

УДК 620.174.24:621.793

doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-48-59

Обзор методов оценки прочности сцепления газотермических покрытий

А.Н. Зайцев^{1,2}, Ю.П. Александрова¹, А.Г. Ягопольский²

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Comparative Analysis of Methods for Assessing Adhesion Strength of Thermal Spray Coatings

A.N. Zaytzev^{1,2}, Yu.P. Aleksandrova¹, A.G. Yagopolsky²

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University)

² Bauman Moscow State Technical University

Проведен сравнительный анализ методов оценки адгезионной прочности сцепления газотермических покрытий на образцах-свидетелях и изделиях в специализированных и производственных лабораториях. Среди количественных подходов выделен клеевой метод нормального отрыва на цилиндрических образцах-свидетелях диаметром 25 мм, высотой 16...45 мм при толщине покрытия не менее 0,2 мм, описанный как в международных, так и в отечественных стандартах. Альтернативный штифтовой метод, не имеющий ограничений по предельной прочности сцепления, используют для оценки конических образцов-свидетелей с диаметром торцевого сечения 1,5...2,0 мм при толщине покрытия 0,3...0,5 мм. Метод сдвига представлен двумя способами оценки прочности сцепления цилиндрических образцов-свидетелей (диаметром 25 мм, с кольцевым участком покрытия шириной 4...30 мм при толщине рабочего слоя не менее 0,1 мм) и призматических (с линейными размерами участка сдвига 2,5...5,0 мм при толщине покрытия не менее 0,25 мм). Для всех методов отмечена неравномерность нагружения плоского участка покрытия во время испытаний. Приведены математические модели расчета действительных (истинных) значений прочности сцепления на растяжение и сдвиг, учитывающие появление дополнительных изгибающих и сдвигающих усилий при нагружении покрытия.

Ключевые слова: газотермическое покрытие, адгезионная прочность, прочность сцепления

The paper presents the comparative analysis of existing methods for accessing the adhesive strength of thermally sprayed coatings on witness samples and products in research and industrial laboratories. The adhesive method of normal separation for cylindrical witness samples with a diameter of 25 mm, a height of 16...45 mm and a coating thickness of at least 0.2 mm is pointed out among the quantitative approaches described in both international and domestic standards. An alternative pin test having no restrictions on the ultimate strength of adhesion was used to evaluate conical witness samples with an end section diameter of 1.5...2.0 mm and a coating thickness of 0.3...0.5 mm. The shear method presents two possible adhesion measurement tests: with cylindrical witness samples having the diameter of 25 mm, the width of the annular coating section of 4...30 mm and the thickness of the working layer not exceeding 0.1 mm and prismatic ones with linear dimensions of shear section of 2.5...5.0 mm and the coating thickness of at least 0.25 mm. During the tests all methods were characterized by irregular loading of the flat section of the coating. Mathematical models for calculating the actual value of the tensile and shear adhesion strength are

presented, taking into account the appearance of additional bending and shear forces when loading the coating.

Keywords: thermal sprayed coating, adhesion strength, bonding strength

Несмотря на достаточно продолжительный период применения и эксплуатации изделий с газотермическим покрытием (ГТП) оценка одной из его основных характеристик — *прочности сцепления (bonding strength) с основой (подложкой) — адгезионной прочностью (adhesion strength)*, осуществляется различными методами при отсутствии корреляции результатов испытаний выбранного метода с альтернативными способами.

Расхождение значений прочности сцепления на отрыв и сдвиг у образцов и изделий связано с масштабным фактором и различием вида разрушающего напряжения на границе *покрытие — подложка*. К ограничивающим факторам выбора метода испытания можно отнести прогнозируемую прочность сцепления, толщину и хрупкость ГТП, форму изделия и условия его

испытаний. Величины прочности сцепления будут зависеть от выбранного метода нанесения. Среди основных разновидностей газотермического напыления выделяют высокоскоростное (High Velocity Oxygen Fuel — HVOF), детонационное (Detonation Gun Spraying — DGS), плазменно-дуговое (Atmospheric Plasma Spraying — APS), плазменное в динамическом вакууме (Low Pressure Plasma Spraying — LPPS) и газопламенное (Flame Spraying — FS).

В трудах [1, 2] предложено ввести поправочные коэффициенты в конечные расчетные формулы по обработке результатов экспериментов на отрыв/сдвиг, учитывающие неравномерность нагружения во время испытаний, геометрические параметры образцов и другие факторы, приводящие к заниженным/завышенным значениям прочности сцепления.

