УДК 621.793.7.

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ГАЗОДЕТОНАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

А.И. ДОЛМАТОВ, В.Г. МИХАЙЛУЦА
А.П. ЖЕМАНЮК, А.П. ПЕТРЕНКО

Рассматривается задача оптимизации частоты выстрелов детонационно-газовой установки при нанесении покрытий на тонкостенные детали авиадвигателей (лопатки), которые закреплены консольно.

В последние годы резко возрос интерес к процессам газотермического нанесения покрытий, это связано с возможностью создания гаммы покрытий различного состава и назначения. Одним из перспективных и нашедших широкое применение как у нас в стране, так и за рубежом, является детонационный метод напыления.

На рисунке 1 представлена принципиальная схема процесса газотермического нанесения покрытий.

Дальнейшее развитие метода наряду с совершенствованием оборудования должно идти по пути совершенствования технологии. Поскольку процесс детонационного нанесения покрытий является многофакторным, необходимо не только обобщать экспериментальные данные, но и совершенствовать теоретические модели, которые позволяют количественно описать процессы, сопровождающие детонационное напыление.

Условия формирования покрытий характеризуются энергетическим состоянием частиц (запасом тепловой и кинетической энергии в момент соударения сподложкой), физико-механическими свойствами материалов частиц и подложки. Качество напыления покрытий прежде всего определяется прочностью сцепления покрытия с подлжкой, а также между отдельными частицами напыляемого материала.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций даёт далеко не полную информацию по технологии нанесения детонационных покрытий. Данные работ позволяют выделить ряд основных параметров, определяющих свойства детонационных покрытий. В работе [I] параметры процесса представлены следующим образом: I) агрегатное состояние частиц перед их взаимодействием с подложкой; 2) концентрация расплавленных частиц; 3) скорость частиц; 4) химический состав и физические свойства материалов частиц и поверхности подложки; 5) средний размер частиц; 6) распределение частиц по размерам; 7) геометрия поверхности подложки; 8) температура подогрева подложки; 9) диаметр ствола; I0) длина ствола; II) интервал между выстрелами; I2) доза газовой смеси на один выстрел; I3) состав газовой смеси в стволе между выстрелами.

Эксперименты, проводимые в ХАИ, и опыт других предприятий по нанесению покрытий на тонкостенные детали авиадвигателей (лопатки) показали, что при отработанном технологическом процессе, при соблюдении с определенными допущениями параметров по классификации [I] большое значение на формирование покрытия, и, в частности, прочности сцепления оказывает интервал между выстрелами.

Авторы объясняют это возникновением колебаний в детали, на которую производится нанесение покрытий и представляет алгоритм оптимизации частоты выстрелов установки.

Будем рассматривать функцию [2], [3]

$$U(\bar{r},t),\ \text{где}\ \bar{r}=r(x_1,x_2,x_3)$$

$$U(\bar{r},t)\in C^2(R^3\times(0,\infty))\cap C^1(R^3\times[0,\infty])$$

$u(\bar{r},t)$ рассматриваем в классе функций дважды дифференцируемых в R^3 и обладающих непрерывными первыми производными C^1 и в рассматриваемом классе будем искать решение, удовлетворяющее начальным условиям (I) - (задача Коши для уранения Коши в трехмерном пространстве)

$$\begin{cases} LU=0, \\ U(\bar{r},0)=\varphi(\bar{r}), \\ U_t(\bar{r},0)=\psi(\bar{r}), \end{cases} \qquad (\mathrm{I})$$

причем:

$$\varphi(\bar{r})\in C^3(R^3)$$
$$\psi(\bar{r})\in C^2(R^3)$$

Решение задачи Коши ищем методом Пуассона $h(\bar{r})\in C^k(R^3)$.

