетворительно совпадают с имеющимися литературными данными, однако высоты и координаты линий рассчитанного LIF-спектра пока значительно не совпадают с литературными данными.

Таким образом, к настоящему моменту НОЦ ГДИ СГАУ накопил некоторый практический опыт и методический задел применения лазерно-

оптических измерителей. Однако обзоры зарубежных исследований показывают необходимость перехода на новый методический и технологический уровень более эффективного применения лазерно-оптических измерителей [6, 7]. С этой целью в НОЦ ГДИ инициированы разработки, направленные на модернизацию существующих и создание новых экспериментальных стендов, позволяющих выполнять лазерно-оптические измерения параметров потоков при повышенном давлении и температуре газа в камере сгорания.

Библиографический список

1. Barlow, R.S., Laser diagnostics and their interplay with computations to understand turbulent combustion [Text] // Proceedings of the Combustion Institute, V.31, 2007, -pp. 49-75.
2. Kohse-Hoinghaus, K., Combustion at the focus: laser diagnostics and control [Текст] / К. Kohse-Hoinghaus, R.S. Barlow, M. Alden, J. Wolfrum // Proceedings of the Combustion Institute, V.30, 2005, -pp. 89-123.
3. Диденко, А.А., Исследование качества распыливания топлива и его влияния на характеристики камер сгорания малоразмерных ГТД [Текст] / А.А. Диденко // Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук. – Самара: Самарск. гос. аэрокосм. ун-т (СГАУ), 1996.-267с.
4. Лукачѐв, С.В., Тестирование лазерного измерителя мелкости на макетах и моделях полидисперсных частиц [Текст] / С.В. Лукачев, А.А.Диденко, В.В. Рогалев, М.А. Жижкин // Вестник СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 2; Самар. гос. Аэрокосм. ун-т, Самара, 1999. –С. 104-125.
5. Диденко, А.А., Разработка математической модели для метода КАРС-спектроскопии молекул H_2 для задач диагностики высокотемпературных потоков [Текст] / А.А. Диденко, С.Ю. Мишенков // Сб. трудов конф. «Оптика и образование – 2008» межд. Оптического конгресса «ОПТИКА-XXI век», 20-24 октября 2008. -Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2008.-С.62-64.
6. Becker, J., Experimental investigation of spatial and temporal aspects of the liquid fuel placement in a swirl cup at elevated pressure [Text] / J. Becker, Ch. Hassa // ASME GT-2004-53524, Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, -pp. 1-10, 2004.
7. Tacin, R., Sector tests of a low- NO_x , lean-direct-injection, multi-point integrated module combustor concept [Text] / R. Tacina, Ch. Wey, P. Laing, A. Mansour// ASME GT-2002-30089, Proceedings of ASME Turbo Expo 2002, -pp. 1-12, 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕТР АЛЕКСЕЕВИЧ КОЛЕСОВ (1915 – 2004)	3
ОБРАЩЕНИЕ ГУБЕРНАТОРА ЯРОСЛАВСКОЙ ОБЛАСТИ С. ЯСТРЕБОВА К УЧАСТНИКАМ II МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФОРУМА «ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ. ПРОИЗВОДСТВО».....	4
ОБРАЩЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО ДИРЕКТОРА ОАО «НПО «САТУРН», ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ЯРО ООО «СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИИ», ПРЕДСЕДАТЕЛЯ СОВЕТА ИННОВАЦИОННОГО ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО КЛАСТЕРА «ГАЗОТУРБОСТРОЕНИЕ И ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЕ» И. ФЕДОРОВА	5
ОБРАЩЕНИЕ РЕКТОРА РЫБИНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВИАЦИОННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМЕНИ П. А. СОЛОВЬЕВА (РГАТУ) В. ПОЛЕТАЕВА.....	6
СЕКЦИЯ «ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ»	7
Р. В. Никифоров, В. В. Агрошенко. Оценка напряженно-деформированного состояния сварных стыковых соединений в пакете ANSYS	7
А. В. Собуль, А. К. Карачалов. Нормирование выведенных литейных дефектов на лопатках турбин малоразмерных ГТД.....	11
В. В. Посадов, А. Е. Ремизов. Обеспечение устойчивости к флаттеру рабочих лопаток авиационного газотурбинного двигателя.....	14
А. В. Пахоменков, В. В. Воинова, А. Н. Яркин, Д. В. Габов. Расчет критических частот вращения роторов ГТД в программном комплексе ANSYS	19
Д. В. Габов, А. В. Пахоменков, Р. А. Азимов. Моделирование заброса средней птицы на вход в авиационный двигатель.....	20
С. М. Скирта, Ф. В. Карпов, И. А. Немтырева. Лопаточный венец ротора газовой турбины с асимметричной бандажной полкой	22
С. Н. Бардинова. Повышение усталостной прочности при ремонте деталей ГТД.....	26
И. Н. Паламарь. Оценка технического состояния структуры поверхностного слоя детали ГТД на основе функциональной адаптации мультифрактального анализа изображения	29
А. А. Округин, С. А. Букатый. Исследование циклической долговечности валов ГТД в условиях малоциклового усталости при двухчастотном нагружении	34
Д. А. Слободской, А. В. Пахоменков. Определение размеров допустимых повреждений на поверхности деталей статора ГТД на основе коэффициентов концентрации напряжений	39
П. А. Султанова, Р. А. Азимов, А. В. Пахоменков. Анализ влияния неблагоприятного сочетания геометрических допусков при определении напряженно-деформируемого состояния деталей.....	44
А. А. Молчанов, И. В. Надеждин. Динамика мехатронных рекуперативных приводов с циклоидальными механизмами	46
И. В. Надеждин. Проблемы совершенствования динамических характеристик мехатронных систем с управляемым пневмоприводом	50
В. В. Шевелев. Оптимизация групповых болтовых соединений при действии внешней силы в плоскости стыка	54

