

## Технология упрочнения алмазоподобным покрытием

Г.П. ФЕТИСОВ, канд. техн. наук, проф., А.В. ПРОКОПЕНКО, Д.В. БОЛОГОВ,  
А.С. ПОМЕЛЬНИКОВА, д-р техн. наук, проф.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ

E-mail: fetisov901@mail.ru

*Исследована возможность упрочнения штамповой оснастки, используемой в производстве деталей авиационных двигателей, при помощи нанесения алмазоподобных покрытий. Разработана технология плазменного нанесения алмазоподобного тонкопленочного покрытия на основе разложения паров жидких препаратов. Проведены испытания полученных покрытий на адгезионную стойкость, трение и износ. Применение технологии позволило повысить стойкость штампов в три—шесть раз.*

**Ключевые слова:** упрочнение, алмазоподобное покрытие, испытания, поверхность, коэффициент трения, интенсивность изнашивания.

**П**ластическая деформация лежит в основе одного из наиболее распространенных технологических процессов — обработки металлов давлением (ОМД). Широкое применение ОМД обусловлено существенными ее преимуществами перед другими процессами формирования заготовок: высокие механические свойства заготовок и производительность; рациональное использование материалов; широкие возможности для автоматизации и т.д. Обработка давлением занимает ведущее место среди других процессов и в авиационно-космической промышленности, прежде всего в производстве двигателей. По данным [1], доля обработки деталей для разных типов двигателей выглядит следующим образом (табл. 1).

Одной из проблем при использовании ОМД является стойкость штамповой оснастки, что

влияет на стоимость и точность изготовления деталей.

Для повышения долговечности деталей технологической оснастки в авиационной промышленности применяют износостойкие покрытия, наносимые методом вакуумного ионно-плазменного напыления, электроискрового легирования, финишного плазменного упрочнения (ФПУ); а также лазерной и плазменной закалкой [2].

Наряду с определенными достоинствами эти процессы имеют и недостатки: при лазерной и плазменной закалке, проводимой в воздушной среде, возможно окисление обрабатываемой поверхности; в процессе электроискрового легирования не удается получать тонкопленочные покрытия толщиной порядка нескольких микрон; при вакуумном ион-

1. Доля обработки деталей для разных типов двигателей

Основные типы двигателей	Доля обработки деталей давлением, %		
	по массе	по количеству	по трудоемкости
Турбореактивные (ТРД)	≤80	≤85	≤50
Жидкостные (ЖРД)	≤95	90...100	≤60
Прямоточные (ПТРД)	≤90	90...100	≤70
Плазменные	≤75	≤90	≤50

но-плазменном напылении температура обрабатываемых изделий при нанесении покрытия составляет 250...500 °С, а толщина покрытия значительно зависит от разнотолщинности изделия и его расположения относительно испарителя [2].

В последнее время появилось много публикаций о применении алмазных и алмазоподобных пленок для упрочнения режущего инструмента и деталей технологической оснастки.

Финишное плазменное упрочнение (ФПУ) инструмента и технологической оснастки, обеспечивающее нанесение алмазоподобного тонкопленочного ( $\leq 3$  мкм) покрытия в безвакуумном пространстве при атмосферном давлении, относится к новым промышленным технологиям. Процесс упрочнения в этом случае происходит при интегральной температуре нагрева изделий 100 °С, и что важно — без изменения исходной шероховатости рабочих поверхностей.

За основу данной технологии взято разложение паров жидких технологических препаратов, вводимых в дуговой плазматрон, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии.

Нами в качестве исходных веществ для получения алмазоподобного покрытия на основе оксикарбонитрида кремния использованы металлоорганические и органические соединения в жидком состоянии. В качестве плазмообразующего газа, используемого в дуговом плазматроне, выбран аргон. При этом стойкость катодного и анодного узлов плазматрона при ФПУ достигает ~1000 ч непрерывной работы.

Одной из основных особенностей ФПУ, вызванной повышенной скоростью охлаждения осаждаемого покрытия и наличием элементов-аморфизаторов, является аморфное состояние наносимого покрытия, которое имеет повышенную твердость ( $\leq 53$  ГПа), высокое удельное электрическое сопротивление ( $10^{10}$  Ом·м), низкий коэффициент трения, обладает химической инертностью. Аморфные покрытия применяют в качестве барьерных пленок, предотвращающих быструю диффузию, пассивирующих пленок, повышающих коррозионную стойкость материалов и пре-

пятствующим коррозионному растрескиванию под напряжением и водородному охрупчиванию [3].

Наносимое покрытие при ФПУ повторяет профиль подложки. В покрытии отсутствуют микротрещины, несплошности, поры и другие дефекты. Формируется упрочняющее покрытие в виде оптически прозрачной пленки, которая на полированной поверхности дает интерференционную картину с радужными оттенками от фиолетово-голубого до зелено-красного цветов.

