

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

---

УДК 621.793

## ФИНИШНОЕ ПЛАЗМЕННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ИНСТРУМЕНТА, ШТАМПОВ И ПРЕСС-ФОРМ

Бологов Д.В.\* , Прокопенко А.В.\*\* , Сутормин А.Ю.\*\*\* , Фетисов Г.П.\*\*\*\*

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

\* e-mail: [bdv12@inbox.ru](mailto:bdv12@inbox.ru)

\*\* e-mail: [7298887@mail.ru](mailto:7298887@mail.ru)

\*\*\* e-mail: [alexeyjs1@gmail.com](mailto:alexeyjs1@gmail.com)

\*\*\*\* e-mail: [fetisov901@mail.ru](mailto:fetisov901@mail.ru)

---

Исследована возможность упрочнения технологической оснастки, используемой в производстве деталей авиационных двигателей и режущего инструмента посредством нанесения алмазоподобных покрытий. Разработана технология нанесения алмазоподобного тонкопленочного покрытия на основе разложения паров жидких технологических препаратов, вводимых в дуговой плазмотрон. Проведены испытания полученных покрытий на адгезионную стойкость, трение и износ, показавшие значительное повышение характеристик по сравнению с существующими образцами. Разработанная технология апробирована на различных предприятиях; ее применение показало повышение стойкости технологической оснастки и режущего инструмента в три-шесть раз.

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

---

### Введение

Для повышения долговечности режущего инструмента и деталей технологической оснастки в авиационной промышленности применяются износостойкие покрытия, наносимые путем вакуумного ионно-плазменного напыления, электроискрового легирования, финишного плазменного упрочнения (ФПУ), лазерной и плазменной закалки.

В то же время следует отметить и недостатки присущие им: при лазерной и плазменной закалке, проводимой в воздушной среде, возможно окисле-

ние обрабатываемой поверхности; в процессе электроискрового легирования невозможно получение тонкопленочных покрытий толщиной порядка нескольких микрон; при вакуумном ионно-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.

В последнее время появилось много публикаций о применении алмазных и алмазоподобных пленок

для упрочнения режущего инструмента и деталей технологической оснастки. В Германии разработан даже специальный стандарт VOI 2840 на алмазоподобные покрытия. Реализации этих процессов основаны на использовании дорогостоящего вакуумного оборудования.

### Разработка технологии нанесения покрытия для ФПУ и исследование его свойств

Финишное плазменное упрочнение инструмента и технологической оснастки, обеспечивающее нанесение алмазоподобного тонкопленочного (до трех мкм) покрытия в безвакуумном пространстве при атмосферном давлении, относится к новым промышленным технологиям. Процесс упрочнения инструмента, оснастки и деталей машин происходит при интегральной температуре нагрева изделий порядка 100 °С без изменения исходной шероховатости рабочих поверхностей.

Основным принципом нанесения алмазоподобного тонкопленочного покрытия, взятым за основу данной технологии, является 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 использовались металлоорганические и органические соединения в жидком состоянии. Расход технологических препаратов при односторонней работе установки не превышал 0,5 л/год. В качестве плазмообразующего газа, используемого в дуговом плазматроне, выбран аргон, применение которого основывается на требовании долговечности и надежности элементов плазматрона при длительном ведении процесса. При этом стойкость катодного и анодного узла плазматрона при ФПУ достигает порядка 1000 часов непрерывной работы.

Одной из основных особенностей ФПУ, связанной с повышенными скоростями охлаждения осаждаемого покрытия и наличием элементов-аморфизаторов, является аморфное состояние наносимого покрытия, имеющего повышенную твердость (до 53 ГПа), высокое удельное электрическое сопротивление ( $10^{10}$  Ом·м), низкий коэффициент трения и обладающего химической инертностью. Известно, что в аморфных материалах отсутствуют дефекты, характерные для кристаллических тел. В них нет границ зерен, дислокаций, их структура гомогенна, диффузия по вакансиям более затруднительна, они изотропны. Аморфные покрытия применяются в качестве барьерных пленок, предотвращающих быструю диффузию, пассивирующих пленок, повы-

шающих коррозионную стойкость материалов и препятствующих коррозионному растрескиванию под напряжением и водородному охрупчиванию.

Наносимое покрытие при ФПУ повторяет профиль подложки. На рис. 1 показан поперечный шлиф, полученный с помощью многоцелевого сканирующего (растрового) микроскопа ISM-6460LV.

