



Рис. 2. Зависимость безразмерной температуры  $\theta$  на поверхности заготовки от безразмерной координаты  $\gamma$  в момент положения центра пятна нагрева на краю полосовой области сканирования для коэффициентов перекрытия излучения:  
 $1 - K = 0,05$ ;  $2 - 0,10$ ;  $3 - 0,20$ ;  $4 - 0,30$ ;  $5 - 0,50$

На основе теоретических исследований показана зависимость неравномерности распределения температуры в заготовке по ширине полосовой области сканирования луча лазера от величины перекрытия пятна излучения. Для рассмотренных условий нагрева заготовки относительный перепад температуры между центром и краем полосовой области сканирования излучения лазера при изменении коэффициента перекрытия от 0,05 до 0,5 практически линейно увеличивается от 0,065 до 1,044.

#### Литература

1. Майоров, В. С. Лазерное упрочнение металлов / В. С. Майоров // Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. – Москва, 2009. – С. 439–469.
2. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443.
3. Целуева, С. Н. Температурное поле стальной заготовки при закалке сканированием излучения непрерывного лазера / С. Н. Целуева, М. Ю. Целуев, С. И. Красюк // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч.х ст. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2023. – Ч. 2. – С. 41–46.

УДК 669.017; 539.213

### АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ НАИЛУЧШУЮ АДГЕЗИЮ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

В. Ю. Процко, Д. Л. Стасенко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

*Показано, что предварительная обработка поверхности основы является важным фактором для обеспечения прочного сцепления напыленного слоя с материалом основы.*

*Отмечено, что необходимое условие для этого – подготовка поверхности основного материала путем удаления загрязнений и активации поверхности основы. Раскрыто, что анализ, обоснование и выработка рекомендаций по использованию механических свойств материалов, в том числе и композиционных, при нанесении покрытий методами газопламенного напыления покрытий – один из наиболее важных этапов исследования, который позволит не только объективно судить о поведении деталей при эксплуатации, но и активно управлять ресурсом их работы, воздействуя на состав, структуру, свойства и, естественно, технологию получения покрытий.*

**Ключевые слова:** газотермическое напыление, адгезия, технология и оснастка, подготовка поверхности, порошковый материал.

### **ANALYSIS OF PRE-TREATMENT METHODS PROVIDING, THE BEST ADHESION IN GAS-THERMAL SPRAYING**

**V. Yu. Protsko, D. L. Stasenko**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Pre-treatment of the base surface is an important factor in ensuring strong adhesion of the sprayed layer to the base material. A necessary condition for this is the preparation of the surface of the base material by removing contaminants and activating the surface of the base. Analysis, justification and development of recommendations on the use of mechanical properties of materials, including composites, when applying coatings using flame spraying methods of coatings is one of the most important stages of the study, which will allow not only to objectively judge the behavior of parts during operation, but also to actively manage their service life, influencing the composition, structure, properties and, naturally, the technology of obtaining coatings.*

**Keywords:** thermal spraying, adhesion, technology and equipment, surface preparation, powder material.

При проведении газотермического напыления на воздухе большое значение имеет предварительная подготовка поверхности детали перед напылением, так как состояние поверхности определяет качество адгезионной связи на границе раздела «покрытие – основа». Выполненные рядом исследователей работы по изучению работоспособности деталей с покрытиями убедительно показали, что основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалом покрытия и основы. По указанной причине серьезным ограничением на пути более широкого применения изделий, упрочненных покрытиями, следует считать прочность сцепления.

Предварительная обработка поверхности основы – важный фактор для обеспечения прочного сцепления напыленного слоя с материалом основы. Необходимое условие для этого – подготовка поверхности основного материала путем удаления загрязнений и активации поверхности основы.

К основным технологическим приемам активации относятся: повышение шероховатости поверхности; деформирование поверхности основы для создания напряженного состояния; предварительный нагрев изделия. Одним из технологических приемов является точение «рваной» резьбы с углом при вершине 55–60° и радиусом закругления 0,3–0,5 мм, угол резания – 80°, передний угол резца равен 0° или отрицателен (2–5°). Резец устанавливают в резцедержателе с вылетом 100–150 мм. Для получения необходимой шероховатости режущую кромку смещают ниже оси детали. Вибрация резца вызывает дробление металла на обрабатываемой поверхности, что приводит к шероховатости. Рекомендуются следующие значения шага рваной резьбы: при диаметре детали до 20 мм – 0,5 мм, 25–50 мм – 0,8–1,0 мм, 60–100 мм – 1,5 мм [1].

