

**Ю. С. Багайсков**, д-р техн. наук, доцент, **Н. В. Некипелов**

Волжский политехнический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, г. Волжский, Россия

Тел. +7 902 3130738; E-mail: bagaiskov@bk.ru

## АНАЛИЗ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДРОБЕМЕТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СТАЛЬНЫХ ТРУБ

*Для защиты поверхности стальных труб при транспортировке нефтегазовых материалов в условиях агрессивных сред применяют покрытия. При этом для подготовки поверхности труб наибольшее применение имеет дробеметный метод. В качестве абразивных частиц для этой обработки используется в основном стальная колотая дробь высокой твердости. Для лучшего закрепления покрытий на стальных поверхностях необходимо иметь повышенную развитую шероховатость. Показана зависимость достигаемой шероховатости от твердости частиц дроби. Вследствие ударного действия при обработке происходит разрушение дроби, меняются их размеры и форма. Фактически в рабочей зоне обработки находится смесь частиц различных фракций. Параметры шероховатости, глубины проникновения частиц дроби в поверхность и величины остаточных напряжений зависят от размерности и формы частиц дроби, дистанции и угла атаки частиц относительно поверхности, времени обработки.*

**Ключевые слова:** трубы, покрытия, дробь, твердость, шероховатость, напряжения.

**Yu. S. Bagayskov, N. V. Nekipelov**

## ANALYSIS OF OPTIMAL SHOTBLASTING CONDITIONS OF STEEL PIPE SURFACES

*Coatings are used to protect the surface of steel pipes during the transportation of oil and gas materials in aggressive environments. Shotblasting is the most commonly used method for preparing the pipe surface. High-hardness steel grit is primarily used as an abrasive particle for this treatment. For better adhesion of coatings to steel surfaces, a high degree of roughness is required. The dependence of the achievable roughness on the hardness of the shot particles is demonstrated. Due to the impact action during processing, the shot particles are destroyed, changing their size and shape. In fact, the processing zone contains a mixture of particles of different sizes. Roughness parameters, the depth of penetration of the shot particles into the surface, and the magnitude of residual stresses depend on the size and shape of the shot particles, the distance and angle of attack of the particles relative to the surface, and the processing time.*

**Keywords:** pipes, coatings, shot, hardness, roughness, stress.

### 1. Введение

Для транспортировки нефтегазовых материалов к потребителю служат трубопроводные системы. Эксплуатация труб проходит в условиях воздействия значительных механических нагрузок, перепадов температур и агрессивных сред. Для этого поверхности труб, чаще всего стальных, должны обладать высоким уровнем характеристик по прочности, износостойкости, коррозионной стойкости [1]. Обеспечить такие требования позволяет нанесение покрытий, в основном на композиционной полимерной основе. Для закрепления таких покрытий, повышения адгезионных свойств, необходима определенная подготовка поверхностей труб. Поэтому подготовка поверхности перед нанесением антикоррозионных покрытий является необходимой стадией в технологическом цикле их нанесения.

Повышение степени адгезии покрытий к поверхностям труб может уменьшить скорость коррозии, увеличить срок службы покрытия и самих труб [2].

В процесс подготовки поверхности труб к нанесению покрытий входит очистка поверхности от адсорбированных загрязнений и оксидных пленок, обезжиривание и в

конечном итоге обеспечение микрорельефа с желательной величиной шероховатости. В заключительной стадии такой обработки поверхности труб применяют чаще всего дробеструйный или дробеметный способы. Различаются эти технологические процессы источниками энергии, сообщаемого движение рабочим телам – частицам (зернам абразива). В первом случае – за счет сжатого воздуха и прямолинейного ударного действия частиц, во втором – за счет вращения лопасти, основана на принципе центробежного ускорения частиц, которые с высокой скоростью воздействуют на поверхность трубы [3].

Дробеметная обработка достаточно производительна, позволяет достичь равномерного, заданной величины, микрорельефа поверхности, при этом создаются благоприятные остаточные напряжения сжатия, которые повышают усталостную прочность и коррозионную стойкости.