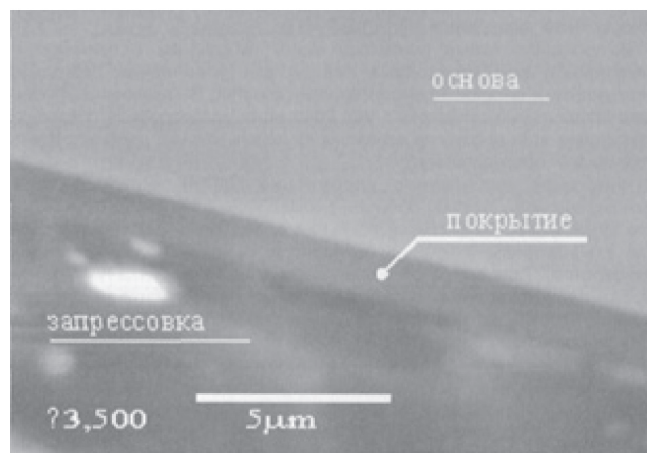


Рис. 1. Поперечный шлиф образца с покрытием ФПУ (x3500)

В покрытии отсутствуют микротрещины, несплошности, поры и другие дефекты. Формируется прочное покрытие в виде оптически прозрачной пленки, которая на полированной поверхности дает интерференционную картину с радужными оттенками от фиолетово-голубого до зелено-красного цвета.

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, исследовались склерометрическим методом. Основой являлась термообработанная инструментальная сталь Р6М5. В качестве индентора применялся 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 её критическая величина, при которой покрытие полностью отделялось от подложки. Данную критическую нагрузку определяют, исследуя полученные царапины под металлографическим микроскопом. 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. 2), 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.

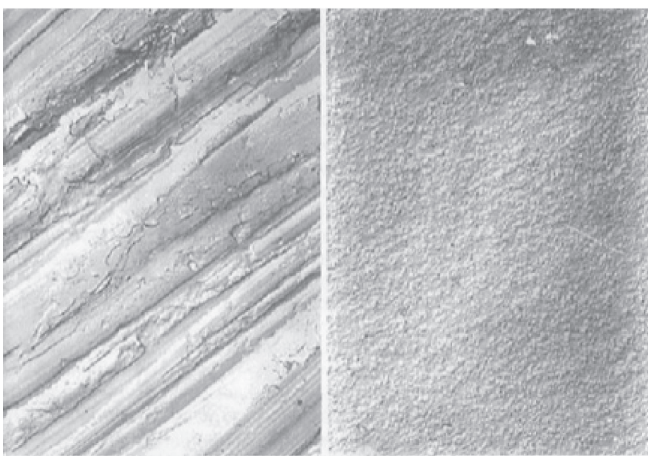


Рис. 2. Микрорельеф поверхности до (слева) и после (справа) ФПУ (x5000)

менялись термообработанные до твердости HRC 63 образцы из стали ШХ15. Условия контакта — трение качения с 20% проскальзыванием со смазкой. В качестве смазки применяли промышленное масло И-20 (ГОСТ 20779-75). Испытания велись при частоте вращения образца 1000 мин<sup>-1</sup> при нагрузке 1650 Н. Для сравнения также использовался образец из термообработанной стали Р6М5.

В процессе эксперимента регистрировались значения момента трения и массового износа образцов и рассчитывались коэффициенты трения и интенсивность изнашивания.

Коэффициент трения рассчитывается по формуле

$$f = \frac{M_{\text{тр}}}{DP},$$

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

Полученные результаты исследования триботехнических свойств пар трения приведены в таблице.

Таким образом, на основании испытаний на трение и износ было определено, 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.

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

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 температурах до 1000—1200 °С.

Испытания на трение и износ проводились в соответствии с ГОСТ 23.224-86 на установке СМЦ-2. Для этой цели использовались 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 при-

Для определения качества нанесения покрытия разработан прибор контроля роста толщины покрытия в процессе ФПУ (рис. 3) 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 (более 1 млн измерений) и могут быть перенесены на персональный компьютер.



Рис. 3. Прибор контроля нанесения алмазоподобного покрытия

### Примеры использования процесса ФПУ

1. Упрочнение технологической оснастки, используемой в производстве деталей авиадвигателей (рис. 4).



Рис. 4. ФПУ вытяжной матрицы, используемой в авиационном производстве

При изготовлении деталей для газотурбинных двигателей (ГТД) используется большое разнообразие специализированного режущего инструмента, штамповой оснастки, мерительного инструмента, изготавливаемых из инструментальных сталей и твердых сплавов. Одним из основных расходных 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, про-

тиводействующего образованию задиоров и налипания, уменьшения параметров шероховатости рабочих поверхностей инструмента, применяется технология ФПУ.

