

**ОПИСАНИЕ  
ИЗОБРЕТЕНИЯ  
К ПАТЕНТУ**  
(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ  
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **24440**

(13) **С1**

(45) **2024.11.20**

(51) МПК

*C 23C 4/129* (2016.01)

*B 05D 1/08* (2006.01)

(54) **СПОСОБ ГАЗОПЛАМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО  
ПОКРЫТИЯ**

(21) Номер заявки: а 20230048

(22) 2023.02.10

(43) 2024.09.20

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Белоцерковский Марат Артемович; Шелег Валерий Константинович; Сокоров Игорь Олегович; Кравчук Марина Анатольевна; Ма Минь; Ванюк Эдуард Андреевич (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. Монография. Минск: УП "Технопринт", 2004, с. 171-174.

ВУ 8528 С1, 2006.

ВУ 15869 С1, 2012.

RU 2636211 С2, 2017.

SU 1240462 А1, 1986.

ВУ 10711 С1, 2008.

(57)

Способ газопламенного напыления полимерного покрытия, включающий формирование кольцевого пропано-воздушного факела пламени, подачу соосно факелу внутреннего спутного воздушного потока, транспортировку по оси факела воздухом частиц полимерного порошка, их нагрев до плавления и послойное осаждение на предварительно подготовленную поверхность детали, **отличающийся** тем, что при напылении первого слоя осаждают частицы размером менее 100 мкм, при этом расход воздуха в спутном потоке составляет не более 6,0 % от расхода воздуха, затрачиваемого на формирование факела, а при напылении последующих слоев осаждают частицы размером 160-200 мкм, при этом отношение расхода воздуха в спутном потоке к расходу воздуха, затрачиваемого на формирование факела,  $Q$  выбирают в зависимости от показателя текучести расплава напыляемого полимера  $\eta$ , используя следующее выражение:

$$Q = A - k \cdot (\ln \eta),$$

где  $A$  - коэффициент, численно равный 14,4 и соответствующий максимально возможному количеству воздуха в спутном потоке;

$k$  - коэффициент, численно равный 2,26.

Изобретение относится к технологии нанесения полимерного покрытия методами газотермического напыления порошков из термопластичных полимерных материалов и может быть использовано при изготовлении виброизолирующих элементов, при формировании шумопоглощающих покрытий или изготовлении опор скольжения с повышенными демпфирующими свойствами.

Известны способы газопламенного нанесения полимерных материалов на металлические и керамические поверхности для повышения их виброизолирующих характери-

**ВУ 24440 С1 2024.11.20**

стик [1], включающие формирование кольцевого факела пламени, образованного горением углеводородных газов (ацетилена, пропана) в окислителе (кислороде, воздухе), транспортировку по оси факела воздухом частиц полимерного порошка, их нагрев и послойное осаждение на предварительно подготовленную поверхность детали.

Основным недостатком данных способов является невозможность управления плотностью теплового потока факела без замены соплового наконечника, что требуется, например, при смене напыляемого полимерного порошка с легкоплавкого на более тугоплавкий.

Наиболее близким по технической сущности заявляемому способу является способ газопламенного напыления полимерных покрытий [2], включающий формирование кольцевого пропано-воздушного факела пламени, подачу соосно факелу внутреннего спутного воздушного потока, транспортировку по оси факела воздухом частиц полимерного порошка, их нагрев до плавления и послойное осаждение на предварительно подготовленную поверхность детали.

В данном способе обеспечена возможность управления теплофизическими характеристиками факела путем изменения соотношения объема воздуха, затрачиваемого на формирование факела, и объема воздуха, подаваемого во внутренний спутный поток (в зазор между мунштуком и сопловым наконечником). Поток воздуха, подаваемый в зазор, является газодинамическим активатором, с помощью которого изменяется форма факела и, соответственно, плотность теплового потока.

Недостатком способа, принятого за прототип, является невысокий уровень показателей демпфирования наносимых покрытий, определяемый только наносимым материалом и толщиной покрытия.

Задачей заявленного изобретения является обеспечение более высокого качества наносимого покрытия, а именно повышение значений демпфирующей способности напыленного полимерного покрытия за счет управляемого образования в покрытии воздушных пузырьков (аэрирования).

