

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5482

УДК 620.17

Статья

Зависимость между параметрами вязкости и прочности сцепления газотермических покрытий деталей лесных машин

Тимохова Оксана Михайловна

кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» (Российская Федерация), chopochka@mail.ru

Бурмистрова Ольга Николаевна

Доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» (Российская Федерация) (Российская Федерация), oburmistrova@ugtu.net

Тимохов Роман Сергеевич

кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» (Российская Федерация), romeo1188@mail.ru

Получена: 10 ноября 2020 / Принята: 20 декабря 2020 / Опубликовано: 26 декабря 2020

Аннотация: В процессе эксплуатации на лесные машины действуют различные факторы, оказывающие существенное влияние на техническое состояние основных узлов, сборочных единиц и отдельных деталей. Значительный ущерб приносит воздействие коррозии на все незащищённые металлические поверхности. Её воздействие настолько ощутимо, что при разработке методов защиты специально выделяют коррозионную усталость, коррозионное растрескивание, коррозионно-механическое изнашивание. Однако по данным статистики, наиболее частой причиной необходимости замены той или иной детали становится механический износ. Изнашиваясь, сопрягаемые детали начинают взаимодействовать с отклонениями от начальных регулировок, это приводит к ещё более интенсивному износу контактирующих поверхностей. В связи с этим расширение спектра вторичного использования изношенных деталей открывает огромный резерв в экономической сфере. Об этом говорит опыт экономически развитых стран. Например, в США, по данным Ассоциации дилеров тракторных запчастей, более 500 предприятий непосредственно занимается восстановлением изношенных узлов и отдельных деталей. Эффективное использование ресурсов требует внедрения новых технологий — плазменных, денатационных и прочих,

которые позволяют повысить срок эксплуатации лесных машин, снизить энерго- и материалоёмкость производства. Применение (при ремонте и изготовлении деталей лесных машин) современных методов нанесения покрытий способствует значительному повышению их долговечности. Исследованы газотермические покрытия с содержанием молибдена для напыления на стальную подложку с использованием электрической дуги, плазменного напыления и высокоскоростного газоплазменного напыления. Экспериментальные исследования на прочность соединения при растяжении проводились с целью изучения степени адгезии, когезионной прочности покрытий. Исследования на трещиностойкость при вдавливании по Виккерсу проводились как параллельно, так и перпендикулярно на границе раздела покрытие-подложка с целью изучения трещиностойкости материала во взаимосвязи с микроструктурой, направлением вдавливания, твёрдостью и длиной микротрещин, возникающих при различных нагрузках. Выявлено, что на вязкость разрушения оказывает влияние направление и нагрузка вдавливания. Найдена взаимосвязь между вязкостью разрушения и прочностью сцепления формируемых газотермических покрытий.

Ключевые слова: машины лесные, покрытие газотермическое, вязкость разрушения, прочность сцепления

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5482

Article

The relationship between the parameters of viscosity and adhesion strength of thermal spray coatings of forest machine parts

Oksana Timokhova

*Ph. D. in engineering, associate professor, Ukhta State Technical University (Russian Federation),
chonochka@mail.ru*

Olga Burmistrova

*D. Sc. in engineering, professor, Ukhta State Technical University (Russian Federation),
oburmistrova@ugtu.net*

Roman Timokhov

*Ph. D. in engineering, associate professor, Ukhta State Technical University (Russian Federation),
pomeo1188@mail.ru*

Received: 10 November 2020 / Accepted: 20 December 2020 / Published: 26 December 2020

Abstract: During operation, forest machines are affected by various factors that have a significant impact on the technical condition of the main units, assembly units and individual parts. The effects of corrosion on all exposed metal surfaces cause significant damage. Protection methods are developed with a special focus on corrosion fatigue, corrosion cracking, and corrosion-mechanical wear. However, according to statistics, mechanical wear is the most common reason that causes replacement of a particular part. Worn mating parts begin to interact with deviations from the initial adjustments that results in even more intensive wear of the contacting surfaces. Consequently, reuse of worn parts is of potential economic value, as developed countries have already proved. For example, in the USA, according to the Association of Tractor Parts Dealers, more than 500 enterprises are directly involved in the restoration of worn out assemblies and individual parts. Efficient use of resources requires the introduction of new technologies that can increase the service life of forestry machines, and reduce the energy and material intensity of production. The use of modern coating methods in the repair and manufacture of forest machine parts contributes to a significant increase of their durability. The authors have investigated thermal gas coatings containing molybdenum for spraying onto a steel substrate using an electric arc, plasma spraying, and high-speed gas-plasma

spraying. Experimental studies of the tensile strength of the joint were performed to study the degree of adhesion and cohesive strength of coatings. Vickers indentation crack resistance studies were performed both parallel and perpendicularly at the coating-substrate interface to study the crack resistance of the material in relation to the microstructure, direction of indentation, hardness and length of microcracks arising under various loads. It was found that the direction and load of indentation influences the fracture toughness. The relationship between fracture toughness and adhesion strength of the formed thermal gas coatings is found.

