

УДК 533.924; 621.793.7

Д-р техн. наук С. В. Лоскутов, д-р техн. наук А. В. Ершов, Е. А. Зеленина

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

## ОЦЕНКА КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ СЦЕПЛЕНИИ ЧАСТИЦЫ ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ С ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОДЛОЖКИ

*Рассмотрена модель распределения контактной температуры при сцеплении частицы плазменного покрытия с шероховатой поверхностью подложки. Показано, что на поверхности микровыступов подложки контактная температура оказывается выше, чем на гладкой поверхности. Определено расположение изотермы плавления относительно поверхности. Разработан метод оценки относительной прочности сцепления покрытия на основании определения площади зон плавления на шероховатой поверхности подложки. Показано, что доля зон оплавленной поверхности шероховатой подложки составляет 20–28 % и возрастает при увеличении шероховатости и температуры подложки.*

**Ключевые слова:** плазменное напыление, подложка, контактная температура, нестационарный теплообмен, изотерма плавления, прочность сцепления.

### Постановка проблемы

При использовании плазменных покрытий для восстановления и упрочнения деталей требуется повышение их прочности, износостойкости и коррозионной стойкости. Особым требованием является повышение прочности сцепления с поверхностью детали. Указанные характеристики непосредственно связаны с возможностью повышения надежности, работоспособности и долговечности машин. Прочность плазменных покрытий в настоящее время составляет только (10–15) % от прочности материала детали [1, 2]. Недостаточная прочность сцепления покрытий связана со сложностью физических процессов, протекающих при контакте частиц с подложкой. Наиболее важными из них являются процессы нагрева поверхности подложки, которые определяют условия сцепления покрытия с поверхностью. Одним из главных параметров, определяющих скорость протекания химической реакции схватывания частицы с поверхностью подложки, является контактная температура. Из опыта известно, что для повышения сцепления покрытия следует специально создавать шероховатость на подложке. Однако при теоретических расчетах контактной температуры и других характеристик, наличие шероховатости подложки не учитывается. Поэтому разработка теоретической модели влияния шероховатости поверхности на величину контактной температуры является актуальной проблемой.

### Анализ последних исследований и публикаций

Для повышения прочности выполняется ряд мероприятий, направленных на повышение темпе-

ратуры контактного взаимодействия частиц с поверхностью детали, [1–5] в виде дуговой, термической, химической или газодинамической активации подложки. Ввиду малой длительности высокотемпературной фазы контакта, которая примерно составляет  $10^{-5}$  с, прямые измерения контактной температуры затруднены. Существующие расчеты контактной температуры используют допущение о том, что температура частиц равна или незначительно превышает температуру плавления. В результате, полученная величина контактной температуры для стальных покрытий на стальной подложке составила 847 °С [1]. Однако последние экспериментальные работы по измерению температуры частиц путем калориметрирования металлизационной струи показали, что температура частиц, полученных при дуговом распылении проволоки, равна температуре кипения металла [6]. При этом предварительная оценка контактной температуры будет значительно превышать результаты работы [1]. Указанное обстоятельство требует уточнения величины контактной температуры.

Задачей исследований по улучшению свойств покрытий является изучение механизма сцепления расплавленных частиц металла с поверхностью подложки. При решении этой задачи еще недостаточно полно учитывается влияние характеристик шероховатости на поверхности подложки. Если применение дробеструйной активации, при которой создается шероховатость поверхности, считается практически необходимой как при плазменном, так и при электродуговом методе нанесения покрытий [7], то теоретические разра-

ботки, учитывающие влияние шероховатости поверхности подложки на контактную температуру отсутствуют. Механизм влияния формы и высоты микрорельефа подложки на распределение контактной температуры покрытия теоретически не исследован.

Поэтому **главной целью этой работы является** разработка модели расчета контактной температуры при сцеплении частицы покрытия с шероховатой поверхностью подложки.

**Физическая модель контакта частицы с поверхностью**

В основе механизма сцепления используется представление об оплавлении вершин микровыступов при контакте с расплавленной каплей металла. С увеличением относительной площади оплавления микровыступов должна повышаться и прочность сцепления покрытия с подложкой. Для определения площади оплавления микровыступов следует решить задачу о нестационарной теплопроводности контактирующих поверхностей. При этом каплю металла и подложку можно считать полубесконечным телом, до того момента времени, пока тепловая волна не достигнет противоположной поверхности частицы покрытия [1, 2].

