

чениями углов с правым и левым направлением наклона режущих пластин.

Также при моделировании было установлено, что для получения качественной поверхности с минимальными отклонениями по форме необходимо проводить обработку данной фрезой в три этапа (черновая, получистовая и чистовая) путем снижения скорости вращения фрезы. Причем последний чистовой этап проводить на минимальных скоростях вращения фрезы одной режущей пластиной, что позволяет полностью снять огранку с обрабатываемой детали.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов, М.Ю., Волков, Д.В., Скляр, В.М. Разработка рациональной формы режущей кромки инстру-

мента для фрезоточения // *Металлообработка*. – 2018. – № 3(105). – С. 9-12.

2. Грановский, Г.И., Грановский, В.Г. Резание металлов. – М.: Высш. шк. 1985. – 304 с.

3. Аршинов, В.А., Алексеев, Г.А. Резание металлов и режущий инструмент. – М.: Машиностроение, 1975. – 440 с.

### REFERENCES

1. Kulikov, M.Yu., Volkov, D.V., Sklyarov, V.M. Development of tool tip efficient shape for milling // *Metal Processing*. – 2018. – No.3(105). – pp. 9-12.

2. Granovsky, G.I., Granovsky V.G. *Metal Cutting*. – M.: Higher School. 1985. – pp. 304.

3. Arshinov, V.A., Alexeev, G.A. *Metal Cutting and Cutter*. – M.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 440.

*Рецензент д.т.н. Ф.С. Сабиров*

УДК 621.7.02

DOI: 10.30987/article\_5bf7a56d3dab40.87032409

**А.А. Кульков**, к.т.н.

(ФГБОУ ВО Российский университет транспорта (МИИТ),  
127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9)

**М.А. Ларионов**, к.т.н.

(Институт конструкторско-технологической информатики РАН,  
127055, г. Москва, Вадковский пер. 18, стр. 1а)

E-mail: pioneer\_maxim@mail.ru

## Особенности абразивно-струйной обработки металлических поверхностей перед окрашиванием

*Приведены результаты исследования процесса обработки металлических поверхностей перед промышленной окраской или нанесением защитных покрытий. Предокрасочная обработка определяет качество нанесенного покрытия, его адгезию с основным металлом, равномерность и прочность. Подробно рассмотрены процессы формообразования шероховатости поверхности в зависимости от режимов обработки и свойств применяемого абразива.*

**Ключевые слова:** обработка свободным абразивом; шероховатость; адгезия; защитные покрытия.

**A.A. Kul'kov**, Can. Sc. Tech.,

(FSBEI HE Russian University of Transport (MITE),  
Building 9, 9, Obraztsov Str., Moscow 127994)

**M.A. Larionov**, Can. Sc. Tech.

(Institute of Design Technological Informatics of RAS, Building 1a, 18. Vadkovsky Alleyway, Moscow 127055)

## Peculiarities of metal surface abrasive jet processing before coloring

*The investigation results of metal surface processing before industrial painting or protective coat application are shown. A pre-coloring processing defines quality of the coating applied, its adhesion with basic metal, uniformity and strength. The processes of surface roughness formation depending on processing modes and properties of the abrasive used are considered thoroughly.*

**Keywords:** processing with free abrasive; roughness; adhesion; protective coats.

Большинство изделий машиностроения проходит операцию окрашивания или нанесения иного защитного покрытия с целью продления срока службы и получения требуемых эксплуатационных свойств. Предокрасочная обработка изделий в машиностроении реализуется дробеструйным или пескоструйным методом вручную или автоматически с использованием робота–манипулятора.

В производственных условиях оператор очистки сам выбирает абразив (дробь, купершлак, песок) и рабочее давление воздуха при очистке. В некоторых случаях выбор регламентируется технологическим процессом, но и там прописываются только два основных режима: рабочее давление воздуха  $P$  (МПа) и средний размер абразива (мм). Правильный выбор режимов очистки в совокупности с опытом оператора позволяет обеспечить требуемое качество (степень очистки Sa 1-3 по ISO8501, рис. 1) и придать поверхности металла требуемую шероховатость  $Rz$ , регламентируемую производителями красок и грунтовок, в зависимости от толщины и свойств наносимого покрытия [1, 2].

