

Конечный результат, который должен быть по конструкторским данным: X -1090; Y – 3272; Z – 144

Т.о. можно сделать вывод, что при таком задании размеров невозможно обеспечить модульную сборку ГПА без подгонки на месте, т.к. существует большая разница между действительными данными и необходимыми. Поэтому рабочим приходится постоянно производить подгибку труб и пригонку с помощью проволоки. С помощью программы “Вектор” возможна корректировка трубопровода. При подробном рассмотрении и расчете всего блока маслообеспечения можно сказать, что необходимо изменить часть труб (откорректировать длины) и только выходные трубы оставить с запасом и после подгонять по месту при стыковке с двигателем. Это приведет к экономии времени и затрат на производство всего ГПА.

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛАЗЕРНОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Мурзин С.П., Трегуб В.И., Мельников С.М.

Самарский государственный аэрокосмический университет,
ОАО “Моторостроитель”, г. Самара

Методы высокоэнергетической обработки на основе лазерного излучения обладают значительными потенциальными возможностями для улучшения эксплуатационных свойств деталей путем придания их поверхностным слоям требуемых физико-механических свойств. К настоящему времени выполнен ряд работ, в которых показана возможность управления процессом упрочняющей обработки за счет изменения пространственного распределения мощности излучения в плоскости фокусировки [1, 2 и др.]. Применение элементов компьютерной оптики (фокусаторов излучения) позволяет создать требуемое пространственное распределение плотности мощности энергетических потоков для успешного проведения технологических процессов лазерной термической и комбинированной обработки материалов. Предложен метод изменения интенсивности излучения и параметров энергетического воздействия на основе применения динамических фокусаторов [3, 4]. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования формирования лазерных пучков позволили создать оптические системы, обеспечивающие регулирование распределения плотности мощности по пятну нагрева. Для проведения

лазерной термической и комбинированной обработки материалов с использованием непрерывного излучения CO₂-лазеров разработано оптическое устройство корректировки параметров лазерного излучения на базе динамического фокусатора, состоящее из узлов фиксации, охлаждения, юстировки и вращения элемента компьютерной оптики. Значительно расширить технологические возможности лазерной обработки с применением динамических фокусаторов излучения позволяет их использование в составе оптической системы с адаптивным оптическим элементом. Введение в состав оптической системы деформируемого зеркала с механическим, электрическим или электромагнитным приводом позволяет более эффективно управлять профилем интенсивности в плоскости заготовки.

Широкое распространение компактной быстродействующей вычислительной техники для обработки и хранения информации позволяет с высокой эффективностью применять аппаратно-программные комплексы на стадиях подготовки производства и проведения технологических процессов. Разработанная система компьютерного управления технологическим оборудованием, содержит следующие основные элементы: систему автоматизированной подготовки управляющих программ; программно-технический комплекс сопряжения персонального компьютера с технологическим оборудованием; модули ввода специальных сигналов и их обработки на персональном компьютере. Основными задачами системы компьютерного управления являются: преобразование данных, подготовленных в стандартных САПР и пакетах иллюстративной векторной графики, в программу, управляющую системами технологического оборудования; синтез, редактирование и хранение управляющих программ в виде электронных документов, проведение сопутствующих вычислений; визуализация и получение чертежа детали; интерфейс в систему AUTO CAD для окончательного оформления и выпуска конструкторской документации; передача управляющих программ от персонального компьютера на технологическое оборудование; контроль и обеспечение оператора информацией о параметрах технологического оборудования и реализуемых технологических процессах; формирование управляющих воздействий на исполнительные механизмы для автоматизированной подстройки контролируемых параметров под условия технологического процесса. Специально разработанные аппаратно-программные средства введены в состав лазерного технологического оборудования [5].

Целью данной работы являлась разработка рекомендаций для проектирования технологических процессов лазерной и комбинированной обработки материалов в авиадвигателестроении при формировании температурных полей с использованием компьютерной и адаптивной оптики.

