

Перспективные направления применения лазерных технологий в авиационной промышленности

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Для интенсификации производства современных изделий авиационной промышленности необходима разработка и внедрение новых передовых технологий, способствующих повышению как качества и надежности изделий, так и экономических показателей их производства. Лазерные технологии в последнее время являются наиболее прогрессивными и довольно широко внедряются в авиационной промышленности. В статье дан актуальный обзор по применению лазерных технологий при производстве и ремонте изделий авиационной техники, также представлено описание преимуществ, которые позволят добиться внедрение лазерных технологий в производство.

Ключевые слова: лазерная сварка, лазерная наплавка, лазерная резка, лазерная очистка, селективное лазерное спекание.

Введение

Широкое применение и совершенствование лазерных технологий (ЛТ) в экономике наиболее развитых стран является глобальной тенденцией мирового развития. Использование ЛТ имеет решающее значение для повышения производительности труда и конкурентоспособности национальной экономики, расширения возможностей ее интеграции в мировую экономическую систему. Лазерная обработка материалов является одной из тех технологий, которые определяют современный уровень производства в промышленно развитых странах. Отличительные особенности применения лазеров в производстве – высокое качество получаемых изделий, высокая производительность процессов, экономия людских и материальных ресурсов, экологическая чистота [1].

Конструктивные особенности современных изделий авиационной промышленности обуславливают использование для их изготовления широкого класса материалов, при обработке которых применяются разнообразные технологические процессы и операции. Поэтому одним из новых прогрессивных видов обработки, получившим в последнее время промышленное внедрение, относятся лазерные технологии [2, 3].

Целью данной статьи является актуальный обзор лазерных технологий в современной аэрокосмической отрасли при производстве и ремонте изделий авиационной техники.

Лазерные технологии в авиационной промышленности

Среди многообразия технологических операций, осуществляемых лазерным лучом, в первую очередь необходимо отметить размерную обработку – резку [4, 5]. **Лазерная резка** является одной из наиболее часто применяемых на практике технологических операций с использованием лазеров – на ее долю приходится около 30...35 % всех промышленных применений лазеров. Лазерная резка применяется практически во всех отраслях промышленности от аэрокосмического, судостроения и автомобилестроения до высокоточного приборостроения и медицины. Она одинаково успешно используется как для резки габаритных изделий (деталей кузовов, строи-

тельных конструкций, узлов летательных аппаратов и т. д.), так и для изготовления миниатюрных изделий с микронной точностью (фильтры, прокладки, медицинские имплантаты и т. д.).

Сущность процесса лазерной резки состоит в локальном выплавлении материала под действием острогофокусированного луча и одновременно удаления расплава из зоны реза инертными нейтральными или активными газами, подаваемыми под давлением. Ширина реза может составлять 0,1...0,2 мм, при этом шероховатость поверхности незначительна. Процесс легко поддается автоматизации и может производиться с использованием систем с числовым программным управлением.

Одной из особенностей лазерной резки является отсутствие механического воздействия на материал, что дает возможность резки легкодеформируемых металлов. Конечно же, не маловажен вопрос высокой производительности процесса. Замена механической резки газолазерной позволяет в 8...10 раз уменьшить машинное время резки и в 3...5 раз снизить общую трудоемкость изготовления сварного изделия.

Испытания образцов из алюминиевых сплавов после лазерной резки на малоцикловую усталость показали, что их долговечность снижается в сравнении с образцами изготовленными фрезерованием. Причём, для образцов, вырезанных с кислородом, источником снижения прочности служат микротрещины, образующиеся на поверхности реза (рис. 1). При резке с азотом малоцикловая усталость возрастает, однако она меньше чем для образцов, изготовленных фрезерованием.



Рис. 1. Наличие трещин на поверхности реза алюминиевого сплава при лазерной резке с кислородом [5]

Исследования коррозионных свойств образцов, вырезанных лазером и изготовленных фрезерованием, показали, что уровень их коррозионной стойкости практически

одинаковый для всех исследуемых алюминиевых сплавов.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что использование для изготовления ресурсных деталей из алюминиевых сплавов, испытывающих знакопеременные нагрузки, лазерной резки требует последующей механической доработки кромок резки на глубину зоны термического влияния, резка должна проводиться с азотом [5].