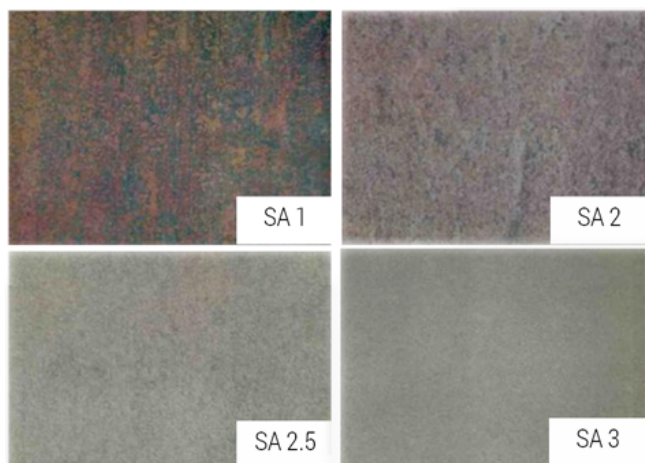


Рис. 1. Степени очистки металлической поверхности в соответствии с ISO8501

Очистка металлов дробеструйным или пескоструйным способом имеет существенные производственные потери. Эти потери характеризуются тем, что в процесс очистки вкладывается существенно больше энергии, чем требуется. Потери формируются из-за того, что оператор по очистке не может в производственных условиях оценить требуемую величину вкладываемой энергии и материалов.

При настройке большего давления и расхода воздуха частицы абразива раскалываются при столкновении с поверхностью металла и не могут быть использованы повторно. При

этом раскол абразива может составить до 40...50 % за цикл, при нормальных потерях от раскола 5...10 %. Получаемая потеря не может быть оценена непосредственно в производственных условиях, так как основана на факторах, которые сложно проконтролировать визуально.

В табл. 1 приведены четыре типовых случая производственных потерь при неправильно выбранном режиме очистки.

**1. Примеры производственных потерь при абразивоструйной металлообработке**

Ошибка при выборе режима	Следствие	Причина потери	Потеря
Выбрано слишком большое давление и расход воздуха	Слишком большой разгон частиц в потоке	Абразив раскалывается при столкновении с поверхностью и не может быть использован повторно (потеря более 40 % абразива за цикл)	Электрэнергия, абразив
Выбрано слишком маленькое давление и расход воздуха	Слабый разгон частиц в потоке	Энергии соударения недостаточно для разрушения загрязнений, замедление скорости очистки	Время
Выбран слишком твердый абразив	Хрупкое разрушение металла в зоне столкновения	Поверхность металла стачивается	Металл
Выбран слишком мягкий абразив	Разрушение абразива в зоне столкновения, недочистка	Твердости абразива недостаточно для разрушения загрязнений и придания шероховатости	Абразив, время

Термоабразивный метод позволяет избежать данных проблем. Он представляет собой обработку поверхности потоком разогретого газа, смешанного с ускоренными частицами свободного абразива. При этом поток абразива разрушает оксидные пленки и твердые загрязнения, придает поверхности шероховатость и требуемое качество, а термический поток обезжиривает ее. Это позволяет исключить сложную и отходоёмкую операцию классического обезжиривания химическим путем и в целом сократить технологический процесс.

Реализация данного метода возможна за счет использования экспериментальной термоабразивной установки. Её применение в машиностроении требует проработки и научного обоснования параметров воздействия потока свободного абразива на обрабатываемую поверхность.

На примере типовой конструкции газодинамического аппарата, представленной на рис. 2, можно рассмотреть основные принципы генерации газодинамического потока свободного абразива. Через штуцер 4 в камеру сгорания 1 впрыскивается топливо, а через штуцер 3 подается сжатый воздух. В камере сгорания создается горючая смесь, находящаяся под давлением, и стремящаяся выйти через критическое сечение сопла 6. Перед этим смесь воспламеняется искрой 5 и образует факел термического потока 9, который ускоряется путём сужения диаметра сопла перед критическим сечением 6. На выходе из критического сечения сопло снова расширяется, для того чтобы не создавать препятствий истечению ускоренного термического потока. После выхода из ускоряющего сопла в поток через эжектор 8 подается абразив. Таким образом, на выходе из аппарата создается горячий газодинамический поток свободного абразива.