Keywords: forest machines, thermal spray coating, fracture toughness, bond strength

1. Введение

Повышение долговечности деталей лесных машин и увеличение их ресурса позволяет обеспечить бесперебойную работу лесных машин. Наиболее эффективный и современный метод восстановления и упрочнения деталей лесных машин — газотермическое напыление. Газотермические покрытия используют для повышения коррозионной стойкости, контроля трения и теплоизоляции и, в частности, для повышения износостойкости. Два основополагающих фактора, влияющих на качество и срок службы соединения «покрытие — подложка» — это распространение микротрещин и прочность сцепления покрытий. Микротрещины в неоднородных газотермических покрытиях распространяются непредсказуемым образом и, в свою очередь, в итоге приведут к расслоению покрытия. Характеристика и поведение распространения микротрещин в напылённых покрытиях могут возникать при участии механических напряжений или в результате остаточных напряжений, возникающих при охлаждении и затвердевании горячих шлаков. Одна из главных характеристик покрытия, позволяющая прогнозировать механическое поведение материала покрытия при интенсивности напряжения без процесса разрешения — трещиностойкость [2].

Одним из наиболее часто используемых методов, дающих достоверные результаты для оценки трещиностойкости газотермических покрытий, является метод индентирования индентором Виккерса [2—5]. Основополагающим преимуществом данного метода является то, что трещиностойкость покрытий может быть проверена локально (на нескольких уровнях, например, на границе раздела «покрытие — подложка»), в перпендикулярном и параллельном направлениях к границе раздела «покрытие — подложка», между слоями или отдельными участками.

Цель данного подхода заключается в соотнесении длины микротрещин, возникающих в углах отпечатков Виккерса, с различными постоянными и механическими характеристиками материала, такими как твёрдость и модуль упругости. С другой стороны, функциональность системы термического напыления «покрытия — подложки» зависит от прочности сцепления слоёв и пластинчатых частиц, а также от адгезионной прочности покрытия на его подложке. Данные типы прочности сцепления термически напылённых покрытий могут быть распознаны после визуального или микроскопического исследования разрушения покрытий, экспериментально исследованных на прочность соединения при растяжении. Кроме недостатков данного метода следует отметить следующие: проникновение связующего вещества в покрытие из-за пористости покрытия, изменение его физических свойств, а также невозможность измерения адгезионной прочности покрытия при когезионном разрыве, и наоборот, представляют собой основные ограничения данного метода [4]. Кроме того, имеется более 80 методов измерения адгезии покрытия и многие из них тоже являются энергоёмкими с точки зрения времени, стоимости и оборудования [5]. Поэтому дополнительным методом является испытание на вдавливание Виккерса на границе раздела «покрытие — подложка», который всё чаще используется для оценки адгезионной прочности

благодаря своей простоте, точности и низкой стоимости и, как следствие, результаты которого могут быть выражены либо в виде коэффициента интенсивности напряжений с единицами $\text{кг}/\text{мм}^{3/2}$, либо в виде поверхностной энергии разрушения с единицей $\text{Дж}/\text{м}^2$. Аналогично, в случае, когда разрыв газотермических покрытий производится только внутри слоёв, испытание на вдавливание по Виккерсу может быть использовано в качестве дополнительного метода оценки прочности сцепления путём локального испытания покрытия между слоями. Анализируя характер распространения микротрещин, полученных в процессе исследования на вдавливание Виккерса, и режимах разрушения покрытий, испытанных при опытах на прочность связи при растяжении, можно установить взаимосвязь между двумя наиболее важными механическими свойствами газотермических покрытий, такими как вязкость разрушения и прочность когезионной связи.

Таким образом, основной целью данной работы является оценка и исследование зависимости трещиностойкости при испытаниях на вдавливание параллельно и перпендикулярно границе раздела «покрытие — подложка» с когезионной прочностью при испытаниях на прочность связи при растяжении газотермических покрытий, полученных тремя методами термического напыления: электродуговым, плазменным напылением и высокоскоростным газоплазменным напылением.

2. Материалы и методы

Сталь 45X является основным материалом системы «покрытие — подложка». Данная сталь в настоящее время используется для изготовления большого количества деталей, в т. ч. распределительных и коленчатых валов. В процессе эксперимента сталь 45X была покрыта термическим и газотермическими покрытиями с включением молибдена, нанесёнными различными методами: электродуговое напыление (ЭД), плазменное напыление (ПН) и высокоскоростное газоплазменное напыление (ГПН). Для ЭД метода была использована установка УЭМ-500 (молибденовая проволока диаметром 1,6 мм) и для ПН и ГПН методов были применены плазменная горелка и установка напыления порошкового покрытия УПУ 3Д соответственно. Материалом служил молибденовый порошок с номинальным размером частиц $-75 + 25$ мкм. Для оценки прочности сцепления этих покрытий были использованы цилиндрические образцы диаметром $30,1 \times 30,1$ мм для каждого типа покрытия с нанесённым фронтальным покрытием на поверхность, которая подвергалась механической обработке до толщины около 350 мкм для покрытий, нанесённых методом ПН и ЭД, и 150 мкм для покрытий, нанесённых методом ГПН. Готовые поверхности имели шероховатость поверхности R_a около 2 мкм для каждого типа покрытия и измерялись с помощью измерителя шероховатости поверхности TR100. Для оценки адгезионной прочности напыляемых покрытий поверхность покрытия лучше всего изучать с более грубой шероховатостью. Это необходимо для более качественного механического закрепления между покрытием и подложкой. Однако в процессе эксперимента поверхность покрытий подвергалась механической обработке, поскольку в реальных условиях работы составных частей, которые