Для решения поставленной задачи в способе газопламенного напыления полимерного покрытия, включающем формирование кольцевого пропано-воздушного факела пламени, подачу соосно факелу внутреннего спутного воздушного потока, транспортировку по оси факела воздухом частиц полимерного порошка, их нагрев до плавления и послойное осаждение на предварительно подготовленную поверхность детали, согласно изобретению, при напылении первого слоя осаждают частицы размером менее 100 мкм, при этом расход воздуха в спутном потоке составляет не более 6,0 % от расхода воздуха, затрачиваемого на формирование факела, а при напылении последующих слоев осаждают частицы размером 160-200 мкм, при этом отношение расхода воздуха в спутном потоке к расходу воздуха, затрачиваемого на формирование факела,  $Q$  выбирают в зависимости от показателя текучести расплава напыляемого полимера  $\eta$ , используя следующее выражение:

$$Q = A - k \cdot (\ln \eta),$$

где  $A$  - коэффициент, численно равный 14,4 и соответствующий максимально возможному количеству воздуха в спутном потоке;

$k$  - коэффициент, численно равный 2,26.

Повышение демпфирующей способности напыляемых покрытий достигается за счет образования в них пузырьков воздуха (процесс аэрирования) при воздействии внутреннего спутного потока в процессе осаждения расплавленных полимерных частиц. Количество пузырьков зависит от реологических характеристик расплавленного полимера и объема воздуха, подаваемого для образования спутного потока.

Для определения необходимого количества воздуха в спутном потоке, обуславливающего возникновение воздушных пузырьков при напылении покрытий, были проведены исследования со следующими порошками термопластичных полимеров: полиэтиленом ПЭВД (ГОСТ 16338-85) марок 10703-20 и 84, полиэтилентерефталатом ПЭТФ

(ГОСТ Р 51695-2000), полипропиленом ПП (ГОСТ 26996-86) марок 21020 и 21100, полиамидом ПА-6 (ОСТ-6-06-09-93). Порошки были получены криогенным измельчением гранул полимеров на оборудовании фирмы "PALLMANN".

Оценку реологических характеристик полимера выполняли используя показатель текучести расплава (ПТР), характеризующий его вязкость в расплавленном состоянии. Данный показатель, согласно действующему ГОСТ 11645-73, определяет, сколько термопластичного полимера в граммах под определенным давлением и при заданной температуре за 10 мин экструдируется через калиброванный капилляр. Чем выше данный показатель, тем полимер более текучий и менее вязкий.

Определение показателя текучести расплава термопластов осуществляли на приборе ИИРТ-5М. Необходимое давление на материал создавали при помощи поршня с грузом. Нагрев полимерной массы осуществляли в интервале температур от 170 до 290 °С.

Исследования осуществляли на образцах двух типов. Первые - прямоугольные пластинки (2 × 20 × 80 мм), на одну из поверхностей которых напылялись полимерные покрытия, изготавливались из литого серого чугуна СЧ-20. Вторые - стандартные образцы для оценки прочности сцепления покрытий путем отрыва штифта от покрытия нормально приложенной нагрузкой. Перед нанесением полимерного покрытия поверхности образцов подвергались струйно-абразивной обработке.

Напыление полимерного покрытия толщиной 0,9-1,0 мм осуществлялось на паспортных режимах установкой газопламенного напыления порошковых материалов типа "ОИМ 050", разработанной в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси [3].

Коэффициент аэрирования, характеризующий количество пузырьков воздуха в покрытии, определяли путем гидростатического взвешивания в этиловом спирте отделенных от подложки элементов покрытий, используя широко применяемый в практике порошковой металлургии метод определения пористости спеченных материалов. Коэффициент аэрирования  $a_r$  показывает, какую часть объема покрытия занимают пузырьки воздуха. Демпфирующую способность напыленного полимерного покрытия определяли по значениям логарифмического декремента затухания колебаний  $\delta$ , определяемого по виброграмме колебаний, полученной с помощью установки, предназначенной для измерения интенсивности затухания свободных затухающих изгибных колебаний в интервале амплитуд от + 0,5 до ± 250 мкм [4].

Логарифмический декремент затухания колебаний при построении диаграммы его зависимости от амплитуды деформации вычислялся по формуле [5]:

$$\delta = \frac{1}{n-1} \ln \frac{A_0}{A_n},$$

где  $\delta$  - логарифмический декремент затухания колебаний;  $n$  - число циклов колебаний;  $A_0$  - начальная амплитуда колебаний;  $A_n$  - амплитуда колебаний через  $n$  циклов.

Помимо оценки логарифмического декремента затуханий измерялась также твердость полимерных покрытий по Бринеллю по ГОСТ 4670-91. Рассматривались только те режимы, которые обеспечивали величину твердости аэрированного покрытия не ниже 0,6 от твердости покрытия без пузырьков или с его минимальным количеством. Это ограничение обусловлено тем, что демпфирующее покрытие должно обладать механическими характеристиками, позволяющими его использовать в местах посадки подшипников качения в шпиндельных узлах, рабочих поверхностях направляющих в опорах скольжения станков и столов механизмов подач.

