

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЕДИНИЧНОЙ ДРОБИ В ПРОЦЕССЕ ИМПУЛЬСНОЙ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСНЫХ И ЕМКОСТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Аннотация.

Актуальность и цели. Методы дробеструйной обработки различных поверхностей получили широкое распространение в машиностроении. Конструкции устройств для их реализации регулярно совершенствуются и модернизируются, зачастую это приводит к изменению физических параметров процесса обработки (угла атаки факела дроби, скорости дроби, температуры и т.д.). В связи с этим существующие расчетные методики не могут быть применены для оценки параметров воздействия дроби как технологической гранулированной среды на обрабатываемую поверхность при проектировании технологического оборудования. В частности, отсутствуют методики прогнозирования результатов обработки для такого усовершенствованного метода дробеструйной обработки, как импульсная дробеструйная обработка.

Материалы и методы. Данные для проведения анализа динамики движения единичной дроби в процессе импульсной дробеструйной обработки внутренней поверхности корпусных и емкостных деталей получены посредством измерительного контроля: твердость внутренней поверхности объекта исследования (баллона для воздуха 10-200У ГОСТ 949–73), шероховатость поверхности после обработки была измерена на образцах «свидетелях» физической модели (стальной баллон для воздуха 10-200У ГОСТ 949–73 (диаметр 140 мм, длина 900 мм, объем 10 л) с приваренными соединительными фланцами и отверстиями для крепления образцов-свидетелей внутри баллона). Значения эффективной скорости взаимодействия единичной дроби с поверхностью материала $V_{эф}$ для различных частей баллона определены на основе анализа массивов численных данных, получены в результате САЕ-моделирования наладки для обработки внутренней поверхности баллона для воздуха 10-200У ГОСТ 949–73 ($V = 10$ л, $\Phi 140$, $L = 900$). Для упрощения анализа процесса формирования шероховатости поверхности методом импульсной дробеструйной обработки и с учетом того, что частицы дроби в процессе взаимодействия приобретают форму сферы, далее приняты следующие допущения: форма дроби – сфера, диаметр дроби (D) – 1 мм.

Результаты. Для выделенных частей баллона рассчитаны значения диаметра d и глубины h пластического отпечатка, полученные после единичного удара дробью $\Phi 1$ мм (горловина: $d = 110,45$ мкм, $h = 3,05$ мкм; цилиндрическая часть: $d = 23,39$ мкм, $h = 0,14$ мкм; дно: $d = 39,99$ мкм, $h = 0,4$ мкм). На основе полученных данных рассчитаны критические значения параметра шероховатости ($Ra_{кр}$) внутренней поверхности горловины (1,16 мкм), цилиндрической части (0,05 мкм) и днища (0,15 мкм) рассматриваемого газового баллона для

воздуха 10-200У ГОСТ 949–73 после пульсирующей дробеструйной обработки.

Выводы. Сопоставление результатов аналитических расчетов и физическо-го эксперимента с учетом ряда допущений и упрощений показало достаточную согласованность результатов (относительно небольшой разброс значений параметра шероховатости внутренней поверхности), что подтверждает значение дисперсии адекватности $S_a^2 = 0,19$. Неравномерная погрешность предсказания по длине баллона объясняется различием в углах контакта цилиндрической части и дна с горловиной. Таким образом, предлагаемая методика позволяет с достаточной для производственных целей точностью прогнозировать результаты подготовки внутренних поверхностей сосудов под давлением.

Ключевые слова: обработка внутренней поверхности, импульсная дробеструйная очистка, единичная дробь, динамика дроби.

A. V. Trazanov, K. R. Tarantseva, A. E. Zverovshchikov

AN ANALYSIS OF THE UNIT FRACTION MOTION DYNAMICS IN THE PROCESS OF PULSE SHOT BLASTING OF THE INTERNAL SURFACE OF BASIC AND CAPACITIVE PARTS

Abstract.

Background. Methods of blasting of various surfaces are widely used in mechanical engineering. The designs of devices for their implementation are regularly improved and modernized, often this leads to a change in the physical parameters of the treatment process (angle of attack of the shot torch, shot speed, temperature, etc.). In this regard, the existing calculation methods can not be used to estimate the parameters of the impact of the shot, as a technological granular medium, on the surface to be treated during the design of process equipment. In particular, there are no methods for predicting the processing results for such an improved method of shot blasting, such as pulse shot blasting.