будут защищены этими покрытиями, толщина и шероховатость поверхности являются критическими техническими характеристиками. Цилиндрические детали с покрытыми поверхностями и эталонные образцы с непокрытой поверхностью (для проверки только прочности сцепления связующего) соединяли с цилиндрическими встречными деталями с помощью адгезива, фиксировали с помощью нагружающих грузиков на самоустанавливающемся устройстве (рисунок 1) и отверждались при повышенной температуре 150° С в течение 80 мин. Испытательные образцы представлены на рисунке 1а и схематически показаны на рисунке 1б. Напряжение происходило вдоль продольной оси со скоростью перемещения 0,75 мм/мин с помощью универсальной механической испытательной машины ИНСТРОН 8802. После завершения испытаний на прочность соединения при растяжении поверхности разрыва покрытых образцов подвергались визуальному и микроскопическому осмотру для установления режима процесса разрушения. Прочность сцепления покрытия определяется, если разрушение происходит полностью на границе раздела «покрытие — подложка», а также если разрыв происходит только в пределах слоёв покрытия. В процессе исследования покрытий состоялся когезионный разрыв (рисунок 1б) и значения прочности сцепления были рассчитаны путём деления предельной силы на площадь поперечного сечения цилиндрических образцов.

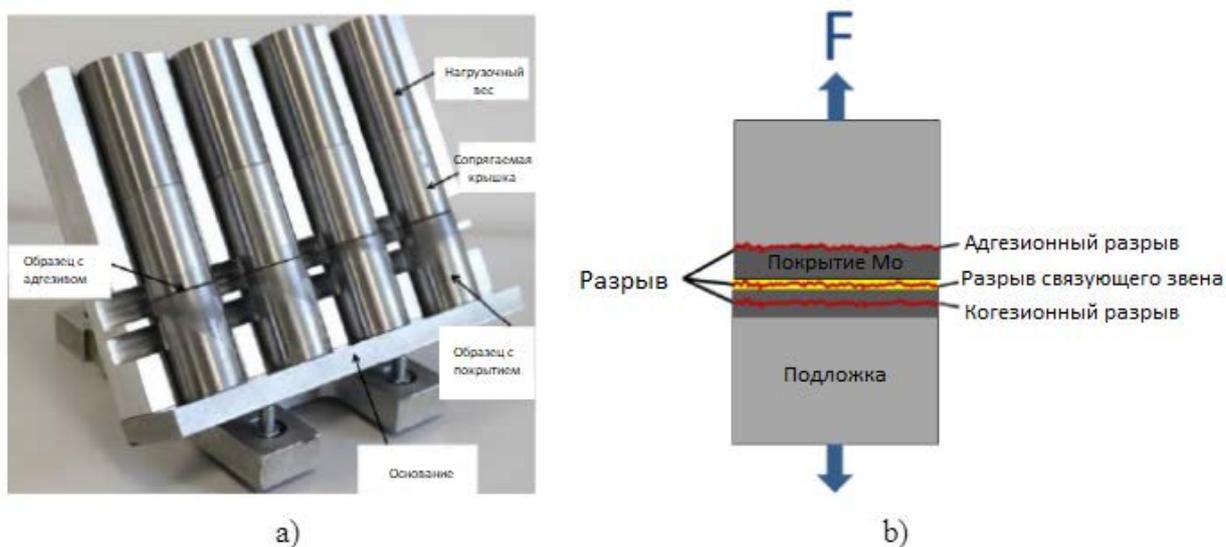


Рисунок 1. Подготовка цилиндрических образцов на растяжение путём приклеивания покрытия к торцу нагружающей арматуры (а) и схематическое представление различных режимов разрушения, обычно встречающихся при испытаниях прочности связи на растяжение термически напыляемых покрытий (б)

Figure 1. Preparation of cylindrical tensile specimens by gluing a coating to the end of a loading reinforcement (а) and a schematic representation of the various failure modes commonly encountered in tensile bond tests of thermally sprayed coatings (б)

Для оценки процесса появления микротрещин путём расчёта трещиностойкости этих анизотропных термических покрытий предложено проводить испытания покрытий с молибденом на поперечном сечении (перпендикулярно границе раздела «покрытие — подложка» или между слоями) и на поверхности (параллельно границе раздела «покрытие — подложка» или в слоях) (рисунок 2а). Таким образом, получены средние значения локальной трещиностойкости сразу в двух направлениях — параллельном и перпендикулярном направлениях к границе раздела «покрытие — подложка» с целью выявления зависимости результатов трещиностойкости с результатами испытаний на прочность связи при растяжении.