Р. А. Азимов, А. В. Пахоменков. Современные методы оценки циклического ресурса основных деталей авиационных ГТД.....	60
А. М. Портер, Д. П. Лёшин. Расчётно-экспериментальное определение периодичности контролей основных деталей ГТД при эксплуатации по техническому состоянию	63
Е. В. Медведева, Ю. А. Равикович. Автоматизация процесса сбора данных при проведении стендовых испытаний турбомашин	67
С. А. Букатый. Повышение размерной стабильности и точности изготовления ответственных деталей ГТД	72
Ле Тиен Зыонг, В. Г. Нестеренко. Методы обеспечения конструкционной прочности бандажных полок и оптимизации числа охлаждаемых лопаток высокотемпературных турбин газогенераторов современных авиационных двигателей	77
Н. В. Осадчий, В. Т. Шепель. Упрощение конечно-элементной модели конструкций с сотовым наполнителем посредством замены сотового наполнителя слоем сплошного материала.....	80

СЕКЦИЯ «ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА».....82

Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов. Методология оценивания сложных технологических процессов в мехатронных системах.....	82
С. В. Старовойтов, В. Л. Юрьев. Исследование влияния интенсивности образования энтропии на размерную стойкость инструмента при точении	85
Е. П. Решетникова, П. Ю. Бочкарев. Совершенствование контрольно-измерительных процедур сложнопрофильных поверхностей в технологической подготовке машиностроительных производств.....	90
И. А. Гришанов, Б. М. Бржозовский. Оценивание аномальных выбросов при идентификации качества многочастотных случайных процессов при резании	94
В. В. Кокарева, К. Т. Саттарова, Н. Д. Проничев. Создание интегрированной информационной системы автоматизации технической подготовки и управления авиационным производством	99
А. Н. Малыхин, В. В. Кокарева, В. Г. Смелов. Автоматизированная система мониторинга и управления ремонтно-механическим цехом	104
П. В. Виноградов, К. С. Кульга. Автоматизация бизнес-процессов разработки технологии изготовления отливок базовых деталей станочного оборудования с числовым программным управлением	108
А. С. Букатый, С. Е. Семенова. Обеспечение геометрической точности ответственных деталей машиностроительных производств при пневмодробеструйном упрочнении.....	113
М. В. Ватуев, Л. А. Галимова, Р. Д. Агзамов, А. Ю. Демин. Особенности управления процессом электрохимического алмазного шлифования при получении узких пазов	116
Л. А. Галимова, М. В. Ватуев, Р. Д. Агзамов, В. В. Атрощенко. Получение узких пазов методом электрохимического алмазного шлифования	117
Т. Д. Кожина, А. В. Курочкин. Разработка многослойных износостойких наноструктурированных покрытий для твердосплавных концевых фрез.....	119

