DOI: 10.25515/PMI.2018.1.77

УДК 621.9.015:621.43-233

ОБЕСПЕЧЕНИЕ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ ДВИГАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНОГО ТРАНСПОРТА

Ю.ОЛЬТ[1], **В.В.МАКСАРОВ**[2], **В.А.КРАСНЫЙ**[2]
[1] *Эстонский университет естественных наук, Тарту, Эстония*
[2] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Основной тенденцией в развитии современного дизелестроения является создание форсированных, надежных и экономичных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые находят широкое применение в различных отраслях промышленности, включая горное машиностроение. Рассмотрено применение методов газотермического и газоплазменного напыления для получения износостойкого покрытия поршневых колец крупногабаритных двигателей внутреннего сгорания карьерного транспорта – тепловозных локомотивов и автосамосвалов. Показано, что в качестве подготовительной операции перед напылением широко применяется струйно-абразивная обработка поверхности подложки, при этом значительное влияние на прочность сцепления напыляемого покрытия с подложкой оказывает шероховатость рабочей поверхности колец после струйно-абразивной обработки. Выбор шероховатости поверхности и режимов струйно-абразивной обработки для повышения прочности сцепления покрытия с подложкой во многом определяет как толщину покрытия, так и надежность самой детали.

Целью работы является исследование зависимости адгезионной прочности сцепления газотермического износостойкого покрытия поршневых колец крупногабаритных двигателей карьерного транспорта, включая автосамосвалы и тепловозные локомотивы, от шероховатости рабочей поверхности после струйно-абразивной обработки, которая в свою очередь зависит от ее режимов (расстояния до среза сопла, числа проходов, давления рабочего воздуха, частоты смены дроби).

Прочность сцепления рабочей поверхности поршневых колец диаметром 210 мм с напыляемым покрытием композицией молибдена и стальной проволоки оценивалась углом закручивания, при котором происходило отслаивание покрытия. Показано, что шероховатость, обеспечивающая угол закручивания более 35°, должна составлять более 22 мкм, что не вызывает отслаивания покрытия. Режимы струйно-абразивной обработки, обеспечивающие указанные значения шероховатости: давление рабочего воздуха 0,4 МПа, расстояние до среза сопла – 110 мм, количество проходов – 2, смена дроби после обработки 40 оправок.

***Ключевые слова*:** шероховатость поверхности, адгезионная прочность, струйно-абразивная обработка, износостойкие напыляемые покрытия, поршневые кольца

***Как цитировать эту статью*:** Ольт Ю. Обеспечение адгезионной прочности газотермических покрытий поршневых колец двигателей карьерного транспорта / Ю.Ольт, В.В.Максаров, В.А.Красный // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 77-83. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.77

Введение. Повышение надежности современной техники, снижение себестоимости обслуживания, обеспечение конкурентоспособности, продление ресурса эксплуатации, а также реновация путем применения современных технологий для восстановления работоспособности узлов до уровня новых изделий – наиболее приоритетные направления развития техники.

Основной тенденцией в развитии современного дизелестроения является создание форсированных, надежных и экономичных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), которые находят широкое применение в различных отраслях промышленности, включая горное и нефтегазовое машиностроение [3, 4]. Одно из главных направлений обеспечения ресурса их работы ориентировано на повышение износостойкости ответственных деталей узлов и снижение потерь на трение, что во многих случаях решается использованием износостойких покрытий [1, 2].

Применение технологий нанесения защитных и износостойких покрытий, среди которых газотермические и газоплазменные процессы занимают значительное место, является одним из кардинальных путей решения данного вопроса. Существующие в настоящее время оборудование, материалы и технологии напыления позволяют значительно снизить или исключить влияние на изнашивание деталей таких факторов, как эрозия, коррозия (в том числе высокотемпературная), кавитация и др. [5, 9].

Газотермические и газоплазменные покрытия применяют при ремонте оборудования и упрочнении рабочих поверхностей новых деталей. В зависимости от назначения покрытия и условий его работы меняются требования к точности соблюдения основных параметров покрытия – его состава, толщины, плотности и прочности сцепления с подложкой [8]. Газотермические покрытия применяются при изготовлении и ремонте ряда ответственных деталей двигателей внут-

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.77

реннего сгорания и, в первую очередь, деталей цилиндропоршневой группы (поршней, поршневых колец), коренных и шатунных шеек коленчатых валов и ряда других.

