

УДК 629.083(045)

**Ю.В. БРУСИЛО<sup>1</sup>, А.А. ТАМАРГАЗИН<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Национальный авиационный университет, Украина*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

*Проведено экспериментальное исследование технологии восстановления электродуговым напылением деталей двигателей внутреннего сгорания, устанавливаемых на авиационную наземную технику с целью оптимизации ее к эксплуатационным условиям аэропорта. Предложено использовать для распыления проволочных сталей продукты горения пропан-воздушной смеси вместо сжатого воздуха, что позволило повысить скорость частиц в два и более раза, снизить окисление напыляемого металла и выгорание легирующих элементов. Варьированием расходов пропана и воздуха можно создавать нейтральную или восстановительную атмосферу в зоне плавления проволоки и тем самым снизить окисление металла и выгорание легирующих элементов.*

**Ключевые слова:** *двигатель, эксплуатация, ремонт, восстановление, электродуговое напыление.*

### **Введение**

Немаловажным фактором при ремонте авиационной наземной техники (АНТ) в условиях аэропорта является перерасход дорогостоящих запасных частей импортного производства из легированного металла для замены изношенных деталей. При этом возрастают затраты на реновацию изношенных соединений, которые дополняются убытками от простоев АНТ. В связи с этим, практика эксплуатации АНТ, особенно последних десятилетий, поставила ряд новых проблем, среди которых одной из главных является проблема сохранения и эксплуатации «стареющего» парка АНТ предыдущих поколений. В таких условиях гарантом сохранения парка АНТ становится усовершенствование системы технического обслуживания и ремонта, повышение качества всех видов и форм ремонтно-восстановительных работ.

Важнейшим направлением в усовершенствовании ремонта деталей АНТ становится научно-обоснованный поиск прогрессивных и менее затратных методов восстановления и повышения надежности, долговечности и ресурса ее деталей и, в первую очередь, деталей двигателей.

### **1. Формулирование проблемы и методы ее решения**

Основной причиной разрушения поверхностей деталей двигателей является трение [1] – результат сочетания различных видов взаимодействия механических, физических, химических, электрических и других процессов, возникающих при контактировании и относительном перемещении тел. Вредные про-

явления этого явления выражаются в износе и оцениваются непосредственно по изменению размеров деталей двигателя [2].

Большинство деталей двигателей АНТ работает в условиях, при которых эксплуатационная нагрузка (давление, нагрев, действие окружающей среды и т.п.) воспринимается главным образом их поверхностью. Потому в подавляющем большинстве случаев разрушается только рабочая поверхность детали, которую можно восстановить материалами со специальными свойствами [3].

Анализ проведенных исследований показал, что комплексное сочетание технологических приемов повышения износостойкости может позволить не только восстановить геометрические размеры деталей, но и обеспечить их эксплуатационные свойства на стадии ремонта, а соответственно и продлить ресурс. Поэтому необходимо рассмотреть возможность использования методов восстановления и повышения износостойкости для обеспечения долговечности, надежности и ресурса деталей двигателей АНТ.

В настоящее время существуют различные способы нанесения покрытий [4], многообразие которых объясняется тем, что ни один из них не может претендовать на универсальность: один и тот же метод в одних условиях эксплуатации может дать положительный эффект, а в других отрицательный; каждый способ имеет свою область применения, один и тот же материал покрытия может быть нанесен разными способами, большинство способов можно рассматривать как альтернативные.

При разработке технологических процессов восстановления деталей двигателей АНТ необходимо из всех возможных способов выбрать наиболее рациональный, обеспечивающий максимальный срок службы детали и наименьшую себестоимость ее восстановления, быть достаточно универсальным, простым и легко реализуемым.

В последнее время наметилась тенденция к замене газопламенного напыления электродуговым напылением (ЭДН). Это обусловлено многими достоинствами этого метода: простотой и доступностью оборудования; покрытия по качеству практически не уступают покрытиям, нанесенным плазменным и детонационным методами; более высокой тепловой эффективностью, достигающей 57% по сравнению с 13 и 17% при газопламенном и плазменном напылении; высокой производительностью (в 3...4 раза выше, чем при газопламенном напылении); распространенностью и доступностью источника энергии для плавления металла; получением покрытий с большей прочностью сцепления с основным металлом, чем при газопламенном напылении.