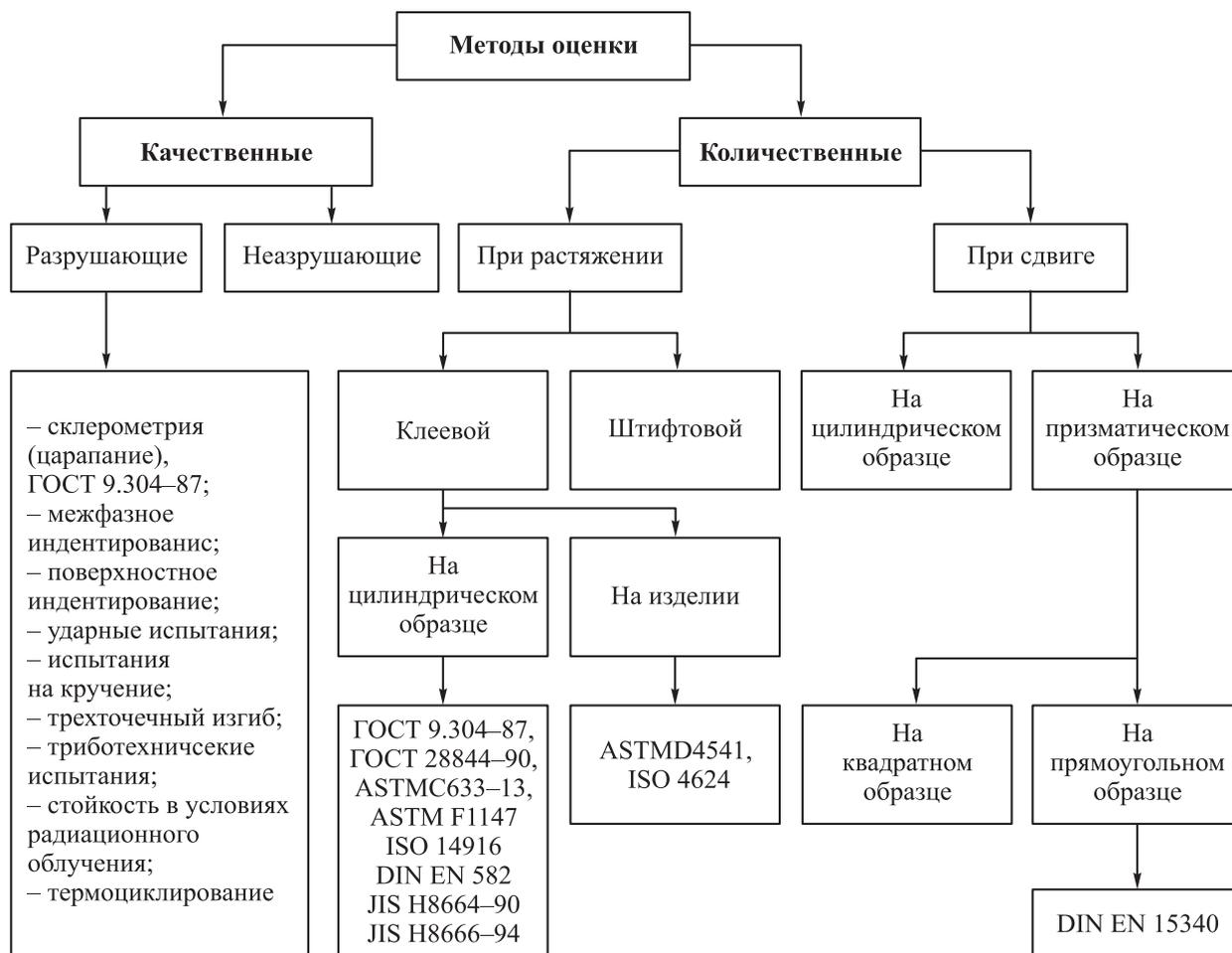


Рис. 1. Классификация методов оценки адгезионной прочности ГТП

Однако это не решает задачу проверки прочности сцепления в условиях сложного напряженного состояния, проводимой в производственных лабораториях по контролю качества покрытий на образцах-свидетелях (ОС), применительно к изделиям машиностроения.

Цель работы — систематизация и анализ методов оценки адгезионной прочности ГТП, широко применяемых в авиационно-космической и энергетической отраслях промышленности.

Классификация методов. Известные методы оценки прочности сцепления с основой ГТП можно разделить на две основные группы — качественные и количественные (рис. 1). Несмотря на разнообразие разрушающих методов, стандартизованными количественными являются *метод нормального отрыва (клеевой метод)* — определение адгезионной прочности при растяжении либо на цилиндрическом ОС (tensile adhesion strength test method; ГОСТ 9.304–87, ASTM C633-13 (2017), ASTM F1147, ISO 14916, DIN EN 582, JIS H 8666-94, JIS H 8664-90), либо на изделии (tensile pull-off method for adhesion strength; ASTM D4541, ISO 4624) и *метод сдвига (shear load resistance test method; DIN EN 15340)* на цилиндрическом ОС. В ГОСТ 28844–90 приведены только два метода оценки прочности сцепления на отрыв — *клеевой и штифтовой*, однако методика испытания на штифтах не описана.

На основе неразрушающих методов контроля [3–5] (выявляющих наличие и распределение трещин, пор, включений и отслоений по толщине) проводят качественную оценку прочности сцепления (см. рис. 1). К самым распространенным среди них можно отнести методы ультразвуковой дефектоскопии.

Методы испытания на растяжение (отрыв).

В работе [5] выделены четырнадцать самостоятельных методов оценки прочности сцепления на отрыв. Наиболее распространенными являются *клеевой и штифтовой* методы нормального отрыва при растяжении на ОС, создающие одноосное напряженное состояние. Отрыв покрытия непосредственно на изделии применяют реже вследствие сложности проведения испытаний на рельефных поверхностях.

Клеевой метод основан на равномерном отрыве покрытия [1, 2, 4–12], нанесенного на торец цилиндрического ОС либо непосредственно на изделие (рис. 2). Критерием прочности

сцепления является отношение усилия отрыва F (при котором произошло разрушение покрытия) к номинальной площади склеенных торцевых поверхностей цилиндрических ОС $A = \pi d_{\text{обр}}^2 / 4$ ($d_{\text{обр}}$ — номинальный диаметр ОС и контрообразца):

$$\sigma_{\text{сц}} = F/A. \quad (1)$$

Метод определения адгезионной прочности нормальным отрывом на цилиндрическом ОС, названный клеевым, прошел длительный период апробации и в соответствии с отечественными и зарубежными стандартами (ГОСТ 9.304–87, ASTM C633-13 (2017), DIN EN 582) применим для различных материалов, включая хрупкую оксидную керамику.

Рекомендуемый диаметр ОС $d_{\text{обр}} \approx 25$ мм (рис. 3) при равномерной толщине покрытия по плоскости торца $h_{\text{п}} \geq 0,2$ мм (см. рис. 2). Согласно японским стандартам JIS H 8664-90 и JIS H 8666-94, для металлических и керамических ГТП рекомендуемый диаметр ОС составляет 40 мм. Ограничение по толщине связано с вероятностью проникновения клея до основного материала в пористых покрытиях, что недопустимо (ГОСТ 9.304–87).

Конструктивное утолщение цилиндрического участка ОС до диаметра $35 \pm 0,1$ мм (см. рис. 3) обеспечивает возможность удаления излишков клея после отверждения и после-

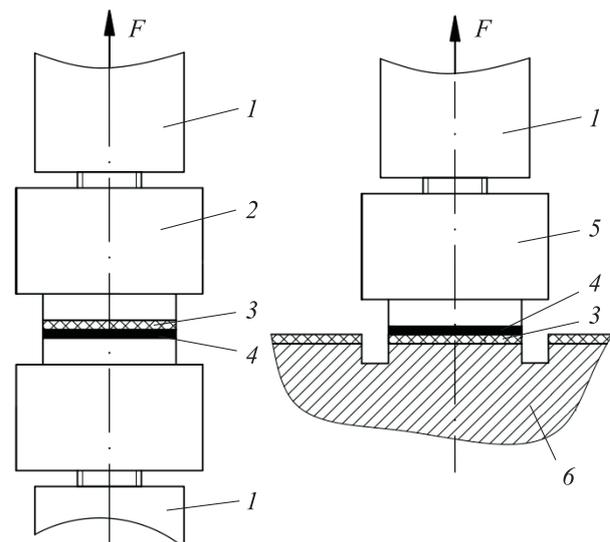


Рис. 2. Схемы испытаний прочности сцепления ГТП толщиной $h_{\text{п}} \geq 0,2$ мм по клеевому методу на цилиндрическом ОС диаметром $d_{\text{обр}} = 10 \dots 40$ мм (а) и на изделии (б): 1 — оснастка для закрепления в разрывной машине; 2 — ОС; 3 — ГТП; 4 — клей; 5 — контрообразец; 6 — изделие