Лазерная сварка как технологическая операция соединения металлических образцов известна с начала 1960-х гг. Основное преимущество лазерной сварки по сравнению с другими видами получения сварных соединений состоит в том, что при создании высокой плотности мощности излучения лазера в месте обработки возможно локальное проплавление материала. Это позволяет осуществлять сварку с очень высокой точностью.

Последние десятилетия гиганты самолётостроения, такие как Boeing и Airbus, активно апробировали различные методы, которые позволили бы при изготовлении конструкций фюзеляжа и крыльев заменить традиционную клёпку.

Внедрение например в производственный процесс лазерной сварки позволяет снизить вес летательных аппаратов А380 на 15% и, как следствие, экономия на расходе топлива составит до 1,45% на каждую тонну веса летательного аппарата. Это означает, что, к примеру, на трансатлантический перелёт потребуется на 750 литров авиационного керосина меньше [3].

В случае комплексного применения автоматизированных и роботизированных лазерных технологий резки деталей и сварки конструкций суммарные затраты на их изготовление снижаются в среднем 2...3 раза по сравнению с традиционными технологиями [1].

Исследования [6] показали, что эффективность взаимодействия концентрированного лазерного излучения волоконного лазера с длиной волны 1,07 мкм с поверхностью алюминиевых сплавов в среднем на 30...37 % выше эффективности при обработке излучением CO₂-лазера с длиной волны 10,6 мкм.

Увеличение полного КПД проплавления при лазерной обработке алюминиевых сплавов излучением волоконного лазера в наибольшей степени связано с высоким термическим КПД, который на 60...62 % выше, чем при обработке излучением CO₂-лазера.

Для обеспечения наибольшей производительности, экономии лазерной энергии и качества обработки алюминиевых сплавов рекомендуется применять в качестве источника излучения волоконные лазеры.

Многообразие технологических задач, решаемых авиационной промышленностью, ставит широкий круг вопросов перед лазерными технологиями в области модифицирования поверхностного слоя деталей. Прежде всего, это лазерная термическая обработка, которая широко применяется для упрочнения поверхности с целью повышения износостойкости деталей из углеродистых сталей и различных видов инструмента, в том числе режущего [2].

Кроме процессов, направленных на повышение износостойкости деталей и инструмента, возникает необходимость разрабатывать технологию **лазерной наплавки** однородных и разнородных материалов.

Примером таких задач может служить лазерное нанесение уплотнительных покрытий из бронзы на перо направляющих лопаток компрессоров из титановых и никелевых сплавов, а также наплавка порошков на изношенные гребешки рабочих лопаток турбины из того же материала с целью их восстановления.

Практика восстановления изношенных деталей в ремонтном производстве автомобилей и других машин подтвердила перспективность данного направления. Авиаремонтная отрасль, несмотря на сложности межведомственных согласований, достигла так же заметного прогресса в освоении восстановительных технологических процессов с применением лазерной наплавки. Целый ряд восстановленных деталей авиатехники прошли, кроме стендовых, летные испытания. Технологии восстановления этим методом широко внедряются в серийное производство [7].

В рамках создания перспективного двигателя ПД-14 для самолета МС-21 в конструкции компрессора высокого давления применяются моноколеса. В процессе эксплуатации моноколеса (лопатки и диск, выполненные как единое целое) испытывают вибрации и удары, подвергаются абразивному износу, воздействию высоких температур и прочих негативных факторов. Это приводит к образованию трещин, забоин, изменению прочностных характеристик и искажению геометрии про-

филя каждой лопатки. Поскольку реальная геометрия каждой лопатки моноколеса после эксплуатации отличается от номинальной геометрии CAD-модели, для осуществления ремонта лопаток необходимо применение адаптивных методов обработки, в частности адаптивной лазерной порошковой наплавки LMD. Адаптивные методы обработки отличаются от стандартных тем, что программы ЧПУ необходимо адаптировать индивидуально к геометрии каждой детали, тогда как при использовании стандартных методов обработки целый ряд деталей обрабатывается по одной и той же номинальной программе ЧПУ.

Ввиду высокой дороговизны моноколеса его ремонт представляется перспективным направлением. Решение данной проблемы возможно с применением аддитивных технологий – лазерной газопорошковой наплавки LMD (Laser Metal Deposition). Существует несколько процессов LMD, но все они работают по одному принципу: сфокусированный лазерный луч направляется на порошок, происходит его плавление и постепенное, слой за слоем, формирование на обрабатываемой детали наплавленного металла (рис. 2).