Сравнительные характеристики адгезионных свойств алмазоподобного покрытия, наносимого методом ФПУ, и покрытия нитрида титана, наносимого ионно-плазменным напылением в вакууме на оптимальном режиме на установке ННВ-6,61/11, исследовали склерометрическим методом. Основой являлась термообработанная инструментальная сталь Р6М5 [4]. В качестве индентора применяли алмазный конус Роквелла с углом при вершине 120°, передвигаемый по поверхности покрытий со скоростью 3 см/мин. Вертикальная нагрузка на индентор увеличивалась до тех пор, пока не достигалась ее критическая величина, при которой покрытие полностью отделялось от подложки. В результате проведенных исследований выявлено, что критическая нагрузка, при которой появлялись первые сколы и отслоения покрытия из нитрида титана, составляла 35 Н, а для покрытий, нанесенных методом ФПУ, — 65 Н.

Субмикрорельеф рабочих поверхностей образцов (рис. 1), исследовавшийся на просвечивающем электронном микроскопе ЭММА-2 методом углеродно-серебряных реплик, показал высокооднородную характерную шероховатость, присущую поверхностям после ФПУ (в то время как субмикрорельеф поверхностей до ФПУ имеет явно выраженные многообразные следы — риски и дефекты от предшествующей абразивной обработки). Изменение топографии поверхности после ФПУ является подтверждением того, что покрытие осаждается на микродефектах поверхности, залечивая тем самым дефектные зоны, образованные при предшествующей шлифовальной операции.

Наносимое алмазоподобное покрытие, являясь диэлектриком, образует пленочный барьер, препятствующий схватыванию контактируемых поверхностей. Кроме того, это покрытие обладает повышенной коррозионной стойкостью и жаростойкостью, что подтверждается длительными испытаниями образцов на воздушную коррозию при до 1000...1200 °С.

Испытания на трение и износ проводили в соответствии с ГОСТ 23.224—86 на установке СМЦ-2. Для этой цели использовали образцы диаметром 38 мм, толщиной 12 мм из стали Р6М5, на которые наносилось алмазоподобное покрытие методом ФПУ и покрытие TiN методом ионно-плазменного напыления в вакууме. В качестве контртела использовали термообработанные до твердости HRC 63 образцы из стали ШХ15. Условия контакта — трение качения с 20% проскальзыванием со смазкой. В качестве смазки применяли индустриальное масло И-20 (ГОСТ 20779—75). Испытания проводили при частоте вращения образца 1000 мин<sup>-1</sup> и нагрузке 1650 Н. Для сравнения также использовали образец из термообработанной стали Р6М5.

В процессе эксперимента регистрировали значения момента трения и массового износа образцов и рассчитывали коэффициенты трения и интенсивность изнашивания. Коэффициент трения рассчитывается по формуле:

$$f = M_{тр} / DP,$$

где  $M_{тр}$  — момент трения, Н·м;  $D$  — диаметр образца, м;  $P$  — нагрузка, Н.

Получены следующие результаты исследования триботехнических свойств пар трения (табл. 2).

Таким образом, на основании испытаний на трение и износ определено, что коэффициент трения и интенсивность изнашивания поверхностей с алмазоподобным покрытием уменьшаются практически в два раза по срав-

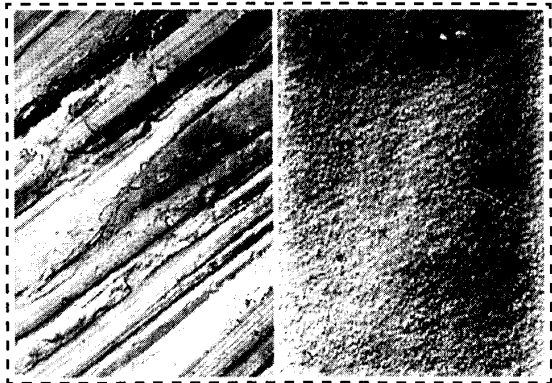


Рис. 1. Микрорельеф поверхности до (слева) и после (справа) ФПУ. ×5000

нению с исходной поверхностью стали Р6М5 и на 20% по сравнению с покрытием TiN, нанесенным в вакууме.

Для определения качества нанесения покрытия разработан прибор контроля роста толщины покрытия в процессе ФПУ с использованием в качестве датчика самой плазменной струи. Прибор обеспечивает цифровую индикацию сигнала по одному или двум параллельно включенным входным каналам, вывод его текущего значения на жидкокристаллический графический экран в координатах ток—время, сохранение графического изображения значений измерительного микротока и времени в энергонезависимой памяти. Результаты измерений архивируются в энергонезависимой памяти прибора емкостью 4 Мб (>1 млн измерений) и могут быть перенесены на персональный компьютер.

Примеры использования процесса ФПУ приведены ниже.