Materials and methods. The data for analyzing the dynamics of a single shot in the process of pulsed shot blasting of the inner surface of body and capacitive parts were obtained by means of measuring control: the hardness of the inner surface of the object of study (air cylinder 10-200U GOST 949-73), the surface roughness after processing was measured on samples "Witnesses" of the physical model (steel cylinder for air 10-200U GOST 949-73 (diameter 140 mm, length 900 mm, volume 10 l) with welded connecting flanges and holes and for mounting specimens of witnesses inside the cylinder). Values of the effective interaction rate of a single fraction with the surface of the material V_{eff} , for different parts of the cylinder, determined on the basis of analysis of arrays of numerical data obtained as a result of CAE modeling set-up for processing the inner surface of an air cylinder 10-200U GOST 949-73 ($V = 10l$, $\varnothing 140$, $L = 900$). To simplify the analysis of the process of surface roughness formation by the method of pulsed shot blasting and taking into account the fact that fractional particles in the process of interaction take the form of a sphere, the following assumptions are made: the fractional shape is a sphere, the fractional diameter (D) is 1 mm.

Results. For the selected parts of the balloon, the values of the diameter d and the depth h of the plastic imprint obtained after a single shot with a $\varnothing 1\text{mm}$ shot (throat: $d = 110.45 \mu\text{m}$, $h = 3.05 \mu\text{m}$; cylindrical part: $d = 23.39 \mu\text{m}$, $h = 0, 14 \mu\text{m}$; bottom: $d = 39.99 \mu\text{m}$, $h = 0.4 \mu\text{m}$). Based on the data obtained, the critical values of the roughness parameter (R_{acr}) of the inner surface of the neck ($1.16 \mu\text{m}$), the cylindri-

cal part (0.05 μm) and the bottom (0.15 μm) of the considered gas cylinder for air 10-200U GOST 949-73 are calculated after pulsating shot blasting.

Conclusions. The comparison of the results of analytical calculations and the physical experiment, taking into account a number of assumptions and simplifications, has showed sufficient consistency of the results (relatively small variation in the roughness parameter of the inner surface), which confirms the value of the variance of adequacy $S_a^2 = 0.19$. The uneven prediction error along the length of the cylinder is explained by the difference in the contact angles of the cylindrical part and the bottom with the throat. Thus, the proposed method allows with sufficient accuracy for production purposes to predict the results of preparing the internal surfaces of pressure vessels.

Keywords: internal surface treatment, pulse shot blasting, unit fraction, fraction dynamics.

Введение

Методы дробеструйной обработки различных поверхностей получили широкое распространение в машиностроении. Конструкции устройств для их реализации регулярно совершенствуются и модернизируются, зачастую это приводит к изменению физических параметров процесса обработки (угла атаки факела дроби, скорости дроби, температуры и т.д.). В связи с этим существующие расчетные методики не могут быть применены для оценки параметров воздействия дроби как технологической гранулированной среды на обрабатываемую поверхность при проектировании технологического оборудования. В частности, отсутствуют методики прогнозирования результатов обработки для такого усовершенствованного метода дробеструйной обработки, как импульсная дробеструйная обработка [1].

В настоящее время для анализа динамических процессов активно применяются различные методы CAE-моделирования, в частности, в среде SolidWorks. Реализация данных методов на практике требует обоснованного выбора эффективных моделей динамики среды; использования надежных экспериментальных данных по механике процессов взаимодействия частиц в среде; экспериментально обоснованных правил моделирования на основе условий подобия [2]. При этом большинство сред моделирования динамических процессов не предоставляют доступа для анализа и редактирования применяемых для расчетов математических аппаратов, хотя и позволяют получать достаточно адекватные результаты расчета в большинстве частных случаев. Однако для подтверждения адекватности результатов расчетов, полученных численными методами при анализе новых процессов, требуется проведение физических экспериментальных исследований и, при возможности, аналитическое описание динамики процесса.

Ранее была показана эффективность импульсной дробеструйной обработки внутренней поверхности корпусных и емкостных деталей по сравнению с обычным методом дробеструйной очистки [3–6]. Показано, что более высокая чистота обработки поверхности с помощью предлагаемого метода обусловлена использованием одной и той же дроби и ее постепенным измельчением в процессе работы. Путем физического и численного эксперимента было подтверждено, что улучшение качества поверхности достигается созданием вихревых потоков внутри изделия, увеличивающих площадь контакта и расширяющих возможный диапазон углов атаки газобразивного потока на обрабатываемую поверхность.