При разработке модели будем считать, что диаметр частицы больше среднего расстояния между ближайшими микровыступами. При этом условия жидкая частица покрытия будет охватывать микровыступ на подложке с двух сторон и его нагрев будет более интенсивным за счет одновременности процесса. Если же, диаметр деформированной частицы покрытия будет меньше, чем шаг микровыступов, то одновременный двусторонний нагрев каждого из них будет мало вероятным. Поскольку средний диаметр деформированных частиц покрытия составляет примерно 600 мк, то среднее расстояние между микровыступами в данной модели не должно превышать 300 мк. Форма микровыступов принимается в виде треугольников с прямым углом при вершине. При этом существует вопрос о заполнении микровпадин жидкой частицей. Для того, чтобы это случилось, при отсутствии смачивания холодной поверхности подложки, величина силы инерционного давления частицы должна превысить силу поверхностного натяжения расплавленного металла. Приравняв гидродинамическое давление частицы капиллярному давлению, найдем радиус заполнения капилляра:

$$S_n = \frac{1}{2} S_0 \left( 1 - \frac{2D}{h} \right), \quad (1)$$

где  $\rho, v, \sigma$  – плотность, скорость и коэффициент поверхностного натяжения частицы,  $R$  – ра-

диус капилляра, заполняемого под действием силы гидродинамического давления:

$$R = \frac{4\sigma}{\rho V^2}, \quad (2)$$

Расчет для стали при  $\sigma = 1,85$  Н/м, [8],  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $V = 50$  м/с дает величину гидродинамического давления 9,8 МПа, а значение радиуса заполняемого капилляра составит  $R = 3,76 \cdot 10^{-7}$  м. Таким образом, вблизи лобовой критической точки частицы жидкий металл даже при отсутствии смачивания с поверхностью будет достаточно глубоко проникать в микровпадины, поскольку радиус капилляра, заполняемого под действием силы гидродинамического давления значительно меньше высоты микровыступов.

Зададим идеализированную форму поперечной шероховатости подложки в виде одинаковых треугольников с прямыми углами при вершинах и во впадинах и будем пренебрегать продольной шероховатостью, рис. 1. Такая поверхность может быть получена, например, при грубом шлифовании, обработке резцом, фрезой или при иглофрезеровании металлическими щетками.

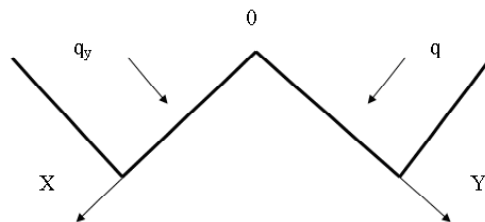


Рис. 1. Расчетная схема температурного поля микровыступа на подложке;  $q_x, q_y$  – плотности теплового потока вдоль осей  $OX$  и  $OY$

Для определения температурного поля микровыступа зададим тепловые потоки  $q_x$  и  $q_y$  вдоль координатных осей  $OX$  и  $OY$ . Для каждого из тепловых потоков можно применить модель расчета нестационарной теплопроводности для плоской стенки, а также использовать принцип суперпозиций температурных полей. Целью расчета является определение температуры на гранях микровыступа.

**Математическая модель**

Рассмотрим нагрев грани микровыступа под действием теплового потока  $q_x$ , поступающего при контакте микровыступа с жидкой частицей. Для расчета температурного поля используется уравнение нестационарной теплопроводности [9]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где  $t$  – температура микровыступа, зависящая от времени нагрева  $\tau$  и координаты  $x$ ,  $\alpha = \lambda/\rho c$  – коэффициент температуропроводности, определяемый величинами теплопроводности –  $\lambda$ , плотности –  $\rho$  и теплоемкости подложки –  $c$ .

Для решения уравнения (3) задаются начальные (4) и граничные (5) условия для частицы с начальной температурой  $t_1$  и микровыступа с начальной температурой  $t_2$ .