В качестве подготовительной операции перед напылением широко применяется струйно-абразивная обработка поверхности подложки. Такая подготовка очищает поверхность и выводит ее из состояния термодинамического равновесия со средой, освобождая межатомные связи поверхностных атомов, т.е. химически активирует подложку. Однако активность подложки быстро снижается из-за химической адсорбции газов из атмосферы и окисления. Обработка делает поверхность шероховатой, это приводит к увеличению температуры в контакте под напыляемыми частицами на выступах шероховатости и повышает суммарную площадь участков приваривания. Шероховатая поверхность имеет большую площадь по сравнению с гладкой, что способствует увеличению прочности сцепления. Наличие оптимальной шероховатости по прочности сцепления определяется также объемом впадин шероховатости, обеспечивающим необходимую величину усадки напыленного слоя при охлаждении. Выбор шероховатости поверхности и режимов струйно-абразивной обработки для повышения прочности сцепления покрытия с подложкой во многом определяет как толщину покрытия, так и надежность самой детали.

Целью настоящей работы является исследование зависимости прочности сцепления газотермического износостойкого покрытия поршневых колец крупногабаритных двигателей карьерного транспорта, включая автосамосвалы и тепловозные локомотивы, от шероховатости рабочей поверхности после струйно-абразивной обработки, которая в свою очередь зависит от ее режимов (расстояния до среза сопла, числа проходов, давления рабочего воздуха, частоты смены дроби).

Особенности подготовки поверхности под нанесение износостойкого газотермического покрытия. Существующие технологические методы обеспечения износостойкости поверхностей деталей узлов трения подразделяют на несколько групп: химико-термические, объемная и поверхностная закалка, электрохимические, химическая обработка, механотермические, наплавка износостойких слоев, напыление порошковых покрытий, ионно-плазменная обработка, плакирование, механическое упрочнение и др.

В странах с развитой промышленностью при решении экологических проблем освоения техники газотермическое напыление вытесняет гальванические «грязные» технологии. Во многих работах зарубежных и отечественных авторов предлагаются различные методы нанесения защитных и износостойких покрытий, в том числе развитие и совершенствование способов напыления на различные ответственные детали [10-14, 16-18].

Ситуация в России, сложившаяся в настоящее время, дает возможность не реанимировать устаревшие технологии, а, адаптируясь к новым условиям, вместо гальванических методов использовать новейшие технологии нанесения покрытий методами термического напыления. Отечественные предприятия, борющиеся за свое место на рынке, все чаще начинают внедрять современные методы газотермического нанесения покрытий для повышения качества выпускаемой продукции.

Технологический процесс нанесения покрытий включает следующие операции: предварительную подготовку поверхности изделия для обеспечения прочного сцепления напыляемого материала; подготовку материала; нанесение покрытия; механическую обработку покрытия после напыления.

Для повышения адгезии покрытий поверхности детали необходимо придать шероховатость. С этой целью применяют струйно-абразивную обработку, травление, электроискровые методы. Все чаще в последние годы используют нанесение подслоя из материалов, обладающих высокой адгезией к основному металлу.

Предварительная обработка поверхности основы является важным фактором для обеспечения прочного сцепления напыленного покрытия с деталью, так как в большинстве случаев соединение покрытия с основой происходит в результате механического сцепления. Следовательно, для того, чтобы напыляемые частицы, которые ударяются и деформируются об основу, прочно сцеплялись с неровностями поверхности, основа должна быть достаточно шероховатой [8, 9]. Увеличение прочности механического зацепления связано с увеличением площади поверхности основы и созданием большей активности основы, что также важно и для других видов соединений. Поэтому создание развитой шероховатости на поверхности основы является важным требованием.