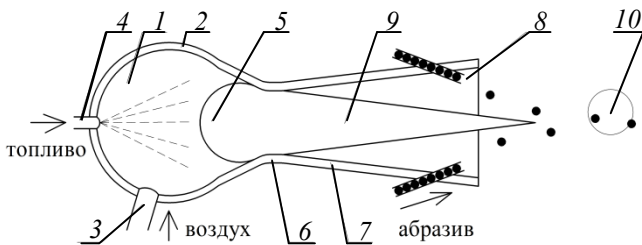


Рис. 2. Принципиальная схема установки для реализации газодинамического метода:

1 – камера сгорания; 2 – корпус камеры сгорания; 3 – штуцер подачи сжатого воздуха; 4 – штуцер подачи топлива; 5 – воспламенение; 6 – критическое сечение сопла; 7 – расширяющаяся часть ускоряющего сопла; 8 – эжектор подачи абразива; 9 – факел термического потока; 10 – факел газодинамического потока

Расчет и обоснование режимов абразивоструйной обработки является актуальной научно-практической задачей, так как позволяет избежать многих производственных потерь, а главное дает возможность выбрать нужный режим при автоматизации и роботизации очистки, когда процесс перестанет определяться опытом оператора.

Одними из главных параметров, определяющих эффективность процесса очистки, является скорость и кинетическая энергия частиц абразива. Попадая в поток, частицы разгоняются до разных скоростей, зависящих от различных параметров. Для движения в потоке характерны следующие закономерности. На определённом участке потока частица разгоняется и достигает максимальной скорости, а далее следует её постепенное замедление. Это вызвано тем, что вылетая из сопла, она начинает испытывать сопротивление окружающей среды.

При попадании частицы в поток на неё действует аэродинамическая сила  $P$  (Н), созданная двигающимися частицами воздуха [3], как показано на рис. 3.

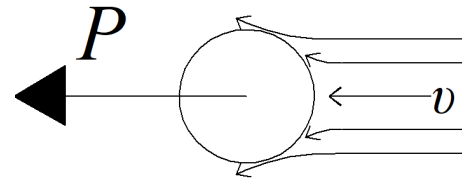


Рис. 3. Воздействие аэродинамической силы на частицу в потоке

В процессе обтекания частица начинает двигаться с переменной скоростью  $\omega$ . Чем больше разность скоростей между частицей и потоком, тем большее ускорение будет придаваться частице. Сила, с которой поток воздействует на поверхность зерна абразива, является геометрической суммой мгновенных сил, возникающих при элементарных соударениях микрочастиц воздуха и поверхности зерна.

В аэродинамике получена специальная формула, позволяющая рассчитать силу  $P$ , действующую на твердое тело, при попадании его в поток воздуха.

Аэродинамическую силу, действующую на круглую частицу абразива в потоке, можно вычислить по формуле

$$P = C_x F_{\text{част}} \rho_{\text{г}} \frac{(\vartheta - \omega)^2}{2}, \quad (1)$$

где  $C_x$  – коэффициент, учитывающий фор-

му частицы и режим её обтекания;  $F_{\text{част}}$  – площадь поверхности частицы, на которую воздействует поток (модель сечения частицы);  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа;  $v$  – скорость газового потока;  $\omega$  – скорость частицы.

Расчёт скорости напрямую с использованием данного выражения затруднителен, так как его преобразование относительно скорости частиц приводит к получению сложных дифференциальных уравнений. Поэтому в данном случае целесообразно воспользоваться упрощённой методикой расчёта скорости. Суть её состоит в том, чтобы разделить исследуемый участок ускорения частиц на несколько коротких участков, и принять, что на данных участках частица движется равноускоренно.

Разделим путь частицы на расстояния до 0,3 м на 10 равных участков длиной 1 см. Примем, что на каждом участке на частицу действует постоянная сила  $P$ , которая приводит частицу в равноускоренное движение. В начале каждого участка скорость частицы равна  $\omega_0$ , а в конце  $\omega$ . Если частица движется на указанном участке равноускоренно, то для неё можно записать следующее уравнение:

$$l = \frac{at^2}{2} + \omega_0 t, \quad (2)$$

где  $l$  – длина участка.