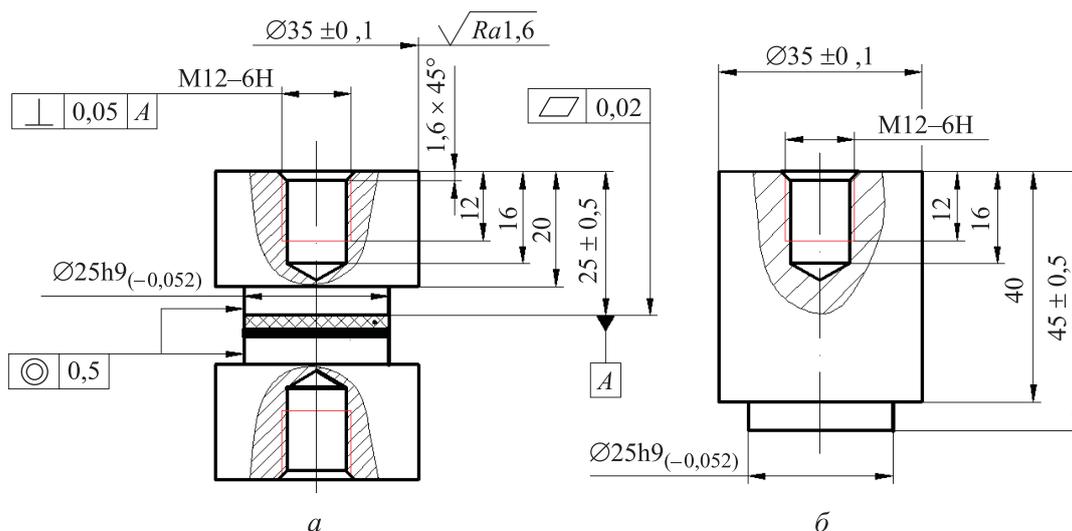


Рис. 3. Конструктивные схемы склеиваемых цилиндрических ОС высотой $h_{обр} = 25$ (а) и 45 мм (б)

дующее многократное применение центрирующих втулок при склеивании (рис. 4).

Рекомендуемая высота ОС (ГОСТ 9.304–87) $h_{обр} = 16$ мм. На рис. 3 предложены два варианта ОС высотой $h_{обр} = 25 \pm 0,5$ мм и $h_{обр} = 45 \pm 0,5$ мм. Согласно данным работы [9], близкое расположение резьбового отверстия относительно плоскости отрыва ($h_{р.отв}/h_{обр} \approx 0,7$, где $h_{р.отв}$ — глубина глухого отверстия резьбы) приводит к неравномерности распределения напряжений (до 50 %) от центра к периферии во время испытаний.

Увеличение высоты ОС до $h_{обр} = 45 \pm 0,5$ мм ($h_{р.отв}/h_{обр} = 0,4...0,5$) позволяет повысить жесткость и значительно снизить неравномерность распределения напряжений по торцу.

Испытания проводят на универсальном испытательном стенде при скорости перемещения захватов разрывной машины 1...10 мм/мин (ГОСТ 9.304–87).

Необходимое осевое усилие и обеспечение соосности при склеивании достигается использованием специальной оснастки (по ГОСТ 27890–88) или центрирующих втулок (см. рис. 4).

В случае испытания изделия цилиндрический контрообразец (рис. 2, б) приклеивают непосредственно к поверхности детали с покрытием. После отвердевания выполняют проточку вдоль границы склеивания до основного металла.

Адгезионная прочность эпоксидных и полиамидных клеев не превышает 50...70 МПа [1, 11], что ниже средних значений прочности сцепления высокоскоростных и детонационных

покрытий ($\sigma_{сц} = 100...150$ МПа). Отверждение клея обычно происходит при температуре $T = 100...150$ °С, что не позволяет в дальнейшем проводить испытания при повышенных и высоких температурах, вызывающих потерю адгезионных свойств.

Анализ результатов исследований, приведенных в работах [1, 2], выявил зависимость прочности сцепления $\sigma_{сц}$ от диаметра ОС $d_{обр}$ из-за влияния масштабного фактора и фактической неравномерности напряженного состоя-

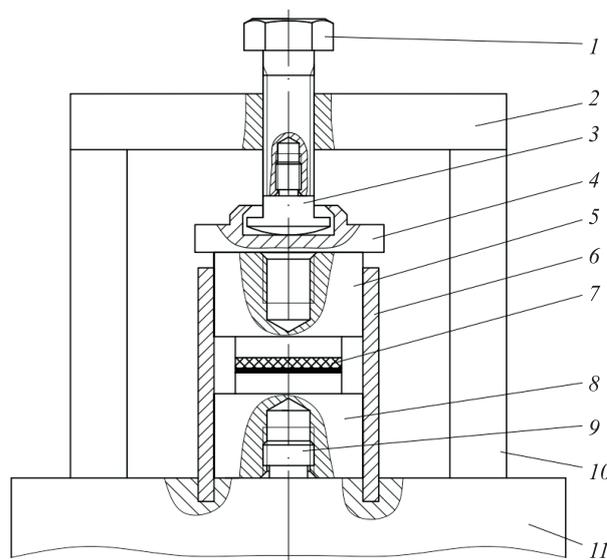


Рис. 4. Схема оснастки для центрирования и создания необходимого осевого усилия при склеивании ОС с ГТП:

- 1 — болт; 2 и 11 — верхняя и нижняя (основание) плиты;
- 3 — сферический шток; 4 — прижимная шайба; 5 — ОС;
- 6 — центрирующая втулка; 7 — испытуемое покрытие;
- 8 — контрообразец; 9 — винт; 10 — стойка

ния от центра ОС к периферии во время испытаний. Влияние краевого эффекта можно минимизировать, увеличив диаметр ОС с 10 до 50 мм. У различных материалов покрытий (Al_2O_3 , W, сплавов на основе Cu) может наблюдаться эффект уменьшения или увеличения прочности сцепления при диаметре ОС $d_{обр} = 10 \dots 40$ мм [2].

В большинстве случаев с ростом диаметра ОС минимизируется влияние краевого эффекта, демонстрируя большие значения адгезионной прочности, тем самым приближаясь к действительному (истинному) значению прочности сцепления покрытия $\sigma'_{сц}$ на изделии.

При испытаниях склеенных ОС механизм отслоения покрытия (прослойки) от подложки характеризуется переходом от одноосного растяжения, где главные напряжения $\sigma_1 = 4F/(\pi d_{обр}^2)$; $\sigma_2 = \sigma_3 = \tau = 0$ (τ — касательные напряжения), к сложному напряженному состоянию с появлением касательных напряжений ($\tau \neq 0$), максимальное значение которых достигается на крае ОС [1, 2].