Выбор характеристик рабочих тел при дробеметной обработке очень важен. В качестве этих частиц применяют частицы (дробь) их различных материалов. Прежде всего это стальная дробь, а именно по видам: литая дробь, имеет оптимальную твердость и качество обработки, дольше сохраняет сферическую форму в рабочей смеси, колотая дробь, изготавливается из литой путем дробления, выпускаются три основных группы, отличающиеся по твердости ( GP, GL и GH), дробь на основе рубленой стали, вследствие высокой прочности может использоваться несколько раз. Кроме того применяются чугунная дробь, она хорошо очищает поверхности от ржавчины или окалины, но плохо удаляет клейкие загрязнения, износостойкость в несколько раз ниже, чем у стальной дроби, керамическая дробь, применяется для обработки поверхностей, требующих высокой точности и минимального износа оборудования, алюминиевая дробь, цель - обработка мягких металлов, не повреждает структуры, убирают накипь, тонкие слои ржавчины, окалины и нагара, дробь на основе стекла, имеет вид сверхпрочных стеклянных шариков, без вредных примесей, предназначена для многократной обработки металлических изделий со средней прочностью [4].

Стальная дробь различается по химическому составу, структуре металла, форме, размерам и твердости. Примерный химический состав: углерода 0,8-1,2 %, Mn и Si по 0,5-0,7%.

Анализ и опыт показывают, что качество подготовки поверхности труб напрямую влияет на адгезию покрытия, чаще всего полимерного. В частности ключевым параметром шероховатости поверхности является величина Rz. В принципе увеличение Rz способствует улучшению адгезии. Однако, с другой стороны, чрезмерная шероховатость может привести к образованию острых пиков, как концентраторов напряжений, которые могут стать и зонами развития коррозии [5].

Важно уметь выбирать оптимальные параметры дроби и режимных факторов процесса обработки, достигать баланса между достигаемой шероховатостью, получаемой адгезией и производительностью дробеметной обработки, исходя из требований, связанных с характеристикой поверхности труб и функциональных условий их эксплуатации. Поэтому проведение исследований оптимальных условий дробеметной обработки является актуальным.

## **2. Основное содержание и результаты работы**

Анализ исследований с применением разных видов стальной дроби показал следующее. Колотая дробь разных групп имеет твердость от 40-52HRC до примерно 60-53 HRC и обеспечивает более развитую и выраженную шероховатость поверхности.

Величина Rz на 30-40 % выше, чем достигается у литой дроби. Вследствие самой высокой твердости и повышенной склонности к раскалыванию прежде всего дробь группы GH всегда сохраняет остроугольную форму, обладая при этом максимальной производительностью и самым коротким жизненным циклом по сравнению с другими марками дроби [4]. На рисунке 1 приведена зависимость достигаемой шероховатости при дробеметной обработке от величины твердости различных видов стальной дроби. На данных из графика прослеживается четкая корреляционная зависимость шероховатости поверхности от показателей твердости дроби.

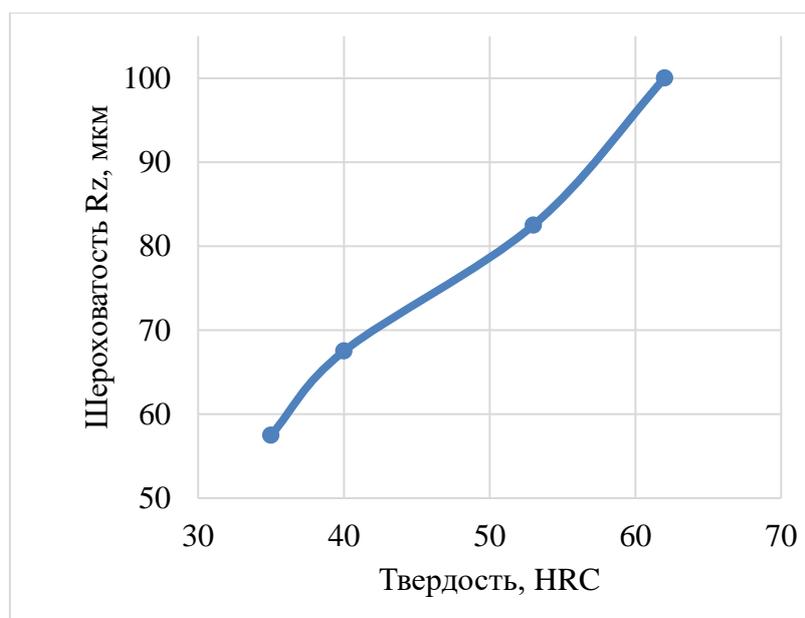


Рисунок 1. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от твердости частиц дроби