Подставим значение ускорения в (1) и, преобразовав его, получим, что при ускорении частицы:

$$\omega_i = \sqrt{(\omega_{i-1}^2 + 2C_x F_{\text{част}} \rho_{\text{г}} \frac{(v - \omega_{i-1})^2}{2m} l)}, \quad (3)$$

где  $\omega_i$  – скорость частицы в конце участка;  $\omega_{i-1}$  – скорость частицы в начале участка.

Из уравнения (3) следует, что скорость частицы в конечном итоге определяется следующими факторами: скоростью воздушного потока; массой частицы; местонахождением частицы в потоке; площадью поверхности частицы.

В уравнении (3) неизвестной величиной является скорость газового потока  $v$ . Скорость газового потока, получаемая в соплах дробеструйных аппаратов, может быть рассчитана исходя из следующего выражения [4]:

$$v_0 = \sqrt{\left( \frac{k}{k-1} RT_0 \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \right)}, \quad (4)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление воздуха;  $P_0$  – давление воздуха;  $k = 1,4$  для воздуха;  $R = 287$  Дж/кг·К;  $T_0$  – температура воздуха.

Регулируя давление  $P$ , мПа и расход воздуха  $L$ , м<sup>3</sup>/мин были проведены измерения

скорости газового потока в ускоряющей трубе и рассчитана скорость разгона частиц на выходе из сопла и на разных расстояниях от сопла. Экспериментально-теоретическим путем определена зависимость скорости разгона частиц  $\omega$  в газодинамическом потоке, в зависимости от режима истечения потока и параметров частицы. Установлено, что средняя скорость разгона частиц диаметром 0,5 мм составляет от 25 до 55 м/с.

Процесс взаимодействия свободного абразива с поверхностью металла описан в нескольких работах [1, 5]. В основном исследование сводилось к тому, что эффективность очистки зависит, в первую очередь, от энергии частиц при столкновении, т.е. параметры среза в основном зависят от массы и скорости частицы на момент столкновения, а также от механических свойств материала частицы и старого лакокрасочного покрытия и основного металла.

Сталкиваясь с поверхностью, частица дроби или песка деформирует поверхность металла, при этом в зависимости от энергии частицы происходит хрупкое разрушение в зоне контакта или пластическая деформация. С точки зрения подготовки поверхности к покраске целесообразно сообщать частицам потока энергию, достаточную только для пластической деформации металла. Так, можно предотвратить стачивание поверхности при обработке.

Далее приведены результаты исследования процесса газодинамического метода обработки свободным абразивом. В его основе лежит модель деформирования поверхности в результате множества соударений с ней частиц абразива.

Теоретическая модель столкновения частицы с поверхностью ( $P$  – мгновенная сила соударения, Н;  $r$  – радиус оставляемого следа, мм;  $\psi$  – глубина оставляемого следа, мм) представлена на рис. 4.

До столкновения частица в свободном полете обладает кинетической энергией, которая при столкновении совершает работу по деформированию и разрушению поверхности. Параметры оставляемого следа в основном зависят от массы и скорости частицы на момент столкновения, а так же от механических свойств материала частицы и металла.

Теоретические и практические исследования показали, что глубина и диаметр оставляемого частицей следа растут с увеличением скорости и массы частиц и составляют 20...30 % от диаметра частиц при расчетных скоростях

50 м/с, если абразив – кварцевый песок. При применении более твердого абразива, например стальной или чугунной дроби, глубина и диаметр составляют уже 50 % от диаметра частиц при тех же расчетных скоростях.

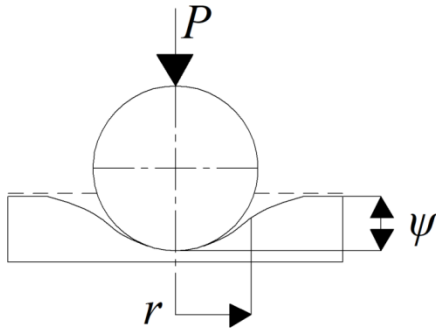


Рис. 4. Модель деформирования поверхности частицей свободного абразива

Исследования проводились на наиболее часто используемых типах свободных абразивов: кварцевый песок, колотая и литая дробь из стали и чугуна и купершлак. Средние фракции исследуемых абразивов от 0,1 до 1 мм. Крупные частицы более инертны и тяжелей разгоняются в потоке. Дробь средней фракции 1 мм разгоняется не более чем до 30 м/с. Песчаная смесь разгоняется до 60...70 м/с и оставляет более качественный след на обработанной поверхности. При обработке с максимальными режимами глубина дефектного слоя не превышает 0,2 мм при использовании песчаной смеси и 0,4 мм – при использовании дроби. В целом песчаная смесь обеспечивает более мягкое воздействие на поверхность металла за счет своих природных свойств.