Предельное состояние (разрушение покрытия) наступает, когда совокупность нормальных σ и касательных напряжений достигает максимума:

$$\sigma_{экр} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{экр}$ — эквивалентное напряжение.

Следовательно, при клеевых испытаниях на цилиндрических ОС диаметром $d_{обр} = 25$ мм рассчитываемые по уравнению (1) значения прочности сцепления будут меньше истинной прочности сцепления: $\sigma'_{сц} = \sigma_{экр} > \sigma_{сц}$.

В монографии [1] приведено уравнение, позволяющее вычислять среднее напряжение $\sigma_{ср}$ при испытаниях по клеевой методике, учитывающее одновременное появление нормальных и касательных напряжений, которое можно принять как истинное значение прочности сцепления:

$$\sigma'_{сц} \approx \sigma_{ср} = \sigma_{\tau} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}\chi} \right), \quad \chi = h_n/d_{обр}, \quad (3)$$

где σ_{τ} — предел текучести материала покрытия при одноосном растяжении.

Ввиду малой толщины покрытия экспериментально установить значения пределов текучести материала покрытия при одноосном растяжении σ_{τ} и чистом сдвиге τ_{τ} , характеризующие когезионный тип разрушения, по

соответствующим пределам прочности σ_{ν} и τ_{ν} (адгезионный тип разрушения) не всегда представляется возможным. По этой причине можно принять $\sigma_{\tau} \approx \sigma_{\nu}$ и $\tau_{\tau} \approx \tau_{\nu}$.

Такое допущение позволяет подставлять экспериментально найденные значения прочности сцепления $\sigma_{сц} \approx \sigma_{\tau}$ из уравнения (1) в формулу (3) и рассчитывать истинное значение адгезионной прочности на отрыв с учетом геометрических размеров ОС

$$\sigma'_{сц} = \frac{F}{A} \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}h_n/d_{обр}} \right). \quad (4)$$

Рассматривая испытания на отрыв по клеевой методике на изделиях и ОС большого диаметра (свыше 50 мм), можно предположить, что покрытие будет испытывать одноосное растяжение, что позволяет записать равенство $\sigma'_{сц} = \sigma_{экр} \equiv \sigma_{сц}$. Однако только по экспериментальным данным можно установить размеры ОС, при которых дополнительными касательными напряжениями в уравнениях (2)–(4) можно пренебречь.

Штифтовой метод основан на оценке прочности сцепления ГТП на штифтах. В отличие от клеевого метода, он не имеет ограничения по предельной прочности клеевой прослойки. У детонационных и высокоскоростных покрытий штифтовой метод остается единственным возможным для количественной оценки прочности сцепления на отрыв при нормальных и повышенных температурах применительно к производственным задачам [1, 2, 12–15].

Покрытие наносят на торцевую поверхность конического штифта 5 (рис. 5), установленного в отверстие конусной шайбы (оправки) 4 [10]. Прочность сцепления покрытия с подложкой определяют по формуле (1), где номинальная площадь торца штифта с нанесенным покрытием $A = \pi d_{шт}^2/4$ ($d_{шт}$ — диаметр штифта).

Повторяемость результатов и точность измерений зависит от установленных допусков на коническое сопряжение. Фиксация конусной пары достигается регулированием осевого смещения, обеспечивая минимально возможный натяг (см. рис. 5).

Отношение радиуса торцевого сечения штифта r к толщине покрытия ($r/h_n \leq 2,0$) влияет на корректность проведения испытаний [1]. Согласно данным работ [1, 10], рекомендуемый диаметр торцевого сечения штиф-

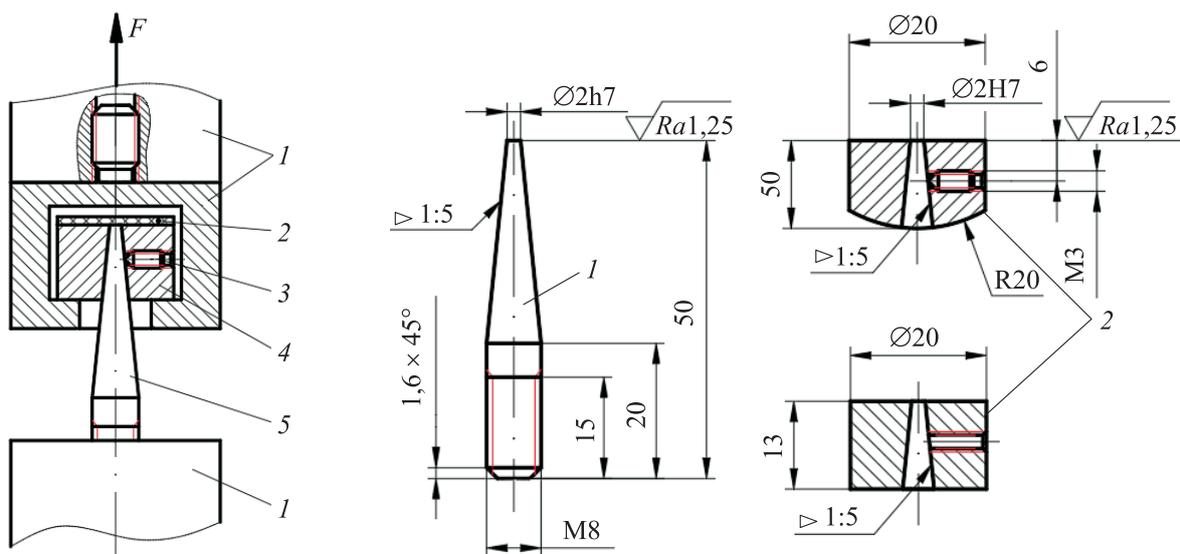


Рис. 5. Конструктивные схемы экспериментальных ОС для оценки прочности сцепления ГТП толщиной $h_{п} \geq 0,3$ мм по штифтовому методу:

1 — оснастка для закрепления в разрывной машине; 2 — испытуемое покрытие; 3 — стопорный винт; 4 — конусная шайба (оправка); 5 — конический штифт

та составляет 1,5...2,0 мм для толщины покрытия $h_{п} \approx 0,3...0,5$ мм. Увеличение диаметра штифта с 1,0 до 2,5 мм приводит к многократному падению прочности сцепления [10]. При этом уменьшение диаметра шайбы ведет к снижению прочности сцепления. Рекомендуемый диаметр шайбы $d_{ш} = 20$ мм (см. рис. 5).