Определим операцию усреднения по некоторому радиусу α .

$$I(\bar{r},\alpha)=\frac{1}{4\pi}\int_{\Omega_1} h(\bar{r}+\alpha\bar{\xi})\,d\sigma_\xi$$

$$I(r,\alpha)\in C^k(R^3)$$

кроме того:

$$I(\bar{r},0)=\lim_{\alpha\to 0} I(r,\alpha)=h(\bar{r})$$

Выясним интеграл:

$$\int_{\omega_{0,R}} h(\bar{r}+\bar{\xi})\,dV_\xi=\int_0^R \alpha\, d_\alpha\int_0^{2\pi} d\varphi\int_0^{\pi} h(\bar{r}+\bar{\xi})\sin\theta\, d\theta \qquad (2)$$

$$dV_\xi=\alpha^2\sin\theta\, d\varphi\, d\theta\, d\alpha$$

Выделим интеграл по поверхности радиуса α с помощью $|\bar{\xi}|=\alpha$,

$\bar{\xi}=\alpha\,\xi^1,\ |\xi^1|=1$ заменой сводим интегрирование по сфере с радиусом α по радиусу I ; тогда (2) запишется как:

$$\int_{\omega_{0,R}} h(\bar{r}+\bar{\xi})\,dV_\xi=4\pi\int_0^R \alpha^2 I(\bar{r},\alpha)\,d\alpha \qquad (3)$$

Вычислим Лапласиан по переменной r :

$$\Delta\int_0^R 4\pi\alpha^2 I(r,\alpha)\,d\alpha=\Delta_r\int_{\omega_{0,R}} h(\bar{r}+\bar{\xi})\,dV_\xi= \qquad (4)$$

$$=\int_{\omega_{0,R}}\Delta_r h(\bar{r}+\bar{\xi})\,dV_\xi=\int_{\omega_{0,R}}\Delta_\xi h(\bar{r}+\bar{\xi})\,dV$$

Применяя теорему Гаусса-Остроградского, интеграл по объему заменяется на интеграл по поверхности и окончательный вид (4) будет:

$$\Delta\int_0^R 4\pi\alpha^3 I(\bar{r},\alpha)\,d\alpha=\int_{S_{0,R}}(\nabla_\xi h(\bar{r}+\bar{\xi}),\frac{\bar{\xi}}{R})\,d\sigma_\xi \qquad (5)$$

Возьмем интеграл $\int_{W_{0,R}} h(r+\xi)\,dV_\xi$ и вычислим от него операцию $\frac{\partial}{\partial R}$ при этом представим $\xi=r\xi^{1}$.

$$\frac{\partial}{\partial R}I(\bar{r},R)=\frac{1}{4\pi}\frac{\partial}{\partial R}\int h(\bar{r}+R\bar{\xi})\,d\sigma_\xi=\frac{1}{4\pi}\int_{S_{0,1}}\nabla_\xi h(r+R\bar{\xi})\frac{\xi}{R}\,d\sigma_\xi \qquad (6)$$

Сравнив с тем, что получили в (6), мы можем приравнять их левые части

$$\Delta\int_0^R 4\pi\alpha^2 I(\bar{r},\alpha)\,d\alpha=4\pi R^2\frac{\partial}{\partial R}I(\bar{r},R) \qquad (7)$$

Продифференцировав по R и разделив на R левую и правую часть, (7) запишется как:

$$\Delta R\,I(\bar{r},R)=\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^2\frac{\partial}{\partial R}I(\bar{r},R)\right) \qquad (8)$$

Преобразуем правую часть:

$$\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^2\frac{\partial}{\partial R}I(\bar{r},R)\right)=\frac{1}{R}\left(2R\frac{\partial I}{\partial R}+R^2\frac{\partial^2 I}{\partial R^2}\right)= \qquad (9)$$

$$=2\frac{\partial I}{\partial R}+R\frac{\partial^2 I}{\partial R^2}=\frac{\partial}{\partial R^2}\left(R\,I(\bar{r},R)\right).$$