При единичном столкновении частица оставляет на поверхности срез глубиной  $\psi$ , шириной  $r$  и длиной  $l$ . Тогда процесс очистки может быть представлен в виде модели, описывающей совокупность множества элементарных столкновений частиц абразива с поверхностью. Разделим зону очистки на малые зоны длиной  $l$  и шириной  $r$ . Тогда каждой зоне будет соответствовать количество столкновений в ней  $N_i$ , а так же суммарная глубина разрушения  $H_i$ , как показано на рис. 5.

Примем, что количество частиц от краев потока к центру распределяется в соответствии с нормальным законом распределения Гаусса. Примем, что общее количество частиц, попадающих в пятно контакта в единицу времени равно  $N$ , а количество частиц попадающих в центр пятна контакта равно  $N_0$ . Тогда

скорость очистки может быть выражена как:

$$v = K \frac{N \cdot \psi \cdot r}{H_{\text{покр}}} \cdot e^{-\left(\frac{R_{\text{п}}}{R_y}\right)^2}, \quad (5)$$

где  $R_{\text{п}}$  – радиус зоны очистки;  $H_{\text{покр}}$  – толщина покрытия;  $\psi$  – глубина единичного среза;  $r$  – ширина единичного среза;  $N$  – расход абразива;  $v$  – скорость очистки.

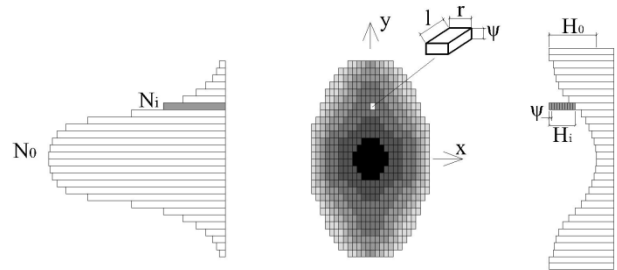


Рис. 5. Дискретизация зоны очистки на элементарные площадки

Данное уравнение позволяет определить рациональное количество вкладываемой в процесс обработки энергии и произвести оценку эффективности. Расчеты показали, что эффективность обработки увеличивается тем интенсивней, чем больше скорость очистки и ширина очищаемой зоны. При толщине покрытия до 1 мм производительность процесса составляет 40...75 м<sup>2</sup>/ч. Экспериментальная проверка адекватности модели очистки показала, что производительность при обработке соответствует теоретическим данным до значений 30...35 м<sup>2</sup>/ч.

Шероховатость поверхности формируется как след от соударений с частицами и находится в пределах  $Rz = 25...55$  мкм в зависимости от типа и скорости абразива. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 6, а.

Расход свободного абразива при средних режимах составляет примерно 60 кг/ч, при этом часть абразива может быть использована повторно. Песчаная смесь за один цикл теряет примерно 30...40 % массы, которая превращается в пыль. Дробь и купершлак имеют больший ресурс и за один цикл теряют 7 % и 15 % массы соответственно. С точки зрения качества песчаная смесь имеет лучшие показатели, т.к. более мягко воздействует на обрабатываемую поверхность, но превращаясь в пыль, негативно воздействует на здоровье человека, работающего рядом с зоной очистки. Дробь и купершлак сильнее деформируют обрабатываемую поверхность, но раскалываясь при столкновении, не образуют пыль.

На рис. 6, б приведен экспериментальный график зависимости расхода абразива от скорости абразивоструйного потока. На рис. 6, в представлена зависимость скорости движения частиц от расхода воздуха.