После сборки и фиксации штифта стопорным винтом 3 торцевые поверхности ОС шлифуют до шероховатости $Ra = 1,25$ мкм. По этой причине диаметр штифта перед каждым испытанием следует измерять с точностью не ниже 0,01 мм.

В работе [16] предложено использовать конические штифты с кольцевой формой торца, гарантирующие разрушение покрытия по границе *покрытие — подложка* при условии

$$D_k - d_k \leq 4h_{п} \tau_{\max} / \sigma_{\max},$$

где D_k и d_k — наружный и внутренний диаметры штифта с кольцевой формой торца; τ_{\max} — предел прочности ГТП на сдвиг; σ_{\max} — предел адгезионной прочности ГТП.

Вследствие малого диаметра штифта вопрос вида разрушения покрытия (чистый отрыв, поперечное, смешанное, внутреннее [10]) стал основополагающим, что определило необходимость развития теории сложнапряженного состояния на границе *покрытие — подложка*. В случае полного отрыва материала покрытия от торца штифта (чистого отрыва) по границе

покрытие — подложка предполагается, что разрушение возникает в условиях одноосного нормального напряжения.

В действительности при испытаниях одновременно действуют нормальные, сдвигающие и изгибающие усилия, максимальные значения которых достигаются в момент отрыва покрытия по краю штифта. По уравнению (1) вычисляют заниженные значения прочности сцепления покрытия.

Получение «чистого» адгезионного отрыва на штифте при малой толщине покрытия ($h_{п} = 0,1...0,2$ мм) является сложной задачей. В работе [15] предложено рассчитывать прочность сцепления детонационных покрытий по кольцевому участку отрыва, характерному для поперечного типа разрушения. Площадь отрыва определяют по боковой поверхности усеченного конуса кольцевого участка

$$A = \frac{\pi}{2} (d_{шт} + d_{отр}) \sqrt{\frac{(d_{шт} + d_{отр})^2}{4} + h_{п}^2},$$

где $d_{отр}$ — диаметр отверстия отрыва покрытия на шайбе.

В расчете сложнапряженного состояния для штифта радиусом r покрытие рассматривают как тонкую пластину [1]. Выделяемый у края штифта участок покрытия шириной a испытывает максимальные изгибающие напряжения в начальный момент отслоения. Радиальные σ_r ,

нормальные (окружные) σ_ϕ и касательные τ_{rz} напряжения определяются выражениями

$$\sigma_r = \frac{3F}{\pi h_n^2}; \quad \sigma_\phi = \nu \frac{3F}{\pi h_n^2}; \quad \tau_{rz} = \frac{F}{2\pi h_n (r-a)}.$$

С учетом условий $r \gg h_n$, $r \gg a$ главные напряжения вычисляются следующим образом:

$$\sigma_1 = \frac{3F}{\pi h_n^2}; \quad \sigma_2 = \nu \frac{3F}{\pi h_n^2}; \quad \sigma_3 = 0,$$

где ν — коэффициент Пуассона.

По теории наибольших касательных напряжений определяют эквивалентное напряжение в покрытии, которое можно принять как истинное значение прочности сцепления

$$\sigma'_{\text{сц}} \equiv \sigma_{\text{эКВ}} = \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{3F}{\pi h_n^2}. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет оценить падение прочности сцепления с увеличением толщины покрытия, но не отражает влияния геометрического размера штифта r на искомую величину. Для определения истинного значения адгезионной прочности $\sigma'_{\text{сц}}$ по штифтовой методике расчетная формула (5) должна включать в себя недостающие параметры.

Методы испытания на сдвиг. В литературных источниках [1, 2, 6, 8–10] и немецком стандарте DIN EN 15340 приведены ОС для оценки прочности сцепления на сдвиг ГТП, но методика ее проведения требует дальнейшего развития. Основными разновидностями метода являются испытания на цилиндрических и реже призматических ОС. Критерием прочности сцепления на сдвиг $\tau_{\text{сд}}$ служит отношение максимального значения сдвигающего усилия $F_{\text{сд}}$, отнесенного к номинальной площади A кольцевого или плоского участка покрытия.

Метод испытания на цилиндрическом ОС (пуансоне) диаметром $d_{\text{пуан}} = 15...30$ мм (рис. 6, а, б) получил наибольшее распространение. Матрицу изготавливают из закаленной стали твердостью не менее 60 HRC. Для уменьшения влияния сил трения при перемещении пуансона во время испытаний сопряжение матрица — пуансон выполняют с минимальным зазором по посадке H7/g6, H6/g5, H7/h6.

Номинальная ширина кольцевого участка l покрытия обычно составляет 4...20 мм [2, 8–10]. Оптимальную ширину l выбирают опыт-

ным путем из условия полного отделения покрытия по боковой поверхности пуансона.

Покрытие наносят на предварительно отпескоструенный кольцевой участок пуансона, обеспечивая толщину рабочего слоя покрытия не менее 0,1 мм [10]. Параллельность торцевых поверхностей покрытия и матрицы достигается последующей механической обработкой. При известной ширине кольцевого участка l покрытие может быть выполнено с проточкой шириной 2 мм на ОС для снижения сил резания и вибраций при его обработке (см. рис. 6, а). Во избежание возникновения сколов и отслаивания хрупких материалов покрытия во время механической обработки могут быть применены конические матрицы (рис. 6, з), обеспечивающие прилегание покрытия во время испытаний.

В целях устранения остаточных сжимающих/растягивающих напряжений рекомендовано проводить технологические вырезы в покрытии шириной 0,50...0,76 мм [8].

Независимо от качества изготовления матрицы и пуансона со скользящей посадкой (рис. 6, а–з) появление дополнительных сил трения в ходе испытаний приводит к искажению результатов оценки сдвигающего усилия $F_{\text{сд}}$. Отсутствие в конструкции ОС центрирующих направляющих приводит к сложности обеспечения соосности матрицы и пуансона. Многократные испытания, термическое воздействие при напылении и абразивоструйная обработка являются причиной изменения геометрических размеров пуансона.

Метод испытания на призматических ОС (см. рис. 1) позволяет исключить влияние сил трения наличием зазора Δ между индентором (резцом) и границей раздела покрытие — подложка (рис. 7). С помощью масок на квадратный ОС наносят одинаковые по площади и толщине отдельные участки покрытия.

Реализовать метод в промышленных условиях трудно по многим факторам, к основным из которых относятся сложность подготовки ОС и контроль геометрических размеров, наличие специальных стендов для проведения испытаний и обоснование линейных размеров $l = 2,5...5,0$ мм участка покрытия на сдвиг при толщине покрытия $h_n \geq 0,25$ мм.

