

УДК 621.385(04)
DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-47-57

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦИОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ДЕТАЛИ

В. И. Сидоренко, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
И. В. Штенников, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Проведены исследования влияния параметров вакуумного конденсационного напыления металлического покрытия с использованием стержневого резистивного испарителя на температуру полой детали во время формирования на поверхности отверстия слоя покрытия.

Показано, что источниками нагрева обрабатываемой детали является тепловое излучение испарителя и теплота конденсации пара напыляемого металла.

В общем случае соотношение величин теплового потока излучения испарителя и потока теплоты конденсации зависит от природы конденсируемого вещества и параметров напыления. Установлено, что при типичной технологии конденсационного хромирования стальной детали основной вклад в ее нагрев вносит тепловое излучение испарителя – 85-97 %; в меньшей степени деталь нагревается за счет теплоты конденсации хрома – 15-3 %.

Проанализированы следующие параметры напыления, которые в разной степени влияют на тепловое состояние детали: начальный диаметр стержневого резистивного испарителя $d_{исп0}$, температура испарителя $T_{исп}$, продолжительность нанесения покрытия $\tau_{нан}$, начальная температура конденсации $T_{конд0}$, диаметр нагревателя $D_{нагр}$, температура нагревателя $T_{нагр}$, диаметр отверстия $D_{вн.дет}$, наружный диаметр детали $D_{дет}$.

В результате исследований теплового состояния детали в процессе напыления конденсационного хромового покрытия, выполненных с применением метода математического моделирования, вычислены наиболее значимые параметры, определяющие рост температуры детали $T_{дет}$: а) температура испарителя $T_{исп}$ и б) начальная температура конденсации $T_{конд0}$ покрытия.

При изменении на 1 % наиболее значимого параметра – температуры испарителя $T_{исп}$ – рост температуры детали $T_{дет}$ в течение продолжительного времени формирования покрытия составляет от 0,44 до 1,18 %. Влияние второго значимого параметра – начальной температуры конденсации $T_{конд0}$ – на рост температуры детали несколько меньше. При этом степень влияния этого параметра при тех же условиях напыления покрытия постепенно уменьшается от 0,77 до 0,31 %. Роль других исследованных параметров напыления в изменении температуры детали малозначительна.

Одним из рациональных путей уменьшения нежелательного перегрева детали во время конденсации покрытия является интенсификация технологических режимов напыления. За счет выбора максимально возможной температуры испарения $T_{исп}$ достигается высокая скорость испарения $V_{исп}$ напыляемого материала, и вследствие этого обеспечивается высокая скорость конденсации $V_{конд}$, сокращается продолжительность формирования покрытия требуемой толщины, а также снижается тепловая нагрузка на обрабатываемую деталь.

Ключевые слова: термическое испарение, полые детали, параметры напыления, конденсационное хромирование.

Введение

Разработка методов упрочнения внутренних рабочих поверхностей деталей с малым диаметром отверстия является актуальной задачей и предполагает создание новых и совершенствование существующих технологий. Авторами патента № 390032 «Способ нанесения взрывом проводника» (Швеция, 1975) и заявки № 53–33947 «Устройство для нанесения покрытий взрывом проводника» (Япония, 1980) предложено для упрочнения внутренней поверхности таких деталей наносить покрытие

в вакууме методом электровзрывного испарения проводника из осаждаемого материала, расположенного соосно отверстию детали [1]. Метод нанесения покрытий посредством электрического взрыва проводника получил развитие в работах [2–6] и по результатам исследований авторов позволяет создавать композиционные покрытия, обладающие высокой адгезией и стойкостью к механической эрозии.

Для получения покрытий повышенной толщины при соосном расположении источника материала покрытия авторами изобретений (за-

явка № 58–42267 «Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность труб» (Япония, 1980); А.С. 1526270 СССР. Устройство для нанесения покрытий в вакууме на внутренние поверхности труб) предложен метод конденсационного напыления в вакууме с использованием стержневого резистивного испарителя (рис. 1).

Применение порошкового испарителя с повышенным запасом испаряемого материала позволило значительно расширить возможности метода. Для научного обоснования и более широкого использования этого метода на основе оптимизации технологических режимов обработки покрываемой детали необходимо провести дополнительные исследования влияния параметров процесса напыления на тепловое состояние детали во время формирования покрытия.

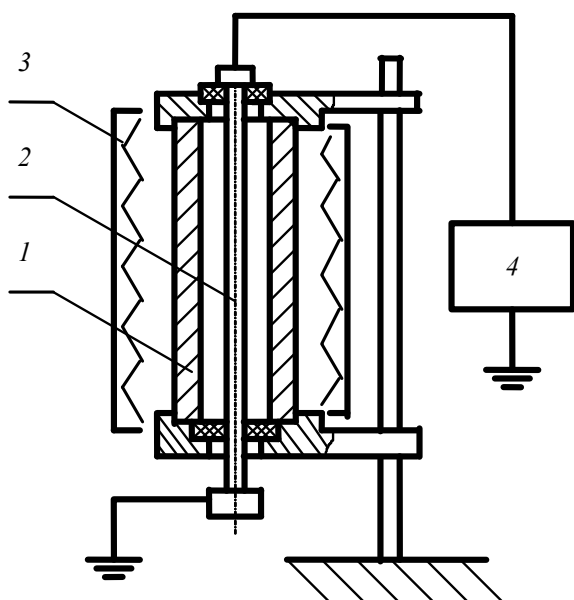


Рис. 1. Схема нанесения покрытия на полые детали: 1 – деталь; 2 – испаритель; 3 – нагреватель; 4 – источник тока

Fig. 1. Coating scheme for hollow parts: 1 - detail; 2 - evaporator; 3 - heater; 4 - current source

В работах [7, 8] рассмотрены тепловые процессы при вакуумном конденсационном напылении металлических покрытий на внутреннюю поверхность полых детали с соосно расположенного стержневого резистивного испарителя; разработана математическая модель теплового состояния детали во время напыления покрытия; составлен алгоритм и программа расчета температуры детали в зависимости от технологических режимов и условий напыления покрытия, что позволяет с достаточной для практики

точностью прогнозировать температуру детали во время формирования покрытия (например, в случае операции хромирования погрешность расчета не превышает 5 %).

Цель настоящих исследований: 1) проведение системного анализа температурного состояния покрываемой детали; 2) углубленное исследование изменения температуры детали в зависимости от параметров напыления и определение наиболее значимых параметров с применением метода математического моделирования; 3) нахождение рациональных путей оптимизации технологии напыления покрытия для исключения нежелательного перегрева обрабатываемой детали во время конденсации материала покрытия.