Используют и такой технический прием, как накатывание на восстанавливаемой или упрочняемой поверхности заготовки резьбы с замковым профилем. При подготовке к напылению наружных гладких цилиндрических поверхностей незакаленных деталей из материала, твердость которого не превышает 35 HRC, часто применяют косую сетчатую накатку [1]. При такой обработке прочность сцепления напыленного покрытия с основным металлом при испытаниях на сдвиг резко возрастает, достигая 100 МПа. Другим технологическим приемом является метод струйно-абразивной обработки поверхности. В качестве абразивных материалов для дробеструйной обработки используют стальную и чугунную крошку (дробь), корунд, карбид кремния, кварцевый песок. На процесс дробеструйной обработки влияет вид абразивного материала, форма, размеры, требования, предъявляемые к свойствам покрытий. Стальная крошка должна быть твердой (7500 МПа), остроугольной, свободной от ржавчины. Наилучшее качество поверхности получается при давлении сжатого воздуха 0,6 МПа. Также технологический прием активации – шлифование и ультразвуковая финишная обработка металлическими щетками, при которой снимается слой 0,5–2 мм и обеспечивается высокое качество поверхности с шероховатостью  $Ra$  10–50 мкм [1–3].

Существенное влияние на взаимодействие материалов при газотермическом напылении оказывает шероховатость основы. При подготовке поверхности основы для газотермического напыления необходимо учитывать физико-механические свойства поверхности и условия напыления. Так, при напылении частиц с низкой скоростью увеличение шероховатости ведет к росту прочности их с основой и повышению коэффициента напыления. Достигнув максимального значения, прочность сцепления начинает уменьшаться. При напылении высокоскоростных частиц увеличение высоты микронеровностей поверхности основы их взаимодействие в зоне контакта изменяет незначительно. С увеличением шероховатости наблюдаются следующие закономерные явления [1]: 1) уменьшается удельная площадь поверхности основы; 2) снижается концентрация микровыступов; 3) растет пластическая деформация вершин микровыступов при напылении; 4) ухудшаются условия взаимодействия во впадинах; 5) при соизмеримых с размерами напыляемых частиц и больших микронеровностях роль микровыступов в образовании связи невелика.

Для формирования равномерного и качественного покрытия на фасонных поверхностях необходимо обеспечить равномерное перемещение горелки, расположенной перпендикулярно поверхности на заданном расстоянии от детали, поскольку оптимальный режим напыления зависит от многих факторов, в том числе от угла и дистанции напыления. При малой дистанции напыления создается опасность деформации металла основы под влиянием термических напряжений, при больших расстояниях температура и скорость напыляемых частиц снижается, что приводит к образованию «рыхлого» покрытия и уменьшению прочности сцепления с основой. Определенное влияние на формирование покрытия при газопламенном напылении оказывает угол атаки, т. е. угол между направлением напыления и поверхностью основы. По мере уменьшения угла напыления возрастает пористость покрытия, снижаются коэффициент использования напыляемого материала, его плотность и прочность сцепления покрытия с основой, т. е. наилучшие характеристики покрытия получают при перпендикулярном направлении пламени горелки относительно напыляемой поверхности. Деформация напыляемых частиц происходит при соударении с поверхностью основы. В случаях, когда невозможно обеспечить этот угол, допускается отклонение от вертикали, но не более чем на 45°. В противном случае сильно снижается качество покрытия и возрастают потери порошка. Наиболее интенсивное напыление происходит по центру потока, где сосредотачиваются самые

крупные фракции наименее окисленных распыленных частиц. Основная масса напыляемого материала поступает по центру потока, где достигаются наилучшее сцепление с основой, минимальная пористость и окисление частиц. В наружной части факела материал напыляется с минимальной скоростью, при этом образуется окисленный слой частиц с высокой пористостью и плохим сцеплением с подложкой. Следовательно, при восстановлении криволинейных поверхностей необходимо обеспечить перпендикулярность пламени относительно напыляемой поверхности и равномерное перемещение горелки в горизонтальной плоскости с соблюдением фиксированной дистанции напыления [2, 10]. Решения этой задачи можно добиться путем копирования поверхности горелкой, расположенной на неизменном расстоянии напыления и зафиксированной от перемещения в вертикальном направлении.