Согласно DIN EN 15340, ГТП наносят на торцевую поверхность прямоугольного ОС размером 5×10 мм [9]. В процессе испытаний обеспечивают наличие и контроль минималь-

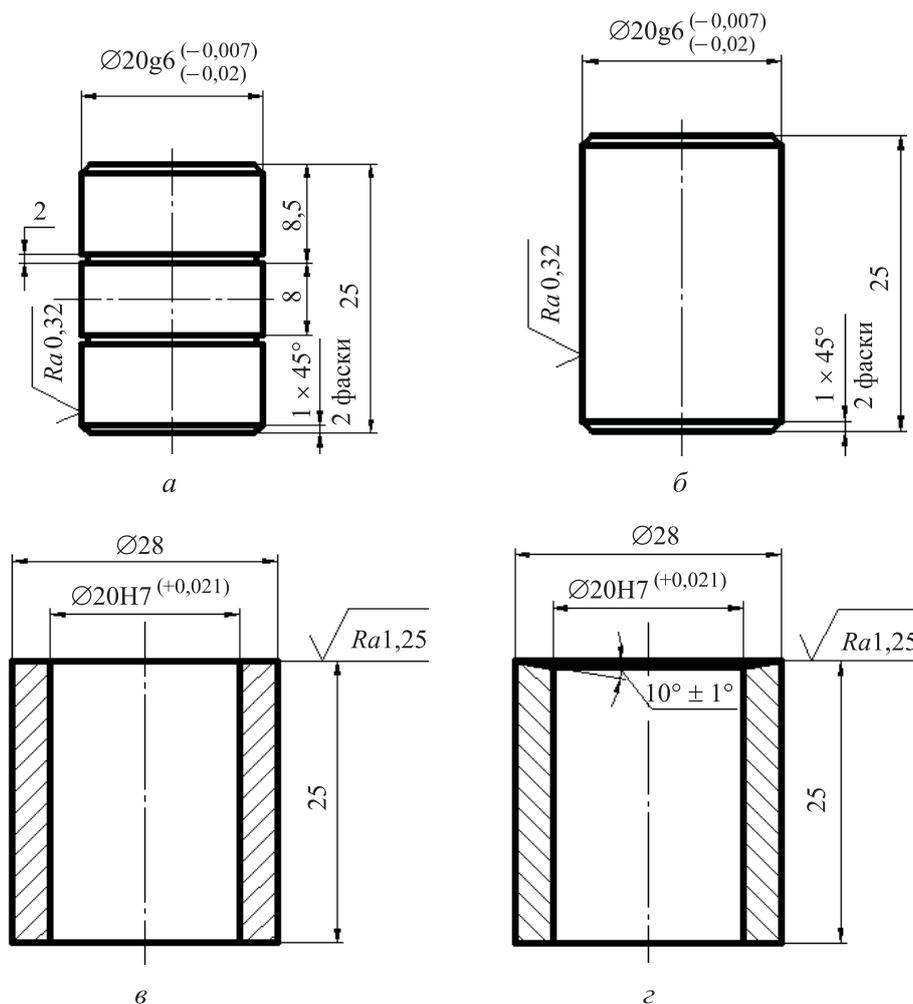


Рис. 6. Конструктивные схемы пуансонов и матриц для определения прочности сцепления на сдвиг ГТП толщиной $h_n \geq 0,1$ мм:
 а и б — пуансона с проточкой и цилиндрического пуансона; в и г — цилиндрической и конической матриц

ного зазора Δ , как и для квадратных ОС. Стандартное отклонение в серии экспериментов не должно превышать 10 % среднего значения прочности сцепления.

Основными преимуществами метода определения прочности сцепления на плоских ОС над таковым на цилиндрических ОС является возможность реализации испытаний в условиях одновременного действия сжимающих и сдвигающих усилий, а также низкая трудоемкость получения значительной выборки результатов измерений на одном квадратном ОС.

В обеих схемах испытаний на сдвиг (см. рис. 6, 7) имеет место неравномерность нагружения, так как покрытие, соприкасающееся с матрицей/индентором, испытывает максимальную сдвиговую нагрузку. В то время как свободный конец участка покрытия характеризуется незначительным нагружением [1, 2, 10].

Наличие зазора между матрицей/индентором и подложкой ОС во время испытаний приводит к различию вида нагружения по толщине покрытия. Определение истинного значения прочности сцепления в условиях чистого сдвига $\tau'_{сд}$ на цилиндрических и плоских ОС является очень сложной задачей.

В работе [2] исследовано влияние геометрических размеров цилиндрических ОС на прочность сцепления покрытия. В расчетной модели распределения касательных напряжений по ширине покрытия l выделяли два участка покрытия толщинами a и b ($b = \Delta$), испытывающих напряжения сжатия вдоль оси x и напряжения сдвига:

$$\tau = \frac{Gq_0}{bkE(1 - e^{-2kl})} (e^{-2kl} e^{kx} + e^{-kx}),$$

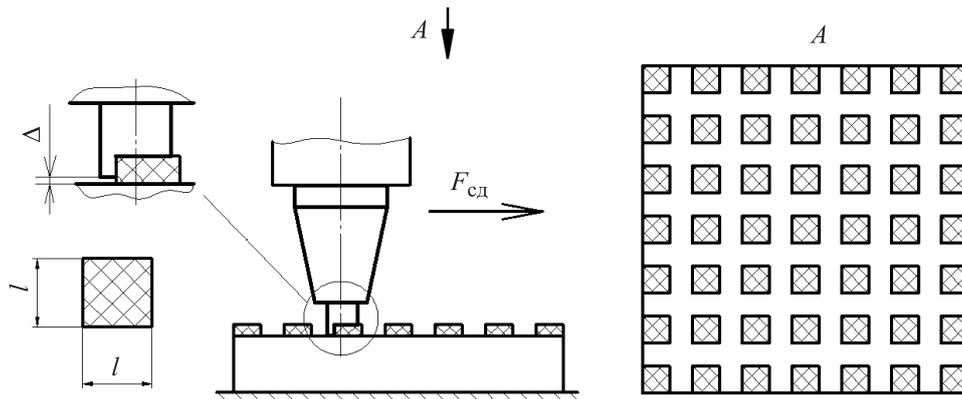


Рис. 7. Схемы квадратного ОС для определения прочности сцепления на сдвиг ГТП при толщине $h_n \geq 0,25$ мм

$$k = \sqrt{\frac{G}{abE}}; \quad q_0 = \frac{F_{сд}}{\pi a(D_m + a)}, \quad (6)$$

где G и E — модули упругости второго и первого рода материала покрытия; q_0 — распределенная нагрузка при сдвиге покрытия; D_m — внутренний диаметр матрицы.