Тепловые процессы при вакуумном конденсационном напылении покрытий на полые детали с помощью стержневого испарителя

Уравнение теплового баланса, характеризующее тепловое состояние детали $q(t)$ во время напыления металлического покрытия исследуемым методом, имеет следующий вид:

$$q(t) = q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}} - q_{\text{дет.нар}} - q_{\text{фаз}} - q_{\text{тор}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{изл}}$ и $q_{\text{конд}}$ – соответственно, плотности потоков теплового излучения испарителя и теплоты конденсации, поступающих на покрываемую поверхность детали; $q_{\text{дет.нар}}$ – плотность теплового потока излучения наружной поверхностью детали; $q_{\text{фаз}}$ – плотность потока тепла, поглощаемого в результате эндотермической реакции фазового превращения, протекающего в материале покрываемой детали; $q_{\text{тор}}$ – плотность потока тепловых потерь за счет излучения с торцевой поверхности детали и теплопередачи на элементы крепления детали в технологической оснастке.

Величины $q_{\text{изл}}$ и $q_{\text{дет.нар}}$ согласно закону Стефана – Больцмана для случая теплообмена в системе коаксиально расположенных тел определяются на основе рекомендаций С. С. Кутателадзе [9], соответственно, выражениями:

$$q_{\text{изл}} = \varepsilon \sigma (T_{\text{исп}}^4 - T_{\text{конд}}^4) \frac{D_{\text{исп.тек}}}{D_{\text{вн.дет.тек}}}, \quad (2)$$

$$q_{\text{дет.нар}} = \varepsilon_{\text{дет-нагр}} \sigma (T_{\text{дет}}^4 - T_{\text{нагр}}^4) \frac{D_{\text{дет}}}{D_{\text{нагр}}}, \quad (3)$$

где σ – постоянная Стефана – Больцмана $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$,

$$\varepsilon = \frac{1}{1/\varepsilon_{\text{исп}} + \frac{d_{\text{исп.тек}}}{D_{\text{вн.дет.тек}}}(1/\varepsilon_{\text{конд}} - 1)} - \text{приведенный}$$

интегральный коэффициент черноты системы «испаритель – основа» (покрываемая поверхность); $\varepsilon_{\text{исп}}$ – интегральный коэффициент черноты материала испарителя; $\varepsilon_{\text{конд}}$ – интегральный коэффициент черноты конденсата;

$$d_{\text{исп.тек}} = d_{\text{исп0}} - \frac{2V_{\text{исп}}t}{\rho_{\text{исп}}} - \text{текущий диаметр стерж-$$

невого испарителя; $d_{\text{исп0}}$ – начальный диаметр испарителя; t – текущее время; $\rho_{\text{исп}}$ – плотность испаряемого материала;

$V_{\text{исп}} = 0,138\alpha \cdot p\sqrt{M/T_{\text{исп}}}$ ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$) – скорость испарения по Ленгмюру, где α – коэффициент испарения; p – упругость паров; M – молекулярная масса испаряемого материала; $T_{\text{исп}}$ – температура испарения, $T_{\text{конд}}$ – температура конденсации, $D_{\text{вн.дет}}$ и $D_{\text{вн.дет.тек}} = (D_{\text{вн.дет}} - 2h)$ – начальный и текущий диаметры покрываемого отверстия, h – толщина покрытия, $\varepsilon_{\text{дет-нагр}} =$

$$= \frac{1}{1/\varepsilon_{\text{дет}} + \frac{D_{\text{дет}}}{D_{\text{нагр}}}(1/\varepsilon_{\text{нагр}} - 1)} - \text{приведенный инте-}$$

гральный коэффициент черноты системы «деталь – нагреватель»; $\varepsilon_{\text{дет}}$ – интегральный коэффициент черноты наружной поверхности детали; $\varepsilon_{\text{нагр}}$ – интегральный коэффициент черноты поверхности нагревателя; $T_{\text{дет}}$ – температура наружной поверхности детали; $T_{\text{нагр}}$ – температура поверхности нагревателя; $D_{\text{дет}}$ – наружный диаметр покрываемой детали; $D_{\text{нагр}}$ – диаметр нагревателя.

Плотность потока теплоты конденсации $q_{\text{конд}}$ описывается уравнением [9]

$$q_{\text{конд}} = V_{\text{конд}} [c(T_{\text{исп}} - T_{\text{конд}}) + u], \quad (4)$$

где c – удельная теплоемкость материала покрытия; u – удельная теплота сублимации;

$$V_{\text{конд}} = V_{\text{исп}} \frac{d_{\text{исп.тек}}}{D_{\text{вн.дет.тек}}} - \text{скорость конденсации ма-}$$

териала по массе.

Ввиду высокой интенсивности режимов нанесения покрытий ($T_{\text{исп}} = 1650 \dots 1800 \text{ К}$, $V_{\text{конд}} = 2 \dots 12 \text{ мкм/мин}$ [10, 11]), хорошей теплоизоляции покрываемой детали от элементов технологической оснастки камеры напыления принимаем, что тепло в детали распространяется только в радиальном направлении; испарение материала происходит равномерно по всей длине испарителя; перераспределением тепла вдоль

детали и тепловыми потерями с поверхности торцов $q_{\text{тор}}$ к элементам технологической оснастки пренебрегаем. Не учитываем также влияние теплоты эндотермической реакции фазового перехода $q_{\text{фаз}}$, поскольку покрытия наносят обычно при температурах, не превышающих температуру фазовых превращений материала детали, как это отмечается в работах [10, 11].

Таким образом, с учетом высказанных допущений уравнение теплового баланса (1) примет вид

$$q(t) = q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}} - q_{\text{дет.нагр}}. \quad (5)$$

Сравнительный анализ влияния теплового излучения испарителя и теплоты конденсации на температуру основы (поверхности напыления)

К настоящему времени о влиянии теплового излучения испарителя и теплоты конденсации пара на температуру основы опубликовано небольшое число работ. Данные их неоднозначны и в некоторой степени противоречивы.

Например, по результатам измерений температуры стекла на разных этапах формирования пленки при исследовании тепловых процессов при напылении тонких пленок никеля на стекло со скоростью конденсации 1 нм/с был сделан вывод, что основной вклад в разогрев основы вносит теплота конденсации, поскольку резкое повышение температуры наблюдалось только во время конденсации пленки [12].

Вклад обеих составляющих – теплового излучения испарителя и теплоты конденсации пара – в нагрев основы приблизительно одинаков: при напылении пленки из золота прирост температуры, вызванный теплотой конденсации, уменьшается примерно на 400 К при снижении скорости конденсации от 10 до 1 нм/с.

Таким образом, исследования показали, что при малых скоростях конденсации (менее 10^{-4} мкм/с) основной вклад в разогрев основы вносит тепловое излучение испарителя. В диапазоне скоростей конденсации $5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-2}$ мкм/с теплота конденсации соизмерима с теплотой излучения и их влияние равнозначно. При скоростях конденсации более 10^{-2} мкм/с тепловым излучением испарителя можно пренебречь и считать, что покрываемая поверхность разогревается только за счет выделения теплоты конденсации.

Из анализа немногочисленных работ, посвященных исследованию температуры поверхности конденсации во время нанесения покрытий, следует, что интенсивность ее нагрева зависит

главным образом от температуры испарения и скорости конденсации.

Как уже отмечалось, при конденсационном способе получения покрытий нагрев основы обусловлен действием суммарного теплового потока $q_{\text{сум}}$, который складывается из двух потоков – теплоизлучения испарителя $q_{\text{изл}}$ и теплоты конденсации $q_{\text{конд}}$ пара напыляемого материала: $q_{\text{сум}} = q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}}$.

Для оценки доли вклада в разогрев напыляемой поверхности теплоизлучения испарителя $\delta_{\text{изл}} = q_{\text{изл}} / (q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}})$ и доли вклада теплоты конденсации $\delta_{\text{конд}} = q_{\text{конд}} / (q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}})$ проведен анализ расчетных величин $\delta_{\text{изл}}$ и $\delta_{\text{конд}}$ при напылении покрытий из хрома (рис. 2).

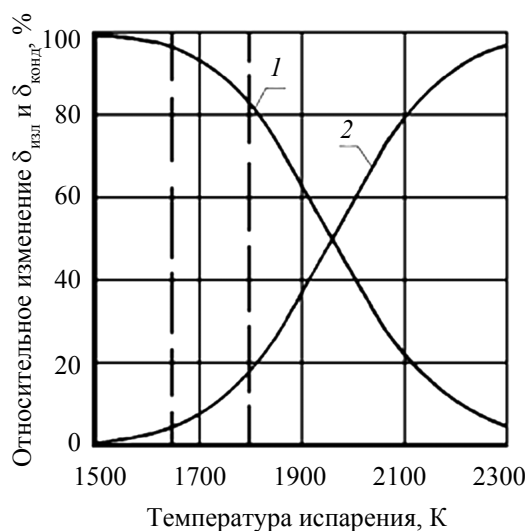


Рис. 2. Влияние температуры испарения $T_{\text{исп}}$ хрома на величину доли вклада в разогрев поверхности конденсации: от теплоизлучения испарителя $\delta_{\text{изл}}$ и от теплоты конденсации $\delta_{\text{конд}}$; график 1 – $\delta_{\text{изл}} = q_{\text{изл}} / (q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}})$; график 2 – $\delta_{\text{конд}} = q_{\text{конд}} / (q_{\text{изл}} + q_{\text{конд}})$; штриховыми вертикальными линиями отмечены границы наиболее вероятного интервала температур испарения при конденсационном напылении хромовых покрытий

Fig. 2. Influence of evaporation temperature T_{evap} chromium on the value of the contribution share to the heating of the condensation surface: from the heat radiation of the evaporator δ_{rad} and from the heat of condensation δ_{cond} : chart 1 – $\delta_{\text{rad}} = q_{\text{rad}} / (q_{\text{rad}} + q_{\text{cond}})$; chart 2 – $\delta_{\text{cond}} = q_{\text{cond}} / (q_{\text{rad}} + q_{\text{cond}})$; dashed vertical lines mark the boundaries of the most probable evaporation temperature range during condensation spraying of chromium coatings

Расчеты выполнены для следующих условий: начальная температура конденсации $T_{\text{конд}0} = 750$ К; диаметр отверстия детали $D_{\text{вн,дет}} = 10$ мм; диаметр испарителя $d_0 = 3,0$ мм; коэффициент

испарения хрома $\alpha_{\text{ср}} = 0,5$; степени черноты: хрома на испарителе $\epsilon_{\text{исп}} = 0,7$, хромового покрытия $\epsilon_{\text{конд}} = 0,18$; наружной поверхности стальной детали $\epsilon_{\text{дет}} = 0,6$, внутренней поверхности нагревателя $\epsilon_{\text{нагр}} = 0,7$ с использованием данных о физических свойствах рассматриваемых материалов, приведенных в изданиях [13–15].

Из рис. 2 видно, что по мере повышения температуры испарения хрома доля $\delta_{\text{конд}}$ – удельного теплового потока конденсации $q_{\text{конд}}$ (график 2) в суммарном тепловом потоке $q_{\text{сум}}$ постепенно увеличивается, и при температурах испарения выше $T_{\text{исп}} = 1950$ К эта доля преобладает с постоянным возрастанием. При этом доля $\delta_{\text{изл}}$ – удельного теплового потока излучения $q_{\text{изл}}$ испарителя (график 1) закономерно уменьшается.

Для объяснения характера изменения величин $\delta_{\text{изл}}$ и $\delta_{\text{конд}}$ проанализируем отношение $q_{\text{изл}}/q_{\text{конд}}$, которое в соответствии с уравнениями (2) и (4) имеет вид

$$\frac{q_{\text{изл}}}{q_{\text{конд}}} = \frac{\epsilon\sigma(T_{\text{исп}}^4 - T_{\text{конд}}^4)}{[c(T_{\text{исп}} - T_{\text{конд}}) + q]V_{\text{исп}}}. \quad (6)$$

Преобразуем выражение (6), учитывая реальные условия и влияние параметров напыления на процесс формирования покрытий. При нанесении покрытий из хрома температура испарения $T_{\text{исп}}$ выше температуры конденсации $T_{\text{конд}}$ примерно в 2 раза, что характерно для технологии хромирования стальной поверхности [16]. Отсюда получаем, что значение $T_{\text{исп}}^4$ превышает значение $T_{\text{конд}}^4$ почти в 16 раз. Следовательно, числитель в этом уравнении можно представить в виде $\epsilon\sigma T_{\text{исп}}^4$, а разность $T_{\text{исп}} - T_{\text{конд}}$ в знаменателе заменить на множитель $0,5T_{\text{исп}}$.

В результате получим более простое для анализа отношение удельных тепловых потоков $q_{\text{изл}}$ и $q_{\text{конд}}$:

$$\frac{q_{\text{изл}}}{q_{\text{конд}}} = \frac{\epsilon\sigma(T_{\text{исп}}^4)}{(0,5cT_{\text{исп}} + q)V_{\text{исп}}}. \quad (7)$$

Погрешность расчета при таком преобразовании не превышает 7%. Используя зависимость, характеризующую давление насыщенного пара p от температуры испарения T – $\log p = -\frac{20680}{T} + 16,685 - 1,31 \cdot \log T$, приведен-

ную в справочном издании [17], запишем уравнение скорости испарения $V_{\text{исп}}$ хрома по Ленгмюру в более явном виде:

$$V_{исп} = 10^{16,685 + \lg \alpha - \frac{20680}{T_{исп}} - 1,31 \cdot \lg T_{исп}} \quad (8)$$

Полученные выражения (7) и (8) позволяют судить об изменении отношения $q_{изл}/q_{конд}$ в зависимости от температуры испарения $T_{исп}$.

С повышением температуры испарения на 10 % числитель в уравнении (7) увеличивается в 1,5 раза, а знаменатель за счет изменения скорости испарения $V_{исп}$ (другие параметры практически не изменяются) возрастает в $10^{-0,075 + 1880/T_{исп}}$ раз, что по результатам исследований для интервала температур испарения хрома $T_{исп} = 1600 \dots 2000$ К составляет примерно 10 раз.

Следовательно, повышение температуры испарения при напылении покрытия способствует более интенсивному росту величины теплоты конденсации в суммарном тепловом потоке, воздействующем на деталь, т. е. более сильному ее влиянию на нагрев основы и детали в целом по сравнению с заметно меньшим ростом величины теплового излучения испарителя.

В соответствии с рис. 2 при наиболее вероятных температурах испарения хрома 1650...1800 К (например, в процессе вакуумного конденсационного хромирования втулок с малым диаметром отверстия) основной вклад в разогрев покрываемой поверхности отверстия вносит тепловое излучение испарителя. Его доля составляет 85-97 %; остальная, меньшая доля – 15-3 % – приходится на нагрев поверхности за счет теплоты конденсации.

Таким образом, чтобы уменьшить тепловую нагрузку на обрабатываемую деталь, формирование покрытия необходимой толщины следует производить за более короткое время, т. е. при более высокой температуре испарения, обеспечивающей высокую скорость испарения материала и, соответственно, высокую скорость конденсации покрытия.

Параметры вакуумного конденсационного напыления покрытий, влияющие на температуру полой детали

Для исследования определены следующие параметры, которые в соответствии с уравнениями (2)–(4) в разной степени влияют на изменение температуры обрабатываемой детали.

1. Параметры способа нанесения покрытия: начальный диаметр стержневого резистивного испарителя $d_{исп0}$, температура испарителя $T_{исп}$, продолжительность нанесения покрытия $\tau_{нан}$, начальная температура конденсации $T_{конд0}$, диаметр нагревателя $D_{нагр}$, температура нагревателя $T_{нагр}$.

2. Параметры детали: диаметр отверстия $D_{вн.дет}$, наружный диаметр детали $D_{дет}$.

Теплофизические параметры испарителя ($\epsilon_{исп}$, $\epsilon_{конд}$, c , u), покрываемой детали ($\epsilon_{дет}$, a , λ) и нагревателя ($\epsilon_{нагр}$), которые для определенного испаряемого материала покрытия, материала обрабатываемой детали, а также материала нагревателя были приняты неизменными и в данной работе не рассматривались.

Исследование степени влияния параметров вакуумного конденсационного напыления покрытий на температуру детали проведено методом моделирования ее теплового состояния в соответствии с рекомендациями авторов статьи «Математическая модель теплового состояния основы в процессе вакуумного хромирования полых деталей» на примере хромирования внутренней поверхности полых осесимметричных деталей из стали марки 50РА.

Также по результатам ранее выполненных работ авторов настоящей статьи наиболее характерные значения параметров хромирования: температура испарителя $T_{исп} = 1670 \dots 1790$ К; начальная температура конденсации $T_{конд.0} = 600 \dots 900$ К; продолжительность нанесения покрытия $\tau_{нан} = 8$ мин; диаметр испарителя начальный $d_{исп0} = 3,0 \text{--} 4,0$ мм; температура нагревателя $T_{нагр} = 600$ К; диаметр нагревателя $D_{нагр} = 80$ мм.

Диаметр покрываемого отверстия $D_{вн.дет} = 7,5 \dots 25$ мм, наружный диаметр детали $D_{дет} = 27,5 \dots 45$ мм.

Результаты моделирования теплового состояния полой детали при вакуумном конденсационном хромировании отверстия

Зависимости температуры детали $T_{дет}$ от параметров процесса хромирования: температуры испарителя $T_{исп}$, начальной температуры конденсации $T_{конд0}$, начального диаметра испарителя $d_{исп}$, диаметра покрываемого отверстия $D_{вн.дет}$ иллюстрируются рис. 3–6. Применение разработанной авторами статьи математической модели теплового состояния основы в процессе вакуумного хромирования полых деталей позволило более углубленно проанализировать изменение температуры детали $T_{дет}$ в течение довольно продолжительного времени напыления покрытия.

Из рис. 3 следует, что повышение температуры испарителя $T_{исп}$ в интервале 1670...1790 К приводит к заметному росту температуры обрабатываемой детали $T_{дет}$. При этом чем более продолжительный процесс напыления, тем более существенный рост температуры детали.

Например, если диаметр отверстия $D_{вн.дет} = 10$ мм, то на начальном этапе напыления хро-

ма $t = 2$ мин рост температуры детали $T_{\text{дет}}$ составляет 3,2 %; при увеличении продолжительности напыления до $t = 8$ мин рост температуры почти вдвое больше – 5,6 %. С увеличением диаметра отверстия $D_{\text{вн.дет}}$ до 20 мм влияние

температуры испарителя $T_{\text{исп}}$ усиливается: на начальном этапе хромирования $t = 2$ мин рост температуры покрываемой детали составляет около 5 %, а при продолжительности процесса хромирования $t = 8$ мин – почти 8,5 %.

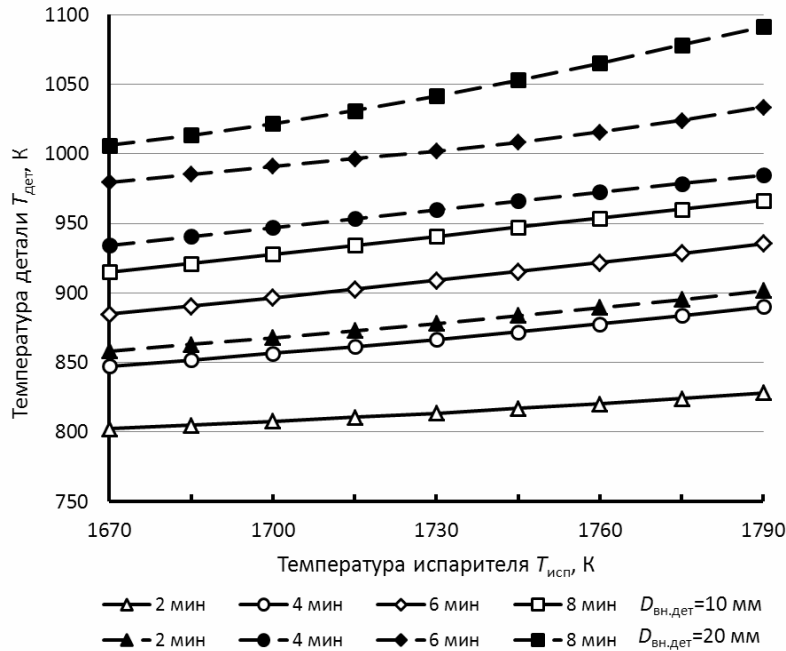


Рис. 3. Изменение температуры детали $T_{\text{дет}}$ в процессе напыления в зависимости от температуры испарителя $T_{\text{исп}}$ ($T_{\text{конд0}} = 750$ К, $d_{\text{исп0}} = 3,5$ мм, $D_{\text{дет}} = 30$ мм)

Fig. 3. Changing the temperature of the part T_{part} in the process of spraying depending on the temperature of the evaporator T_{evap} ($T_{\text{конд0}} = 750$ К, $d_{\text{evap0}} = 3.5$ мм, $D_{\text{part}} = 30$ мм)

Для объяснения полученной закономерности изменения температуры детали $T_{\text{дет}}$ в зависимости от температуры испарителя $T_{\text{исп}}$ проанализируем уравнения (2) и (4), которые характеризуют тепловое состояние системы «деталь – испаритель». Очевидно, что при повышении температуры испарителя $T_{\text{исп}}$ увеличиваются величины плотности тепловых потоков излучения испарителя $q_{\text{изл}}$ и теплоты конденсации $q_{\text{конд}}$, воздействующих на покрываемую поверхность, вызывающих рост температуры детали $T_{\text{дет}}$. Поскольку в расчетах, использованных для построения графических зависимостей на рис. 3, наружный диаметр детали принят постоянным – $D_{\text{дет}} = 30$ мм, то естественно, что увеличение диаметра покрываемого отверстия будет сопровождаться уменьшением толщины стенки детали и одновременным снижением массы детали. Отсюда вполне понятно, почему при таких условиях хромирования с увеличением диаметра отверстия $D_{\text{вн.дет}}$ наблюдаем более интенсивный нагрев обрабатываемой детали, что согласуется

с закономерностями теплообмена, описанного С. С. Кутателадзе [18].

Влияние начальной температуры конденсации $T_{\text{конд0}}$ на температуру детали $T_{\text{дет}}$ во время напыления хромового покрытия показано на рис. 4. Прежде следует заметить, что начальная температура конденсации $T_{\text{конд0}}$ равна исходной температуре детали, до которой она была подогрета до начала процесса напыления ($T_{\text{дет.нач}} = T_{\text{конд0}}$).

Наблюдается очевидная закономерность: чем больше величина начальной температуры конденсации $T_{\text{конд0}}$, тем до более высокой температуры (по сравнению с исходной) нагревается деталь во время процесса хромирования. При этом по мере увеличения продолжительности напыления покрытия темп роста температуры нагрева детали замедляется. Так, на начальном этапе напыления $t = 2$ мин рост температуры детали $T_{\text{дет}}$ при повышении начальной температуры конденсации $T_{\text{конд0}}$ в интервале 600...900 К составляет 38,5 %, а при увеличенной до $t = 8$ мин

продолжительности процесса она изменяется всего лишь на 15,5 %.

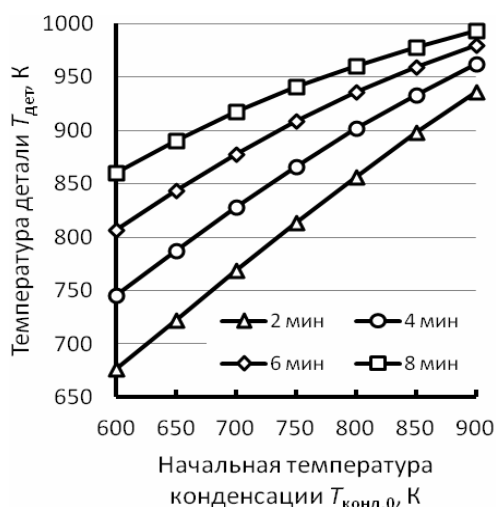


Рис. 4. Изменение температуры детали $T_{дет}$ в процессе напыления в зависимости от начальной температуры конденсации $T_{конд,0}$ ($T_{исп} = 1730$ К, $d_{исп0} = 3,5$ мм, $D_{вн,дет} = 10$ мм, $D_{дет} = 30$ мм)

Fig. 4. Changing the temperature of the part T_{part} in the process of spraying depending on the initial condensation temperature T_{cond0} ($T_{evap} = 1730$ К, $d_{evap0} = 3.5$ mm, $D_{int.diam} = 10$ mm, $D_{part} = 30$ mm)

Ослабление влияния начальной температуры конденсации $T_{конд,0}$ (при высоких численных значениях этого параметра) на изменение температуры детали $T_{дет}$ связано с уменьшением плотности теплового потока ($q = q_{изл} + q_{конд}$), поступающего на покрываемую поверхность детали, что вытекает из анализа уравнений (2) и (4).

Изменение температуры детали $T_{дет}$ в ходе конденсационного хромирования поверхности отверстия мало зависит от размера начального диаметра испарителя $d_{исп0}$ (рис. 5). На начальном этапе процесса напыления ($t = 2$ мин) температура детали повышается незначительно – лишь на 1,2 %, а при более длительном напылении покрытия ($t = 8$ мин) рост температуры детали несколько больше – 2,6 %.

При постоянной температуре испарителя $T_{исп}$ чем больше его диаметр $d_{исп0}$, тем выше плотность потока теплового излучения испарителя $q_{изл}$, что следует из уравнения (2). Одновременно с этим согласно уравнению (4) увеличивается скорость конденсации испаряемого материала и повышается плотность потока теплоты конденсации $q_{конд}$. В итоге повышение плотности общего теплового потока, направленного на покрываемую поверхность, приводит к росту температуры детали (хотя и незначительному).

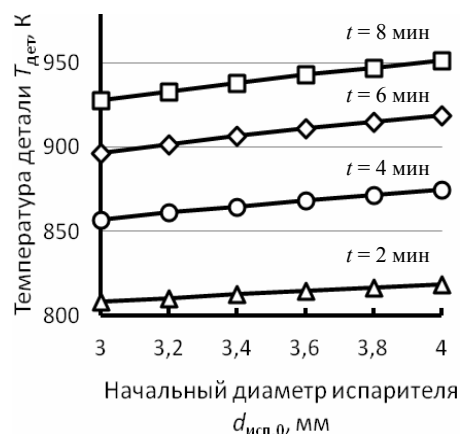


Рис. 5. Изменение температуры детали $T_{дет}$ в процессе напыления в зависимости от начального диаметра испарителя $d_{исп0}$ ($T_{исп} = 1730$ К, $T_{конд0} = 750$ К, $D_{вн,дет} = 10$ мм, $D_{дет} = 30$ мм)

Fig. 5. Temperature change of the part T_{part} in the process of spraying depending on the initial diameter of the evaporator d_{evap0} ($T_{evap} = 1730$ К, $T_{cond0} = 750$ К, $D_{int.diam} = 10$ mm, $D_{part} = 30$ mm)

Применение метода математического моделирования в исследовании теплового состояния полых детали позволило получить весьма полезные сведения для практического использования при проектировании и реализации технологии конденсационного напыления металлических покрытий.

В результате исследований установлено (рис. 6), что с увеличением диаметра отверстия $D_{вн,дет}$ при неизменном наружном диаметре детали ($D_{дет} = 30$ мм), когда толщина стенки неизбежно уменьшается $H_{дет} = 0,5 \cdot (D_{дет} - D_{вн,дет})$, происходит существенный рост температуры детали $T_{дет}$. На начальном этапе напыления покрытия ($t = 2$ мин) температура детали повышается на 19,7 %, а после продолжительного напыления покрытия ($t = 8$ мин) рост температуры достигает 28,3 %.