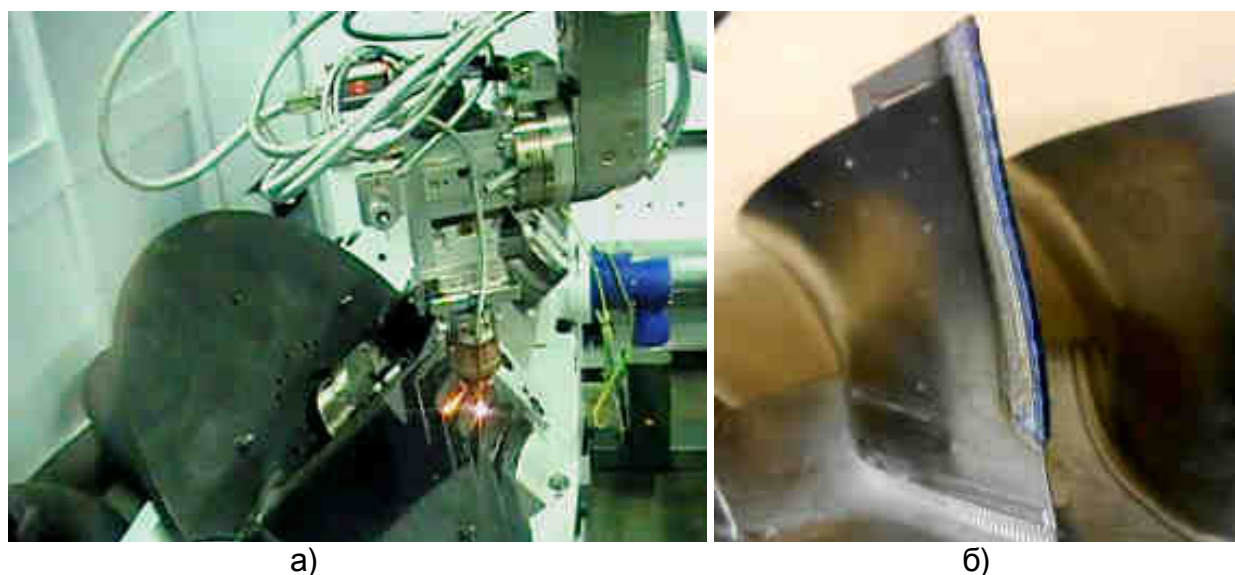


Рис. 2. Процесс восстановления входной кромки лопатки (а) и наплавленная входная кромка лопатки (б) сектора моноколеса [8]

Использование метода LMD для восстановления деталей газотурбинного двигателя обусловлено локальностью воздействия, что приводит к снижению короблений деталей и уменьшению зоны термического влияния. Это не вызывает значительного снижения прочности, а деформации (коробление, поводки) также ниже, чем при традиционной сварке. Наплавка LMD особенно целесообразна для сложных деталей малых и средних размеров. Ремонт авиационных деталей с помощью LMD может быть очень выгоден, так как изготовление новой детали может оказаться в 20 раз дороже [8].

Еще одной интенсивно развивающейся на текущий момент аддитивной технологией является **селективное лазерное спекание (СЛС)**. При лазерном спекании модели или готовые детали создаются из порошковых материалов за счет эффекта спекания при помощи энергии лазерного луча. Попадая на тонкий слой порошка, лазерный луч спекает его частицы и формирует твердую массу, в соответствии с геометрией детали. В качестве материалов используются полиамид, полистирол, песок и некоторые металлы [9].

Методы быстрого прототипирования, кроме создания физической модели по электронной модели, могут потребовать новых подходов к процессу проектирования деталей.

Примером применения технологий создания прототипов и самих деталей методами спекания металлических порошков является изготовление в подразделении EADS Innovation Works, расположенного в Великобритании, на установке Arcam A2 петли для кожуха реактивных двигателей самолета A380 (рис. 3) [10].