Прочность сцепления за счет сдвиговых усилий на цилиндрических ОС обычно вычисляют по формуле

$$\tau_{сд} = \frac{F_{сд}}{A} = \frac{F_{сд}}{\pi d_{пун} l}. \quad (7)$$

Предполагая, что разрушение ГТП наступает при максимальном значении сдвигающего напряжения τ_{max} (при $x=0$) рассчитывают истинное значение прочности сцепления на сдвиг для цилиндрических и призматических ОС, вводя коэффициент концентраций напряжений K_τ [2, 17].

Согласно выражениям (6) и (7), истинное значение прочности сцепления на сдвиг и коэффициент концентраций напряжений определяются следующими выражениями:

• для цилиндрических ОС

$$\tau'_{сд} = \tau_{max} = K_\tau \frac{F_{сд}}{\pi d_{пун} l};$$

$$K_\tau = \frac{G d_{пун} l (1 + e^{-2kl})}{bkEa(D_m + a)(1 - e^{-2kl})};$$

• для квадратных ОС

$$\tau'_{сд} = \tau_{max} = K_\tau \frac{F_{сд}}{l^2};$$

$$K_\tau = \frac{Gl(1 + e^{-2kl})}{bkEa(1 - e^{-2kl})}.$$

Выводы

1. Среди способов оценки адгезионной прочности ГТП метод нормального отрыва на цилиндрических ОС единообразен для мировой практики.

2. Наличие различных технологий газотермического напыления накладывает значительные ограничения на применение клеевого метода вследствие отсутствия клеев, превышающих прочность сцепления покрытий, получаемых высокоскоростным (HVOF), детонационным (DGS) и плазменным в динамическом вакууме (LPPS) методами. Альтернативой им служат штифтовой метод на конических ОС и метод сдвига на цилиндрических ОС.

3. Существующие методы оценки прочности сцепления не позволяют получать ее истинные значения, так как характеризуются неравномерностью нагружения ГТП по площади его контакта с подложкой. Создание одноосного напряженного состояния (растяжения, сдвига) сопровождается появлением дополнительных изгибающих, фрикционных и других сил на границе раздела покрытие — подложка.

Литература

- [1] Пузряков А.Ф. *Теоретические основы технологии плазменного напыления*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.

- [2] Кравченко И.Н., Зубрилина Е.М., Панкратова Е.В., Москаль О.Я. *Методика оценки прочности покрытий с учетом коэффициента концентраций напряжений*. URL: http://www.rusnauka.com/30_NNM_2012/Tecnic/2_118680.doc.htm (дата обращения 10 октября 2020).
- [3] Vencl A., Arostegui S., Favaro G., Zivic F., Mrdak M., Mitrović S., Popovic V. Evaluation of adhesion/cohesion bond strength of the thick plasma spray coatings by scratch testing on coatings cross-sections. *Tribology International*, 2011, vol. 44, iss. 11, pp. 1281–1288, doi: 10.1016/j.triboint.2011.04.002
- [4] Hadad M., Marot G., Démarécaux P., Chicot D., Lesage J., Rohr L., Siegmann S. Adhesion tests for thermal spray coatings: correlation of bond strength and interfacial toughness. *Journal Surface Engineering*, 2007, vol. 23, iss. 4, pp. 279–283, doi: 10.1179/174329407X215159
- [5] Chen Z., Zhou K., Lu X., Lam Y.Ch. A review on the mechanical methods for evaluating coating adhesion. *Acta Mechanica*, 2014, vol. 225, iss. 2, pp. 431–452, doi: 10.1007/s00707-013-0979-y
- [6] Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. *Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник*. Киев, Наукова Думка, 1987. 544 с.
- [7] Ichikawa Y., Barradas S., Borit F., Guipont V., Jeandin M., Nivard M., Berthe L., Ogawa K., Shoji T. Evaluation of Adhesive Strength of Thermal-Sprayed Hydroxyapatite Coatings Using the Laser Shock Adhesion Test (LASAT). *Materials Transactions*, 2007, vol. 48, no. 4, pp. 793–798.
- [8] Хасуи А., Моригаки О. *Наплавка и напыление*. Москва, Машиностроение, 1985. 240 с.
- [9] Коробов Ю.С. *Анализ свойств газотермических покрытий. В 2 ч. Ч. 2. Оценка параметров покрытий*. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2016. 92 с.
- [10] Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И. *Методы исследований материалов*. Москва, Мир, 2004. 384 с.
- [11] Кравченко И.Н. Экспериментально-расчетная методика определения прочностных характеристик плазменнонапыленных покрытий. *Труды ГОСНИТИ*, 2009, т. 103, с. 158–162.
- [12] Kuroda S., Inoue T., Kishi A., Yokoyama K., Yomoto H., Gotoh Y. Evaluation of adhesive strength of HVOF sprayed metallic alloy coatings by a modified tensile test. *Proceedings of the ITSC 2004. International Thermal Spray Conference: Advances in Technology and Application*, 10–12 May, 2004, Osaka, Japan, pp. 138–142.
- [13] Luo X., Smith G.M., Sampath S. On the Interplay Between Adhesion Strength and Tensile Properties of Thermal Spray Coated Laminates—Part I: High Velocity Thermal Spray Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, vol. 27, pp. 296–307.
- [14] Ульяницкий В.Ю., Батраев И.С., Штерцер А.А. Детонационные покрытия из оксидов. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2015, № 9(129), с. 37–44.
- [15] Ряховский А.В., Косенко В.В., Власенко В.Н. Особенности оценки прочности сцепления детонационных покрытий. *Система вооружения и военная техника*, 2012, № 3(31), с. 215–217.
- [16] Рогожин В.В., Смирнов Ю.В., Петров В.Я. Определение адгезионной прочности газотермических покрытий. *Порошковая металлургия*, 1982, № 7, с. 87–91.
- [17] Зайцев А.Н., Лешуков А.Ю., Дубинин Г.В., Свириденко М.Н., Александрова Ю.П., Сачек Б.Я., Мезрин А.М. Расчет толщин электроизоляционных плазменнонапыленных оксидных покрытий Al_2O_3 в изделиях бланкета ИТЭР. *Известия Академии Наук. Энергетика*, 2016, № 1, с. 79–91.