Заменив R на α, получим:

$$\Delta\alpha I(\bar{r},\alpha)=\frac{\partial^2}{\partial\alpha^2}\left(\alpha I(\bar{r},\alpha)\right) \qquad (10)$$

Можем рассмотреть функцию $\alpha I(\bar{r},\alpha)$, как некоторый оператор, применяемый к функции $h(\bar{r})$:

$$\alpha I(\bar{r},\alpha)=\Omega_\alpha h(\bar{r})=\frac{\alpha}{4\pi}\int_{S_{0,1}}h(\bar{r}+\alpha\xi)\,d\sigma_\xi, \qquad (11)$$

$$\Delta\Omega_\alpha h(\bar{r})=\Omega_\alpha\Delta h(\bar{r})=\frac{\partial}{\partial\alpha^2}\left(\Omega_\alpha h(\bar{r})\right)$$

Пусть функция $U(\bar{r},t)$ является решением уравнения Даламбера

$$0 = LU \qquad (12)$$

$$LU = \Omega_{\bar{\alpha}} LU \qquad (13)$$

Так как условие (I3) выполняется, то применение $\Omega_{\bar{\alpha}} LU$ тоже 0.

$$\Omega_{\bar{\alpha}} LU = \Omega_{\alpha}\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - a^2\Delta\right)U = \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\Omega_{\bar{\alpha}}U) - a\Delta^2(\Omega_{\bar{\alpha}}U)$$

$$0 = \frac{\partial^2}{\partial t^2}(\Omega_{\alpha}U) - a^2\frac{\partial^2}{\partial \alpha^2}(\Omega_{\alpha}U) \qquad (14)$$

Введем $V(\bar{r},t,\alpha) = \Omega_{\alpha}U$ и подставим в (I4).

Мы видим, что V является решением одномерного волнового уравнения (I5)

$$\frac{\partial^2 V(\bar{r},t,\alpha)}{\partial t^2} = a^2\,\frac{\partial^2 V(\bar{r},t,\alpha)}{\partial \alpha^2} \qquad (15)$$

Операция усреднения позволяет свести задачу Коши для трехмерного уравнения к одномерному.

Найдем связь U и V.

$$V(\bar{r},t,\alpha) = \frac{\alpha}{4\pi}\int\limits_{S_{0,1}} U(r+\alpha\bar{\xi},t)\,d\sigma_{\xi} \qquad (16)$$

$$\frac{V(\bar{r},t,\alpha)}{\alpha} = \frac{1}{4\pi}\int\limits_{S_{0,1}} U(r+\alpha\bar{\xi},t)\,d\sigma_{\xi} \qquad (17)$$

Функция зависит от двух переменных, возьмем предел при $\alpha \to 0$.

$$\lim_{\alpha\to 0}\frac{V(\bar{r},t,\alpha)}{\alpha} = U(\bar{r},t) \qquad (18)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \alpha}(\bar{r},t,0) = U(\bar{r},t) \text{ при } \alpha = 0 \qquad (19)$$

если $t>0$, $0<\alpha<\infty$, то справедливо (I5), мы имеем уравнение, заданное на полуоси (α играет роль x)

при $\alpha = 0$, $V = 0$ из (I6) мы имеем граничное условие

$$V(\bar{r}, t, 0) = 0$$

Из (I6) при $t = 0$, $V(\bar{r}, 0, \alpha) = \Omega_\alpha \varphi(\bar{r})$

Второе начальное условие - необходимо взять производную (I6) по t

$$V_t(\bar{r}, 0, t) = \Omega_\alpha \psi(\bar{r}) \qquad (20)$$

Для функции V по t получим начальные условия колебания полубесконечной струны с закрепленным концом