Моделирование движения потока частиц во внутреннем объеме емкости

Для упрощения анализа процесса формирования шероховатости поверхности методом импульсной дробеструйной обработки и с учетом того, что частицы дроби в процессе взаимодействия приобретают форму сферы, далее приняты следующие допущения: форма дроби – сфера, диаметр дроби (D) – 1 мм.

Согласно [1] диаметр d и глубина h пластического отпечатка определяются следующим образом:

$$d = \left(\frac{DE_u}{0,1H_D} \right), \quad (1)$$

$$h = \frac{d^2}{4D}, \quad (2)$$

где E_u – энергия удара единичной дроби; H_D – динамическая твердость материала детали, определяемая отношением энергии удара единичной дроби к объему вытесненного ей материала (принимается $H_D = 1,7HB$, значение параметра твердости выберем в соответствии с зависимостью изменения твердости материала внутренней поверхности баллона (рис. 1)).

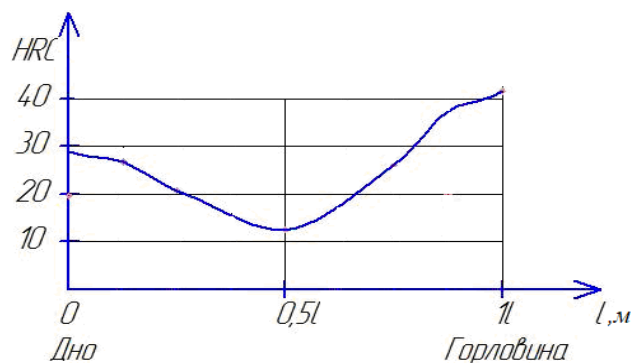


Рис. 1. Зависимость твердости внутренней поверхности баллона ($HRC_э$) по длине (l) от дна до горловины баллона 10-200У ГОСТ 949–73 (диаметр 140 мм, длина 900 мм, объем 10 л)

Энергия удара единичной дроби равна:

$$E_u = \frac{mV_{эф}^2}{2}, \quad (3)$$

где m – масса единичной дроби, г; $V_{эф}$ – эффективная скорость взаимодействия единичной дроби с поверхностью материала, м/с.

Масса единичной дроби:

$$m = \frac{4\pi R^3 \rho_d}{3}, \quad (4)$$

где R – радиус единичной дроби, для принятой дроби, $R = 0,0005\text{м}$ (0,5мм); ρ_d – плотность материала дроби, соответственно, для дроби стальной $\rho_d \geq 7,2 \text{ г/см}^3$ ($\rho_d \geq 7200 \text{ кг/м}^3$).

Эффективная скорость взаимодействия единичной дроби с поверхностью материала рассчитывается как

$$V_{\text{эф}} = k_{\text{эф}} S \omega, \quad (5)$$

где $k_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективной скорости; S – путь, проходимый единичной дробью в процессе работы и зависящий от габаритных размеров обрабатываемого баллона, м; ω – частота подачи импульса сжатого воздуха внутрь баллона в процессе обработки предлагаемым методом, с^{-1} .

Для дробеструйной обработки коэффициент эффективной скорости должен учитывать: влияние соседних дробинок (k_d), потери энергии в потоке дроби ($k_{\text{вз}}$), потери энергии на трение ($k_{\text{тр}}$) и полезную работу (A) на взаимодействие с поверхностью материала. Определение данных коэффициентов требует дополнительных значительных исследований, что усложнит первоначальную задачу исследования.

Для упрощения данного анализа примем гипотезу, что эффективная скорость взаимодействия единичной дроби с поверхностью материала баллона с учетом влияния взаимодействия дроби статистически достоверно определяется средствами САЕ моделирования как среднее значение скорости каждой рассчитываемой единичной дроби. Среднее значение скорости дроби определим из расчета скоростей 22 дробинок по оси Y модели наладки для обработки внутренней поверхности баллона для воздуха 10-200У ГОСТ 949–73 (рис. 2).