Зададим начальные и граничные условия для грани микровыступа

$$\begin{aligned} \tau = 0 : & \quad t_2 = \text{const} \\ \tau > 0 : & \quad x = 0: \quad t = t_k; \end{aligned} \quad (4)$$

$$x \Rightarrow \infty : \quad \frac{\partial t}{\partial x} = 0; \quad t = t_2, \quad (5)$$

где  $t_k$  – температура в контакте микровыступа и частицы покрытия.

Решение уравнения (3) можно представить в виде [9]:

$$t - t_2 = \theta(t_k - t_2), \quad (6)$$

где  $\theta$  – параметр температуры, который выражается через интеграл ошибок

$$\theta = 1 - \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo}}, \quad (7)$$

где величина

$$Fo = a\tau/x^2 \quad (8)$$

представляет критерий Фурье, который равен квадрату отношения глубины распространения тепловой волны к координате, отсчитываемой от поверхности подложки. Плотность теплового потока на поверхности микровыступа в зоне контакта согласно [9]:

$$q_x = -\lambda_2 \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\lambda_2(t_k - t_2)}{\sqrt{\pi a_2 \tau}}. \quad (9)$$

Аналогично с формулой (9) определится плотность теплового потока в частице покрытия

$$q_x = -\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\lambda_1(t_1 - t_k)}{\sqrt{\pi a_1 \tau}}. \quad (10)$$

Здесь и ниже теплофизические коэффициенты подложки обозначаются индексом – «2», а коэффициенты частицы покрытия – индексом «1».

На поверхности микровыступа, при  $x=0$ , температура нагрева под действием теплового потока  $q_x$  будет равна контактной температуре, вели-

чина которой определится при равенстве формул (9) и (10), поскольку плотность теплового потока в зоне контакта не изменяется при переходе от покрытия к подложке

$$t_k = \frac{t_1 + t_2 \sqrt{\rho_2 c_2 \lambda_2 / \rho_1 c_1 \lambda_1}}{1 + \sqrt{\rho_2 c_2 \lambda_2 / \rho_1 c_1 \lambda_1}}. \quad (11)$$

Полученная формула согласуется с соответствующей формулой для случая контакта плоских поверхностей [9, 10]. Если покрытие и подложка являются однородными металлами, то соотношение их теплофизических характеристик будет близким к единице. Наличие шероховатости поверхности подложки приводит к повышению температуры на вершинах микровыступов по сравнению с контактной температурой для плоской поверхности, вследствие двустороннего нагрева микровыступа одинаковыми тепловыми потоками.

Рассмотрим изменение температурного поля в зоне контакта жидкой частицы с шероховатостью поверхности. Если в начальный момент контактная температура, определяемая формулой (11), расположена на границе профиля шероховатости подложки, то через некоторое время линия, определяющая положение контактной температуры станет параллельной линии вершин микровыступов или плоскости поверхности подложки. Исходя из закона симметрии, линия, определяющая положение контактной температуры для случая, когда теплофизические свойства покрытия и подложки одинаковы, должна проходить по середине высоты микровыступов, рис. 2.

Уточним условие преобразования распределения начального профиля контактной температуры в прямую линию. Для этого найдем температуру на изотерме контакта под вершиной микровыступа, используя принцип суперпозиции температурных полей создаваемых левой и правой гранями. Расстояние  $x$  до грани в средней точке

составляет  $x = h/2\sqrt{2}$ , где  $h$  – высота микровыступа. Если температура в заданной точке под действием только одного теплового потока  $q_x$

достигнет половины температуры грани  $t_k$ , то с учетом двустороннего нагрева, условие линейности контактной температуры будет выполнено.