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 V}{\partial t^2} = a^2 \dfrac{\partial^2 V}{\partial \alpha^2} \\ V(\bar{r}, 0, \alpha) = \Omega_\alpha \varphi(\bar{r}) \\ V_t(\bar{r}, 0, \alpha) = \Omega_\alpha \psi(\bar{r}) \\ V(\bar{r}, t, 0) = 0 \end{cases} \qquad (2I)$$

Окончательный вид решения задачи Коши будет иметь вид (22)

$$U(\bar{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t}\left[t \int_{S_{0,1}} \varphi(\bar{r} + at\xi)\, d\sigma_\xi\right] + \qquad (22)$$

$$+ \frac{1}{4\pi} \int_{S_{0,1}} \psi(\bar{r} + at\xi)$$

Применяя полученные значения, опишем и представим графически колебания полубесконечной струны, закрепленной левым концом (рис.2).

При решении практических задач, пусть в начальный момент времени мы имеем после первого выстрела пушки:

(рис. 2а), (23)

$$\begin{cases} \underset{\sim}{U}_{tt} = \underset{\sim}{U}_{xx} \\ \underset{\sim}{U}(x,0) = \varphi(x) \\ \underset{\sim}{U}_t(x,0) = 0 \\ \tilde{U}(0,t) = 0 \end{cases} \qquad (23)$$

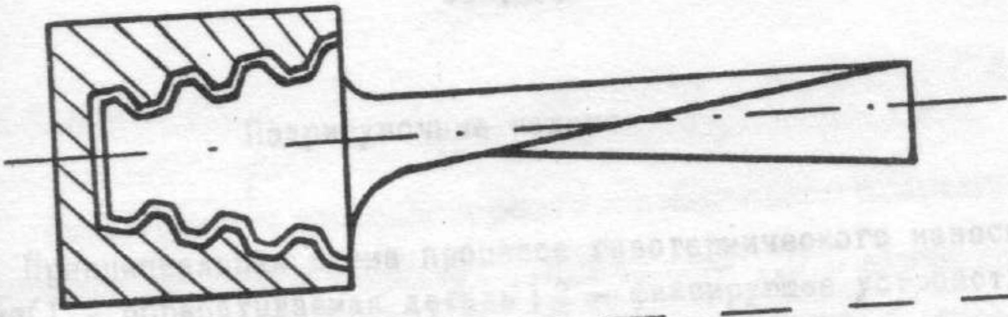
Определим какое решение будет в момент времени t = I; 3/2; 2; 3 (рис. 2, б, в, г, д).

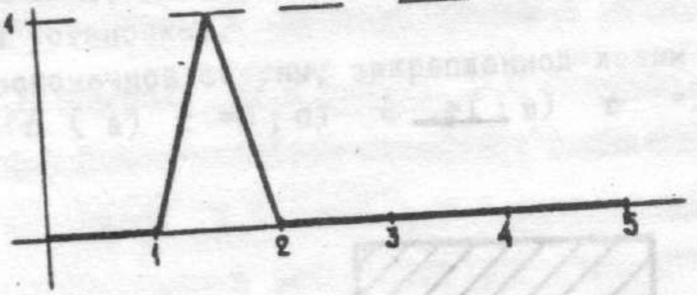
Выводы:

I. Анализируя результаты расчета (рис.2), на котором представлена картина распространения волн в лопатке можно сделать вывод, что для обеспечения наилучшего сцепления наносимого материала с подложкой выстрелы должны производиться по плоско колеблющейся подложке.

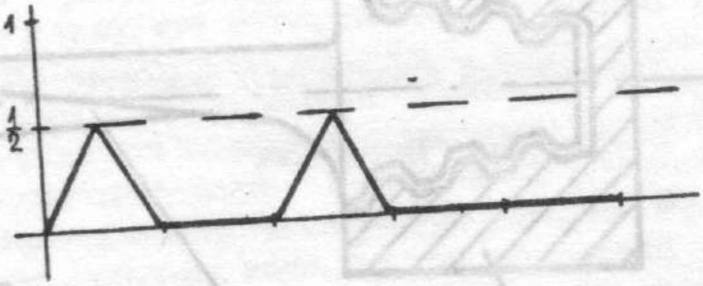
2. Проведенные эксперименты по согласованию частоты выстрелов с колебанием подложки (в данном случае лопатки) позволяют увеличить прочность сцепления до I,5 раза.