*Упрочнение технологической оснастки, используемой в производстве деталей авиадвигателей (рис. 2)*

При изготовлении деталей для ГТД (газотурбинных двигателей) используется большое

## 2. Триботехнические свойства пар трения

Обработка поверхности	Без покрытия	Ионно-плазменное напыление TiN	ФПУ с нанесением алмазоподобного покрытия
Интенсивность изнашивания $J$ , 10 <sup>-9</sup> кг/м <sup>3</sup>	6,40	4,13	3,45
Коэффициент трения $f$ , 10 <sup>-3</sup>	14,50	8,43	7,03



Рис. 2. ФПУ вытяжной матрицы, используемой в авиационном производстве

многообразии специализированного режущего инструмента, штамповой оснастки, измерительного инструмента, изготавливаемых из инструментальных сталей и твердого сплава [4]. Одним из основных расходимых инструментов является формообразующая оснастка, которая испытывает высокие динамические ударные нагрузки и интенсивное трение рабочих поверхностей с обрабатываемой деталью. С целью повышения твердости поверхности инструмента, уменьшения коэффициента трения между инструментом и обрабатываемой деталью, получения на инструменте химически инертного покрытия, противодействующего образованию задиров и налипания, уменьшения параметров шероховатости рабочих поверхностей инструмента применяется технология ФПУ.

Промышленные испытания упрочненной оснастки на ОАО «ММП им. Чернышева» показали повышение ее стойкости более чем в три раза.

*Повышение долговечности инструмента, используемого при изготовлении подшипников качения*

При массовом изготовлении подшипников качения используется многообразный инструмент: режущий, кузнечный (к автомобильным линиям) инструмент полугорячей калибровки

раскаткой, штамповый, высадочный, мерительный и др. Применительно к широкой номенклатуре данного инструмента предлагается использовать технологию ФПУ. С использованием этой технологии обеспечивается локальное упрочнение изнашиваемых поверхностей различного инструмента благодаря нанесению тонкопленочного ( $\leq 3$  мкм) алмазоподобного покрытия. Покрытие имеет следующие свойства: твердость 52 ГПа (в большинстве случаев твердость основы инструмента составляет 8...14 ГПа); низкий коэффициент трения (при испытаниях на трение и износ с контртелом из материала ШХ15 коэффициент трения составляет 0,007, при тех же условиях без покрытия коэффициент трения равен 0,015); покрытие уменьшает параметр шероховатости поверхности  $R_a$  (в зависимости от исходной шероховатости) более чем в два раза; сохранение твердости и внешнего вида при повышенных температурах до 1000 °С; отсутствие взаимодействия с любыми веществами (кроме плавиковой кислоты) за счет химической инертности.

Промышленные испытания упрочненного инструмента (высадочного и штампового) показали повышение его стойкости в четыре—шесть раз.

*Многоразовое повышение стойкости холодновысадочного инструмента (рис. 3)*

Холодной высадкой и выдавливанием из сталей и цветных металлов изготавливают метизы (болты, гайки, шурупы), различные детали универсального назначения (звездочки, шестерни и т.п.), разнообразные формообразующие детали, испытывающие значительные динамические ударные нагрузки, абразивное изнашивающее воздействие [1].

Промышленные испытания холодновысадочного инструмента после ФПУ на промышленных предприятиях показали повышение его стойкости в четыре—шесть раз.

Использование установок для ФПУ на промышленных предприятиях позволяет уменьшать количество изготавливаемого и закупаемого инструмента и оснастки; экономить инструментальную сталь (в связи с уменьшением количества изготавливаемого инструмента

и оснастки); уменьшать объем заточных операций и количество приобретаемого шлифовального инструмента (в связи с применением упрочненного инструмента и оснастки); уменьшать затраты, связанные с настройкой и переналадкой прессов, станков и другого оборудования, в связи с использованием более долговечного инструмента и оснастки; интенсифицировать режимы обработки и, соответственно, увеличивать производительность труда при использовании упрочненного инструмента и оснастки.

Таким образом, авторами разработана технология финишного плазменного упрочнения инструмента и технологической оснастки путем нанесения алмазоподобного покрытия на основе оксикарбонитрида кремния применительно к авиационной и другим отраслям промышленности. Показано, что коэффициент трения и интенсивность изнашивания поверхностей с алмазоподобным покрытием уменьшаются практически в два раза по сравнению с исходной поверхностью стали Р6М5 и меньше на 20%, чем для покрытия TiN, нанесенного в вакууме. Разработанная технология опробована для упрочнения технологической оснастки, используемой в производстве деталей авиадвигателей, повышения стойкости и долговечности инструмента. Проведенные испытания показали повышение стойкости в три—шесть раз.



Рис. 3. ФПУ холодновысадочного инструмента

#### Список литературы

1. Стрельцова А.Н., Багиров А.Б. Технология конструкционных материалов. Основа обработки металлов давлением. М.: МАИ-Принт, 2011. 207 с.
2. *Материаловедение и технология металлов* / Под ред. Г.П. Фетисова. М.: Юрайт, 2014. 786 с.
3. Тибрин Г.С. Тепловые основы технологических процессов. М.: МАИ, 2008. 148 с.
4. Гончаренко И.А. Основы технологии термической обработки стали. Тула: Гриф и К, 2006. 326 с.