На первом этапе исследований были определены условия, при которых покрытие, напыленное порошками различной грануляции, имело бы прочность сцепления, достаточную для широкого диапазона эксплуатации. Размер фракций соответствовал размеру сит, входящих в прибор для ситового анализа модели 029 Усманского механического завода с комплектом латунных сит NN 0200, 0160, 0100, 0063, 0050 по ГОСТ 6613-86. Верхний предел в 199 мкм был ограничен в связи с тем, что полимерные порошки с размером ча-

# ВУ 24440 С1 2024.11.20

стиц более 200 мкм, как правило, не применяются при газопламенном напылении покрытий.

Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

№	Полимерный материал, торговая марка	$\eta$ , показатель текучести расплава полимера, г/10 мин	Размер частиц, мкм	Q, отношение количества воздуха в спутном потоке к количеству воздуха на формирование факела, %	Прочность сцепления, МПа
1	ПЭТФ	8,0	50-63	4,0	8,2
2	-"	-"	-"	5,0	7,6
3	-"	-"	-"	6,0	7,0
4	-"	-"	-"	7,0	6,2
5	-"	-"	-"	8,0	5,5
6	-"	7,8	63-100	4,0	7,5
7	-"	-"	-"	5,0	7,4
8	-"	-"	-"	6,0	7,0
9	-"	-"	-"	7,0	6,6
10	-"	7,7	100-160	4,0	6,8
11	-"	-"	-"	5,0	6,2
12	ПЭВД 10703-20	4,0	50-63	5,0	8,0
13	-"	-"	-"	6,0	7,1
14	-"	-"	-"	7,0	6,2
15	-"	3,9	63-100	5,0	7,5
16	-"	-"	-"	6,0	7,0
17	-"	-"	-"	7,0	6,1
18	-"	3,8	100-160	5,0	6,8
19	-"	-"	-"	6,0	6,3

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, показывает, что для обеспечения прочности сцепления покрытия более 7,0 МПа необходимо его напылять порошками с размером частиц менее 100 мкм, при этом расход воздуха в спутном потоке должен составлять не более 6,0 % от расхода воздуха, затрачиваемого на формирование факела.

Результаты исследования демпфирующей способности покрытия при изменении ПТР и количества воздуха в спутном потоке приведены в табл. 2.

Таблица 2

№	Полимерный материал, торговая марка	$\eta$ , показатель текучести расплава полимера, г/10 мин	Размер частиц, мкм	Q, отношение количества воздуха в спутном потоке к количеству воздуха на формирование факела, %	$a_r$ , коэфф. аэрирования	$\delta$ , логарифмический декремент затухания колебаний	НВ, твердость по Бринеллю, МПа
1	ПЭВД 10703-20	4,0	50-63	4,0	$\leq 0,05$	24,0	32
2	-"	-"	-"	10,0	0,15	26,0	28
3	-"	-"	63-100	-"	0,16	27,0	26

№	Полимерный материал, торговая марка	$\eta$ , показатель текучести расплава полимера, г/10 мин	Размер частиц, мкм	Q, отношение количества воздуха в спутном потоке к количеству воздуха на формирование факела, %	$a_r$ , коэфф. аэрирования	$\delta$ , логарифмический декремент затухания колебаний	НВ, твердость по Бринеллю, МПа
4	- "- -	- "-	100-160	- "-	0,18	30,0	25
5	- "-	- "-	160-200	- "-	0,21	33,0	23
6	- "- -	- "-	- "-	11,0	0,23	35,0	21
7	- "-	4,2	- "-	12,0	0,26	39,0	19
8	- "-	- "-	- "-	13,0	0,28	42,0	17
9	ПЭВД 84	19,0	160-200	3,0	$\leq 0,05$	26,5	30
10	- "-	- "-	- "-	7,0	0,25	35,0	20
11	- "-	- "-	- "-	8,0	0,27	37,0	18
12	- "-	- "-	- "-	10,0	0,34	40,0	16
13	- "-	- "-	- "-	12,0	0,42	42,0	14
14	ПА-6	7,5	160-200	3,0	$\leq 0,05$	23,4	119
15	- "-	- "-	- "-	7,0	0,24	28,0	77
16	- "-	- "-	- "-	9,0	0,28	31,0	70
17	- "-	- "-	- "-	11,0	0,35	35,0	64
18	- "-	- "-	- "-	13,0	0,41	40,0	59
19	ПП 21020	2,0	160-200	3,0	$\leq 0,05$	23,0	51
20	- "-	- "-	- "-	8,0	0,22	27,0	39
21	- "-	- "-	- "-	10,0	0,25	30,0	35
22	- "-	- "-	- "-	12,0	0,30	34,0	31
23	- "-	- "-	- "-	14,0	0,34	38,0	28
24	ПП 21100	10,5	160-200	3,0	$\leq 0,05$	25,0	49
25	- "-	- "-	- "-	8,0	0,27	29,0	33
26	- "-	- "-	- "-	10,0	0,31	32,0	29
27	- "-	- "-	- "-	12,0	0,34	37,0	27
28	- "-	- "-	- "-	14,0	0,36	41,0	25
29	ПЭТФ	7,3	160-200	3,0	$\leq 0,05$	24,8	116
30	- "-	- "-	- "-	8,0	0,23	29,0	76
31	- "-	- "-	- "-	10,0	0,27	32,0	70
32	- "-	- "-	- "-	12,0	0,34	36,0	67
33	- "-	- "-	- "-	14,0	0,40	41,0	64