Авторы:

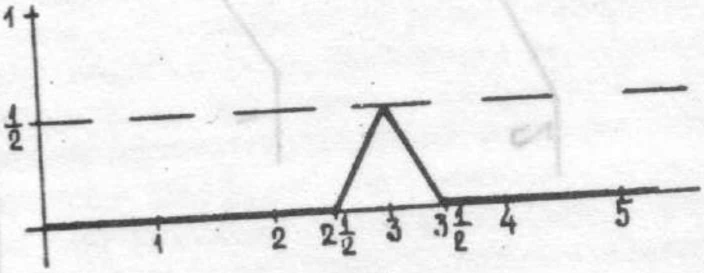




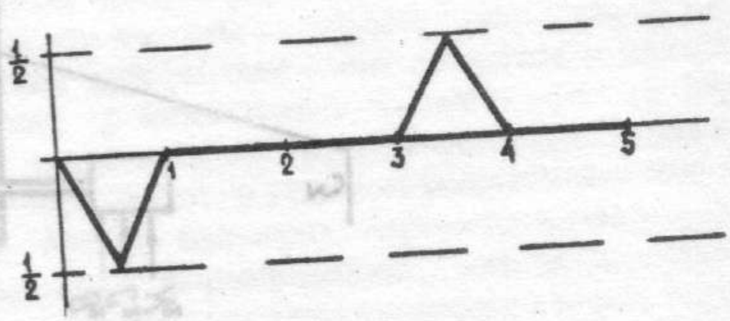
А.



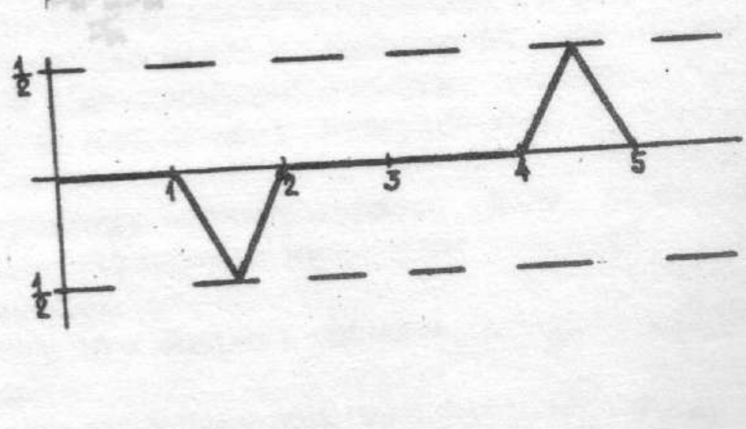
Б.