На производственной базе ОАО “Моторостроитель” проведен комплекс исследований с целью оптимизации технологических параметров воздействия лазерных и комбинированных источников энергии для конкретной группы изделий. Определение общих закономерностей и особенностей процессов направленного воздействия концентрированных потоков энергии на конструкционные материалы выполнено с привлечением лазерного технологического оборудования ЛК-1300 “Хебр-1А” и ЛТН-103.

Основными факторами, определяющими предельные возможности процесса формообразования металла, являются схема напряженного состояния и его пластические свойства. При традиционной технологии изготовления листовых деталей на специализированном оборудовании силовые и точностные характеристики процесса определяются механическими свойствами материалов (склонностью к упрочнению, пластичностью, прочностью, анизотропией механических свойств и т.д.). Точность изготовления деталей зависит от точности изготовления штампа и его конструкции. Технологическая оснастка имеет значительную металлоемкость и не является универсальной для всей номенклатуры деталей. Уменьшение доводочных работ требует применения значительных калибрующих усилий, что приводит к увеличению энергоемкости оборудования и, вследствие этого, снижению его быстроходности. При получении высокоточных деталей данные недостатки приводят к значительным затратам на проведение термических операций для фиксирования заданных свойств штампуемого листа, на изготовление многочисленных комплектов инструмента, на капитальные вложения в основное оборудование.

Устранить эти недостатки и получить значительную экономию материальных и трудовых ресурсов возможно путем применения в специализированном оборудовании совмещения формоизменяющих операций с технологической операцией лазерного отжига. При изменении структурно-фазового состояния листовых и трубчатых металлических материалов за счет их местного разупрочнения достигается значительное улучшение схемы пластического течения металла и локализация деформаций. Применение лазерного отжига для местного разупрочнения перед формообразованием заготовок из металлических сплавов позволяет повысить точность изготовления деталей, уменьшить пружинение и радиусыгиба.

С целью увеличения удельной прочности и жесткости изделий в штамповочном производстве деталей летательных аппаратов и их двига-

телей используются титановые сплавы. Средне- и высоколегированные титановые сплавы практически не поддаются холодному формообразованию из-за высокого сопротивления металла деформации, интенсивного упрочнения, склонности к растрескиванию и разрывам. Низколегированные сплавы также имеют пониженные характеристики пластичности, что в ряде случаев вызывает необходимость нагрева деформируемого металла. Наиболее важными специфическими особенностями, определяющими комплекс технологических свойств таких конструкционных материалов, наряду с ограниченными возможностями холодного деформирования, являются их низкая теплопроводность и высокая активность взаимодействия с окружающей средой. Лазерный нагрев является более предпочтительным, так как он обеспечивает возможность значительного сокращения времени пребывания металла при температурах интенсивного окисления и газонасыщения поверхностных слоев.

Разработаны рекомендации к выбору рациональной схемы нагрева для обеспечения качества технологического процесса отжига перед холодной штамповкой листовых и трубчатых заготовок из алюминиевых и низколегированных титановых сплавов. Принимается схема нагрева непрерывным излучением, сфокусированным в неподвижный (установленный перпендикулярно, под углом и параллельно траектории движения) или вращающийся полосовой энергетический источник. Выполняется условие неоднородного распределения интенсивности излучения по длине полосового источника с ее максимумом по краям, что компенсирует повышенные тепловые потери периферийных участков.

В результате проведенных экспериментальных исследований на примере конструкционных материалов АМг2Н и ОТ4-1 определены температурно-скоростные режимы лазерного отжига алюминиевых и низколегированных титановых сплавов, обеспечивающие снятие наклепа.

Характер структурных изменений в материалах изучался методами традиционной металлографии. На рис. 1 приведена структура алюминиевого сплава АМг2Н после проведения лазерного отжига. Использование элементов компьютерной оптики - фокусаторов излучения позволяет обеспечить режимы обработки в заданных интервалах температуры и времени выдержки.