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.77

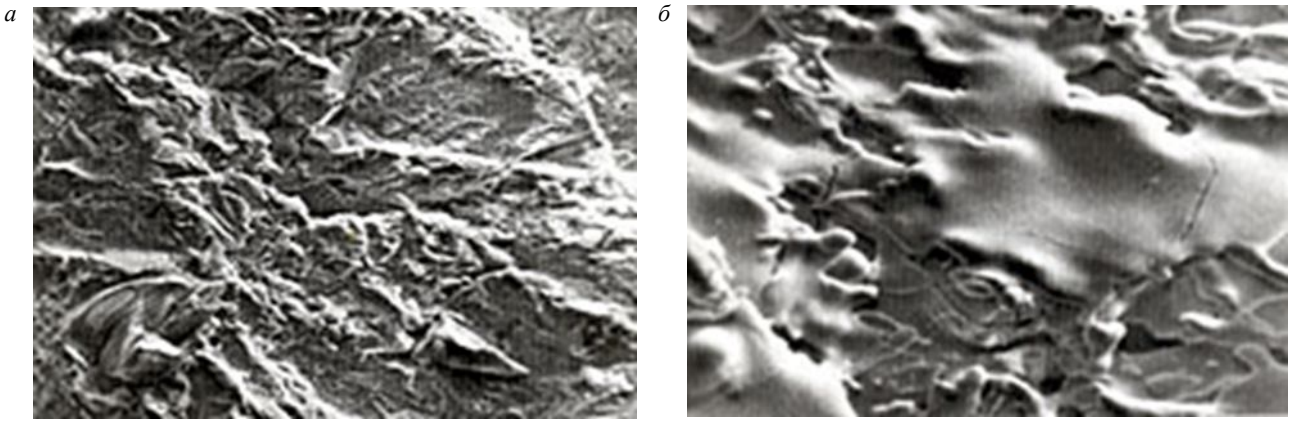


Рис.1. Поверхность после дробеструйной обработки (*а*) и после напыления (*б*)

Одним из способов подготовки поверхности перед напылением является дробеструйная обработка, в результате которой поверхность получается шероховатой. На рис.1 показаны поверхности после дробеструйной обработки и после напыления.

Подготовка поверхности поршневых колец под нанесение износостойкого покрытия. Повышение удельной мощности и экономичности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) характеризуется повышением температур в камере сгорания и деталях цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Опыт эксплуатации ДВС показывает, что их надежность в значительной степени зависит от скорости изнашивания верхних поршневых колец, которая определяется вибрационным и напряженно-деформируемым состоянием, а также составом и технологией нанесения износостойких покрытий, позволяющей управлять их структурой. При этом на первом плане стоит повышение износостойкости и обеспечение смазывания и уплотнения в экстремальных условиях эксплуатации. Материал для покрытия должен сочетаться как с материалами, из которых изготовлены поршневое кольцо и стенка цилиндра, так и со смазкой. Использование покрытия рабочей поверхности у поршневых колец нашло широкое распространение. Часто кольца двигателей серийного производства имеют покрытие из хрома, молибдена и феррооксида.

Одним из основных показателей надежности является назначенный ресурс, который зависит от износостойкости трущихся пар. Известно, что работа трения поршневых колец составляет до 50 % всей работы трения двигателя, причем из всех поршневых колец наивысшая работа трения у верхнего компрессионного кольца. Это связано с работой кольца в условиях высоких температур до 200 °С и в режиме полусухого трения. Однако до сих пор действительный ресурс верхних поршневых колец значительно ниже долговечности других деталей ЦПГ ДВС. Так, широко применяемый гальванический способ нанесения хрома на рабочую поверхность поршневых колец всего лишь на 30 % снижает интенсивность изнашивания по сравнению с нехромированными кольцами, что явно недостаточно, особенно при повышенных давлениях сгорания в цилиндре, характерных для форсированных ДВС [6]. С повышением уровня форсирования ДВС прежние технологии нанесения износостойких покрытий на поршневые кольца пористым хромом в меньшей степени удовлетворяют возросшим требованиям к покрытиям в условиях более высоких температур и давлений.

При производстве поршневых колец крупногабаритных двигателей карьерных самосвалов, тепловозных локомотивов и других, во многих случаях применяется покрытие на основе напыляемого молибдена и его композиций для верхнего компрессионного кольца (рис.2). Молибден обеспечивает высокую термостойкость из-за высокой точки плавления (2620 °С). Благодаря этому методу нанесения покрытия можно получить пористую структуру материала. В возникающих микропустотах на рабочей поверхности колец (рис.2, *б*) может сохраняться моторное масло, что предохраняет от возникновения задиров при экстремальных условиях эксплуатации. При этом толщина покрытия достигает 0,5-1 мм и более.