Электродуговое напыление (ЭДН) среди других способов газотермического напыления является самым дешевым и простым методом нанесения покрытий, который не требует применения дорогостоящего оборудования. Этим методом можно восстанавливать около 60% наименований изнашивающихся деталей, обеспечивая их износостойкость на уровне новых. Таким образом, рассмотрение большого количества альтернативных вариантов технологий для восстановления работоспособности и повышения ресурса деталей двигателей АНТ и их анализ позволили в данной экономической ситуации, сложившейся в Украине, выбрать способ электродугового напыления в качестве оптимального способа восстановления деталей АНТ.

## 2. Результаты исследований

Для успешного применения ЭДН в эксплуатационных условиях аэропорта необходимо разработать методику определения оптимальных режимов восстановления деталей АНТ в зависимости от необходимого качества восстановленной поверхности. Для этого в первую очередь необходимо исследовать основные факторы, влияющие на это качество.

Первым из этих факторов является температура частичек распыляемого материала покрытия в метало-воздушном факеле. Расчеты и экспериментальные исследования показывают, что температура частичек зависит от их размеров, расстояния от места плавления и режима

распыления. С увеличением размеров частичек их температура (при других равных условиях) возрастает. Увеличение сечения пламени (расхода сжатого воздуха), уменьшение напряжения на электродах-проводах и расстояния между соплом электродугового аппарата и восстанавливаемой поверхностью приводят к снижению температуры распыляемых частичек материала покрытия. Средняя температура частичек по мере отдаления от сопла снижается на первых порах быстро, а потом снижение температуры замедляется.

Экспериментальными исследованиями установлено, что оптимальным режимом нанесения электродуговых покрытий является обеспечение коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,0...1,1$  и дистанции напыления 190...210 мм.

В [6] доказано, что на некотором пути осевая скорость газового потока при ЭДН постоянна и равна скорости истечения из сопла. Как показали эксперименты, разность скоростей у поверхности восстанавливаемой детали газового потока и металлических частичек при ЭДН небольшая. Подсчет осевой скорости в границах начального участка можно сделать по формуле:

$$u_k = u_b - \frac{1}{\frac{C_x \cdot \gamma_b \cdot S \cdot \tau}{m} + \frac{1}{u_b}},$$

где  $u_b$  – скорость воздушного потока, м/сек;

$\gamma_b$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$S$  – площадь поперечного сечения частички, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – время, с;

$C_x$  – коэффициент лобного сопротивления частички;

$m$  – масса частички, кг.

Учитывая, что:

$$m = v \cdot \gamma_m,$$

где  $v$  – объем частичек, м<sup>3</sup>;

$d$  – диаметр частички, м;

$\gamma_m$  – плотность металла, кг/м<sup>3</sup>,

получим

$$u_k = u_b - \frac{1}{\frac{6C_x \cdot \gamma_b \cdot \tau}{4 \cdot d \cdot \gamma_m} + \frac{1}{u_b}}.$$

Так как  $\gamma_b$  зависит от давления перед соплом, то и  $u_k$  также зависит от него. Средняя скорость по сечению факела определяется по формуле:

$$\frac{u_k}{u_b} = \frac{0,192}{a \cdot L_0} + 0,29,$$

$R_0$

где  $a$  – коэффициент турбулентности воздушного потока;

$L_0$  – расстояние от среза сопла к данной точке пламени, м;

$R_0$  – радиус сопла, м.

Высокая скорость обдувающего дугу потока при электродуговом методе нанесения покрытий обеспечивает эффективное диспергирование капель расплавленного металла и повышение скорости их полета, так как частицы меньших размеров более интенсивно ускоряются в газовом потоке. Высокая скорость транспортирования расплавленных частиц распыляемого материала позволяет сохранить жидкое агрегатное состояние частицы. Кроме того, с увеличением скорости полета частиц сокращается время контакта их с газовой атмосферой. Оба эти фактора сдерживают нежелательные химические превращения в напыляемом материале.