В результате применения метода СЛС для создания детали из металлического порошка удалось вдвое уменьшить вес по сравнению с деталью, изготовленной традиционными методами. Используемое при проектировании программное обеспечение CAE позволило определить, где части должны нести нагрузки и места, где материал может быть удален, позволяя снизить вес вдвое без потери прочности. Это экономит электроэнергию, металл, и деньги. Сложные изогнутые формы, получаемые в результате, достаточно сложно было бы отлить или вырезать из заготовки, даже на самом передовом оборудовании с ЧПУ.



Рис. 3. Петля для кожуха реактивных двигателей самолета A380 [10]

В тоже время широкое применение современных методов прототипирования в авиации сдерживается по многим причинам: высокая стоимость оборудования; отсутствие собственных разработанных установок и материалов для создания прототипов (в первую очередь металлических порошков требуемого качества), отсутствие обученного персонала для проведения работ, отсутствие рекомендаций по методам проектирования деталей, предназначенных для прототипирования и т.п.

С исторической точки зрения **лазерное сверление** отверстий было одним из самых первых технологических применений лазеров (впервые сведения об использовании лазеров для изготовления отверстий в алмазах появились еще в 1962 г.). Если же говорить о физике этого процесса, то, как и резка, оно основано на испарении материала [11].

Основными физическими процессами при лазерном сверлении являются разогрев, плавление и испарение материала из зоны лазерного воздействия. Для того чтобы инициировать данные процессы, на поверхности обрабатываемого изделия необходимо обеспечить плотность мощности излучения на уровне $10^6 \dots 10^7$ Вт/см². Суть лазерного сверления заключается в том, что под воздействием сфокусированного на поверхности материала лазерного пучка отверстие в нем растет в глубину за счет испарения.

Изготовление охлаждающих каналов в лопатках ГТД методом лазерного сверления позволяет делать отверстия очень малого диаметра с высокой точ-

ностью и качеством (рис. 4). При этом возможны варианты, при которых обрабатываемая деталь неподвижна, либо наоборот – перемещается относительно лазерного пучка.

Регулировка энергии, длительности и частоты следования импульсов, а также фокусного расстояния позволяет добиться оптимального качества отверстий. При этом использование лазерной обработки позволяет разрабатывать и апробировать новые схемы каналов для улучшения охлаждения с меньшими временными затратами и трудоемкостью [3].

При производстве и в процессе ремонта авиационной техники (АТ), в результате регламентных и восстановительных работ, как правило, сталкиваются с композицией различных типов загрязнений на деталях и элементах конструкций АТ. Все виды загрязнений имеют различную связь с очищаемой поверхностью, но как правило их очистка вызывает ряд затруднений.

Среди наиболее перспективных методов очистки – является метод **лазерной очистки** элементов авиационных конструкций.

Технология метода лазерной очистки поверхности лопаток турбин состоит в удалении поверхностных загрязнений путем их перевода в газообразную или пылевую фракцию за счет лазерного нагрева (рис. 5). Как уже было отмечено ранее в [12] применение лазерного излучения для очистки поверхности дает возможность получить метод очистки, лишённый всех недостатков, присущих классическим методам. Применение мобильных лазерных установок для выполнения очистки лопаток турбин делает возможным производить очистку без демонтажа лопаток. Это существенно сокращает время выполнения регламентных работ и, соответственно, позволяет экономить средства за счет уменьшения времени простоя дорогостоящего оборудования.

Помимо очистки деталей двигателей от эксплуатационных воздействий в авиации существует проблема удаления лакокрасочных покрытий (ЛКП) с элементов конструкций объектов авиационной техники в результате регламентных (C-check, D-check) и восстановительных работ или же при смене фирмы эксплуатанта и ребрендинге [13].

Развитие роботизированных систем для удаления ЛКП с отдельных элементов авиационных конструкций

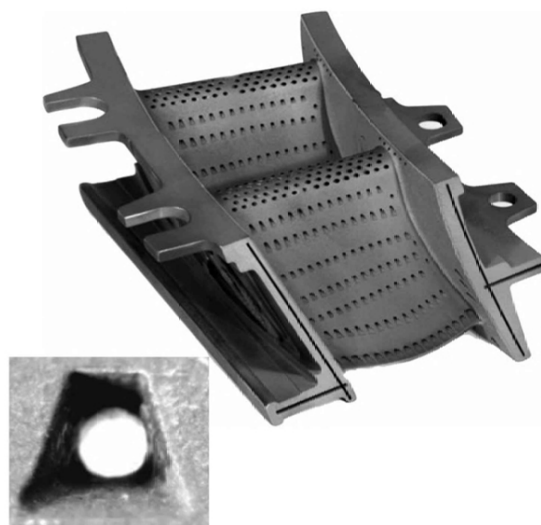


Рис. 4. Лазерное сверление и профилирование охлаждающих отверстий в лопатке ГТД [11]