Согласно формулам (7) и (8), для двойного уменьшения температуры в заданной точке необходимо, чтобы критерий Фурье равнялся  $Fo = 1,2$ . При увеличении расстояния  $x$  до величины равной высоте микровыступа, критерий Фурье составит 0,15, а параметр температуры  $\theta = 0,94$ , что примерно соответствует границе температурного слоя в подложке. Следовательно, при распространении тепловой волны в пределах высо-

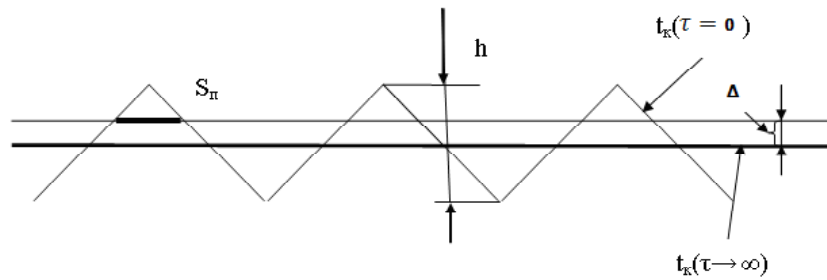


Рис. 2. Трансформация положения линии контактной температуры во времени

ты микровыступа уже происходит приближение изотермы контакта к прямой линии.

На поверхностях микровыступов, расположенных выше медианной линии, которая соответствует  $t_k(\tau \rightarrow \infty)$ , температура будет больше, чем контактная. Оценим положение изотермы плавления подложки. Она будет смещена вверх относительно линии  $t_k(\tau \rightarrow \infty)$  на величину, пропорциональную разности температур плавления и контакта. Используя (9) получим формулу для величины смещения изотермы плавления относительно изотермы контакта:

$$\Delta = \lambda_2 \frac{(t_n - t_k)}{q_2} = \frac{(t_n - t_k)}{(t_k - t_2)} \sqrt{\pi a_2 \tau}, \quad (12)$$

где  $t_n$  – температура плавления подложки. Величина  $\delta_2 = \sqrt{\pi a_2 \tau}$  представляет собой длину тепловой волны, поскольку изменение температуры подложки на этой длине уменьшается до 20 % от изменения температуры поверхности. Расчет смещения изотермы плавления по формуле (12) правомерен для момента времени, когда длина тепловой волны, соизмеримая с толщиной частицы покрытия, превосходит высоту микровыступов на подложке.

Смещение температуры плавления относительно контактной температуры приводит к уменьшению площади поперечного сечения микровыступа, которое определяет прочность сцепления между верхней «сплавленной» с покрытием частью микровыступа и телом подложки. Площадь сечения зоны сплавления определится:

$$S_n = \frac{1}{2} S_0 \left( 1 - \frac{2\Delta}{h} \right), \quad (13)$$

где  $S_0$  – площадь основания микровыступа,  $h$  – его высота. При определении прочности сцепления частицы покрытия следует учесть влияние краевого эффекта, который связан с отсутствием двустороннего нагрева внешних микровыступов, расположенных по периметру деформированной частицы. При этом радиус зоны сцепления уменьшается на половину ширины микровпадины, которая при принятой форме профиля равна высо-

те микровыступа. Поэтому относительная прочность сцепления снижается при увеличении высоты микровыступов по сравнению с радиусом деформированной частицы  $R$ . Учитывая соотношение (13) находится относительная несущая прочность сцепления покрытия с подложкой:

$$\frac{\sigma}{\sigma_2} = \frac{S_n}{S_0} \left( 1 - \frac{h}{R} \right)^2 = \left( 0,5 - \frac{\Delta}{h} \right) \left( 1 - \frac{h}{R} \right)^2. \quad (14)$$

Полученная зависимость имеет экстремум в зависимости от высоты микровыступов подложки.

Для учета конечного размера частицы, который может быть соизмерим с высотой шероховатости подложки, принималось, что в соответствии с результатами измерений средний диаметр сферических частиц покрытия составляет  $d = 180$  мкм. Согласно [1], толщину покрытия  $H$  можно принять равной  $R/8$ , где,  $R$  – радиус контакта частицы. Тогда, из условия постоянства объемов сферической и деформированной частицы

$$4\pi(d/2)^3/3 = \pi \cdot R^3/8$$

находится радиус контакта в виде

$R = \sqrt[3]{1,33} / d = 200$  мкм. При этом средняя толщина деформированной частицы составит 25 мкм.

#### Анализ полученных результатов

Расчетная оценка контактной температуры и относительной прочности сцепления, при нанесении покрытия из проволоки Нп65Г на подложку из стали Ст45 и определение положения изотермы плавления относительно средней линии профиля шероховатости поверхности по формулам (11)–(14), в зависимости от начальной температуры подложки, приведены в табл. 1.