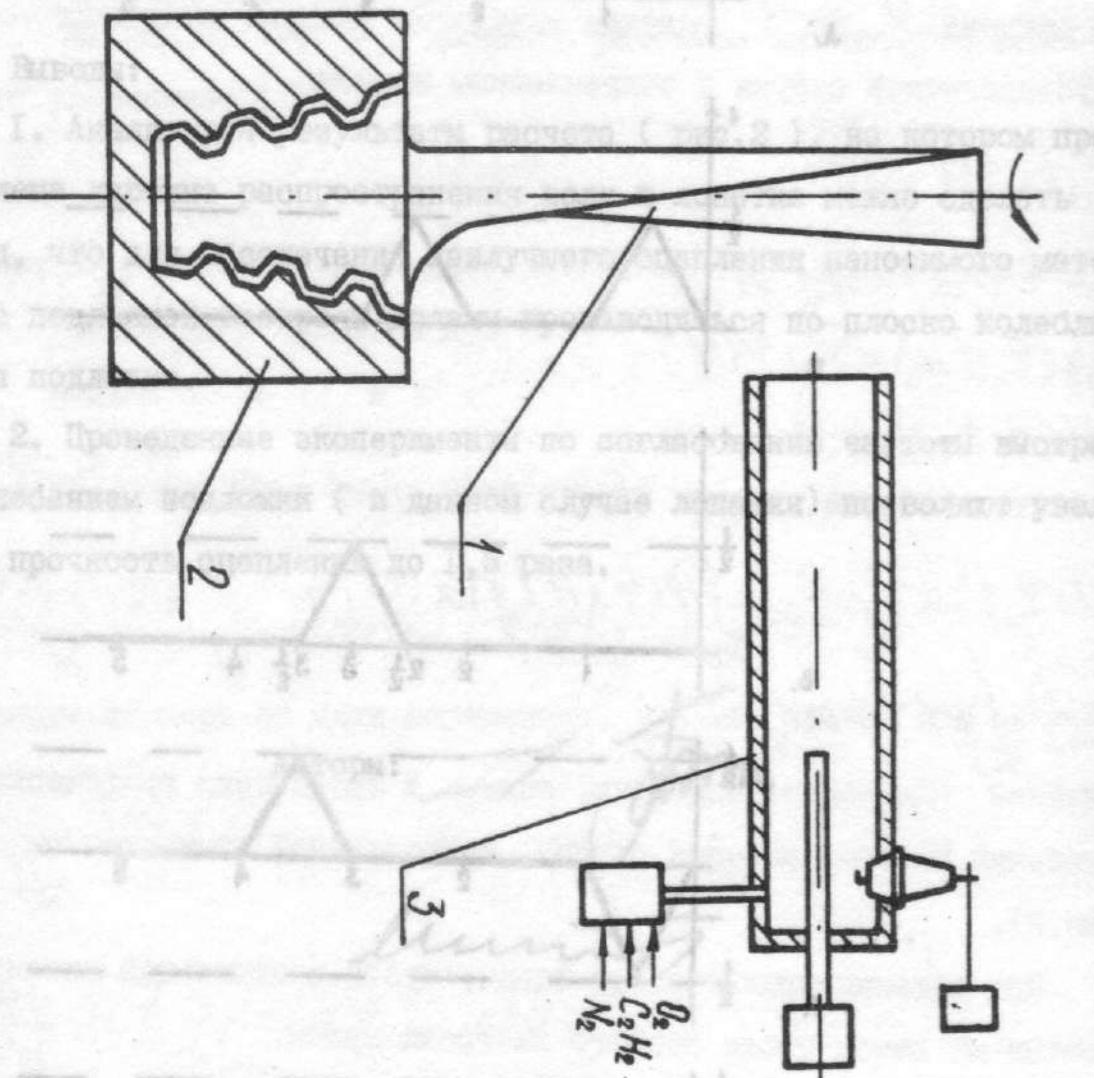
В.



Г.



Д.


1
2
3
O_2
C_2H_2
N_2

Подрисуночные надписи

I. Принципиальная схема процесса газотермического нанесения покрытий(I - обрабатываемая деталь ; 2 - фиксирующее устройство ; 3 - детонационно-газовая установка).

2. Колебания полубесконечной струны, закрепленной левым концом в момент времени t (а) t =0 ; б) t =I ; в) t =3/2 ; г) t =2 ; д) t =3).

Список литературы

I. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.:Машиностроение, I982.-2I5с.

2. Кошляков Н.С.,Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Основные дифференциальные уравнения математической физики.Физматиздат,I962г.

3. Араманович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики. "Наука", М.,I969, 288с. с ил.

Харьковский авиационный институт им.Н.Е.Жуковского

Предприятие "Мотор-Сич"