При истечении газового потока с дозвуковой скоростью размер расплавленных частиц в среднем составляет 200 мкм. С увеличением скорости истечения газового потока размер расплавленных частиц на 90% находится в диапазоне 30...80 мкм. Однако такое уменьшение размера расплавленных частиц напыляемого материала ведет к более интенсивному выгоранию из них легирующих элементов, в первую очередь углерода, что обуславливает повышенную твердость покрытий при дозвуковых скоростях истечения воздуха. Содержание легирующих элементов проволоки при увеличении скорости истечения воздуха и тока дугового разряда изменяется в меньшей степени [5]. Проволоки-электроды, которые находятся в газовом потоке, вызывают дополнительную турбулентность пламени и повышение степени затухания скорости газового потока. Влияние диаметра проволоки на коэффициент турбулентности видно из уравнения:

$$a = \left( 0,4 \frac{d_{\text{пр}}}{D_0} \right)^{2,56} + a_1,$$

где  $d_{\text{пр}}$  – диаметр проволок, м;

$D_0$  – диаметр сопла, м;

$a_1$  – коэффициент турбулентности для данного сопла в случае отсутствия проволок электродов (для сопел диаметром  $3 \cdot 10^{-3}$  м  $a_1 = 0,057$  и для сопел диаметром  $6 \cdot 10^{-3}$  м  $a_1 = 0,056$ ).

С аэродинамической точки зрения лучше применять более тонкие проволоки, так как при этом осевая скорость газового потока уменьшается по мере удаления от сопла интенсивно и последовательно, поэтому нет необходимости жестко выдерживать установленное расстояние между соплом и поверхностью детали.

Согласно результатам исследований наиболее крупные фракции имеют минимальную долю в общей картине распределения. Следовательно, электродуговые покрытия на восстановленных поверхностях достаточно плотные. На дисперсность напыленного металла влияет также энергия газового потока, что в свою очередь, зависит от диаметра сопла и может быть определена по формуле:

$$d_{\text{ср}} = K_1 \left( \frac{3,75}{R_0} + 0,29 \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{G}{\lambda \cdot \mu_2}},$$

где  $K_1$  – коэффициент размерности;

$R_0$  – радиус воздушного сопла;

$G$  – производительность аппарата, кг/сек;

$\gamma$  – плотность напыленного металла, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_2$  – коэффициент равномерности процесса пылеобразования.

При ЭДН частички распыляемого материала покрытия попадают на восстанавливаемую поверхность под различными углами: чем больше угол раскрытия металло-воздушного потока, тем больше количество частичек попадает на поверхность детали под острым углом атаки и тем меньше степень деформации частичек. В условиях высокоскоростного напыления происходит изменение коэффициента сосредоточенности материала в струе в сторону его увеличения, поскольку угол расхождения двухфазных сверхзвуковых струй меньше, чем дозвуковых и составляет 5...7°. Как следствие уменьшается диаметр пятна напыления и возрастает коэффициент использования материала до 0,85.

При совершенствовании процесса ремонта деталей двигателя ЭДН были расширены возможности регулирования процесса, за счет изменения состава транспортирующего газа, что влияет на температуру, скорость и окислительную способность газового потока. Для предотвращения или регулирования образования окисного слоя вокруг частиц материала покрытия необходимо снижать парциальное давление кислорода в атмосфере распыления до достаточно низкого значения.

Замена сжатого воздуха защитными газами (аргоном, азотом и т.п.) при нанесении покрытий открывает широкие технологические возможности для их получения практически без окислов с высокими физико-механическими свойствами. Однако в условиях аэропорта при восстановлении деталей применение относительно дорогостоящих инертных и защитных газов является экономически нецелесообразным в связи с большим расходом этих газов (от 1,0 до 1,5 м<sup>3</sup>/мин).

Использование в качестве распыляющего газа продуктов сгорания пропан-воздушной смеси позволяет значительно снизить окисление напыляемого металла и выгорание легирующих элементов. Варьированием расходов пропана и воздуха можно создавать нейтральную или восстановительную атмосферу в зоне плавления электродной проволоки и тем самым снижать окисление металла и выгорание легирующих элементов. Так, при коэффициенте сгорания топлива  $\beta = 0,4$  количество углерода в покрытии, полученном из проволок Св-08 и 40Х13 практически не отличается от его содержания в исходной проволоке. В то же время при равном отношении воздуха и пропана углерода в покрытии вдвое меньше, чем в исходном материале, а при распылении чистым воздухом содержание углерода уменьшается почти в три раза. Отсутствие кислорода в качестве окислителя топлива значительно снижает себестоимость наносимых покрытий и повышает надежность и безопасность проводимых работ.