References

- [1] Puzryakov A.F. *Teoreticheskiye osnovy tekhnologii plazmennogo napyleniya* [Theoretical foundations of plasma spraying technology]. Moscow, Bauman Press, 2008. 360 p.
- [2] Kravchenko I.N., Zubrilina E.M., Pankratova E.V., Moskal' O.Ya. *Metodika otsenki prochnosti pokrytiy s uchetom koeffitsiyenta kontsentratsiy napryazheniy* [Method for evaluating the strength of coatings taking into account the stress concentration coeffi-

- cient]. Available at: http://www.rusnauka.com/30_NNM_2012/Tecnic/2_118680.doc.htm (accessed 10 October 2020).
- [3] Vencl A., Arostegui S., Favaro G., Zivic F., Mrdak M., Mitrović S., Popovic V. Evaluation of adhesion/cohesion bond strength of the thick plasma spray coatings by scratch testing on coatings cross-sections. *Tribology International*, 2011, vol. 44, iss. 11, pp. 1281–1288, doi: 10.1016/j.triboint.2011.04.002
- [4] Hadad M., Marot G., Démarécaux P., Chicot D., Lesage J., Rohr L., Siegmann S. Adhesion tests for thermal spray coatings: correlation of bond strength and interfacial toughness. *Journal Surface Engineering*, 2007, vol. 23, iss. 4, pp. 279–283, doi: 10.1179/174329407X215159
- [5] Chen Z., Zhou K., Lu X., Lam Y.Ch. A review on the mechanical methods for evaluating coating adhesion. *Acta Mechanica*, 2014, vol. 225, iss. 2, pp. 431–452, doi: 10.1007/s00707-013-0979-y
- [6] Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sidorenko S.L., Ardatovskaya E.N. *Gazotermicheskiye pokrytiya iz poroshkovykh materialov. Spravochnik* [Gas-thermal coatings made of powder materials. Guide]. Kiev, Naukova Dumka publ., 1987. 544 p.
- [7] Ichikawa Y., Barradas S., Borit F., Guipont V., Jeandin M., Nivard M., Berthe L., Ogawa K., Shoji T. Evaluation of Adhesive Strength of Thermal-Sprayed Hydroxyapatite Coatings Using the Laser Shock Adhesion Test (LA-SAT). *Materials Transactions*, 2007, vol. 48, no. 4, pp. 793–798.
- [8] Khasui A., Morigaki O. *Naplavka i napyleniye* [Surfacing and spraying]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1985. 240 p.
- [9] Korobov Yu.S. *Analiz svoystv gazotermicheskikh pokrytiy. V 2 ch. Ch. 2. Otsenka parametrov pokrytiy* [Analysis of the properties of gas-thermal coatings. Pt. 2. Assessment of coating parameters]. Yekaterinburg, Ural. un-t publ., 2016. 92 p.
- [10] Tushinskiy L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeyev V.I. *Metody issledovaniy materialov* [Methods of materials research]. Moscow, Mir publ., 2004. 384 p.
- [11] Kravchenko I.N. Experimental and computational method for determining the strength characteristics of plasma-sprayed coatings. *Trudy GOSNITI*, 2009, vol. 103, pp. 158–162 (in Russ.).
- [12] Kuroda S., Inoue T., Kishi A., Yokoyama K., Yomoto H., Gotoh Y. Evaluation of adhesive strength of HVOF sprayed metallic alloy coatings by a modified tensile test. *Proceedings of the ITSC 2004. International Thermal Spray Conference: Advances in Technology and Application*, 10–12 May, 2004, Osaka, Japan, pp. 138–142.
- [13] Luo X., Smith G.M., Sampath S. On the Interplay between Adhesion Strength and Tensile Properties of Thermal Spray Coated Laminates—Part I: High Velocity Thermal Spray Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2018, vol. 27, pp. 296–307.
- [14] Ul'yanitskiy V.Yu., Batrayev I.S., Shtertser A.A. Oxide coatings made by detonation spraying. *Uprochnyayu-shchiye tekhnologii i pokrytiya*, 2015, no. 9(129), pp. 37–44 (in Russ.).
- [15] Ryakhovskiy A.V., Kosenko V.V., Vlasenko V.N. Features of estimation of durability of coupling of detonation coverages. *Systems of Arms and Military Equipment*, 2012, no. 3(31), pp. 215–217 (in Russ.).
- [16] Rogozhin V.V., Smirnov Yu.V., Petrov V.Ya. Determination of the adhesive strength of gas-thermal coatings. *Poroshkovaya metallurgiya*, 1982, no. 7, pp. 87–91 (in Russ.).
- [17] Zaytsev A.N., Leshukov A.Yu., Dubinin G.V., Sviridenko M.N., Aleksandrova Yu.P., Sachek B.Ya., Mezrin A.M. Calculation thickness of insulation plasma-sprayed oxide coating Al_2O_3 in the parts of ITER blanket. *Proceedings of the Russian academy of sciences. Power engineering*, 2016, no. 1, pp. 79–91 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 10.12.2020

Информация об авторах

ЗАЙЦЕВ Андрей Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); доцент кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: skadi221@gmail.com).

АЛЕКСАНДРОВА Юлия Петровна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Физическая химия». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское ш., д. 4, e-mail: alexandrova.yu.pet.1940@gmail.com).

ЯГОПОЛЬСКИЙ Александр Геннадиевич — старший преподаватель кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Information about the authors

ZAYTSEV Andrey Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Aircraft Engine Technology Department. Moscow Aviation Institute (National Research University); Associate Professor, Department of Machine Tools. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: skadi221@gmail.com).

ALEXANDROVA Yuliya Petrovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Physical Chemistry. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoye Shosse, Bldg. 4, e-mail: alexandrova.yu.pet.1940@gmail.com).

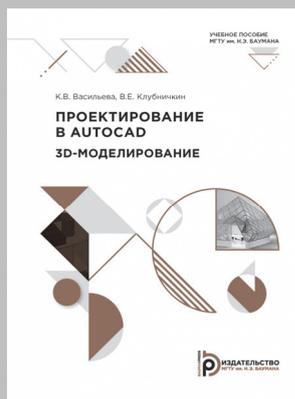
YAGOPOLSKY Aleksandr Gennadievich — Senior Lecturer, Department of Machine Tools. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Зайцев А.Н., Александрова Ю.П., Ягопольский А.Г. Обзор методов оценки прочности сцепления газотермических покрытий. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 5, с. 48–59, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-48-59

Please cite this article in English as:

Zaytzev A.N., Aleksandrova Yu.P., Yagopolsky A.G. Comparative Analysis of Methods for Assessing Adhesion Strength of Thermal Spray Coatings. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 5, pp. 48–59, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-48-59



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

**«Проектирование в AUTOCAD.
3D моделирование»**

Авторы: К.В. Васильева, В.Е. Клубничкин

Приведены необходимые сведения для выполнения индивидуального задания по 3D-моделированию сборочного узла.

Для студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, изучающих дисциплины «Инженерная и компьютерная графика» и «Компьютерная графика», а также для аспирантов соответствующего профиля.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;

press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru