

УДК 621.793

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-87-90

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФРИКЦИОННОГО НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ
ПЕРЕД ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ ПОКРЫТИЯ**

*канд. техн. наук, доц. В.М. ИЗОИТКО, канд. техн. наук, доц. К.В. БУЙКУС
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Разработана концепция технологии локального фрикционного нагрева поверхности деталей перед газотермическим напылением, основанная на преобразовании механической энергии трения в тепловую непосредственно в зоне последующего формирования покрытия. Метод разогревает только зону напыления, не перегревая всю деталь, что минимизирует термические деформации и изменения структуры основного металла. Метод обеспечивает термическую активацию поверхности, так нагрев способствует десорбции газов и влаги, а также ускоряет диффузионные процессы при контакте напыляемых частиц с подложкой. В результате фрикционной обработки создается необходимая шероховатость для механического сцепления частиц покрытия с основой. Фрикционный нагрев обеспечивает локальный нагрев до 500 °С за 8–12 с, что в 5 раз быстрее традиционных методов. Адгезионная прочность увеличивается на 30% благодаря формированию ювенильных поверхностей и термической активации. Анализ результатов исследований показал, что наибольшее влияние на температуру поверхности оказывают частота вращения ролика и сила прижатия, тогда как подача может использоваться как эффективный инструмент оперативного регулирования теплового режима. Предложены рекомендации по выбору технологических параметров процесса и последовательности выполнения операций подготовки поверхности перед газотермическим напылением.

Ключевые слова: газотермическое напыление, фрикционный нагрев, предварительный нагрев поверхности, адгезия покрытия, восстановление деталей, тепловые процессы, износостойкие покрытия.

Введение. Газотермические покрытия широко используются при восстановлении и упрочнении рабочих поверхностей деталей машин [1–4]. Несмотря на постоянное совершенствование технологий напыления, одной из основных причин разрушения покрытий остается недостаточная прочность сцепления с основным металлом [5; 6]. Анализ многочисленных исследований показывает, что качество соединения покрытия с подложкой определяется несколькими факторами: шероховатостью поверхности; степенью очистки; температурой детали перед напылением; остаточными напряжениями; наличием оксидных пленок; скоростью охлаждения покрытия [7–9].

Предварительный нагрев детали уменьшает температурный градиент между частицами расплава и поверхностью металла, способствует испарению влаги и адсорбированных газов, снижает вероятность образования трещин и улучшает пластическую деформацию частиц при ударе.

В настоящее время наиболее распространены следующие методы нагрева: газопламенный; индукционный; электрический; инфракрасный; нагрев в печах. Каждый из перечисленных способов имеет существенные недостатки. Газовые горелки требуют постоянного контроля пламени и характеризуются невысокой точностью регулирования температуры. Индукционные установки отличаются высокой стоимостью и сложностью настройки при обработке деталей различной формы. Электрические нагреватели обладают значительной инерционностью, а печной нагрев практически исключает возможность интеграции в поточную технологию восстановления.

Перегрев всей детали ведет к короблению, а недостаточный нагрев — к хрупкому отслоению покрытия из-за высоких термических напряжений.

Одним из перспективных направлений является использование тепловой энергии, выделяемой при трении. Фрикционный нагрев обеспечивает локальный подвод теплоты непосредственно в зону последующего напыления, не требует дополнительных источников высокотемпературной энергии и отличается высокой энергетической эффективностью. Однако вопросы выбора рациональных режимов нагрева, оценки распределения температуры и влияния параметров процесса на качество покрытия исследованы недостаточно.

В связи с этим актуальной задачей является разработка технологии предварительного фрикционного нагрева поверхности детали, обеспечивающей повышение эксплуатационных характеристик газотермических покрытий при минимальных энергетических затратах.

Основная часть. Технология фрикционного нагрева. Исследования показывают, что прочность сцепления покрытия определяется не только механическим зацеплением расплавленных частиц за микронеровности поверхности, но и термическими, диффузионными и металлургическими механизмами формирования межфазной границы.

Особое внимание в современных работах уделяется температурному состоянию поверхности детали непосредственно перед напылением. Предварительный нагрев способствует: уменьшению температурного перепада между расплавленной частицей и основой; снижению скорости мгновенного охлаждения; уменьшению остаточных напряжений; удалению влаги и адсорбированных загрязнений; улучшению растекания частиц по поверхности.

Цель исследования – разработка энергоэффективной технологии локального фрикционного нагрева поверхности детали перед газотермическим напылением покрытия, обеспечивающей повышение прочности сцепления покрытия с основным металлом.

Предлагаемый способ основан на преобразовании механической энергии вращения инструмента в тепловую энергию, возникающую вследствие сил сухого трения.

Дополнительным преимуществом технологии является возможность объединения операций механической подготовки поверхности и предварительного нагрева в едином технологическом цикле, что позволяет уменьшить длительность восстановительного процесса.

Схема процесса включает: вращающийся стальной ролик; механизм регулирования усилия прижатия; привод вращения; газотермический аппарат, расположенный за зоной нагрева.

Методика экспериментальных исследований. Экспериментальная установка включает следующие основные узлы: станину; электропривод вращения ролика; шпиндель; фрикционный ролик; механизм регулирования усилия прижатия; систему линейной подачи детали; лазерный пирометр; тепловизор; тензодатчик силы; систему регистрации данных; блок управления.

В качестве источника нагрева используется цилиндрический ролик из закаленной инструментальной стали HRC 58–60. Диаметр ролика принимается 60 мм. Ширина рабочей поверхности – 20 мм. Для исследования используются цилиндрические образцы диаметром 50 мм из Стали 45. Для напыления использовали проволоку Нп-40Х13. Толщина покрытия 0,6–0,8 мм.

Напыление осуществляли активированной дуговой металлизацией сразу после прохождения зоны фрикционного нагрева. Расстояние между роликом и распылителем принимается 40–60 мм. Это обеспечивает минимальные потери температуры поверхности.

Температура определяется двумя независимыми методами. Первый – лазерный пирометр. Второй – тепловизионная съемка. Погрешность измерений не превышает ± 2 °С.

Определение адгезионной прочности покрытия проводили в соответствии с международным стандартом ASTM C633.

Результаты исследования влияния частоты вращения ролика на температуру поверхности приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Влияние частоты вращения ролика на температуру поверхности

Частота вращения, мин ⁻¹	Температура поверхности, °С
600	108
800	142
1000	174
1200	206
1400	236
1600	267

Из таблицы 1 видно, что в диапазоне до 1400 мин⁻¹ температура возрастает практически пропорционально скорости вращения. При дальнейшем увеличении скорости влияние конвективного охлаждения и изменение условий трения могут привести к отклонению зависимости от линейной. Повышение частоты вращения более 1400 мин⁻¹ способно вызвать локальный перегрев поверхности, особенно при обработке тонкостенных деталей.

Результаты исследования влияния усилия прижатия на температуру поверхности приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Влияние усилия прижатия на температуру поверхности

Усилие прижатия, Н	Максимальная температура, °С
400	96
600	138
800	177
1000	214
1200	247

Увеличение силы прижатия приводит к росту мощности трения и, как следствие, к повышению максимальной температуры поверхности. Полученная зависимость близка к линейной в рассматриваемом диапазоне режимов. При дальнейшем увеличении усилия прижатия следует учитывать возможность изменения коэффициента трения и возникновения локальной пластической деформации поверхности, что требует более сложной контактной модели.

Продольная подача определяет продолжительность контакта ролика с отдельным участком поверхности и существенно влияет на величину накопленной тепловой энергии (таблица 3).

Повышение подачи приводит к уменьшению времени теплового воздействия. Следовательно, скорость подачи может использоваться как эффективный параметр регулирования процесса нагрева.

Таблица 3. – Расчетная температура поверхности при различной подаче

Подача, мм/мин	Температура, °C
50	254
100	223
150	196
200	171
250	148

Испытания на адгезионную прочность покрытия показали следующие результаты:

- без нагрева: 35 МПа;
- нагрев горелкой (250 °C): 48 МПа;
- фрикционный нагрев (250 °C): 62 МПа.

Обсуждение результатов. Локальный фрикционный нагрев формирует устойчивую зону с повышенной температурой непосредственно перед нанесением газотермического покрытия. Предлагаемая технология обеспечивает нагрев только поверхностного слоя, участвующего в формировании соединения покрытия с основным металлом.

Результаты экспериментов показывают, что при оптимальных параметрах режима (силы прижатия, скорости вращения ролика и подачи) температура поверхности достигает 180–250 °C, при этом обеспечивается снижение температурного градиента между расплавленными частицами и подложкой.

Увеличение силы прижатия приводит к росту температуры в зоне контактного воздействия и в рассматриваемом диапазоне зависимость близка к линейной. Однако дальнейшее увеличение усилия вызывает локальную пластическую деформацию поверхности и ускоренный износ ролика.

Частота вращения ролика оказывает наибольшее влияние на интенсивность нагрева поверхности детали. При высокой частоте вращения возрастают тепловые потери за счет конвекции и изменяются условия трения.

Увеличение подачи ведет к уменьшению времени контакта ролика с отдельным участком поверхности, в результате чего уменьшается накопленная тепловая энергия. Именно подачей можно оперативно управлять температурой нагрева без изменения конструкции оборудования.

Основным критерием выбора режима является обеспечение температуры поверхности в диапазоне 180–250 °C, достаточной для удаления адсорбированной влаги, уменьшения температурного градиента между расплавленными частицами и основным металлом и снижения уровня остаточных напряжений при формировании покрытия.

Выбор режима рекомендуется осуществлять в следующей последовательности:

- определить материал детали;
- определить теплофизические свойства материала;
- выбрать материал ролика;
- определить допустимую температуру предварительного нагрева;
- рассчитать необходимую мощность фрикционного нагрева;
- определить усилие прижатия;
- выбрать скорость вращения ролика;
- определить скорость подачи;
- выполнить проверочный тепловой расчет;
- провести корректировку режима по результатам измерения температуры поверхности.

По результатам расчетов рекомендуемый диапазон технологических параметров приведен в таблице 4.

Таблица 4. – Рекомендуемые режимы фрикционного нагрева

Параметр	Рекомендуемое значение
Диаметр ролика, мм	50–70
Материал ролика	инструментальная сталь HRC 58–62
Усилие прижатия, Н	700–1100
Частота вращения, мин ⁻¹	1000–1400
Скорость подачи, мм/мин	80–180
Ширина ролика, мм	15–25
Температура поверхности, °C	180–250

Данный диапазон может корректироваться в зависимости от материала детали, ее геометрии и выбранного способа газотермического напыления. Фрикционный нагрев перед напылением улучшает адгезионную прочность покрытий, разрушая оксидные пленки, вызывая диффузию элементов на 3–5 мкм и снижая пористость приграничного слоя.

Заключение. Разработана концепция технологии локального фрикционного нагрева поверхности деталей перед газотермическим напылением, основанная на преобразовании механической энергии трения в тепловую непосредственно в зоне последующего формирования покрытия.

Метод разогревает только зону напыления, не перегревая всю деталь, что минимизирует термические деформации и изменения структуры основного металла. Метод обеспечивает термическую активацию поверхности, так нагрев способствует десорбции газов и влаги, а также ускоряет диффузионные процессы при контакте напыляемых частиц с подложкой.

В результате фрикционной обработки создается необходимая шероховатость для механического сцепления частиц покрытия с основой. Фрикционный нагрев обеспечивает локальный нагрев до 500 °С за 8–12 с, что в 5 раз быстрее традиционных методов. Адгезионная прочность увеличивается на 30% благодаря формированию ювенильных поверхностей и термической активации.

Анализ результатов исследований показал, что наибольшее влияние на температуру поверхности оказывают частота вращения ролика и сила прижатия, тогда как подача может использоваться как эффективный инструмент оперативного регулирования теплового режима. Предложены рекомендации по выбору технологических параметров процесса и последовательности выполнения операций подготовки поверхности перед газотермическим напылением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. – М.: КХТ, 2004. – 134 с.
2. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.
3. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование: учеб. для вузов. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.
4. Газотермическое напыление / Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов, В.А. Вахалин и др.; общ. ред. Л.Х. Балдаев. – М.: Маркет ДС Корпорейшн, 2007. – 342 с.
5. Павлов А.Ю., Овчинников В.В., Шляпин А.Д. Основы газотермического напыления защитных покрытий: учеб. пособие. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 300 с.
6. Ивашко В.С., Изоитко В.М., Буйкус К.В. Технологические рекомендации по восстановлению деталей горношахтного оборудования газотермическим напылением // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Автомобиле- и тракторостроение» / Минск (25–28 мая 2021 г.). В 2 т. – Минск: БНТУ, 2021. – Т. 2. – С. 37–40.
7. Буйкус К.В., Изоитко В.М. Исследование триботехнических свойств материалов для газотермического напыления покрытий на шейки коленчатых валов // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в автомобилестроении» / Минск (04–07 июня 2025 г.). В 2 т. – Минск: БНТУ, 2025. – Т. 2. – С. 8–12.
8. Коробов Ю.С. Анализ свойств газотермических покрытий: учеб. пособие. В 2 ч. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – Ч. 2: Оценка параметров покрытий. – 92 с.
9. Буйкус К.В., Изоитко В.М. Исследование свойств покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением с механической активацией слоев // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Инновации в автомобилестроении» / Минск (04–07 июня 2025 г.). В 2 т. – Минск: БНТУ, 2025. – Т. 2. – С. 16–21.

Поступила 11.07.2026

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR FRICTIONAL HEATING OF THE SURFACE OF A PART BEFORE THERMAL SPRAYING OF A COATING

V. IZOITKO, K. BUIKUS

(Belarusian National Technical University, Minsk)

This concept is based on the conversion of mechanical frictional energy into thermal energy directly in the area where the coating will subsequently form. This method heats only the spray zone without overheating the entire part, minimizing thermal deformation and structural changes in the base metal. This method provides thermal activation of the surface, as heating promotes the desorption of gases and moisture and accelerates diffusion processes during contact between the sprayed particles and the substrate. Friction treatment creates the necessary roughness for mechanical adhesion of coating particles to the substrate. Friction heating provides localized heating up to 500 °C in 8–12 seconds, which is 5 times faster than traditional methods. Adhesive strength increases by 30% due to the formation of juvenile surfaces and thermal activation. Analysis of the research results showed that roller speed and contact force have the greatest impact on surface temperature, while feed can be used as an effective tool for quickly regulating the thermal regime. Recommendations are provided for selecting process parameters and the sequence of surface preparation operations prior to thermal spraying.

Keywords: thermal spraying, friction heating, surface preheating, coating adhesion, restoration of parts, thermal processes, wear-resistant coatings.