В случае увеличения диаметра отверстия $D_{вн,дет}$ при неизменной толщине стенки детали $H_{дет}$, например, $H_{дет} = 0,5 \cdot (D_{дет} - D_{вн,дет}) = \text{const} = 10$ мм, рост температуры детали $T_{дет}$ замедляется: в начальный период хромирования ($t = 2$ мин) на 1,8 %, а при длительном напылении покрытия ($t = 8$ мин) на 4,4 %.

Влияние размера полости детали, т. е. диаметра ее отверстия $D_{вн,дет}$, на характер изменения температуры детали $T_{дет}$ во время напыления покрытия можно объяснить следующим образом.

По мере увеличения диаметра отверстия $D_{вн,дет}$ при неизменном наружном диаметре $D_{дет} = 30$ мм толщина стенки $H_{дет}$ и, соответственно, масса детали уменьшаются, скорость ее нагрева возрастает, что вызывает более интенсивный

рост температуры покрываемой детали, что также отмечается в работе С. С. Кутателадзе (рис. 6).

По мере увеличения диаметра отверстия $D_{\text{вн.дет}}$, но при неизменной толщине стенки $H_{\text{дет}}$ одновременно увеличиваются наружный диаметр

$D_{\text{дет}}$, площадь наружной поверхности и масса детали. Благодаря этому интенсивность нагревания детали замедляется, величина теплового потока излучения ее наружной поверхностью согласно уравнению (3) возрастает, что в итоге влечет за собой снижение температуры детали $T_{\text{дет}}$.

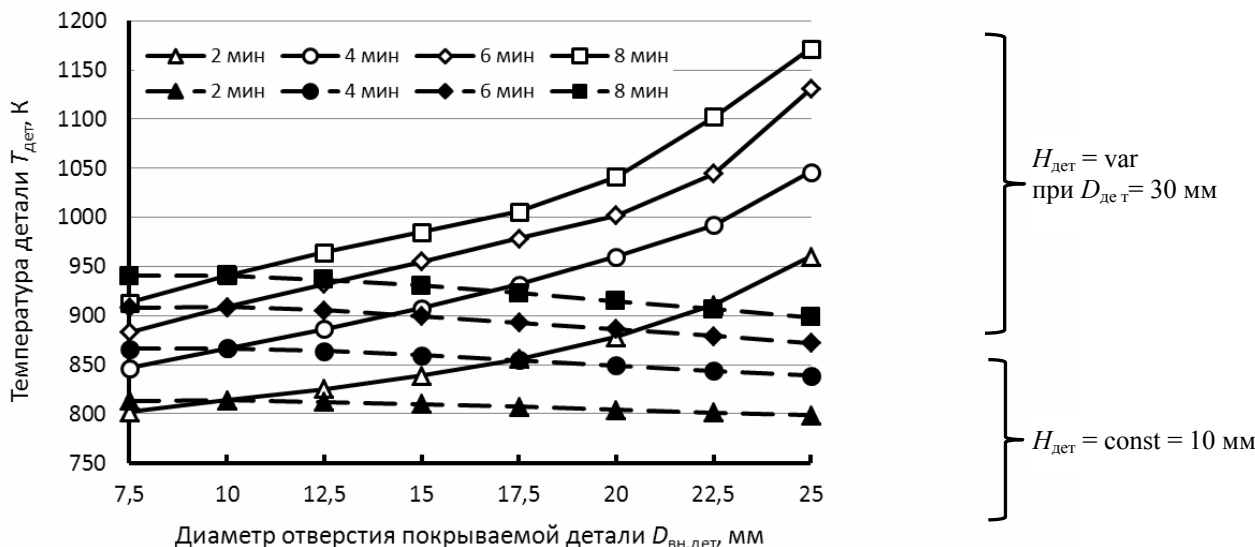


Рис. 6. Изменение температуры детали $T_{\text{дет}}$ в процессе напыления в зависимости от диаметра отверстия $D_{\text{вн.дет}}$ ($T_{\text{исп}} = 1730$ К, $T_{\text{конд0}} = 750$ К, $d_{\text{исп0}} = 3,5$ мм)

Fig. 6. Changing the temperature of the part T_{part} during the spraying process depending on the diameter of the hole $D_{\text{int.diam}}$ ($T_{\text{evap}} = 1730$ К, $T_{\text{cond0}} = 750$ К, $d_{\text{evap0}} = 3.5$ mm)

Построена гистограмма (рис. 7) относительного изменения температуры полый детали $T_{\text{дет}}$ в процессе вакуумного конденсационного хромирования отверстия при увеличении на 1 % численной величины каждого из исследуемых параметров напыления ($T_{\text{исп}}$, $T_{\text{конд0}}$, $d_{\text{исп0}}$, $D_{\text{вн.дет}}$). Выполнен сравнительный анализ степени влияния параметров на температуру полый детали.

Выявлено, что доминирующее влияние на рост температуры детали $T_{\text{дет}}$ в процессе конденсационного хромирования полых деталей оказывает температура испарителя $T_{\text{исп}}$ (рис. 7). По мере увеличения продолжительности напыления повышение температуры испарителя на 1 % приводит к значительному росту температуры детали $T_{\text{дет}}$. Величина относительного роста параметра, характеризующая степень его влияния и значимость, находится в пределах 0,44...1,18 %.

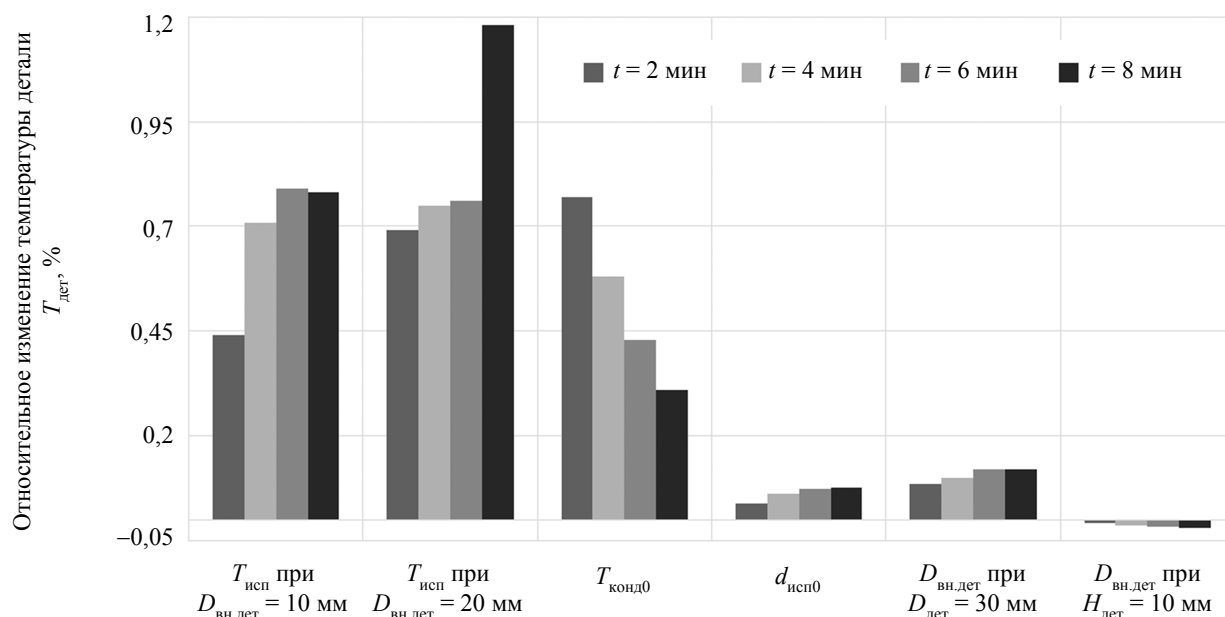
Установлено, что вторым параметром, существенно влияющим на повышение температуры детали $T_{\text{дет}}$, является начальная температура конденсации $T_{\text{конд0}}$. Однако по мере увеличения продолжительности напыления покрытия значимость этого параметра ослабевает, относи-