Несомненным условием нормальной работы поршневых колец с износостойким покрытием является прочность контакта покрытия с основой. В условиях работы поршневого кольца в двигателе в области адгезионного контакта возникают напряжения, связанные с действующими на

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.77*

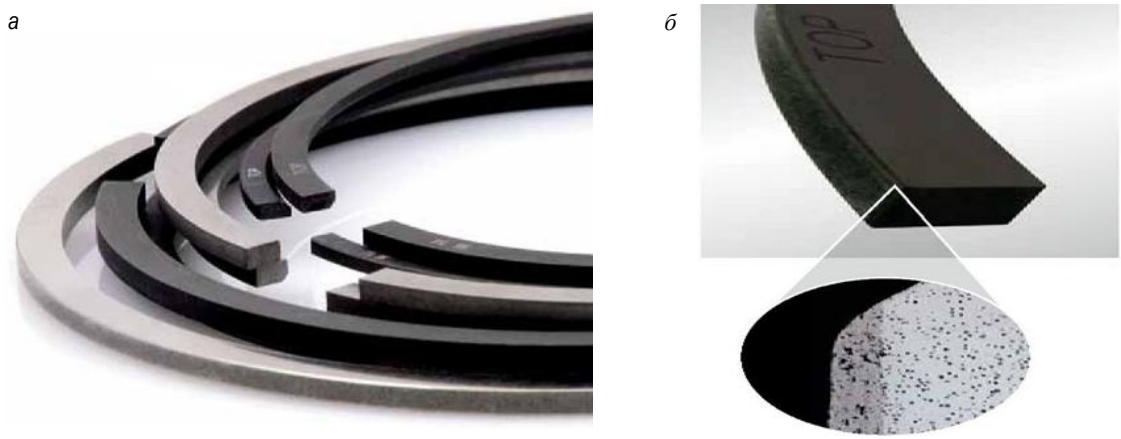


Рис.2. Типы конструкций верхнего компрессионного поршневого кольца (*а*) и кольца с покрытием молибденом (*б*)

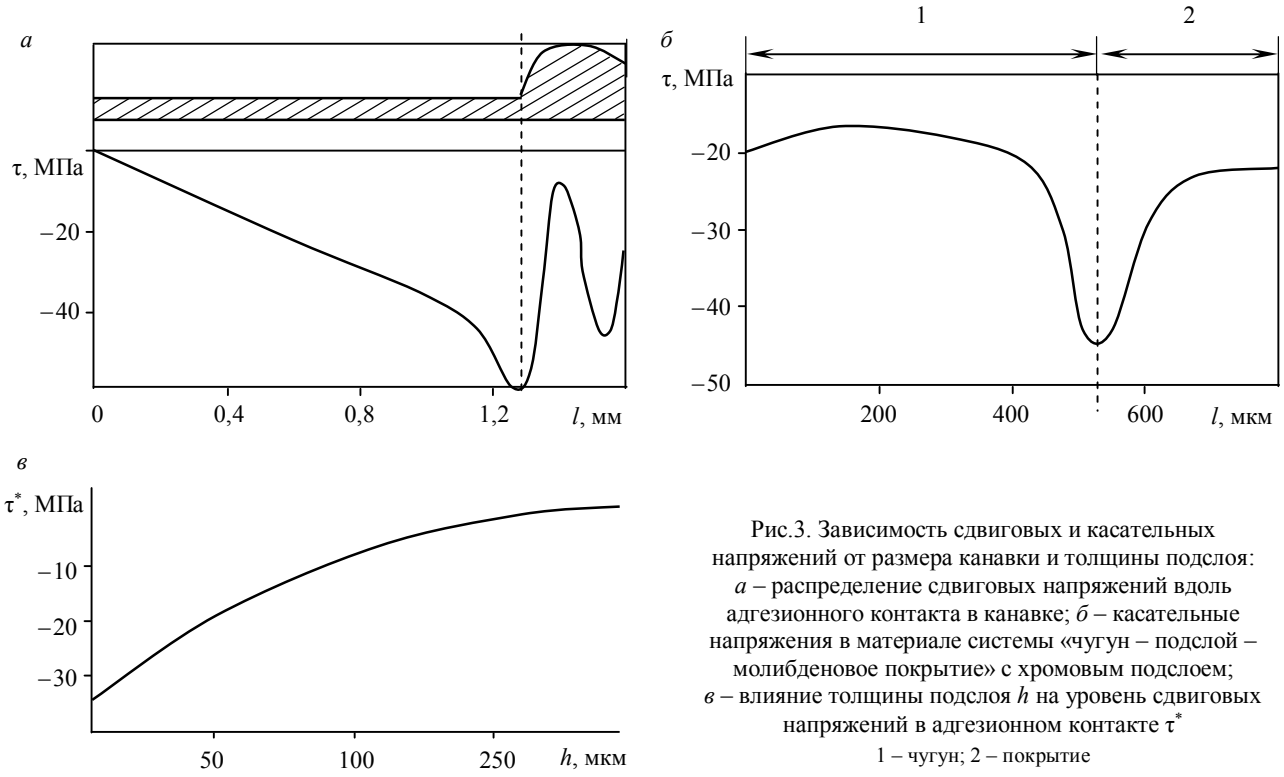


Рис.3. Зависимость сдвиговых и касательных напряжений от размера канавки и толщины подслоя: *а* – распределение сдвиговых напряжений вдоль адгезионного контакта в канавке; *б* – касательные напряжения в материале системы «чугун – подслой – молибденовое покрытие» с хромовым подслоем; *в* – влияние толщины подслоя h на уровень сдвиговых напряжений в адгезионном контакте τ^*
1 – чугун; 2 – покрытие