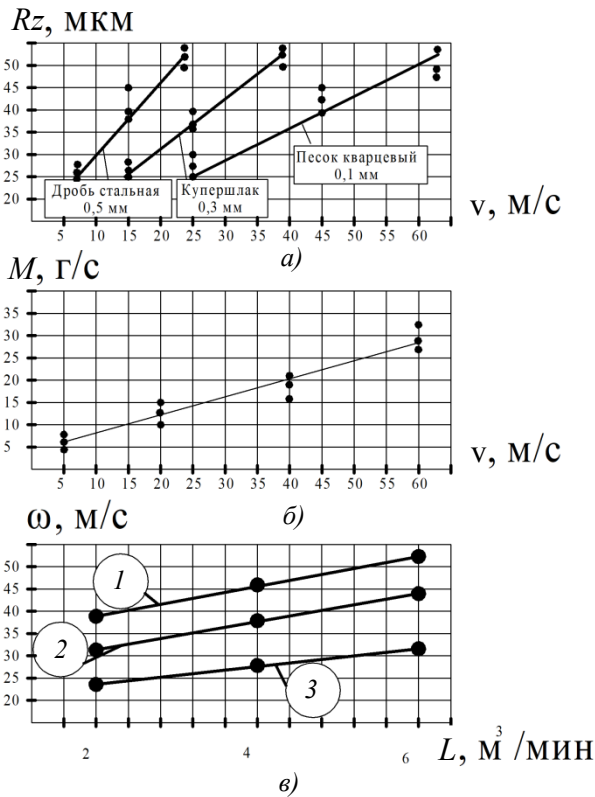


Рис. 6. Технологические режимы обработки свободным абразивом:

1 – дробь колотая 0,2 мм; 2 – дробь колотая 0,5 мм; 3 – дробь колотая 0,8 мм

Исследования показали, что выбранный метод позволяет обеспечить степень очистки не ниже чем Sa2 по ISO8501, и шероховатость  $Rz$  в пределах 25...55 мкм, что соответствует требованиям производителей лакокрасочных покрытий.

Исследование технологических режимов и параметров процесса позволили оценить разгон частиц в абразивоструйном потоке, механику столкновения частицы с металлом и деформирования поверхностного слоя. Данные исследования позволяют более точно настроить

ить режим очистки при автоматизации или роботизации процесса.

Полученная модель очистки позволяет рассчитать требуемое количество энергии, вкладываемое в процесс и заметно сократить расходы на электроэнергию и абразивы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кульков, А.А., Иноземцев, В.Е. Формирование качества поверхности металла при термоабразивной обработке // Сб. тр. VI Междунар. конф. «Конструкторско-технологическая информатика» / под ред. А.В. Морозовой. – М.: Издательский дом «Спектр», 2017. – 38 с.
2. Евсеев, Д.Г., Кульков, А.А., Кoryтов, А.Ю. Оценка эффективности процесса обработки поверхностей вагонов перед окраской // Металлообработка. – 2016. – 4(94). – С. 66.
3. Евсеев, Д.Г., Кульков, А.А., Кoryтов, А.Ю. Исследование процесса формирования качества поверхности при обработке вагонов газодинамическим методом // Металлообработка. – 2016. – 6(90). – С. 39.
4. Евсеев, Д.Г., Кульков, А.А. Дробеструйный газодинамический метод очистки поверхностей // Транспорт: Наука. Техника. Управление. Научный информационный сборник. – С. 32.

### REFERENCES

1. Kulkov, A.A., Inozemtsev, V.E. Quality formation in metal surface at thermo-abrasive treatment // *Transactions of the VI-th Inter. Conf. "Design-Technological Informatics"* / under the editorship of A.V. Morozova. – M.: "Spectrum" Publishers, 2017. – pp. 38.
2. Evseev, D.G., Kulkov, A.A., Korytov, A.Yu. Assessment of railway car surface processing effectiveness before painting // *Metal Processing*. – 2016. – 4(94). – pp. 66.
3. Evseev, D.G., Kulkov, A.A., Korytov, A.Yu. Investigation of surface quality formation at car processing with gas-dynamic method // *Metal Processing*. – 2016. – 6(90). – pp. 39.
4. Evseev, D.G., Kulkov, A.A. Shot blasting gas-dynamic method for surface cleaning // *Transport: Science. Engineering. Management. Scientific Information Collection*. – pp.32.

Рецензент д.т.н. Ф.С. Сабиров