П. Ю. Бочкарёв, С. Г. Митин, Л. Г. Бокова. Принципы взаимодействия систем конструкторского и технологического проектирования и учёта особенностей производственной системы	122
Б. Ф. Усманов, В. Л. Юрьев. Линейные математические модели обрабатываемости алюминиевых сплавов резанием	126
А. В. Улюкин, С. Ю. Звонов. Геометрия клиновых ребер для процесса чистовой вырубki собачки замка в программном комплексе Deform – 2D	130
А. В. Половинкин, К. С. Кульга. Модели и методы создания автоматизированной информационной системы для проектирования станочных приспособлений.....	132
И. М. Смирнов. Обеспечение показателей качества прерывистой поверхности деталей, обработанной инструментом из композита 10.....	137
Д. О. Токарев, А. С. Говорков. Назначение программного комплекса «Система анализа ТКИ» при запуске в производство изделий АТ	140
Г. Д. Петухов, В. Ф. Макаров. Проблемы в современном протягивании лопаток компрессоров.....	145
И. И. Хафизов. Обработка токопроводящих материалов.....	149
А. Е. Кудряшов, Е. А. Левашов. О применении технологии электроискрового легирования и СВС-электродных материалов для повышения стойкости штамповой оснастки.....	153
Н. Р. Мустакаев, П. Л. Людоговский. Алгоритм программирования маршрута автоматической клепки панелей двойной кривизны	158
А. М. Ахметгареева, А. Б. Березовский, Р. И. Исмаилова, С. Л. Балдаев. Опыт применения треханодного плазмотрона для нанесения теплозащитных покрытий для энергетических ГТУ	161
Н. В. Румянцева, М. Н. Ситникова, В. Ф. Безъязычный. Процессный подход к управлению качеством изготовления деталей.....	165
М. С. Елкин, М. В. Тимофеев, В. Ф. Безъязычный. Влияние покрытий режущего инструмента на остаточные напряжения в поверхностном слое детали при концевом фрезеровании.....	168
Д. Н. Крюков. Создание основ по нормам точности для малогабаритного металлообрабатывающего оборудования	172
В. Н. Ситников, В. В. Непомилуев. Обеспечение качества газоперекачивающих агрегатов путем улучшения работы с предприятиями-поставщиками	178
П. В. Ладнов, В. В. Смирнов, В. В. Барзали. Критериальная оценка рентабельности использования технологий послойного синтеза при проектировании и производстве изделий авиационной промышленности. Опыт ФГБОУ ВПО «УГАТУ» в области аддитивных технологий	182
Д. И. Волков. Управление формированием напряженного состояния хвостовиков лопаток турбины при глубинном шлифовании	184
С. Л. Проскуряков. Ультразвуковая диагностика режущих пластин из керамики и КНБ для высокоскоростного течения жаропрочных никелевых сплавов	186
В. В. Михрютин. Построение геометрической модели конических зубчатых колес с эвольвентным профилем зуба.....	189
А. В. Пепельшев, В. Ф. Макаров. Применение растрового метода фрезерования для автоматизации обработки плоских поверхностей глубоких пазов	194

Б. М. Бржозовский, А. Г. Лаптев, А. А. Лаптев, И. В. Белицкий. Новые технологические возможности шестиосевых координатно-измерительных машин	199
С. В. Чугуевская, В. Ф. Безъязычный. Расчетное определение натяга в прессовых соединениях узлов ГТД на основе учета шероховатости и степени наклепа поверхностей соединяемых деталей	202
Н. В. Королев, В. Д. Корнеев. Повышение эффективности использования грузового автопарка для осуществления погрузочно-разгрузочных работ	207
С. С. Малиновский. Создание снегоходной техники с учетом российских условий	210
СЕКЦИЯ «МЕТРОЛОГИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ»	215
А. В. Бильский, Л. М. Чикишев, А. С. Лобасов, Д. К. Шараборин, В. В. Цатиашвили, В. Г. Августинович, Д. М. Маркович. Применение PIV/PLIF методов для исследования смесеобразования за фронтным устройством КС ГТУ	215
А. С. Лобасов, Д. К. Шараборин, В. М. Дулин, И. М. Верещагин, Ш. А. Пиралишвили, Д. М. Маркович. Экспериментальное исследование плоскостными оптическими методами нестационарного реагирующего течения в вихревом горелочном устройстве	218
Ю. А. Ложкин, Д. М. Маркович. Применение оптических методов для исследования газокапельных течений	223
С. С. Юлин, И. Н. Паламарь. О применении машинного обучения в задаче классификации дефектов поверхностного слоя деталей машин	225
А. Н. Попов. Повышение эксплуатационной надежности приводов летательных аппаратов	230
Ю. В. Могильников. Современные методы контроля поверхностных прочностных характеристик материалов и покрытий на производстве и в лаборатории	232
Б. А. Чичигин. Разработка инновационной системы контроля лопаток газотрубинных двигателей в процессе эксплуатации	234
П. А. Карепин, Е. П. Мышелов. Современные тенденции в нормировании требований точности геометрических элементов составных частей изделий	235
А. А. Диденко, С. Г. Матвеев, М. Ю. Анисимов, С. Ю. Мишенков, Д. Н. Дмитриев, А. Б. Соколов, А. В. Ахтерьяков. Применение и развитие лазерно-оптической диагностики газовых потоков в НОЦ ГДИ СГАУ	238

Научное издание

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФОРУМ «ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ. ПРОИЗВОДСТВО»

Сборник материалов научно-технической конференции,
посвященной 100-летию со дня рождения
главного конструктора П. А. Колесова

INTERNATIONAL TECHNOLOGICAL FORUM «INNOVATIONS. TECHNOLOGIES. PRODUCTION»

Зав. РИО М. А. Салкова

Подписано в печать 12.03.2015.
Формат 60×84 1/16. Уч.-изд.л. 15,6. Тираж 100. Заказ 60.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева
(РГАТУ имени П. А. Соловьёва)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П. А. Соловьева
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