Рис. 2. Модель наладки для обработки внутренней поверхности баллона для воздуха 10-200У ГОСТ 949–73 (диаметр 140 мм, длина 900 мм, объем 10 л)

После преобразований функций (1) и (2) в общем виде получим

$$d = 2,55 R^4 \sqrt{\frac{k_{\text{эф}}^2 S^2 \omega^2 \rho_d}{H_D}}, \quad (6)$$

$$h = 1,14 R k_{\text{эф}} S \omega \sqrt{\frac{\rho_d}{H_D}}. \quad (7)$$

Из зависимостей (6) и (7) можно сделать вывод, что с уменьшением частоты подачи дроби и с истиранием дроби в процессе работы размеры единичного отпечатка уменьшаются. Это необходимо учитывать при определении режимов и параметров при импульсной дробеструйной обработке.

Для оценки произвольного количества j повторных ударов в один отпечаток d_j воспользуемся исследованиями [7]:

$$d_j = d(1 + K \ln j), \quad (8)$$

где d_j – диаметр отпечатка после j повторных ударов; K – коэффициент, зависящий от твердости обрабатываемого материала и скорости соударения дроби.

Основным фактором, влияющим на коэффициент K , для данного случая будет твердость материала (рис. 1), так как она будет изменяться значительнее скорости соударения дроби. Выберем следующие значения коэффициента K согласно [8]: для горловины $K = 0,21$, для цилиндрической части $K = 0,4$, для дна $K = 0,25$.

Для оценки изменения глубины отпечатка h при произвольном числе j повторных ударов в один отпечаток h_j воспользуемся зависимостью [7]:

$$h_j = h(1 + K \ln j)^2. \quad (9)$$

Согласно результатам CAE-моделирования наладки для обработки внутренней поверхности баллона для воздуха 10-200У ГОСТ 949–73 (рис. 2) получено следующее распределение скоростей по длине внутренних поверхностей баллона (рис. 3).

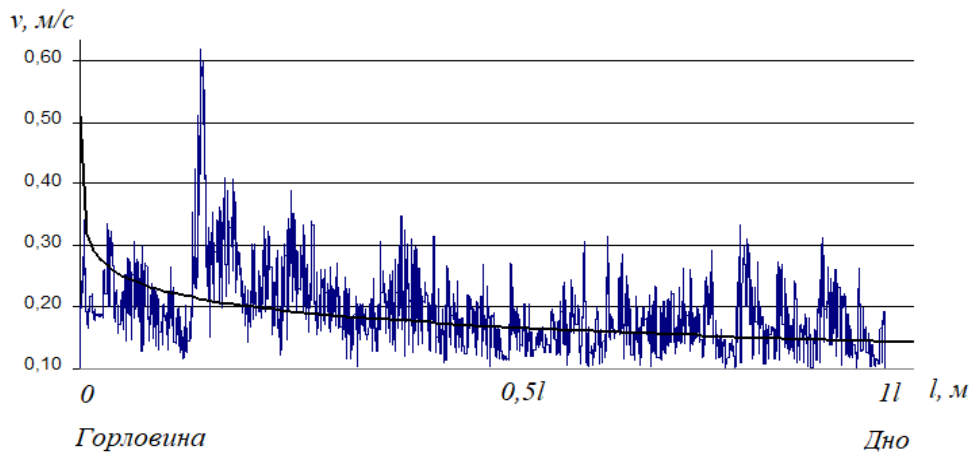


Рис. 3. Результат расчета средней скорости 22 частиц по оси Y модели наладки для обработки внутренней поверхности баллона для воздуха 10-200У ГОСТ 949–73 в среде *Solidwork Flow Simulation*

В табл. 1 для различных частей баллона представлены значения эффективной скорости взаимодействия единичной дроби с поверхностью материала $V_{эф}$, определенные на основе анализа полученных массивов численных данных, а также значения диаметра d и глубины h пластического отпечатка, полученные после единичного удара дробью диаметром 1 мм, рассчитанные аналитически по зависимостям (1) и (2).

На рис. 4 и 5 соответственно представлены значения диаметра d и глубины h пластического отпечатка на поверхности материала в результате мно-

гократных ударов единичной дробью ($j = 10$), рассчитанные по зависимостям (8) и (9).