кольцо внешними силами и высокой температурой. Для оценки возникающих напряжений в работе [3] была рассмотрена плоская задача термонапряженного состояния поперечного сечения поршневого кольца с покрытием, осажденным в трапециевидную канавку, под действием внешних нагрузок и повышенной температуры, моделирующих реальные условия работы поршневого кольца в двигателе.

На рис.3, *а* представлены результаты исследований, выполненных для чугунного поршневого кольца с молибденовым покрытием толщиной h = 300 мкм при температуре T = 800 К. Анализ полученных зависимостей показывает, что при приближении к углам канавки сдвиговые адгезионные напряжения резко возрастают, причем в данном случае их величины превышают предел адгезионной прочности контакта молибденового покрытия с чугунной основой, что означает отслаивание покрытия в данных условиях (что и наблюдается на практике).

С целью оценки эффективности введения подслоя с промежуточным значением коэффициента теплового расширения перед нанесением покрытия была поставлена задача о нахождении поля напряжений в поперечном сечении чугунного кольца с молибденовым покрытием, нанесенным на хромовый подслой, осажденный в трапециевидную канавку. Задача была решена для раз-

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.77

личных толщин подслоя. Из полного поля напряжений, полученного при каждом значении толщины h подслоя, для анализа выбирались величины наиболее опасных касательных напряжений на границе с покрытием.

Изменение касательных напряжений по направлению от основы к покрытию (рис.3, *б*) поясняет выбор величины опасных напряжений τ. Зависимость величины опасных напряжений от толщины подслоя h показана на рис.3, *в*, из которого видно, что в данном случае для обеспечения требуемой адгезионной прочности достаточной является толщина подслоя h = 50-100 мкм.

Однако в ряде случаев нанесение хромового подслоя является сложной и затратной задачей, в то время как обеспечение необходимой прочности сцепления износостойкого напыляемого покрытия рабочей поверхности поршневых колец может быть получено обоснованным выбором режимов струйно-абразивной обработки [15].

Таким образом, для поршневых колец двигателей внутреннего сгорания прочность сцепления износостойкого покрытия с основой является весьма важной эксплуатационной характеристикой, во многом зависящей от способа подготовки поверхности. Для поршневых колец крупногабаритных двигателей внутреннего сгорания дробеструйная обработка применяется перед нанесением газотермически напыляемых покрытий, в частности, покрытий на основе молибдена [15]. Задача обеспечения необходимого микрорельефа поверхности и режимов дробеструйной обработки перед нанесением износостойкого газотермического покрытия является актуальной.

Обсуждение результатов исследования. В работе рассматривалось композиционное сталь-молибденовое покрытие, получаемое из проволоки молибдена и стальной проволоки 11Х18М-ШД, наносимое газотермическим способом на рабочую поверхность поршневых колец диаметром 210 мм.

Перед нанесением покрытия кольца собирались на оправку по 20 штук, на рабочей поверхности каждого из них протачивалась трапециевидная канавка, затем на той же оправке кольца подвергались струйно-абразивной обработке дробью и последующему газотермическому напылению.

Прочность сцепления определялась углом закручивания α, при котором происходило отслаивание покрытия на окончательно готовых кольцах. Зависимость угла закручивания α от параметра шероховатости Rz определялась косвенным путем. Вначале устанавливалась зависимость Rz и α от частоты смены дроби n, а затем оценивалось их взаимовлияние.

Струйно-абразивная обработка производилась на следующих режимах: расстояние до среза сопла – 130 мм; давление рабочего воздуха – 0,4 МПа; количество проходов – 2; частота вращение оправки – 17 мин$^{-1}$; угол атаки сопла – 80°; дробь – ДСК-08 по ГОСТ 11964-81.

Замена дроби проводилась после обработки 35, 40 и 43 оправок колец. Шероховатость образцов колец измерялась на профилографе-профилометре модели 201.