Из-за удара частиц дроби в процессе дробеметной обработки и их раскола производится добавление и смешивание частиц в сепараторе дробеметной установки. Реальная смесь состоит из мелких и крупных фракций. При сетевом анализе по размерам частиц состав смеси должен примерно соответствовать схеме на рисунке 2. В зависимости от требований к обработке конкретной продукции рациональный состав смеси, прежде всего по среднему размеру частиц дроби, может отличаться

К технологическим параметрам дробеметной обработки относятся: скорость дроби, размер и форма частиц дроби, угол атаки частиц дроби к поверхности, дистанция и время обработки.

Оптимальная скорость частиц дроби составляет 60-80 м/с. Высокая скорость дает повышенную производительность, но может вызвать перегрев поверхности [5]. Рекомендуемая скорость дроби составляет 60-80 м/с. Существует оптимальная дистанция, как длина разгона частиц, от среза сопла до обрабатываемой поверхности, при которой их скорость достигает максимума. При малых расстояниях частицы не успевают разогнаться и сталкиваются с отражёнными от поверхности другими частицами. При увеличении такого расстояния плотность потока частиц дроби снижается, что также уменьшает скорость и энергию удара.

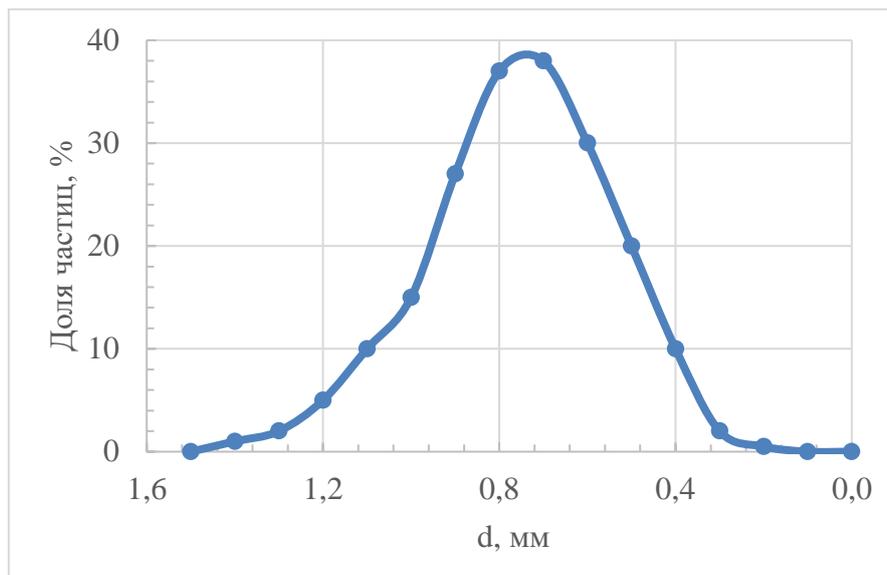


Рисунок 2. Распределение частиц дроби по размерам

Скорость очистки поверхности и производительность процесса выше, если меньше размеры дроби и больше концентрация её частиц. При увеличении размера частиц растет количество выступов и углублений на поверхности труб, несколько увеличивается шероховатость поверхности и степень адгезии покрытия, но и скорость очистки уменьшается [5]. Если частицы дроби имеют близкую к сферической форму, то на поверхности образуется больше впадин меньшей глубины.