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

2. Многократное повышение стойкости оснастки для стеклоформирующих машин (рис. 5). Оснастка для стеклоформирующих машин (черновая и чистовая форма, горловое кольцо, поддон чистой формы, плунжер, коронка, донный затор, плунжерное

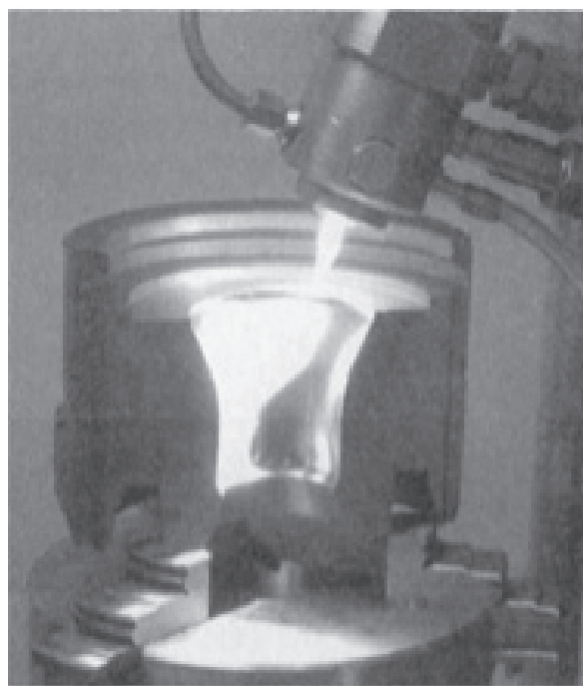


Рис. 5. ФПУ формы для прессования стеклянной тары

кольцо) предназначена для формования стеклоизделий и работает в непосредственном контакте с жидким стеклом. Формование производится в интервале температур 700—1000 °С, а формовая оснастка эксплуатируется в тяжелых условиях термодинамических нагрузок. Основными материалами для литейного изготовления формовой оснастки являются серые и высокопрочные чугуны.

С целью многократного повышения долговечности формовой оснастки на её рабочие поверхности наносится алмазоподобное тонкопленочное покрытие методом ФПУ. Покрытие имеет твердость порядка 52 ГПа, является термостойким и химически инертным. При этом отпадает необходимость наплавки на рабочие поверхности износостойких порошковых материалов на основе никеля.

Использование данной технологии на ООО «ТД «АзовСтекло» показало повышение стойкости формовой оснастки более чем в пять раз.

3. *Повышение долговечности инструмента, используемого при изготовлении подшипников качения.*

При массовом изготовлении подшипников качения используется разнообразный 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 за счет нанесения тонкопленочного (до 3 мкм) алмазоподобного покрытия. Покрытие имеет следующие свойства: твердость 52 ГПа (в большинстве случаев твердость основы инструмента порядка 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 — 0,015); покрытие уменьшает параметр шероховатости поверхности Ra (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) на ОАО «Волжский подшипниковый завод» показали повышение его стойкости в четыре—шесть раз.

4. *Многоразовое повышение стойкости холодновысадочного инструмента* (рис. 6).

Холодной высадкой и выдавливанием из сталей и цветных металлов изготавливают метизы (болты,

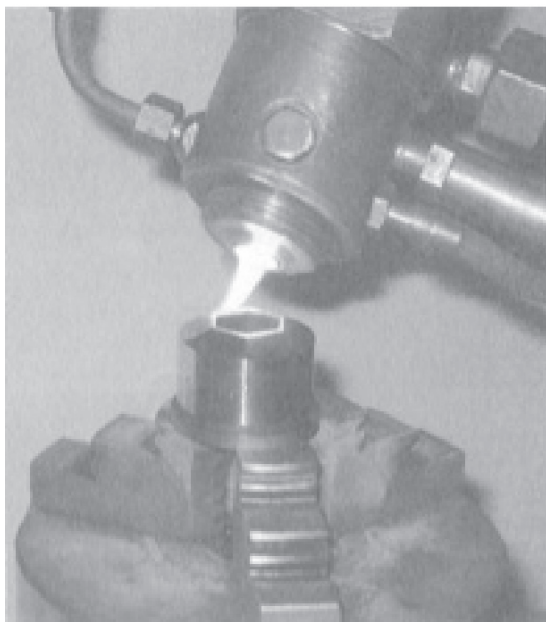


Рис. 6. ФПУ холодновысадочного инструмента

гайки, шурупы), различные детали универсального назначения (звездочки, шестерни и т.п.), разнообразные формообразующие детали, испытывающие значительные динамические ударные нагрузки и абразивное изнашивающее воздействие.