Таблица 1

Значения эффективной скорости взаимодействия единичной дроби с поверхностью материала $V_{эф}$ диаметра d и глубины h пластического отпечатка для различных частей внутренней поверхности газового баллона 10-200У ГОСТ 949–73

	Горловина	Цилиндрическая часть	Днище
$V_{эф}$, м/с	3	2,3	2,1
h , мкм	3,05	0,14	0,4
d , мкм	110,45	23,39	39,99

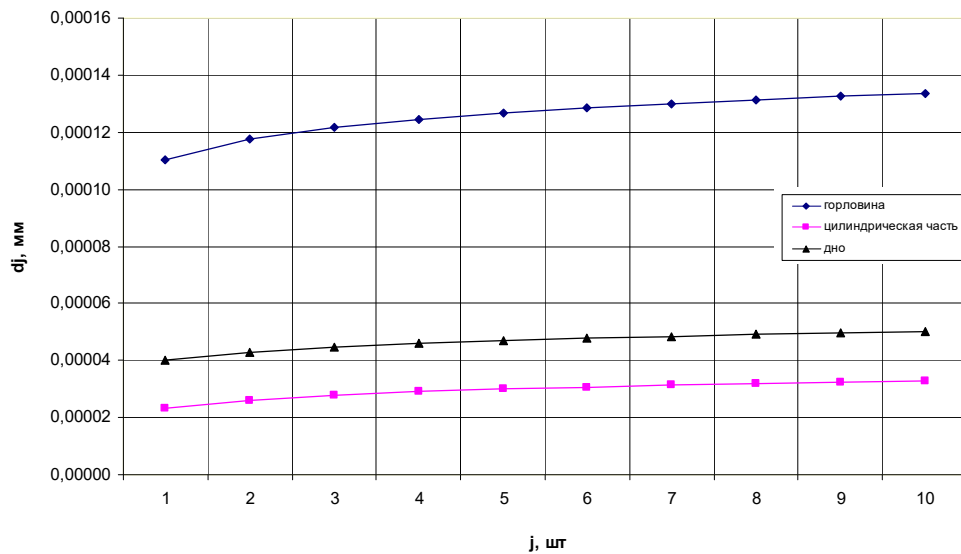


Рис. 4. Изменение диаметра d (мм) пластического отпечатка в различных зонах внутренней поверхности баллона в зависимости от числа ударов дробью

Анализ полученных зависимостей позволяет предположить, что шероховатость поверхности формируется главным образом на начальных этапах обработки, дальнейшая обработка при достижении установившегося параметра шероховатости ($Ra_{уст}$) изменяет данный параметр незначительно и приводит лишь к наклепу поверхностного слоя.

Согласно [1] установившийся параметр шероховатости ($Ra_{уст}$) можно определить следующим образом:

$$Ra_{уст} = 0,03 \sqrt{\frac{h_{\max} d^2 l_{ед}}{R^2}}, \quad (10)$$

где h_{\max} – наибольшая глубина отпечатка единичной дроби на заданной площади изделия после импульсной дробеструйной обработки потоком дроби; $l_{ед}$ – единица длины нормального сечения обрабатываемого изделия.

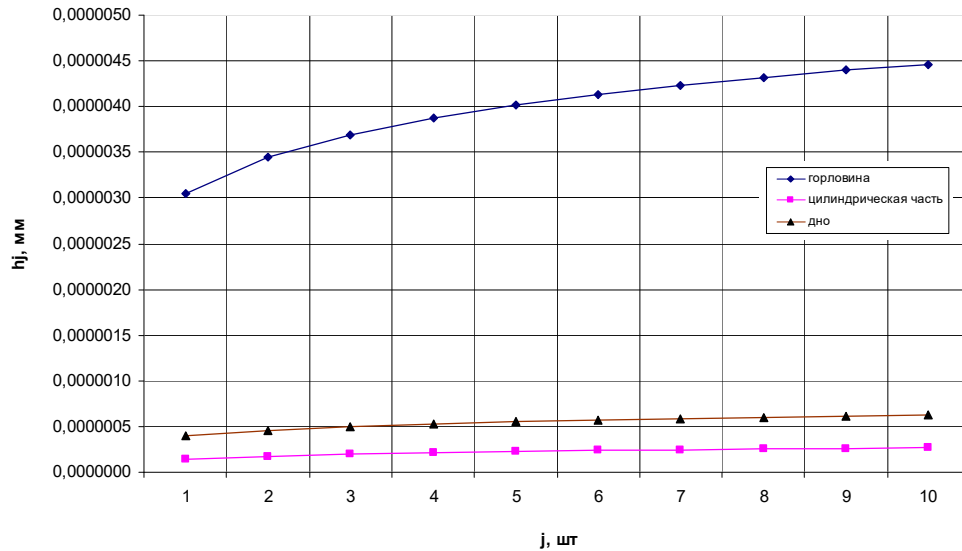


Рис. 5. Влияние повторных ударов дроби на глубину h (м) пластического отпечатка в различных зонах внутренней поверхности баллона

Для учета значительного динамического изменения угла атаки каждой дроби в потоке введем поправочный коэффициент k_{α}^{Ra} , учитывающий угол атаки единичной дроби α .