Для проведения испытаний на вдавливание по методу Виккерса три стальных опорных образца диаметром 30 мм и высотой 10 мм были покрыты на торце каждый термическим методом толщиной около 400 мкм для методов ЭД и ПН и 150 мкм для ГПН, разрезаны пополам и металлографически подготовлены в соответствии с направлением вдавливания. Методом вдавливания Виккерса было проведено пять измерений микро- и макроиндентирования для каждой из 12 выбранных нагрузок в диапазоне от 0,098 до 98,1 Н. Микроиндентирование Виккерса было проведено с помощью тестера ИТВ-10-А для нагрузок в диапазоне от 0,098 до 9,8 Н, а макроиндентирование Виккерса — с помощью теста ИТВ-30-ММ для нагрузок в диапазоне от 19,6 до 98,1 Н. [7]. Длины микротрещин, образовавшихся вблизи отпечатка вдавливания, измерялись с помощью SEM-изображений (JSM-IT100) (см. рисунок 4).

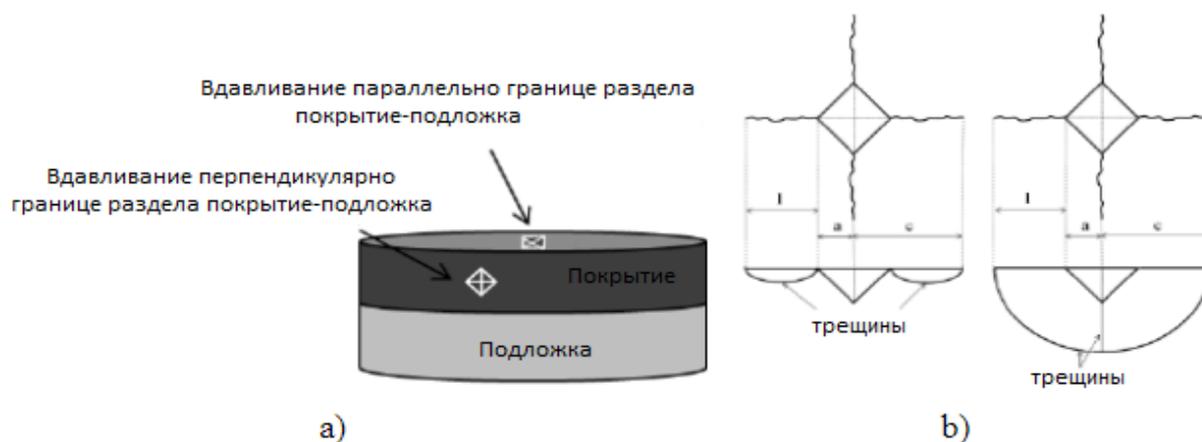


Рисунок 2. Схематическая иллюстрация направлений вдавливания (а) и системы Палмквиста и межфазных трещин (b)

Figure 2. Schematic illustration of indentation directions (a) and Palmqvist system and interfacial cracks (b)

Установлено, что микротрещины, возникающие в результате вдавливания Виккерса, возникают после достижения критической нагрузки и в зависимости от типа покрытия и направления вдавливания обычно распространяются по направлениям диагоналей

вдавливания. Этот механизм распространения микротрещин проявляется обычно в однородных и, в частности, в хрупких материалах [1—3]. В большинстве случаев после вдавливания Виккерса могут образовываться два типа микротрещин, описанных как полудиск (медианные/радиальные трещины) или трещины Палмквиста (радиальные трещины) (рисунок 2b). Для различения этих двух типов трещин может быть применён критерий, основанный на соотношении длины трещины / диагонального вдавливания [9]. В соответствии с принятыми правилами если $c/a \geq 2$, то модель относится к типу полудиск, а если $c/a < 2$, то модель является радиальной [3]. Другие авторы утверждают, что критерием трещин радиального типа является условие: $0,25 \leq l/a \leq 2,5$ [10]. Соответственно для трещин типа полудиск – $c/a \geq 2,5$ [11]. Здесь l — средняя длина трещин, a — половина средней длины диагонали, а c — сумма l и a .

В процессе экспериментальных исследований термических покрытий с включением молибдена средние измерения диагоналей и микротрещин, инициированных на параллельном и перпендикулярном направлениях границы раздела «покрытие — подложка», показывают, что все микротрещины относятся к типу радиальных, что соответствует перечисленным выше критериям. Вязкость разрушения K_{Ic} как параллельно, так и перпендикулярно границе раздела «покрытие — подложка» оценивалась с помощью уравнения (1) для плазменно напыляемых молибденовых покрытий:

$$K_{Ic} = k \cdot \left(\frac{P}{a \cdot l^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (1)$$

где k — коэффициент, зависящий от геометрии используемого индентора и испытуемого материала, а P — нагрузка (N).

3. Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты испытаний на растяжение связывания показывают, что газотермические покрытия для плазменного напыления создают меньшую пористость при уменьшении размера частиц и более высокую общую контактную поверхность [2]. Микрофрактографические исследования поверхностей разрыва показали, что разрушение происходит внутри слоёв покрытия (рисунок 3b) и отдельные слои (рисунок 3c), с удалёнными мелкими частичками покрытия, нанесённые методом газоплазменного напыления, имели наибольшее значение прочности сцепления (43,3 МПа), затем следовали метод плазменного напыления (26,7 МПа) и электродуговой метод (19,2 МПа). Наличие этих различий может быть объяснено более высокой температурой и скоростью распыляемых частиц, которые воздействуют на подложку и создают более высокий уровень сжимающих остаточных напряжений в покрытиях, соответственно создавая более прочную связь между слоями. Ещё одним фактором, влияющим на прочность сцепления, являются размеры молибденовых частиц, которые в случае электродугового способа нанесения покрытий составляют примерно 55 мкм и 37 мкм (не более 2 % от общей площади) (рисунок 3a) и без разрыва внутри слоя.

Таким образом, рассчитанная прочность сцепления фактически является силой сцепления молибденовых покрытий и она ниже, чем адгезия.

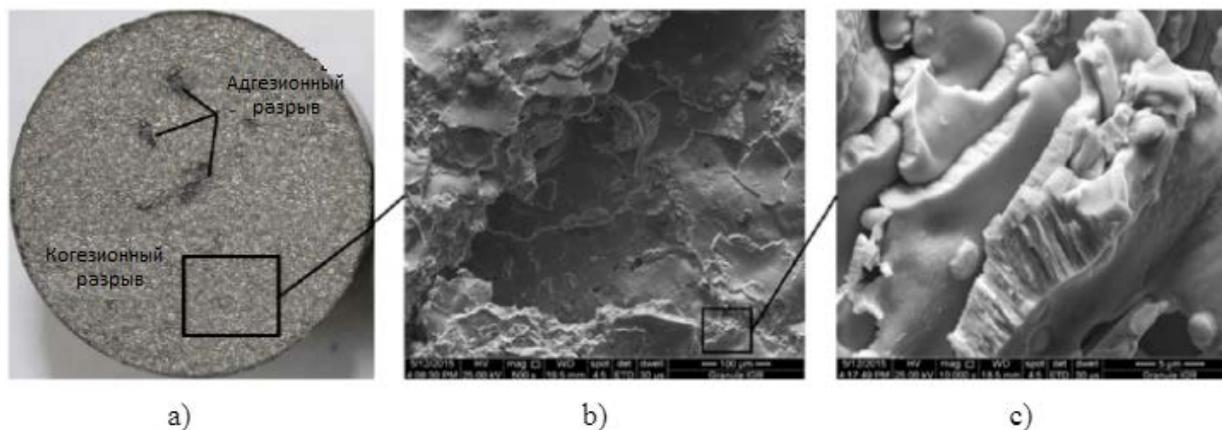


Рисунок 3. Общий вид покрытых поверхностей после испытаний на прочность связи при растяжении (а) с деталями когезионного разрыва слоёв (b) и разрушения молибденовых частиц (с)

Figure 3. General view of coated surfaces after tensile bond strength tests (a) with details of cohesive rupture of layers (b) and destruction of molybdenum particles (c)

Метод вдавливания Виккерса был использован для оценки поведения распространения микротрещин, а также использован в качестве альтернативного метода оценки прочности сцепления в соответствии с известным правилом межфазной трещиностойкости и адгезионной прочности системы «покрытие — подложка». Углубления Виккерса в заданном диапазоне нагрузок выполнялись в параллельном (в слои) и перпендикулярном (между слоями) направлениях к границе раздела «покрытие — подложка» для инициирования и распространения микротрещин в слоях и между слоями покрытия. В большинстве исследованных отпечатков вдавливания две основные микротрещины росли в двух углах из четырёх углов вдавливания как в параллельном, так и в перпендикулярном направлениях (рисунок 4а, b).

В разделе «покрытие — подложка» наблюдалась минимальная нагрузка (или более низкая критическая нагрузка), при которой возникала первая микротрещина, и максимальная критическая нагрузка, при которой происходило расслаивание. Основным ограничением этого метода была толщина покрытия, которая должна была быть выше 150 мкм, чтобы избежать расслоения. Помимо индентирующих нагрузок и механических свойств покрытий, ранее существовавшие трещины, диаметр и толщина шлаков и межфазных шлаков играют решающую роль в распространении микротрещин таким образом, что в некоторых случаях трещины распространяются хаотично (не линейно) и при нагрузках выше 9,8 Н мелкие вторичные микротрещины развиваются вблизи отпечатка индентирования. Все микротрещины, возникшие при различных индентирующих нагрузках, имели радиальный

тип и на основании их длины, твёрдости материала и параметра k в зависимости от направления индентирования определяли трещиностойкость покрытий как в параллельном, так и в перпендикулярном направлениях к границе раздела «покрытие — подложка».