Для определения предельной пластичности сплава и его способности выдерживать заданную пластическую деформацию, проведены испытания на изгиб образцов из листовых материалов. Оценка предельного угла изгиба осуществлялась на испытательной машине усилием 20 тс при плавном увеличении нагрузки на образец до появления на нем первой трещины.

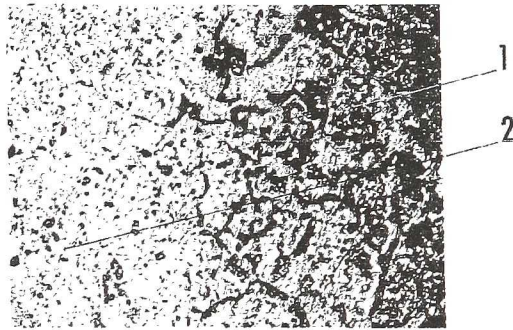


Рис. 1. Структура алюминиевого сплава АМг2Н: увелич. $\times 85$ после лазерного отжига: 1 – зона отжига; 2 – исходная структура

Радиус закругления опор $r_{3,0}$ и диаметр закругления оправки $d_{3,0}$ устанавливались в соответствии с требованиями нормативно-технической документации и для листов из ОТ4-1 толщиной $\delta_n = 2 \cdot 10^{-3}$ м их значения составляли: $r_{3,0} = 15 \cdot 10^{-3}$ м, $d_{3,0} = 6 \cdot 10^{-3}$ м. Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась методами математической статистики. Погрешность результата испытаний определялась путем статистической обработки с учетом случайной и неисключенной систематической погрешности.

Применение рациональной схемы нагрева обеспечивает увеличение предельного угла изгиба при холодном деформировании образцов из титанового сплава ОТ4-1 толщиной $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м на 50...60%, что позволяет проводить формообразование деталей без их дополнительного подогрева. Предельный угол изгиба при холодном деформировании образцов из алюминиевого сплава АМг2Н толщиной $\delta_n = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м увеличивается более чем на 10...15% (изгиб до 3,14 рад без разрушения). Технология отжига перед холодной штамповкой листовых и трубчатых заготовок из алюминиевых и низколегированных титановых сплавов позволяет уменьшить радиусыгиба на 30...40 %, повысить точность изготовления деталей, устранить утонение стенки заготовки за счет локализации пластической деформации, снизить энергозатраты на 50...70 %.

Лазерное термоупрочнение стальных деталей может быть достаточно эффективным и позволяет существенно повысить надежность и ресурс отдельных деталей, узлов и механизмов в целом. При этом одними из основных требований являются равномерность глубины закаленной зоны и отсутствие дефектов на ее поверхности. При проведении экспериментальных исследований определены температурно-скоростные режимы лазерного термоупрочнения деталей из сталей 40Х и 40ХНМА. Для снижения отражательной способности на поверхность обрабатываемого

материала наносились специальные поглощающие покрытия.

Методами традиционной металлографии проведено сопоставление исследуемого температурного поля в конструкционном материале и характера структурных изменений. Исследования поперечных сечений упрочненной лазерным излучением зоны показали, что она состоит из нескольких слоев, микротвердость каждого из которых в различной степени отличается от исходной (см. рис. 2). При обработке без оплавления поверхности верхний, наиболее твердый слой представляет собой мартенсит с микротвердостью $H_{\mu} = 7500 \dots 8000$ МПа. Под ним расположена область неполной закалки из мартенсита и феррита. Третий слой – переходная зона. При лазерном воздействии на предварительно термообработанную деталь в этом слое имеет место снижение микротвердости, связанное с образованием структур отпуска – троостоферрита, троостита или сорбита.