Количество кислорода в покрытиях возрастает с уменьшением содержания пропана в горючей смеси. Так повышение коэффициента избытка воздуха в горючей смеси  $\alpha$  от 0,8 до 1,7 вызывает рост процентного содержания кислорода в покрытиях от 1,3 до 3,5%. Наличие кислорода в электродуговых покрытиях даже при избытке пропана объясняется наличием оксидной оболочки на поверхности проволок, включением в напыленный слой окисленных частиц с периферии распыляющей струи, окислением напыленного слоя за промежуток времени между нанесением предыдущего и последующего слоев и осаждением на поверхность покрытия пылевидных окислов распыляемого материала [6]. Увеличение количества воздуха в смеси с горючим газом приводит также к уменьшению содержания углерода в покрытии. Полученные результаты изменения химического состава вполне согласуются с опубликованными результатами других исследователей.

Еще одним важным фактором, влияющим на качество получаемого покрытия с помощью электродугового напыления, является расстояние от сопла до восстанавливаемой поверхности. Оно обычно составляет 50...350 мм. Если это расстояние равняется 50...80 мм, то такое ЭДН называют горячим. С этим расстоянием работают, когда габариты изделия обеспечивают достаточный теплоотвод и не создают перегрева, который может вызвать коробление изделия. Преимущество восстановления ЭДН при небольшом расстоянии состоит в том, что снижаются потери распыляемого металла. Частицы попадают на поверхность в более

горячем состоянии. Способ горячего ЭДН не рекомендуется применять для восстановления чувствительных к деформациям и напряжениям изделий. Нормальным считают расстояние 80...200 мм, причем нижний его предел рекомендуется для восстановления деталей, не чувствительных к возникновению деформаций и напряжений, а также для аппаратов ЭДН с небольшой производительностью. Рекомендуется начинать восстановление поверхностей нанесением покрытия при небольшом расстоянии, а затем вести процесс при большем расстоянии. Для получения наивысшей энергии удара частичек об восстанавливаемую поверхность детали необходимо размещать аппарат от поверхности на расстоянии 75...100 мм.

Отрезок времени между нанесением отдельных слоев должен быть по возможности минимальным во избежание образования окислов и оседания пыли препятствующих сцеплению частиц между собой.

Скорость перемещения электродугового аппарата выбирается таким образом, чтобы за один проход наносился слой покрытия толщиной 0,2...0,3 мм. Слишком медленное перемещение аппарата вызывает перегрев покрытия и восстанавливаемой поверхности, что ухудшает их качество. Более толстые покрытия нужно напылять с повышенной скоростью. Для высокопроизводительного напыления, то есть при работе на токах порядка 400 А и более, необходима достаточно высокая скорость перемещения электродугового аппарата относительно восстанавливаемой поверхности.

Одним из преимуществ восстановления деталей двигателя ЭДН является возможность наносить покрытие на холодный основной металл. Предварительный подогрев до 200 °С целесообразен только при напылении молибденового или нихромового подслоев.

При отработке технологии ЭДН под конкретную деталь очень важно обеспечить такие условия охлаждения детали, чтобы температура напыленного покрытия не превышала 200 °С. Это позволяет предотвратить появления больших напряжений в покрытии и предотвратить появление трещин.

### Заключение

Установлено путем обобщения результатов дефектации деталей двигателей АНТ, что их эксплуатационные отказы в основном возникают вследствие износа и составляют 80...90 % от общего количества отказов, при этом 40 % наиболее часто встречаемого дефекта – износ внешней цилиндрической поверхности. Правильность такого заключения подтверждена данными о том что, среди разработанных

технологических процессов восстановления деталей – 60 % предназначено для восстановления деталей типа «вал».