На основе проведенного анализа установлено, что максимальная эффективная площадь контакта поверхности формируется при струйно-абразивной обработке основы. Рельеф поверхности в этом случае представлен совокупностью неориентированных в пространстве зубчатых выступов. После шлифования и ультразвуковой финишной обработки максимальная эффективная площадь контакта поверхности – меньше и примерно одинакова. Однако геометрия формируемых профилей сильно отличается. После шлифовки на поверхности образцов сохраняются направленные следы режущего инструмента, не удаленные в процессе шлифования и образующие острые риски. После ультразвуковой финишной обработки рельеф поверхности точения сглаживается, и формируется субмикрорельеф, состоящий из следов множественных ударов ультразвукового инструмента.

Отрыв покрытия, напыленного на основу после струйно-абразивной обработки, площадь очагов схватывания составляет около 53 %, что соответствует высоким показателям адгезионной прочности между покрытием и основой. На поверхности шлифованной основы площадь очагов схватывания составляет около 24 %, а на основе с ультразвуковой обработкой – около 38 %.

#### **Результаты оценки адгезии между покрытием и основой**

<b>Способы предварительной обработки поверхности</b>	<b>Исходная шероховатость основы <math>R_a</math>, мкм</b>	<b>Совокупная площадь очагов схватывания частиц и основы, %</b>
Струйно-абразивная	4,38	53
Шлифование	0,85	24
Ультразвуковая финишная обработка	0,7	38

Анализ, обоснование и выработка рекомендаций по использованию механических свойств материалов, в том числе и композиционных, при нанесении покрытий методами газопламенного напыления покрытий является одним из наиболее важных этапов исследования, который дает возможность не только объективно судить о поведении деталей при эксплуатации, но и осуществлять активное управление ресурсом их работы, воздействуя на состав, структуру, свойства и технологию получения покрытий. Максимальная прочность сцепления для всех композиций обеспечивается при параметре шероховатости  $R_a = 40–45$  мкм. На прочность сцепления влияет также способ обеспечения оптимальной шероховатости. При той же шероховатости прочность сцепления – больше у образцов, подвергнутых дробеструйной обработке. Очевидно, что при дробеструйной обработке кроме шероховатости на прочность

сцепления оказывает влияние повышение общей потенциальной энергии поверхности (наклеп). В поверхностях, подвергнутых дробеструйной обработке, запас поглощенной энергии будет больше, чем при лезвийной.

Таким образом, при подготовке поверхности основы для газотермического напыления с целью получения прочного соединения основы с покрытием необходимо учитывать перечисленные закономерности, а прочность сцепления покрытий достигает максимальных значений при  $R_z / d = 0,75$ , где  $d$  – диаметр напыляемой частицы. Наиболее высокая прочность сцепления отмечена при напылении порошком фракции 80–100 мкм [2].

#### Литература

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 1998. – 583 с.
2. Исследование адгезии покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением / В. А. Клименов, Ж. Г. Ковалевская, К. В. Зайцев, А. И. Толмачев // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310, № 3. – С. 57–61.
3. Процко, В. Ю. Анализ методов подготовки поверхности детали для нанесения покрытия напылением / В. Ю. Процко, Д. Л. Стасенко // МИТРО 2023 – Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника : тез. докл. науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых, Гомель, 6 дек. 2023 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2023. – С. 78.

УДК 621.838:621.891

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЗОВ МИКРОАВТОБУСОВ**

**П. Е. Родзевич**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

*Проведены расчеты приращений температур на поверхности трения тормозов микроавтобусов различных марок и моделей при экстренном однократном торможении.*

**Ключевые слова:** тормоз, фрикционное тепловыделение, приращения температур, тепловые потоки.

## **COMPARATIVE ANALYSIS AND EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF MINIBUS BRAKES**

**P. E. Radzevich**

*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

*Calculations were carried out of the temperature increase on the surface of the brakes of minibuses of various brands and models during a single emergency braking.*

**Keywords:** brakes, frictional heat generation, temperature increase, heat flows.

В настоящее время микроавтобусы используются для перевозки пассажиров и грузов на городских, пригородных и междугородных маршрутах. Безопасность пассажиров и других участников движения во многом зависит от исправности, эффективности работы и надежности основных агрегатов, механизмов и систем, в том числе тормозной системы. При проектировании тормозов микроавтобусов должны учитываться не только стабильность тормозного момента и высокая износостойкость