Рис. 5. Следы высокотемпературной коррозии и результат её удаления с поверхности лопатки турбины лазерным методом [12]

было реализовано Исследовательской лабораторией ВВС США. Проект получил название RLCRS (Robotic Laser Coating Removal System). Установка представляет собой портал, в рабочую зону, которого подаются элементы авиационных конструкций, с которых впоследствии снимается ЛКП (рис. 6). Однако такой подход решает лишь частично проблему комплексного удаления ЛКП с воздушного судна, поэтому проект был продолжен и получил дальнейшее развитие с целью создания автоматизированной системы удаления ЛКП самолета, исключая его разборку. Проект получил название ARLCRS (Advanced Robotic Laser Coating Removal System). На рис. 7 представлен процесс очистки самолета F-16 и общий вид системы ARLCRS. Данная система включает в себя команду мобильных шагающих роботов, работающих независимо друг от друга [14].

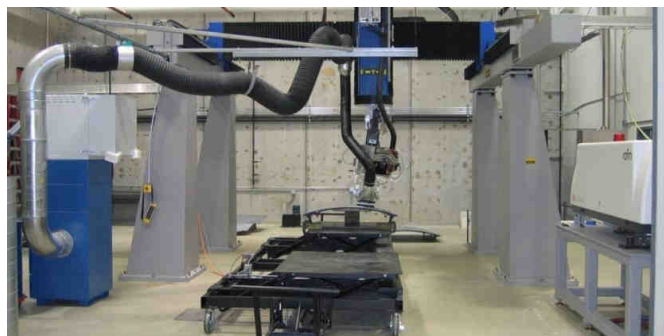


Рис. 6. Портальная система RLCRS лазерной очистки ЛКП



Рис. 7. Система ARLCRS лазерной очистки на примере самолета F-16

Практические исследования в лаборатории позволили сделать выводы о высокой экономической эффективности данной системы по сравнению с традиционным химическим методом очистки поверхности (табл. 1).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика методов очистки

Категория	Ежегодные расходы для	
	химической очистки, \$	ARLCRS, \$
Материалы	114000	20410
Коммунальные услуги	4300	2500
Отходы	60120	130
Окружающая среда, здоровье, безопасность	8000	3380
Трудоемкость	9560260	2180300

Однако, несмотря на экономическую привлекательность такой системы, применение таких комплексов для удаления ЛКП с поверхностей крупногабаритных самолетов также представляет большую трудность. Использование роботизированных систем для очистки поверхностей летательных аппаратов требует большой площадки для их передвижения вокруг объектов очистки, больших размеров и высокой сложности самого комплекса.

Заключение

Лазерные технологии являются наиболее прогрессивными и довольно широко внедряемыми в авиационной промышленности.

В целом применение данных технологий обработки материалов, использующихся в аэрокосмическом секторе – от разнообразных жаропрочных сплавов до слоистых материалов позволяет при заданном качестве повысить ресурс, оптимизировать производственный процесс, сократить трудоемкость и увеличить производительность.