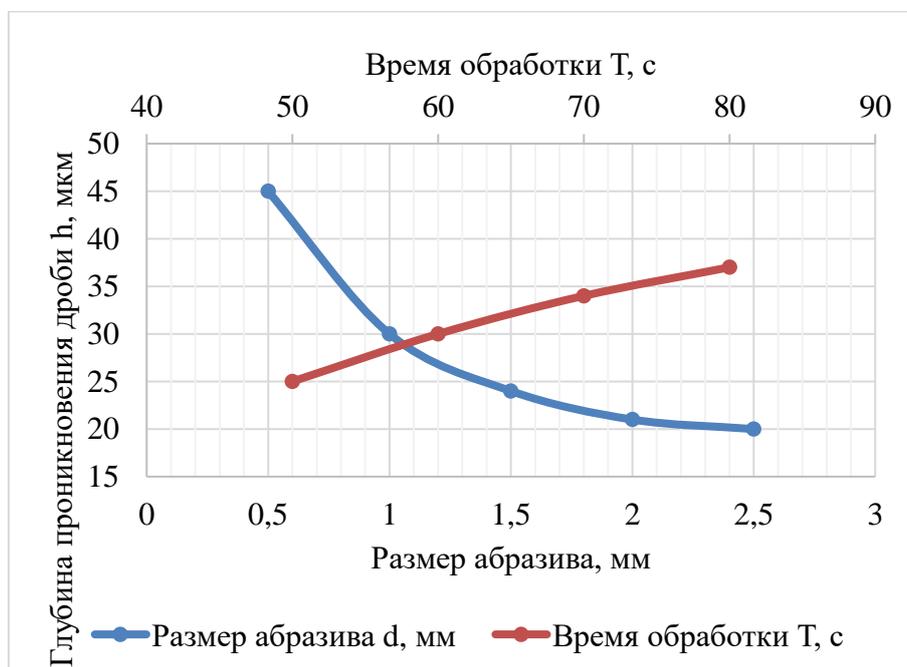


Рисунок 3. Зависимость глубины проникновения дроби (абразива) от их размера и времени обработки

При более угловатой форме частиц обработанная поверхность будет более шероховатой с глубокими впадинами, но некоторые мелкие частицы могут даже

проникать в поверхность и там оставаться. Это может снижать качество подготовки поверхности, приводит к необходимости дополнительной обработки. Так, анализ глубины проникновения частиц дроби в поверхность показал, что она возрастает прежде всего с увеличением продолжительности обработки (рисунок 3) и с уменьшением размера частиц.

Повышенная длительность процесса дробемётной обработки может привести к чрезмерному повышению температуры поверхности, снижению шероховатости и прочности адгезии покрытия.

При анализе реального процесса дробеударного упрочнения часть потока дроби, обладающая заданной скоростью, имеет нормальное направление движения к обрабатываемой поверхности, другая часть дроби попадает на поверхность под различными углами. Из-за отклонения части дроби, соударения с отскочившими дробинками, на обработанной поверхности образуются лунки с различными диаметрами и глубиной. Это может приводить к неравномерности величины упрочненного слоя и распределения остаточных напряжений, ухудшать качество обработанной поверхности [6].

Анализ результатов исследования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя показал, что независимо от направления скорости, значений скорости и размера дроби напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого материала у отпечатка дроби имеет аналогичный характер [7].

По известным данным при скорости удара дроби диаметром 1 мм свыше 15 м/с вне зависимости от направления удара с отклонением до 30 град. максимальное значение остаточных напряжений в поверхностном слое детали также меняется незначительно.

На рисунке 4 представлен график значений максимальных остаточных напряжений.