Расчет выполнялся для момента начала остывания контакта, когда тепловая волна от изотермы контакта  $\delta_2 = \sqrt{\pi a_2 \tau}$  длиной становится соизмеримой с толщиной деформированной частицы, которая принимается равной 25 мкм. Температура частицы покрытия принималась равной температуре кипения стали 2735 °С. Темпе-

**Таблица 1** – Оценка относительной прочности сцепления в зависимости от температуры подложки и высоты микровыступов при

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_k, ^\circ\text{C}$	$\Delta, \text{мк}$	$H = 20 \text{ мкм}$	$H = 25 \text{ мкм}$	$H = 30 \text{ мкм}$
				$\frac{\sigma}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma}{\sigma_0}$	$\frac{\sigma}{\sigma_0}$
2735	0	1230	4,8	0,208	0,236	0,260
	50	1257	4,6	0,212	0,242	0,266
	100	1285	4,2	0,219	0,250	0,275
	150	1312	4,0	0,226	0,258	0,284

ратура подложки изменялась от 0 до 150 °С. Поскольку смещение изотермы плавления  $\Delta$  относительно изотермы средней контактной температуры зависит только от температуры подложки и покрытия (12), то при повышении температуры подложки до 150 °С, прочность сцепления возрастает, согласно (14), асимптотически стремясь к значению 0,3. Повышение относительной прочности наблюдается и при увеличении высоты микровыступов, особенно при низкой температуре подложки.

При уменьшении высоты микровыступов относительная прочность сцепления снижается, а уже при высоте  $h = 2\Delta$ , согласно (13), контактная температура на поверхности микровыступа будет ниже температуры плавления. Это условие, по видимому, соответствует явлению отскакивания частиц при напылении на гладкую поверхность.

Теоретические значения относительной прочности сцепления приближаются к экспериментальным величинам, полученным при применении защитной атмосферы аргона в процессе нанесения покрытия, [2]. Однако, выполненные оценки относительной прочности примерно в полтора два раза выше практически полученных величин, при нанесении покрытий в воздушной среде и применении технологии дробеструйной активации поверхности [1–3]. Одной из причин отличий теоретических и экспериментальных результатов является наличие оксидной пленки на поверхности подложки [5], которая препятствует полноте химического взаимодействия поверхностей на границе контакта [1]. При этом возникает дополнительное температурное сопротивление в зоне контакта.

Модель плавящегося контакта частицы покрытия с шероховатой подложкой объясняет сцепление с поверхностью при любых температурах подложки, в том числе и при 0 °С, в то время как на плоской стальной подложке теоретическое значение контактной температуры достигает температуры плавления только при начальной температуре подложки более 300 °С. Однако практически покрытия наносятся при температуре подложки меньше 150 °С во избежание ее интенсивного окисления, что показы-

вает необоснованность применения теоретической модели гладкой подложки для оценки прочности сцепления.

Развитие данной работы возможно в направлении оценок влияния деформации жидкой частицы на температурное поле на поверхности подложки и влияния поверхностных оксидов на снижение прочности сцепления. Данная модель нуждается в уточнении при значительном отличии теплофизических свойств материалов покрытия и подложки. Представляет интерес изучение влияния шероховатости подложки при воздействии различных видов активации процесса нанесения покрытий.

### Выводы

1. Гидродинамическое давление частицы покрытия на подложку в зоне поперечной, по отношению к подложке, деформации частицы обеспечивает плотный контакт по микрорельефу поверхности на уровне радиусов микровпадин 0,37 мкм. Поскольку эта величина значительно меньше средней высоты микровыступов, неоднородностью теплового контакта можно пренебречь. При этом контактная температура в начальный момент времени будет постоянной по поверхности микрорельефа.

2. Разработан метод оценки относительной прочности сцепления покрытия на основании определения площади зон плавления на шероховатой поверхности подложки. Показано, что доля зон оплавленной поверхности шероховатой подложки составляет 20–28 % и возрастает при увеличении шероховатости и температуры подложки. При распространении температурного поля в пределах высоты шероховатости происходит нагрев микровыступов и охлаждение микровпадин, вследствие чего изотерма контактной температуры принимает стационарное положение, параллельное поверхности подложки.