Предложено использовать для распыления проволочных сталей продукты горения пропан-воздушной смеси вместо сжатого воздуха, что позволило повысить скорость частиц в два и более раза, снизить окисление напыляемого металла и выгорание легирующих элементов. Варьированием расходов пропана и воздуха можно создавать нейтральную или восстановительную атмосферу в зоне плавления проволоки и тем самым снизить окисление металла и выгорание легирующих элементов.

Показано, что свойства поверхностей, восстанавливаемых электродуговыми покрытиями, целесообразно регулировать изменением состава транспортирующего газа. Установлено, что увеличение количества воздуха в смеси с горючим газом приводит к уменьшению содержания углерода в покрытии; повышение коэффициента избытка воздуха в горючей смеси  $\alpha$  от 0,8 до 1,7 вызывает рост процентного содержания кислорода в покрытиях от 1,3 до 3,5%; уменьшение избытка воздуха в горючей смеси уменьшает выгорание легирующих элементов и окисление распыляемого материала покрытий в среднем в два раза, при коэффициенте избытка воздуха в горючей смеси  $\alpha$ , находящемся в пределах от 0,8 до 1,0 происходит науглероживание покрытия.

### Литература

1. Гаркунов Д. Н. Триботехника. Конструирование, изготовление и эксплуатация машин [Текст] / Д. Н. Гаркунов. – М.: Издательство МСХА, 2002. – 632 с.
2. Громановский Д.Г. Проблемы кинетики изнашивания [Текст] / Д.Г. Громановский, И.Д. Ибатуллин, А.В. Дынников [и др.] // Сб. докл. Междунар. конгр. «Мех. и трибология транспортных систем – 2003», Ростов на Дону, 10–13 сент., 2003. – Т.1. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. гос. ун-та путей сообщ., 2003 – С.252–257.
3. Черновол М.И. Восстановление и упрочнение деталей машин с помощью новых износостойких материалов. [Текст] / М.И. Черновол. – М.: АгроНИИТЭИИТО, 1990. – 64 с.
4. Хонинг М. Металлические и керамические покрытия [Текст] / М. Хонинг, В. Васантасри, П.Сидки. – М.: Мир, 2000. – 517 с.
5. Катц Н.В. Металлизация распылением. [Текст] / Н.В.Катц – М.: Машиностроение, 1966. – 212 с.
6. Татаринов Б.П. Металлизация с целью восстановления деталей [Текст] / Б.П. Татаринов, Ч.В. Пулька., С.В. Дробышев. // Соврем. методы наплавки, упрочняющ. защит. покрытия и исполыз. матер.: IV Укр. науч.-техн. конф., 20-22 нояб., 1990: Тез. докл. – Харьков, 1990. – С.134-135.

Поступила в редакцию 31.05.2015

### **Ю.В.Брусило, О.А.Тамаргазін. Оптимізація технології відновлення деталей двигуна електродуговим напиленням**

*Проведено експериментальне дослідження технології відновлення електродуговим напиленням деталей двигунів внутрішнього згорання, які встановлюються на авіаційну наземну техніку, з метою оптимізації її до експлуатаційних умов аеропорту. Запропоновано використовувати для розпилення дротяних сталей продукти горіння пропан-повітряної суміші замість стисненого повітря, що дозволило підвищити швидкість частинок в два і більш рази, знизити окислення напилюваного металу і вигорання легуючих елементів. Варіюванням витрат пропану і повітря можна створювати нейтральну або відновну атмосферу в зоні плавлення дроту і тим самим знизити окислення металу і вигорання легуючих елементів.*

**Ключові слова:** двигун, експлуатація, ремонт, відновлення, електродугове напилення.

### **Yu.V.Brusilo, A.A.Tamargazin. Optimization technology of rework engine parts by the electric arc spraying**

*An experimental study of the technology of recovery of electric arc spraying of parts of internal combustion engines installed on aircraft ground equipment to optimize it to the operational environment of the airport. Proposed to be used for spraying steel wire products of combustion of propane-air mixture is compressed air, which allowed to increase the speed of particles in two or more times, to reduce oxidation of the deposited metal and the burning of alloying elements. The variation of costs of propane and air, you can create a neutral or reducing atmosphere in the melting zone of the wire and thereby reduce the oxidation of the metal and the burning of alloying elements.*

**Keywords:** engine, operation, repair, rework, electric arc spraying.