тельный показатель его влияния уменьшается от 0,77 до 0,31 %.

Роль других исследованных параметров напыления – диаметра покрываемого отверстия $D_{\text{вн.дет}}$ и начального диаметра испарителя $d_{\text{исп0}}$ – незначительна.

Например, при изменении диаметра покрываемого отверстия на 1% ($D_{\text{вн.дет}} = 7,5...25$ мм) при неизменном наружном диаметре $D_{\text{дет}} = 30$ мм температура детали $T_{\text{дет}}$ повышается на небольшую величину – от 0,08 до 0,12 %. Еще в меньшей степени на рост температуры детали $T_{\text{дет}}$ влияет изменение размера начального диаметра испарителя ($d_{\text{исп0}} = 3,0...4,0$ мм). При уменьшении диаметра испарителя на 1 % численные значения показателя, характеризующего степень влияния этого параметра очень низкие – в пределах 0,04...0,08 %.

В случае неизменной толщины стенки детали $H_{\text{дет}}$ (но при этом большем наружном ее диаметре) при увеличении размера отверстия на 1 % в диапазоне $D_{\text{вн.дет}} = 7,5...25$ мм нагрев детали во время напыления покрытия по мере увеличения продолжительности процесса сильно замедляется. Степень влияния названного параметра составляет от 0,007 до 0,02 %.



Изменение параметра вакуумного хромирования на 1 %

Рис. 7. Относительное изменение температуры полой детали $T_{дет}$ в процессе вакуумного конденсационного хромирования поверхности отверстия при увеличении на 1 % численной величины каждого параметра напыления – $T_{исп}$, $T_{конд0}$, $d_{исп0}$, $D_{вн.дет}$

Fig. 7. Relative temperature change of a hollow part $T_{дет}$ during the process of vacuum condensation chromizing of the hole surface with an increase of 1% in the numerical value of each spraying parameter – T_{evap} , T_{cond0} , d_{evap0} , $D_{int.diam}$

Выводы

1. Экспериментально-теоретическими исследованиями подтверждено, что формирование металлических покрытий на внутренней поверхности полых деталей методом вакуумного конденсационного напыления с соосно расположенного стержневого резистивного испарителя сопровождается нагревом обрабатываемой детали.

При обычных режимах технологии хромирования поверхности отверстий основной вклад в нагрев детали вносит тепловое излучение испарителя – 85-97 %; в меньшей степени деталь нагревается за счет выделения теплоты конденсации хрома – 15-3 %.

2. Результаты исследований и выполненный анализ степени влияния технологических параметров конденсационного хромирования на тепловое состояние полой детали, полученные на основе метода математического моделирования, позволили выявить наиболее значимые параметры, определяющие рост температуры детали $T_{дет}$ во время конденсации покрытия: а) температура испарителя $T_{исп}$ (доминанта) и б) начальная температура конденсации $T_{конд0}$.

3. Установлено, что одним из рациональных путей уменьшения перегрева детали во время конденсации покрытия является интенсифика-

ция технологических режимов напыления. Благодаря такому подходу за счет выбора максимально возможной температуры испарения $T_{исп}$ достигается высокая скорость испарения $V_{исп}$ напыляемого материала, и вследствие этого обеспечивается высокая скорость конденсации $V_{конд}$, сокращается продолжительность формирования покрытия необходимой толщины, а также снижается тепловая нагрузка на обрабатываемую деталь.

Библиографические ссылки

1. Bergter M., Bergmann E., Stouder D. PVD-Schichten für Maschintnelemente. Z. Metall, 43 Jahrgang, 1989, Heft 7, pp. 631-635.
2. Будовских Е. А., Громов В. Е., Романов Д. А. Механизм формирования высокой адгезии электровзрывных покрытий с основой металла // Доклады Академии наук России. 2013. Т. 449, № 1. С. 25–27.
3. Особенности формирования мезоструктуры покрытий при напылении электровзрывным методом / Д. А. Романов, В. Е. Громов, Е. А. Будовских, С. В. Панин // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 2. С. 15–19.
4. Лернер М. И. Современные технологии получения наноразмерных материалов. Томск : ТПУ, 2007. 76 с.
5. Vorozhtsov A., Rodkevich N., Lerner M., Zhukov A., Bondarchuk S., Dyachenko N. Metal nanoparticles in

high-energetic materials practice. *Int. J. Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2017, vol. 16, pp. 231-241.

6. Механизм формирования границы раздела покрытие – подложка при обработке проводников плазмой электрического взрыва / В. Д. Сарычев, С. А. Невский, Д. А. Романов, А. Ю. Грановский, А. Д. Филяков, К. В. Соснин // Деформация и разрушение материалов. 2018. № 11. С. 2–6.

7. Сидоренко В. И., Фефилов К. П. Тепловое состояние поверхности конденсации при нанесении металлических покрытий // Вестник ИжГТУ. 2000. № 1. С. 21–22.

8. Сидоренко В. И., Штенников И. В. Математическая модель теплового состояния основы в процессе вакуумного хромирования полых деталей // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т. 15, № 2. С. 71–76. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-2-71-75.

9. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

10. Роих И. Л., Колтунова Л. Н., Федосов С. Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. М. : Машиностроение, 1976. 368 с.

11. Мовчан Б. А., Малащенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев : Наукова думка, 1983. 232 с.

12. О причинах изменения температуры пленок в процессе конденсации их в вакууме / В. А. Буравихин [и др.] // Физика металлов и металловедение. 1970. Т. 29, № 6. С. 1314–1315.

13. Свойства элементов : в 2 ч. Ч. 1. Физические свойства / под ред. Г. В. Самсонова. М. : Metallurgiya, 1976. 600 с.

14. Излучательные свойства твердых материалов / под ред. А. Е. Шейндлина. М. : Энергия, 1974. 427 с.

15. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М. : Энергоатомиздат, 1988. 560 с.

16. Сидоренко В. И., Штенников И. В. К вопросу о слоистом строении вакуумных конденсатов хрома // Вестник ИжГТУ. 2007. № 1 (33). С. 50–53.

17. Смитлз К. Дж. Металлы. М. : Metallurgiya, 1980. 447 с.

18. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.

References

1. Bergter M., Bergmann E., Stouder D. PVD-Schichten für Maschinenelemente. *Z. Metall*, 43 Jahrgang, 1989, Heft 7, pp. 631-635.

2. Budovskikh E.A., Gromov V.E., Romanov D.A. [The mechanism of the formation of high adhesion of electrically explosive coatings with the base metal]. *Doklady Akademii nauk Rossii*, 2013, vol. 449, no. 1, pp. 25-27 (in Russ.).

3. Romanov D.A., Gromov V.E., Budovskikh E.A., Panin S.V. [Features of the formation of the mesostructure of coatings during sputtering by the electric-

explosion method]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2017, no. 2, pp. 15-19 (in Russ.).

4. Lerner M.I. *Sovremennye tekhnologii polucheniya nanorazmernykh materialov* [Modern technologies for producing nanoscale materials]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University, 2007, 76 p. (in Russ.).

5. Vorozhtsov A., Rodkevich N., Lerner M., Zhukov A., Bondarchuk S., Dyachenko N. Metal nanoparticles in high-energetic materials practice. *Int. J. Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2017, vol. 16, pp. 231-241.

6. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Romanov D.A., Granovskii A.Yu., Filyakov A.D., Sosnin K.V. [The mechanism of formation of the inter. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2018, no. 1, pp. 2-6 (in Russ.).

7. Sidorenko V.I., Fefilov K.P. [Thermal state of the condensation surface when applying metallic coatings]. *Vestnik IzhGTU*, 2000, no. 1, pp. 21-22 (in Russ.).

8. Sidorenko V.I., Shtennikov I.V. [Mathematical model of the thermal state of the base in the process of vacuum chrome plating of hollow parts]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2017, vol. 15, no. 2, pp. 71-76 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2017-2-71-75.

9. Kutateladze S.S. *Teplotperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie* [Heat transfer and hydrodynamic resistance]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 367 p. (in Russ.).

10. Roikh I.L., Koltunova L.N., Fedosov S.N. Nanesenie zashchitnykh pokrytii v vakuume [Vacuum coating]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 368 p. (in Russ.).

11. Movchan B.A., Malashenko I.S. *Zharostoikie pokrytiya, osazhdaemye v vakuume* [Heat-resistant coatings deposited in a vacuum]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983, 232 p. (in Russ.).

12. Buravikhin V.A. [About the reasons for the change in the temperature of the films in the process of their condensation in vacuum]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1970, vol. 29, no. 6, pp. 1314-1315 (in Russ.).

13. Samsonova G.V. (ed.). *Fizicheskie svoistva* [Physical properties]. Moscow, Metallurgiya Publ. 1976, 600 p. (in Russ.).

14. Sheindlina A.E. (ed.). *Izluchatel'nye svoistva tverdykh materialov* [Radiative properties of solid materials]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 427 p. (in Russ.).

15. Grigor'ev V.A., Zorin V.M. (eds.). *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki. Teplotekhnicheskii eksperiment* [Theoretical foundations of heat engineering. Thermal Engineering Experiment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 560 p. (in Russ.).

16. Sidorenko V.I., Shtennikov I.V. [On the question of the layered structure of chromium vacuum condensates]. *Vestnik IzhGTU*, 2007, no. 1, pp. 50-53 (in Russ.).

17. Smitlz K.Dzh. *Metally* [Metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980, 447 p. (in Russ.).

18. Kutateladze S.S. *Teplotperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie* [Heat transfer and hydrodynamic resistance]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 367 p. (in Russ.).

Research of the Effect of Parameters of Vacuum Condensation Deposition of Coatings on the Temperature of the Treated Detail

V.I. Sidorenko, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I.V. Shtennikov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The influence of parameters of the vacuum condensation deposition of a metallic coating using a rod resistive evaporator on the temperature of a hollow part during the formation of a coating layer on the surface of the hole has been studied.

It is shown that the heat sources of the evaporator and the heat of condensation of the vapor of the sprayed metal are sources of heating the workpiece.

In general, the ratio of the heat flux of the evaporator radiation and the heat of condensation depends on the nature of the condensable substance and the deposition parameters. It has been established that when choosing typical values of the parameters of the technology of condensation chrome plating of a steel part, the main contribution to its heating is made by the thermal radiation of the evaporator – 85-97 %; to a lesser extent, the part is heated by the heat of condensation of chromium – 15-3 %.

The following sputtering parameters are analyzed, which in different degrees affect the thermal state of the part: initial diameter of a core resistive evaporator $d_{\text{evap},0}$, evaporator temperature T_{evap} , duration of coating deposition τ_{dep} , initial condensation temperature $T_{\text{cond},0}$, diameter of the heater D_{heat} , temperature of the heater T_{heat} , diameter of the hole $D_{\text{int.diam}}$, outer diameter of the part D_{part} .

As a result of studies of the thermal state of the part during the deposition of the condensation chromium coating, performed using the method of mathematical modeling, the most significant parameters determining the temperature rise of the part T_{part} are calculated: a) evaporator temperature T_{evap} and b) initial condensation temperature $T_{\text{cond},0}$ of the coating.

When the most significant parameter changes by 1% – the evaporator temperature T_{evap} , the temperature rise of the part T_{part} during a long time of formation of the coating is from 0.44 to 1.18 %. The influence of the second significant parameter – the initial condensation temperature $T_{\text{cond},0}$ – on the growth of the part temperature is somewhat less. At the same time, the degree of influence of this parameter under the same coating deposition conditions gradually decreases from 0.77 to 0.31%. The role of the other studied parameters of deposition in the temperature variation of the part is of little importance.

One of the rational ways to reduce the unwanted overheating of the part during the condensation of the coating is the intensification of technological modes of deposition. Due to this approach, due to the choice of the maximum possible evaporation temperature T_{evap} , a high evaporation rate V_{evap} of the deposited material is achieved and, as a result, a high condensation rate V_{cond} is ensured, the duration of coating formation of the required thickness is reduced, and the heat load on the workpiece is also reduced.

Keywords: evaporation temperature, hollow parts, deposition parameters, condensation chrome plating.

Получено 29.04.2019

Образец цитирования

Сидоренко В. И., Штенников И. В. Исследование влияния параметров вакуумного конденсационного напыления покрытий на температуру обрабатываемой детали // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 2. С. 47–57. DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-47-57.

For Citation

Sidorenko V.I., Shtennikov I.V. [Research of the effect of parameters of vacuum condensation deposition of coatings on the temperature of the treated detail]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 47-57 (in Russ.). DOI 10.22213/2413-1172-2019-2-47-57.