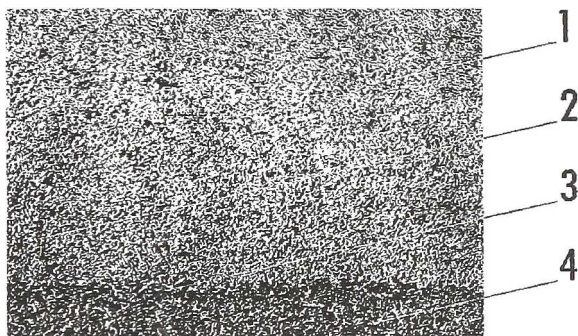


Рис. 2. Структура области лазерного воздействия после термоупрочнения среднеуглеродистой стали 40X: увелич. х30: 1 - закаленная зернистая структура мартенситного типа; 2 - область неполной закалки; 3 - переходная зона; 4 - исходная структура

Исходная структура материала – сорбит. Формирование таких структур в области лазерного воздействия обусловлено характером распределения температурного поля и различием в скорости охлаждения по глубине зоны термического влияния.

Интенсивность изнашивания деталей из стали 40X изучалась на специальном стенде в режиме трения скольжения по наиболее распространенной методике – схеме трения колодки, прижатой по образующей к вращающемуся диску. Диски из стали 40X имели диаметр $d_d = (49,4 \dots 49,5) \cdot 10^{-3}$ м и ширину $b_d = (12,0 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ м. Для определения величины износа образцов, абсолютная масса которых не превышает $m_d = 0,1$ кг, а конфигурация достаточно проста применяется метод взвешивания. Испытания на износ поверхностей трения сопряженных пар методом

взвешивания проводились с точностью до третьего знака на аналитических весах ВЛА-200 ГМ. Отмечено, что поверхности трения, прошедшие лазерную термообработку, после проведения испытаний не имели сетки микротрещин, характерных для образцов, подвергнутых стандартной объемной закалке. При этом на стадии установившегося износа скорость изнашивания и коэффициент трения стабильны. Термоупрочнение деталей из стали 40Х позволяет повысить их износостойкость в 1,8...2,1 раза при увеличении микротвердости поверхностного слоя в 2...2,5 раза. Полученные данные свидетельствуют о целесообразности применения технологических оптических систем на основе фокусаторов излучения при термоупрочнении для повышения износостойкости деталей, работающих в условиях трения.

Плазменные покрытия являются чешуйчатыми, слоистыми, неоднородными в структурном и химическом отношении, характеризуются развитой поверхностью стыков между частицами, повышенным содержанием окисных включений, особенно по границам частиц, отдельных слоев и границе раздела между покрытием и основой. Связь покрытия с основой и сцепление между частицами в покрытии (соответственно адгезия и когезия) являются важнейшими характеристиками покрытия, от которых во многом зависит его долговечность.

Технологические приемы и методы регулирования свойств покрытий подразделяют на термические и химические. В технологии машиностроения интенсивно разрабатываются технологические процессы, использующие совмещение плазменной струи с лазерным излучением. При плазменно-лазерном нанесении покрытий достигается более высокая производительность, чем при физическом и химическом осаждении из паровой фазы, а применение лазерного излучения для оплавления напыленного с помощью плазменной струи слоя улучшает структуру, механические и функциональные свойства получаемого покрытия. Различные схемы реализации процесса комбинированного напыления обеспечивают разные условия взаимодействия лазерного пучка и плазменной струи с напыляемым материалом. Повышение эффективности интегрированных технологий достигается путем снижения ослабления лазерного излучения в гетерофазном плазменном потоке и дуговом разряде [6, 7]. Проведен выбор схем совмещения плазменного потока и дугового разряда с лазерным излучением при комбинированной обработке.