3. Величина средней контактной температуры, определенная на основании измеренной температуры частиц покрытия, полученного при распылении проволоки, составила примерно 1200 °С, что отличается от результатов работы [1] более чем на 40 %.

## Список литературы

1. Кудинов В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий / Кудинов В. В., Иванов В. М. — М. : Машиностроение, 1981. — 192 с.
2. Нанесення покриття / [В. М. Корж, В. Д. Кузнецов, Ю. С. Борисов, К. А. Ющенко]. — К. : Аристей, 2005. — 204 с.
3. Борисов Ю. С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов. — К. : Наукова Думка, 1987. — 210 с.
4. Свид. ВНТИЦ № 70900000091. Способ нанесения плазменных покрытий с использованием электрической дуги пульсирующей мощности на цилиндрических деталях, повышающий прочность и плотность покрытий. Зиновьева Т.Ю. / Опубликовано 06.07.99 г.
5. Ершов А. В. Влияние ионно-микродуговой активации подложки на прочность сцепления газотермических покрытий / А. В. Ершов, Н. Н. Сытник, Г. И. Камель // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Вип. 118/2011. Серія : Машиноприладобудування та транспорт. — Севастополь. — 2011. — С. 32–36.
6. Ершов А. В. Влияние экзотермических процессов на термодинамические характеристики при плазменном распылении металлических токопроводящих проволок / А. В. Ершов, О. Г. Быковский, А. Н. Лаптева // Физика и химия обработки материалов. 2014. — № 1. — С. 21–24.
7. Строганов А. И. Влияние шероховатости стальной подложки на прочность сцепления с плазменным покрытием / А. И. Строганов, А. С. Дробышевский, А. Б. Гоц // Порошковая металлургия. — 1982. — № 10. — С. 91–94.
8. Курдюмов А. В. Литейное производство цветных и редких металлов / А. В. Курдюмов, М. В. Пикунов, В. М. Чурсин // М. : Металлургия. — 1982. — 352 с.
9. Пехович А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. — Л. : Энергия, 1976. — 352 с.
10. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер : пер. с нем. — М. : Наука, 1964. — 282 с.

Поступила в редакцию 09.02.2016

**Лоскутов С.В., Ершов А.В., Зеленіна О.А. Оцінка контактної температури при зчепленні частин плазмового покриття з шорсткою поверхнею підкладки**

*Розглянуто модель розподілу контактної температури при зчепленні частинки плазмового покриття з шорсткою поверхнею підкладки. Показано, що на поверхні мікроставів підкладки контактна температура поверхні виявляється вищою, ніж на гладкій поверхні. Визначено розташування ізотерми плавлення щодо ізотерми контактної температури при нанесенні сталевого покриття на сталеву поверхню. Розроблено метод оцінки відносної міцності зчеплення покриття на підставі визначення площі зон плавлення на шорсткій поверхні підкладки. Показано, що частка зон оплавленої поверхні шорсткої підкладки складає 20–28% і зростає при збільшенні шорсткості і температури підкладки.*

**Ключові слова:** газотермічне напылення, підкладка, контактна температура, нестационарний теплообмін, ізотерма плавлення, міцність зчеплення.

**Loskutov S., Ershov A., Zelenina E. Evaluation contact temperature in clutch particle plasma coating with a rough surface of the substrate**

*A model of the distribution of the contact temperature at the clutch particle plasma coating with a rough surface of the substrate. It was shown that the surface of the substrate microprojection contact temperature is higher than a smooth surface. Determine the location of the isotherm with respect to the melting temperature isotherm contact the substrate steel coating on the steel surface. A method for assessing the relative strength of the adhesion of the coating on the basis of determining the area of the melting zone on the rough surface of the substrate. It is shown that the proportion of the surface areas of melted rough substrate is 20–28% and increases with the roughness of the substrate and temperature.*

**Key words:** plasma spraying, the substrate, the contact temperature, transient heat transfer, melting isotherm, the adhesion strength.