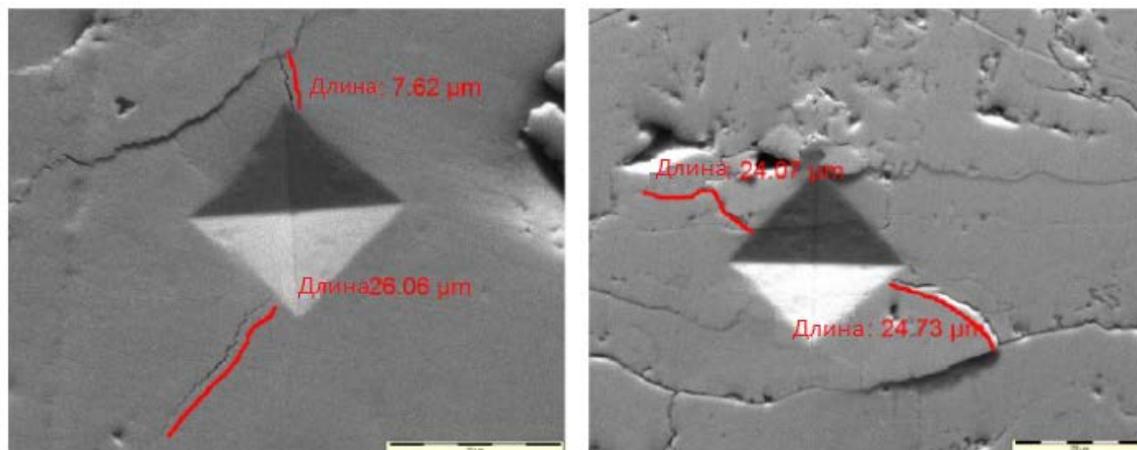


Рисунок 4. Вмятины Виккерса на параллельной (а) и перпендикулярной (б) границах раздела

Figure 4. Vickers dents on the parallel (a) and perpendicular (b) interface

Между значениями трещиностойкости, полученными на трёх типах покрытий, наблюдались значительные различия, но во всех случаях данные, полученные на параллельном направлении, были выше, чем на перпендикулярном направлении к границе раздела «покрытие — подложка». Это связано с тем, что на параллельном направлении большинство углублений находятся в однородных расплавах, в то время как на поперечном сечении (или перпендикулярно границе раздела «покрытие — подложка») углубления находятся, в основном, на границе раздела между расплавами, которая представляет собой самое слабое звено при напылении покрытия. В отличие от однородных материалов, для которых трещиностойкость относительно постоянна независимо от индентирующей нагрузки [1], для неоднородных покрытий, содержащих поры, оксиды, границы шлаков или ранее существовавшие микротрещины, тенденция трещиностойкости возрастает с увеличением индентирующих нагрузок. Эта тенденция может быть объяснена полем деформации, которое не является самовыраженным для различных индентирований и, таким образом, приводит к появлению поля возбуждающих напряжений микротрещин, которые изменяются с нагрузкой индентирования [2], или эффектом R -кривой ударной вязкости [3]. Два других предположения могут объяснить это локальное поведение разрушения напылённых покрытий. Первое предположение состоит в том, что при увеличении нагрузки на вдавливание микротрещины распространяются к границам трещин, пор или уже существующих микротрещин. В таком случае наблюдается увеличение длины диагоналей вдавливания за счёт увеличения нагрузки вдавливания обратно пропорционально длине

развившихся микротрещин. В результате вычисляется более высокое значение вязкости разрушения. Второе предположение может быть принято во внимание, в частности, при нагрузках вдавливания выше 9,8 Н (1 кгс), когда основные микротрещины, инициируемые по углам вдавливания Виккерса, разветвляются на более мелкие вторичные микротрещины.

Таким образом, неоднородность покрытия может предотвратить увеличение длины микротрещин и способствует увеличению значений вязкости разрушения в обоих направлениях вдавливания. Поведение распространения микротрещин в напылённых покрытиях с точки зрения вязкости указывает на то, что граница раздела между слоями является самым слабым звеном в напылённом покрытии.

Этот аспект также подтверждается испытаниями на прочность связи при растяжении из-за основного режима разрушения в слоях покрытия. Появляются микротрещины, которые растут и распространяются через слои напыленного покрытия, что способствует когезионному разрушению или расслоению.