Экспериментальная установка для плазменно-лазерного нанесения покрытий содержала устройство плазменного напыления мощностью 4,0 кВт, а также сопряженные блоки: оптический блок транспортировки лазерного излучения с формированием светового пятна и сканированием его в рабочем пространстве; электронный блок управления сканирующим

устройством траектории движения излучения и манипулятора детали, сопряженный с персональным компьютером; блок оптической визуализации температурного поля в рабочей зоне тепловизора “Радуга”. Сжатую плазменную струю формирует выходной канал цилиндрической дуговой камеры корпуса плазмотрона. Для возбуждения плазмогенерирующей дуги служит анод - сопло. Столб дуги ориентируется по оси формирующего канала и заполняет практически все его сечение. Вытекающий из сопла поток плазмы стабилизирует дуговой разряд. Обрабатываемый материал может являться одним из электродов разряда. Наиболее эффективно используется энергия в дуге постоянного тока прямой полярности (анод на обрабатываемом материале). Вначале возбуждают вспомогательный разряд между катодом и формирующим наконечником с тем, чтобы получить плазменную струю, вытекающую из сопла. Катод плазмотрона и обрабатываемая деталь включены в цепь источника рабочего тока, которая замыкается в момент касания факелом обрабатываемого материала. При этом возникает основная дуга “катод обрабатываемый материал”, подача распыляемого материала осуществляется на срез сопла – анода. Такая схема позволяет в 2-3 раза повысить эффективный к.п.д. нагрева порошковых частиц плазмой по сравнению применяемыми плазмотронами косвенного действия и предоставляет возможность использования установок газотермического напыления мощностью до 3-5 кВт и технологических лазеров мощностью до 1 кВт.

На основе исследования характеристик пропускания лазерного излучения плазменной струей выявлены новые технологические возможности комбинированного плазменно-лазерного нанесения покрытий. Управление пространственным распределением плотности мощности энергетических потоков предоставляет возможность значительно повысить эффективность воздействия. Проведены исследования по выбору режимов совмещенного воздействия на материалы комбинированных энергетических потоков. Структура нанесенных покрытий исследовалась на поперечных шлифах с помощью оптического микроскопа (см. рис. 3).

Для определения величины адгезионной прочности применялась методика отрыва от слоя покрытия штифта, изготовленного из материала основы. Рекомендуемый диаметр штифта, имеющего форму цилиндра или усеченного конуса $D_{шт} = (2...2,5) \cdot 10^{-3}$ м, толщина покрытия должна быть не менее $\delta_n = (0,3...0,4) \cdot 10^{-3}$ м.

Проведенная доработка кинематической и электрической схем испытательной машины под условия эксперимента позволяет изменять нагрузку до $P_n = 5...15$ кг с высокой точностью (относительная погрешность не превышает $\delta_n = 5\%$). Для создания условий статического нагружения использовался пружинный демпфер–преобразователь. Регистрация на-

грузки при испытании образцов с диаметром $D_{ш} = (1,95...2,0) \cdot 10^{-3}$ м при скорости нагружения $v_n = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м/с проводилась при помощи записи и последующего анализа индикаторных диаграмм.

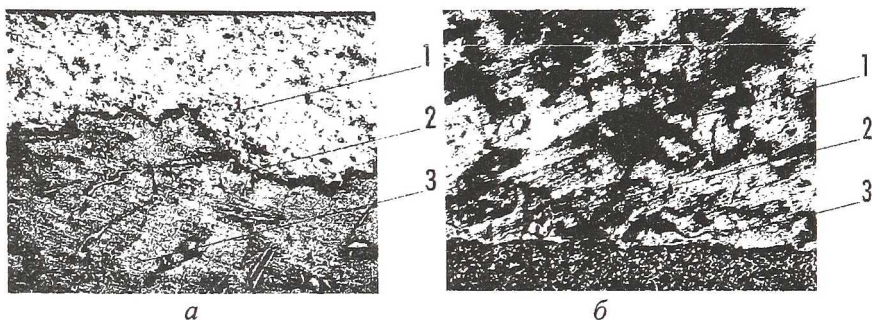


Рис. 3. Структура срабатываемого уплотнительного покрытия АНБ (Al + 13...18% BN + 3...8% SiO₂) после его плазменно-лазерного нанесения на рабочее кольцо статора компрессора высокого давления ГТД: основа ХН45МВТЮБР-ВД (ЭП-718-ВД); подслой НА-67 (Ni + 67% Al) толщиной $(0,1...0,5) \cdot 10^{-3}$ м (а);