В первой части исследований определялась зависимость шероховатости Rz образцов колец от частоты смены дроби n (рис.4, *а*). Очевидно, что шероховатость, обеспечиваемая более новой дробью, выше. Результаты испытаний по определению угла закручивания α, при котором происходило отслаивание покрытия в зависимости от частоты смены дроби n представлены на рис.4, *б*. При этом угол закручивания изменялся от 57° при n = 35 до 39° при n = 43.

Обобщая результаты, представленные на рис.4, *а*, *б*, можно получить зависимость угла закручивания α от шероховатости Rz (рис.4, *в*). При этом видно, что в рассматриваемом диапазоне

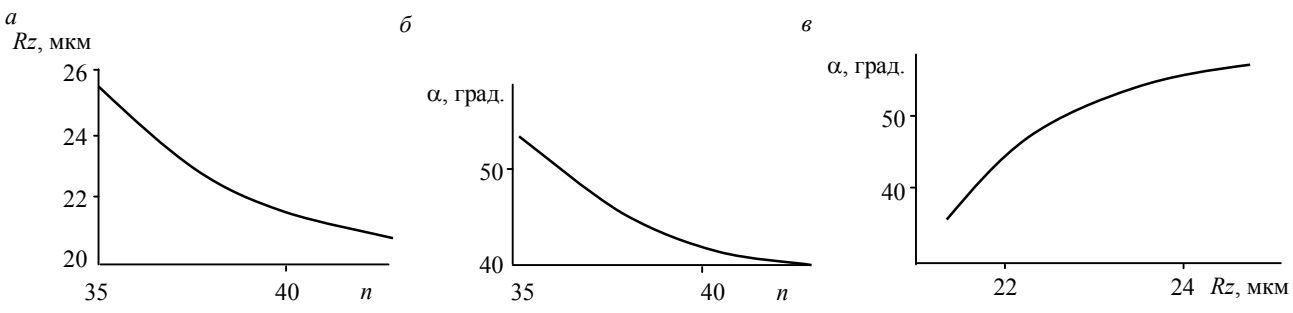


Рис.4. Зависимость шероховатости Rz (*а*) и угла закручивания α (*б*) от частоты смены дроби n и угла закручивания α от шероховатости поверхности Rz (*в*) после струйно-абразивной обработки