Однако аналогичные ассоциации между результатами испытаний адгезии на растяжение и испытаний на межфазное вдавливание были получены для термически напыляемых покрытий, и был сделан вывод о том, что вязкость межфазного разрушения является подходящим параметром для характеристики адгезии термически напыляемых покрытий [4]. Для корреляции локальной трещиностойкости с когезионной прочностью исследуемых молибденовых покрытий учитывали среднюю трещиностойкость значений, полученных для каждого метода термического напыления (0,419 МПа·м^{1/2} для ЭД, 0,623 МПа·м^{1/2} для ПН и 1,081 МПа·м^{1/2} для ГПН). Поэтому на рисунке 5 представлена корреляционная зависимость между вязкостью разрушения K_{Ic} и прочностью сцепления МО-покрытий, нанесённых методами ЭД, ПН и ГПН. Линейность когезионной прочности в зависимости от трещиностойкости может быть выражена как наклон линии, описывающей увеличение когезионной прочности с увеличением трещиностойкости.

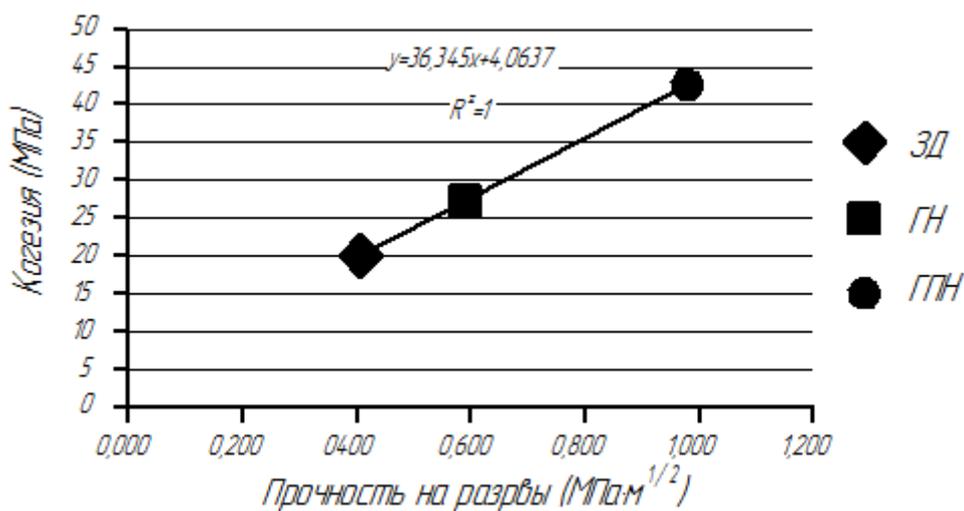


Рисунок 5. Корреляция между вязкостью разрушения K_{Ic} и прочностью сцепления

Figure 5. Correlation between fracture toughness K_{Ic} and bond strength

Исходя из анализа полученных данных, устойчивость к распространению трещин покрытий молибдена показывает состав, нанесённый методом ГПН, и, следовательно, более высокое значение прочности сцепления, чем у покрытий, нанесённых методами ПН и ЭД. Результаты, полученные при испытаниях на вдавливание для оценки трещиностойкости молибденовых покрытий, находятся в диапазоне $0,419—1,081 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ для плазменно напыляемых молибденовых покрытий [1], но данные, полученные при испытаниях прочности связи на растяжение для аналогичных покрытий и условий испытаний, очень разрозненны. Например, для молибденовых покрытий, нанесённых плазменным напылением толщиной 300—350 мкм, были рассчитаны значения адгезионной прочности 33—35 МПа, значения около 52 МПа для молибденовых покрытий толщиной около 400 мкм или значения от 18 до 52 МПа в другом случае [4]. Кроме того, для молибденовых покрытий, нанесённых методом газоплазменного напыления (аналогично процессу ГТН), было сообщено о когезионном разрушении молибденовых покрытий и значениях прочности связи при растяжении в диапазоне 19,7—27,9 МПа [4—7]. Помимо влияния толщины, которая хорошо известна тем, что влияет на прочность сцепления термически напыляемых покрытий, эти различия могут возникать из-за многих причин. Во-первых, оборудование для газотермического распыления, параметры расстояния распыления, сырьё для распыления и подготовка подложки могут отличаться от случая к случаю и генерировать эти различные характеристики прочности сцепления.

Другими факторами, влияющими на значения прочности сцепления, являются связующее вещество, которое может вызвать завышение адгезионной прочности вследствие проникновения в покрытие по направлению к границе раздела фаз [5], а также состояние и шероховатость поверхности. В нашем случае обработанные поверхности подвергались механической обработке и для всех испытанных покрытий было получено значение шероховатости поверхности R_a около 2 мкм, поскольку в реальных условиях работы деталей лесных машин, покрытых молибденовыми покрытиями, таких как валы и оси, это является критическим техническим заданием. Во время испытаний на прочность соединения при растяжении гладкая поверхность покрытия играла решающую роль в режиме разрыва и при прочностных характеристиках склеивания, поскольку она не позволяла обеспечить хорошее механическое закрепление между поверхностью покрытия и связующим агентом, и только несколько превосходных слоёв покрытия испытывали разрыв в результате расслоения. Кроме того, в покрытии при механической обработке поверхности индуцировались внутренние напряжения растяжения, которые ослабляли связь между слоями молибдена, в частности на верхней части системы «покрытие — подложка», где создавался частичный разрыв покрытия (разрыв когезии), а не полный разрыв (разрыв адгезии).