Структура износостойкого покрытия никель-карбид титана (КТП35Н-85Н) после его плазменно-лазерного нанесения на зеркало цилиндра поршневого двигателя: основа АЛ4Т6; подслой НА-67 (Ni + 67% Al) толщиной $0,1 \cdot 10^{-3}$ м (б):

1 - покрытие; 2 - подслой; 3 - основа: шлиф травленный, увелич. $\times 85$

Прочность сцепления срабатываемого уплотнительного покрытия системы АНБ + НА-67, нанесенного на сплав ЭП-718-ВД, после плазменного нанесения составила $(30...33) \cdot 10^6$ Па, характер разрушения – адгезионный. Разработанная технология плазменно-лазерного нанесения такого покрытия позволяет увеличить прочность сцепления до величины $(37...43) \cdot 10^6$ Па, характер разрушения – адгезионно-когезионный. Повышение прочности сцепления покрытия составило 20...40%.

Прочность сцепления износостойкого покрытия системы КТП35Н-85Н + НА-67, нанесенного на литейный алюминиевый сплав АЛ4Т6, после плазменного нанесения составила $(23...25) \cdot 10^6$ Па, характер разрушения – адгезионный. Разработанная технология плазменно-лазерного нанесения такого покрытия позволяет увеличить прочность сцепления до величины $(26...30) \cdot 10^6$ Па. Покрытие при испытаниях прорывалось по окружности штифта, что свидетельствует о повышении адгезионной прочности минимум на 20...25%.

Применение элементов компьютерной оптики (фокусаторов излучения) позволяет создать требуемое пространственное распределение

плотности мощности энергетических потоков для успешного проведения технологических процессов лазерной термической и комбинированной обработки материалов.

Разработаны технические рекомендации по совершенствованию технологического оборудования лазерной термической и комбинированной обработки материалов.

Приведены результаты экспериментальных исследований воздействия на материалы лазерных и комбинированных энергетических потоков.

Обоснована целесообразность применения, разработаны рекомендации к выбору рациональной схемы нагрева и режимов обработки для обеспечения качества технологических процессов: отжига перед холодной штамповкой листовых и трубчатых заготовок из алюминиевых и низколегированных титановых сплавов; лазерного термоупрочнения стальных деталей; плазменно-лазерного нанесения срабатываемых уплотнительных и защитных износостойких покрытий.

Список литературы

1. Handbook of laser processing / Ed. J. F. Ready. – Orlando: Laser Institute of America. – Magnolia publ. Inc., 2001. – 715 с.
2. Головки Л.Ф., Дувейк Д., Орешник В.И. Обеспечение качества слоев, полученных лазерной наплавкой или упрочняющей обработкой // Автоматическая сварка, 2001, №12. – С.47-52.
3. Device for laser treatment of an object: Pat. USA 5, 103, 073. 7.04.1992. Int. cl.⁵ B 23 K 26/00. А.М. Prokhorov, I.N. Sisakian, V.A. Soifer, V.P. Shorin, V.I. Mordasov, S.P. Murzin et al.
4. Мурзин С.П. Повышение эффективности лазерной обработки материалов при использовании элементов компьютерной оптики // Перспективные материалы, 2003, №2. – С.74-78.
5. Мурзин С.П. Компьютерная система управления технологическими процессами лазерной и комбинированной обработки материалов // Известия Самарского научного центра РАН, 2002, Т.4, №1. – С.127-132.
6. Способ лазерно-газотермического нанесения покрытия: Патент РФ 2165997, МКИ⁷ С 23 С 4/12 / В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов, С.П. Мурзин, К.В. Складенко. Бюл.12, 27.04.2001.
7. Устройство лазерно-газотермического нанесения покрытия: Патент РФ 2182189, МКИ⁷ С 23 С 4/12 / С.П. Мурзин, В.Н. Гришанов, В.И. Мордасов, А.А. Шуваев. Бюл.13, 10.05.2002.