DOI: 10.25515/PMI.2018.1.77

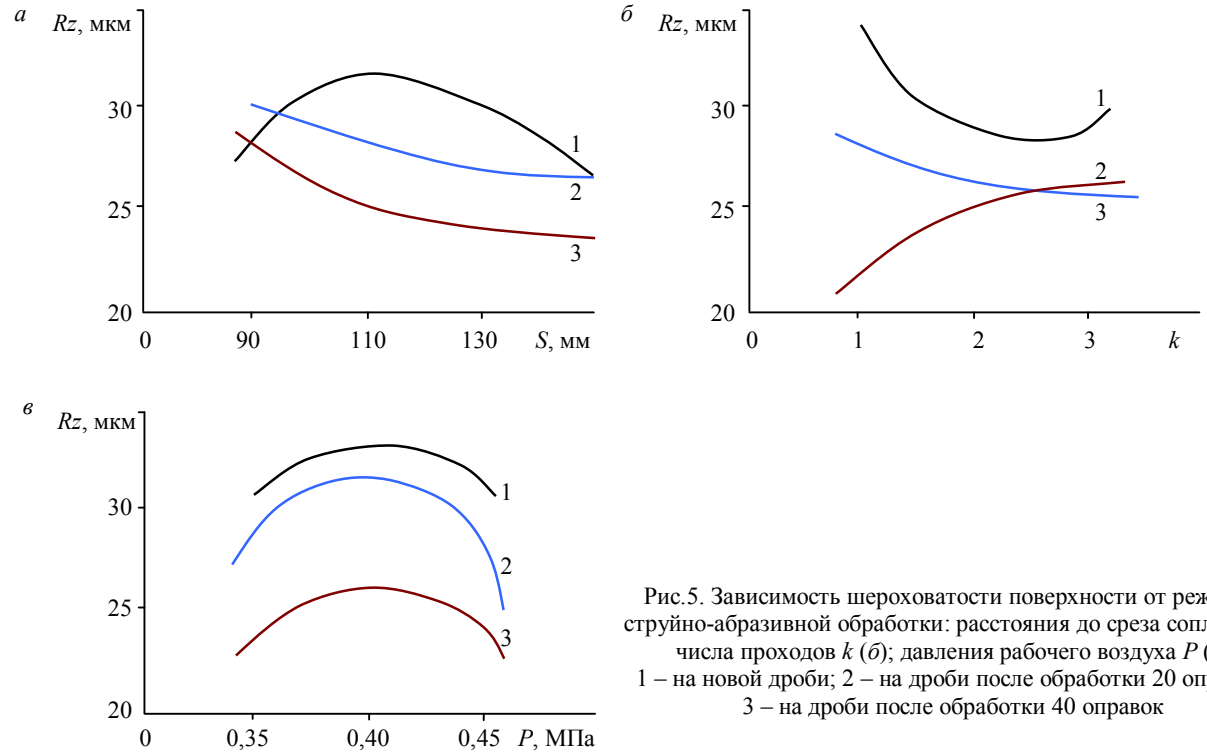


Рис.5. Зависимость шероховатости поверхности от режимов струйно-абразивной обработки: расстояния до среза сопла S (*а*); числа проходов k (*б*); давления рабочего воздуха P (*в*)
1 – на новой дроби; 2 – на дроби после обработки 20 оправок; 3 – на дроби после обработки 40 оправок

изменения шероховатости указанная зависимость аппроксимируется практически в линейном виде, т.е. прочность сцепления увеличивается с увеличением шероховатости поверхности.

Таким образом, учитывая, что нормальная работа поршневых колец, как показывает опыт эксплуатации, обеспечивается при отслаивании покрытий на углах выше 35°, можно сделать вывод о необходимости смены дроби после обработки не более 40 оправок. При этом шероховатость будет ограничена снизу и соответствует $Rz \geq 22$ мкм. По данным работы [8] ограничение шероховатости сверху обычно принимается до $Rz \leq 160$ мкм, так как при большей шероховатости зарождаются очаги отслоений напыленного слоя от основного металла.

Во второй части испытаний с целью обеспечения требуемой шероховатости поверхности после струйно-абразивной обработки были исследованы различные режимы и выявлена их взаимосвязь с параметрами шероховатости. В каждой серии экспериментов варьировался один из режимов обработки: расстояние до среза сопла S, число проходов k, давление рабочего воздуха P, в то время как две другие характеристики оставались постоянными (рис.5).

В первой серии экспериментов варьировалось расстояние до среза сопла (S = 70, 90, 110, 130 и 150 мм), при этом обработка производилась за два прохода при давлении рабочего воздуха 0,4 МПа. Из рис.5, *а* видно, что как для новой дроби, так и для дроби после обработки 40 оправок, общим оптимальным расстоянием до среза сопла следует принять 110 мм.

Во второй серии варьировалось число проходов (k = 1,2, 3) при расстоянии до среза сопла 110 мм и давлении рабочего воздуха 0,4 МПа. Как показано на рис.5, *б*, оптимальным следует считать k = 2.

В третьей серии варьировалось давление рабочего воздуха (P = 0,35; 0,40 и 0,45 МПа) при обработке за два прохода и расстоянии до среза сопла 110 мм. Оптимальным с точки зрения получения необходимой шероховатости следует считать P = 0,4 МПа (рис.5, *в*).

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлена зависимость прочности сцепления газотермического износостойкого покрытия поршневых колец от шероховатости рабочей поверхности после струйно-абразивной обработки и установлены режимы, обеспечивающие оптимальную шероховатость: давление рабочего воздуха – 0,4 МПа, число проходов – 2, расстояние до среза сопла – 110 мм. При этом следует производить смену дроби после струйно-абразивной обработки не более 40 оправок колец.

DOI: *10.25515/PMI.2018.1.77*

Выводы

1. Шероховатость поверхности, получаемая в результате струйно-абразивной обработки, оказывает существенное влияние на прочность сцепления покрытия, получаемого методами газотермического и газоплазменного напыления.

2. Напыляемые покрытия на основе молибдена и его композиций широко применяются при изготовлении поршневых колец крупногабаритных двигателей внутреннего сгорания, в том числе двигателей карьерных автосамосвалов и тепловозных локомотивов. При этом обеспечение прочности сцепления покрытия с подложкой тесно связано с обеспечением необходимой шероховатости и режимами струйно-абразивной обработки.

3. В качестве критерия прочности сцепления покрытия поршневого кольца может быть использован угол закручивания, при котором происходит отслаивание покрытия. Такой подход позволяет косвенным путем установить взаимосвязь между прочностью сцепления покрытия и шероховатостью поверхности.