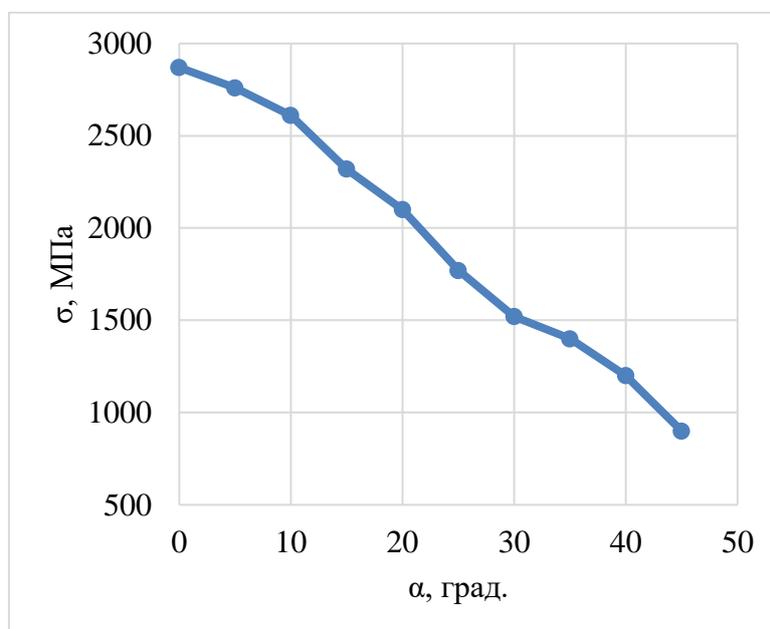


Рисунок 4. Зависимость максимальных остаточных напряжений поверхности труб от угла атаки частиц дроби при ударе дроби о поверхность со скоростью 30 м/с в зависимости от угла удара дроби

Показано, что чем больше в этом случае, т.е. при повышенной скорости частиц, угол атаки частиц дроби, тем больше величина остаточных напряжений.

### 3. Заключение

Проведенный анализ показывает, что дробеметный метод имеет эффективное применение при подготовке поверхностей стальных труб перед нанесением покрытий, позволяет достичь развитой поверхности, заданной величины шероховатости, создаются благоприятные напряжения сжатия, которые повышают усталостную прочность и коррозионную стойкости. В качестве абразивных частиц используется в основном стальная колотая дробь высокой твердости (выше 60 HRC). Показана зависимость величины достигаемой шероховатости от увеличения твердости дроби. Установлено, что при дробеметной обработке в результате ударного действия происходит разрушение дроби и реально в рабочей зоне находится смесь их различных фракций. На глубину проникновения частиц дроби в поверхность, соответственно на размер шероховатости и величину остаточных напряжений влияют режимные факторы: увеличение размерности частиц дроби, степени остроугольности их форм, дистанция и угол атаки частиц относительно поверхности, время обработки.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Колтаков, Д. А. Анализ основных методов повышения коррозионной стойкости и износостойкости рабочих поверхностей / Д. А. Колтаков, Е. А. Шаповалова // Вестник науки. – 2024. – Т. 1, № 1(70). – С. 267-272. – EDN EHVZOE.
2. Карпиков А. В., Буглов Н. А., Захаров В. А., Москвитин В. Н. Повышение коррозионной стойкости буровых труб дробеударной обработкой // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАН. - 2011. - №39. - С. 228-230.
3. Горанский Г. Г., Толстяк Э. Н., Саранцев В. В. Разработка технологий и оборудования для подготовки поверхности в УП «Технопарк БНТУ «Метолит» // Литье и металлургия. - 2006. - №37. - С. 165-169.
4. Габбасов А. Ф., Мутигуллин А. Р., Кузнецова О. А. Выбор абразивного материала для механической очистки металлических поверхностей // Инновационные подходы в решении проблем современного общества. - 2018. - С. 228-230.
5. S. Khorasanizadeh The Effects of Shot and Grit Blasting Process Parameters on Steel Pipes Coating Adhesion // World Academy of Science, Engineering and Technology. - 2010. - №44. - С. 1493-1501.
6. Теплухин В. Г., Карандашев А. Н., Михайлов С. Н., Ермаков С. Б. Повышение надежности и долговечности труб буровых установок, эксплуатируемых в условиях холодного климата // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. - 2021. - С. 228-230.
7. Моделирование формирования основных показателей качества поверхностного слоя деталей при дробеударном упрочнении / В. П. Кольцов, Ч. В. Ле, Д. А. Стародубцева, М. Х. Нгуен // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 3(75). – С. 50-58. – DOI 10.26731/1813-9108.2022.3(75).50-58. – EDN IEPFRN.

Поступила в редколлегию 13.05.2025 г.