Анализ полученных результатов показывает, что максимальные значения величины логарифмического декремента затухания колебаний при соблюдении условия снижения твердости не более 0,6 от твердости неаэрированного полимера наблюдались у образцов № 6, 7, 10, 11, 16, 17, 22, 26, 31. Математическая обработка полученных результатов позволила получить выражение (1), описывающее зависимость Q от показателя текучести расплава полимера  $\eta$ :

$$Q = A - k \cdot (\ln \eta), \tag{1}$$

где A - коэффициент, численно равный 14,4 и соответствующий максимально возможному количеству воздуха в спутном потоке; k - коэффициент, численно равный 2,26.

# ВУ 24440 С1 2024.11.20

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что предложенный способ позволяет повысить демпфирующие свойства полимерного покрытия в 1,29-1,54 раза.

**Пример** реализации способа.

Шумопоглощающее полимерное покрытие наносили на поверхность корпусов шпиндельного узла токарных станков с ЧПУ модели АФ 732.

На первые два корпуса было нанесено покрытие из порошка полиэтилентерефталата согласно предлагаемому способу. Первый слой толщиной 0,2 мм на каждом корпусе был напылен порошком с размером частиц 50-63 мкм при минимальном расходе воздуха в спутном потоке. Основное покрытие толщиной 1,1-1,2 мм напыляли порошком размером 160-200 мкм. Учитывая, что ПТР данного полимера составляет 7,3 г/10 мин, расход воздуха в спутном потоке был выбран по формуле 1 таким образом, чтобы он составлял 9,6-10,0 % от расхода воздуха, образующего распыляющий факел.

На следующую партию из двух корпусов наносили покрытие из порошка полиэтилентерефталата с размером частиц 50-160 мкм согласно способу-прототипу. Толщина покрытия соответствовала первой партии. Расход воздуха в спутном потоке составлял 4,0 % от расхода воздуха, образующего распыляющий факел. Шум при работе шпиндельных узлов измеряли с помощью прибора ВШВ-003.

Замеры показали, что покрытие, полученное по заявляемому способу, обладает более высокой способностью гасить виброакустические колебания, поскольку уровень шума был снижен на 4-5 дБ в диапазоне частот 500-6000 Гц по сравнению с покрытием, полученным по способу-прототипу.

Таким образом, предлагаемый способ нанесения покрытия позволяет снизить уровень виброакустических колебаний компонента машины в 1,3-1,5 раза по сравнению с известным способом. Это позволит, например, в металлообрабатывающих станках снизить путем демпфирования вредные резонансные колебания, обеспечить значительное повышение динамической устойчивости станка при резании, что улучшит качество поверхности обрабатываемых изделий и повысит точность их изготовления.

Источники информации:

1. БОРИСОВ Ю.С. и др. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Киев: Наукова думка, 1987, с. 73-127.

2. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. Минск: Технопринт, 2004, с. 173-174.

3. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ М.А. и др. Технология нанесения полимерных покрытий с повышенными гидрофобными свойствами. Актуальные вопросы машиноведения, 2018, вып. 7, с. 191-193.

4. ЛЕВАНЦЕВИЧ М.А. и др. Демпфирующие свойства тонких покрытий. В кн.: Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междун. сб. научных трудов. Донецк: ДонГТУ, 2003, вып. 28, с. 94-98.

5. ЛЕВАНЦЕВИЧ М.А. и др. Оценка качества наноструктурных покрытий по декременту затухания колебаний. Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: Материалы межд. науч.-техн. конф. Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет", 2004, с. 113-115.