4. Предложены режимы струйно-абразивной обработки (давление рабочего воздуха 0,4 МПа, расстояние до среза сопла – 110 мм, количество проходов – 2, смена дроби после обработки 40 оправок), обеспечивающие требуемую шероховатость рабочей поверхности поршневого кольца ($Rz \geq 22$ мкм) перед напылением.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника / Д.Н.Гаркунов, Э.Л.Мельников, В.С.Гаврилюк. М.: КНОРУС, 2013. 408 с.

2. *Дроздов Ю.Н.* Прикладная трибология (трение, износ и смазка) / Ю.Н.Дроздов, Е.Г.Юдин, А.И.Белов. М.: Эко-Пресс, 2010. 604 с.

3. *Кравченко И.Н.* Обеспечение надежности адгезионной связи плазменных покрытий на поршневых кольцах ДВС с учетом их теплового и термонапряженного состояния / И.Н.Кравченко, Е.М.Бобряшов, А.Ф.Пузряков // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 10. С. 358-361.

4. *Красный В.А.* Применение полимерных композитных материалов в узлах трения скважинных нефтяных насосов / В.А.Красный, В.В.Максаров, Ю.Ольт // Записки Горного института. 2015. Т. 211. С. 71-79.

5. *Кудинов В.А.* Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.А.Кудинов, Г.В.Бобров. М.: Металлургия, 1992. 432 с.

6. *Мяконьков М.Б.* Сравнительные исследования способов нанесения покрытий на поршневые кольца для уменьшения их износа // Металлообработка. 2010. № 3. С. 36-39.

7. Основы эксплуатации горных машин и оборудования / А.В.Гилев, В.Г.Чесноков, Н.Б.Лаврова, Л.В.Хомич, Н.Н.Гилева, Л.П.Коростовенко; Сиб. федер. ун-т. Красноярск. 2011. 276 с.

8. *Суслов А.Г.* Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г.Суслов, В.П.Федоров, О.А.Горленко. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.

9. *Цыбин А.С.* Физические основы плазменной и лазерной технологий / МИФИ. М., 2002. 184 с.

10. *Agarwala R.C.* Electroless alloy/composite coatings: A review / R.C.Agarwala, V.Agarwala // Sadhana. 2003. Vol. 28. Parts 3 & 4. P. 475-493.

11. Diesel Engine Cylinder Bore Coating for Extreme Operating Conditions / Kamo Lloyd, Dorsaf Saad, Philipe Saad, Milad H.Mekari // SAE Technical Paper 2007-01-1439, 2007. DOI: 10.4271/2007-01-1439

12. *Holmberg K.* Coatings Tribology – Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering / K.Holmberg, A.Matthews // Tribology and Interface Engineering Series 56. Amsterdam: Elsevier, 2009. 560 p.

13. *Krasnyy V.* Improving fretting resistance of heavily loaded friction machine parts using a modified polymer composition / V.Krasnyy, V.Maksarov, J.Olt // Agronomy Research. 2016. Vol. 14(S1). P. 1023-1033.

14. *Krasnyy V.* Increase of wear and fretting resistance of mining machinery parts with regular roughness patterns / V.Krasnyy, V.Maksarov, J.Olt // Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium. 2016. P. 151-156.

15. *Maksarov V.* The Formation of Surface Roughness of Piston Rings for the Purpose of Improving the Adhesion of Wear-Resistant Coatings / V.Maksarov, V.Krasnyy // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 736. P. 73-78.

16. *Musil J.* Hard and super hard nanocomposite coatings // Surface and coatings technology. 2000. Vol. 125. Iss. 1-3. P. 322-330.

17. *Shaffer S.J.* Tribological performance of various coatings in unlubricated sliding for use in small arms action components / S.J.Shaffer, M.J.Rogers // Wear. 2007. Vol. 263. P. 1281-1290.

18. *Sigmund P.* Nucl. Mechanisms and theory of physical sputtering by particle impact // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. 1987. Vol. 27. Iss. 1. P. 1-20. DOI:10.1016/0168-583X(87)90004-8

***Авторы*: Ю.Ольт,** *д-р техн. наук*, *профессор*, *jyri.olt@emu.ee* (*Эстонский университет естественных наук*, *Тарту*, *Эстония*), **В.В.Максаров**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *maks78.54@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **В.А.Красный,** *канд. техн. наук*, *доцент*, *vikras1955@yandex.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 18.07.2017.