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, для уменьшения параметров шероховатости поверхностей инструмента применяется технология ФПУ. 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 использованием 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.

## Выводы

1. Разработана технология финишного плазменного упрочнения инструмента и технологической оснастки путем нанесения алмазоподобного покрытия на основе оксикарбонитрида кремния.

2. Определено, 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.

3. 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.

## Библиографический список

1. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. и др. Материаловедение и технология металлов / Под ред. Г.П. Фетисова. — М.: Высшая школа, 2006. — 862 с.
2. Тибрин Г.С. Тепловые основы технологических процессов. — М.: Изд-во МАИ, 2008. — 148 с.
3. Гончаренко И.А. Основы технологии термической обработки стали. — Тула: Гриф и К, 2006. — 326 с.

## FINISHING PLASMA STRENGTHENING OF TOOLS, DIES AND MOLDS

**Bologov D.V.\* , Prokopenko A.V.\*\* , Sutormin A.Yu.\*\*\* , Fetisov G.P.\*\*\*\***

*Moscow Aviation Institute (National Research University),  
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

\* e-mail: bdv12@inbox.ru

\*\* e-mail: 7298887@mail.ru

\*\*\* e-mail: alexeysj1@gmail.com

\*\*\*\* e-mail: fetisov901@mail.ru

### Abstract

This work investigates the possibility of strengthening of production tooling, used for aircraft engine parts production, and cutting tools by diamond-like coating. We have developed diamond-like thin-film coating technique for the finishing plasma strengthening based on disintegration of liquid technologic agents' vapors, inserted into an arc plasma gun followed by plasma-chemical reactions and formation of product coating. We used metal-organic and organic compounds in liquid state as parent substances for providing diamond-like coating based on silicon oxycarbonitride. We choose argon as an orifice gas, used in arc plasma gun.

The applied coating duplicates the substrate profile, and strengthening coating herewith is formed as an optically transparent film.

We investigated comparison characteristics of adhesive properties of diamond-like coating and titanium nitride coating applied by ion-plasma sputtering in vacuum. As a result of our investigations we found that the value of critical load initiating first chips and delaminations equals to 35N for titanium nitride coating and 65N for coatings applied by diamond-like thin-film coating technique.

We found that being a dielectric itself the applied diamond-like coating forms a film barrier preventing stiffening of conjugated surfaces. Besides, this coating possesses higher corrosion stability and heat resistance. This fact is confirmed by numerous long-term atmospheric corrosion tests of samples under temperatures up to 1000–2000 °C.

For friction and wearout tests we used samples 38 mm in diameter and 12 mm thick made of steel P6M5 coated by means of diamond-like thin-film coating and titanium nitride coating applied by ion-plasma sputtering in vacuum techniques. As a counterbody we selected samples made of steel SHH15 heat-treated to the hardness of HCR 63. Contact conditions were as follows

- rolling friction with 20% sliding with lubrication. The tests were carried out at 1000 min<sup>-1</sup> rotation frequency and 1650 N load. For comparison, we also used a sample made of heat-treated steel P6M5.

In the course of the experiment, the values of friction torque and mass wear of the samples were registered, and friction coefficients and wear rate were calculated.

Based on tests results we determined that the friction coefficient of the surfaces with diamond-like coating is two times smaller, compared to reference surface of steel P6M5 and 17% less than for the surface with titanium nitride coating applied in vacuum. The wear rate is reduced by 46% and 16% correspondingly.

Due to the obtained data we came to a conclusion of the expediency of application of the developed technique for strengthening of production tooling and cutting tools in various industries, and for aircraft gas-turbine engines' parts manufacturing in particular. The developed technique was tested at the number of enterprises, and its application showed 3–6 times increase in production tooling and cutting tools durability.

**Keywords:** strengthening, diamond-like coating, test, surface, friction factor, wear rate.

### References

1. Fetisov G.P., Karpman M.G., Matyunin V.M., Gavriljuk V.S., Sokolov V.S., Sokolova N.H., Tutatchikova L.V., Spirihin I.P., Goltsov V.A. *Materialovedenie i tekhnologiya metallov* (Material science and technology of metals), Moscow, Vysshaya shkola, 2006, 862 p.
2. Tibrin G.S. *Teplovye osnovy tekhnologicheskikh protsessov* (Thermal basics of technological processes), Moscow, MAI, 2008, 148 p.
3. Goncharenko I.A. *Osnovy tekhnologii termicheskoi obrabotki stali* (Basics of steel heat treatment technology), Tula, Grif i K, 2006, 326 p.