Список литературы

1. Казакевич, В.С. Тенденции развития рынка лазерных технологий для решения задач лазерной обработки материалов. Часть 1. Мировой лазерный рынок [Текст] / В.С. Казакевич, С.И. Ярьско // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 266 – 275.
2. Блинков, В.В. Применение лазерных технологий в авиационной промышленности [Текст] / В.В. Блинков // ЛазерИнформ. – 2009. – № 23 (422). – С. 5 – 9.
3. Кудрявцева, А.Л. Лазерная обработка в авиационно-космическом секторе [Текст] / А.Л. Кудрявцева / Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2009. – № 4 (42). – С. 32 – 33.
4. Гайдачук, В.Е. Анализ эффективности технологии лазерной резки листовых деталей из цветных металлов в серийном авиационном производстве [Текст] / В.Е. Гайдачук, А.И. Костекнко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2010. – Вып. 2. – С. 20 – 37.
5. Блинков, В.В. Возможности лазерной резки, как финишной операции при изготовлении деталей из алюминиевых сплавов [Текст] / В.В. Блинков, Д.И. Кондратюк, В.Н. Косинов // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности : труды Междунар. научн.-практ. конф., Казань, 5-8 августа 2014 г. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. – Т. III. – С. 3 – 7.
6. Шиганов, И.Н. Лазерная сварка алюминиевых сплавов авиационного назначения [Текст] / И.Н. Шиганов, С.В. Шахов, А.А. Холопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – Спец. Выпуск № 5 «Лазерные технологические процессы в машиностроении». – С. 34 – 50.
7. Шастин, В.И. Развитие лазерных технологий. Особенности формирования среды взаимодействия [Текст] / В.И. Шастин, С.В. Елисеев // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 2 (6). – С. 101 – 109.
8. Ермолаев, А.С. Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного двигателя [Текст] / А.С. Ермолаев, А.М. Иванов, С.А. Василенко // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2013. – № 35. – С. 49 – 63.
9. Бойцов, Б.В. Повышение качества подготовки производства применением технологий быстрого прототипирования [Электронный ресурс] / Б.В. Бойцов, М.Ю. Куприков, Ю.В. Маслов // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2011. – Вып. 49. – 14 с. – Режим доступа: <http://mai.ru/science/trudy/published.php?ID=28179>.
10. Tomlin, M. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part [Электронный ресурс] / M. Tomlin, J. Meyer // Proceedings of the 7th Altair CAE Technology Conference, Gaydon, 10 May 2011. – Gaydon, 2011. – 9 p. – Режим доступа: <http://altairhyperworks.co.uk/technology/Files/Papers/EADS.pdf>.
11. Вакс, Е.Д. Практика прецизионной лазерной обработки [Текст] / Е.Д. Вакс, М.Н. Миленкий, Л.Г. Сапрыкин. – М.: Техносфера, 2013. – 696 с.
12. Перспективы лазерной очистки при ремонте ГТД [Текст] / С.И. Планков-

ский, Е.В. Цегельник, И.И. Головин, П.И. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 10 (127). – С. 54 – 57.

13. Вибір джерела лазерного випромінювання для цілей промислового очищення деталей авіаційної техніки [Текст] / С.І. Планковський, Є.В. Цегельник, І.І. Головін, П.І. Мельничук // *Наукоємні технології*. – 2014. – № 4. – С. 503 – 507.

14. Цегельник, Е.В. Современные подходы к автоматизации процессов лазерной очистки элементов авиационных конструкций от лакокрасочных покрытий [Текст] / Е.В. Цегельник, П.И. Мельничук // *АВИА-2015 : материалы XII Междунар. научн.-техн. конф.*, Киев, 28-29 апреля 2015 г. – Киев: НАУ, 2015. – С. 16.35 – 16.38.

Поступила в редакцию 24.11.2015

Перспективні напрямки застосування лазерних технологій в авіаційній промисловості

Для інтенсифікації виробництва сучасних виробів авіаційної промисловості необхідна розробка й впровадження нових передових технологій, що сприяють підвищенню як якості й надійності виробів, так і економічних показників їх виробництва. Лазерні технології останнім часом є найбільш прогресивними й досить широко впроваджуються в авіаційній промисловості. У статті представлено актуальний огляд по застосуванню лазерних технологій при виробництві й ремонті виробів авіаційної техніки, також представлений опис переваг, які дозволять домогтися впровадження лазерних технологій у виробництво.

Ключові слова: лазерне зварювання, лазерне наплавлення, лазерне різання, лазерна очистка, селективне лазерне спікання.

Perspective Directions of Laser Technology Application in the Aviation Industry

To intensify the production of modern products of the aviation industry requires the development and introduction of new advanced technologies that enhance both the quality and reliability of products as well as economic indicators of production. Laser technology in recent years are the most advanced, and is widely implemented in the aviation industry. The article gives an overview on the current use of laser technology in the production and repair of aviation products-tional art also describes the benefits that will make the introduction of laser technology in production.

Keywords: laser welding, laser cladding, laser cutting, laser cleaning, selective laser sintering.