Связь между вязкостью разрушения межфазной поверхности и прочностью сцепления может быть использована для оценки и прогнозирования механических свойств покрытий с точки зрения поведения разрушения и прочности сцепления. Общая тенденция, которая была обнаружена для связи между вязкостью разрушения и прочностью сцепления, может быть использована в тех случаях, когда разрыв покрытий производится внутри слоёв,

в частности для термически напылённых покрытий, где межфазные швы являются самым слабым звеном в покрытии.

4. Выводы

На основании экспериментальных результатов, полученных в ходе данного исследования, можно сделать общий вывод: исследовано молибденовое покрытие, нанесённое тремя методами термического напыления, такими как ЭД, ПН и ГПН; исследуются с помощью испытаний на прочность связи при растяжении и вдавливание Виккерса с целью оценки и корреляции двух наиболее важных механических свойств термически напыляемых покрытий, таких как прочность сцепления и вязкость разрушения. Микрофрактографические исследования разрывных поверхностей образцов, испытанных при опытах на прочность связи при растяжении, показали, что разрушение всех покрытий, в основном, происходит внутри слоёв. Было получено среднее значение когезионной прочности 43.3 МПа для покрытий, напылённых с помощью ГПН, 26.7 МПа для ПН-покрытий и 19,2 МПа для ЭД-напылённых покрытий. Углубления Виккерса для молибденовых покрытий как в параллельном, так и в перпендикулярном направлениях к границе раздела «покрытие — подложка» создают радиальные трещины в углах отпечатков при различных нагрузках вдавливания. Общая тенденция выражается наклоном линии, описывающей тенденцию повышения вязкости разрушения с увеличением когезионной прочности. Был сделан вывод о том, что вязкость разрушения является подходящим параметром для характеристики когезионной прочности термически напыляемых покрытий.

Список литературы

1. Nature of Thermal Spray Coatings [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>.
2. *Abedini A., Pourmousa A., Chandra S., Mostaghimi J.* Splat Formation in Wire Arc Spraying // ITSC-2004: Proceedings, section «Innovative equipment and process technology». 2004. P. 1—6.
3. *Вирник А. М., Морозов А. И., Подзей А. В.* К оценке остаточных напряжений в покрытиях, нанесённых плазменным напылением // Физика и химия обработки материалов. 1970. № 4. С. 53—56.
4. *Максимович Г. Г., Шатинский В. Ф., Копылов В. И.* Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями. Киев: Наукова думка, 1983. 264 с.
5. Handbook of thermal spray technology / ed. by J. R. Davis. 2d ed. ASM International, 2005. 339 p.
6. *Хасуи А., Моригаки О.* Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
7. *Timokhova O. M., Burmistrova O. N., Sirina E. A., Timokhov R. S.* Effect of plasma spraying modes on material properties of internal combustion engine cylinder liners // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 022101.
8. *Timokhova O. M., Burmistrova O. N., Sirina E. A.* Optimization of cylinder liner plasma spraying mode // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. 082049.

9. Кадырметов А. М., Тимохова О. М., Снятков Е. В., Махонин В. Л. Вопросы технологического обеспечения плазменного напыления и упрочнения покрытий деталей машин // Воронежский научно-технический вестник. 2017. Т. 4, № 4 (22). С. 16—31.

References

1. *Nature of Thermal Spray Coatings*. URL: <http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm>.
2. Abedini A., Pourmousa A., Chandra S., Mostaghimi J. Splat Formation in Wire Arc Spraying. *ITSC-2004: Proceedings, section «Innovative equipment and process technology»*, 2004, pp. 1—6.
3. Virnik A. M., Morozov A. I., Podzey A. V. On the assessment of residual stresses in coatings applied by plasma spraying. *Physics and chemistry of material processing*, 1970, no. 4, pp. 53—56. (In Russ.)
4. Maksimovich G. G., Shatinsky V. F., Kopylov V. I. *Physical-chemical processes in plasma spraying and destruction of materials with coatings*. Kiev: Naukova Dumka, 1983. 264 p. (In Russ.)
5. *Handbook of thermal spray technology* / ed. by J. R. Davis. 2d ed. ASM International, 2005. 339 p.
6. Hasui A., Morigaki O. *Surfacing and spraying*. Moscow: Mashinostroenie, 1985. 240 p. (In Russ.)
7. Timokhova O. M., Burmistrova O. N., Sirina E. A., Timokhov R. S. Effect of plasma spraying modes on material properties of internal combustion engine cylinder liners. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 327, 022101.
8. Timokhova O. M., Burmistrova O. N., Sirina E. A. Optimization of cylinder liner plasma spraying mode. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, 082049.
9. Kadyrmetov A. M., Timokhova O. M., Snyatkov E. V., Makhonin V. L. Problems of technological support of plasma spraying and hardening of coatings of machine parts. *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*, 2017, T. 4, No. 4 (22), pp. 16—31. (In Russ.)