После проведенных преобразований получим ожидаемое распределение установившейся шероховатости внутренней поверхности по длине баллона:

$$Ra_{уст} = 0,12k_{\phi}k_{\alpha}^{Ra}S\omega\sqrt{\frac{Rl_{ед}P_d}{H_D}}. \quad (11)$$

Сопоставление результатов расчетов, полученных по формуле (12) и с результатами физического моделирования, представлено на рис. 6.

Физическое моделирование проводилось на стальном баллоне для воздуха 10-200У ГОСТ 949–73 (диаметр 140 мм, длина 900 мм, объем 10 л) с приваренными соединительными фланцами и отверстиями для крепления образцов свидетелей внутри баллона (рис. 7).

В промышленных испытаниях в качестве контрольных образцов выступили стальные баллоны для газов объемом (v) 10 л, диаметром (d) 140 мм, длиной (l) 900 мм ГОСТ 949. Испытания проводились в цеховых условиях (температура воздуха 19–21 °С, относительная влажность 40–60 %), при очистке использовалась дробь стальная ГОСТ 11964–81 ($d_{min} = 0,7$ мм, $d_{max} = 1,0$ мм).

Движения дроби стальной ($d_{min} = 0,7$ мм, $d_{max} = 1,0$ мм) внутри газовых баллонов рассчитано для следующих параметров процесса: давление питающей сети 0,6...1 МПа; температура воздуха в соответствии с категорией размещения УХЛ4 по ГОСТ 15150–69 (район с умеренным и холодным климатом) +1...+35 °С; периодичность подачи порции воздуха в баллон 0,5–15 с (технические характеристики пневмоаппаратуры).

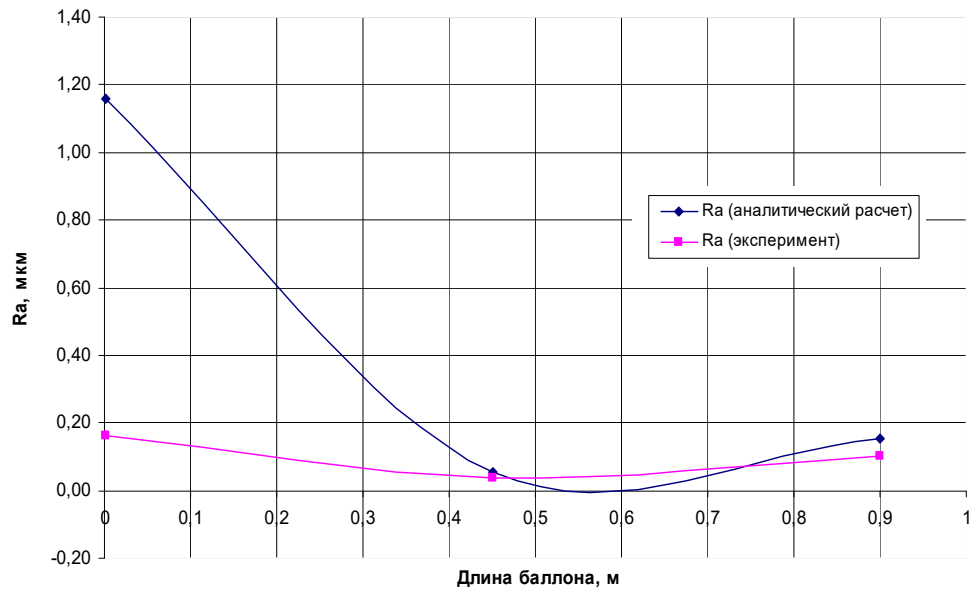


Рис. 6. Изменение шероховатости внутренней поверхности (Ra) по длине баллона при аналитическом расчете и физическом моделировании

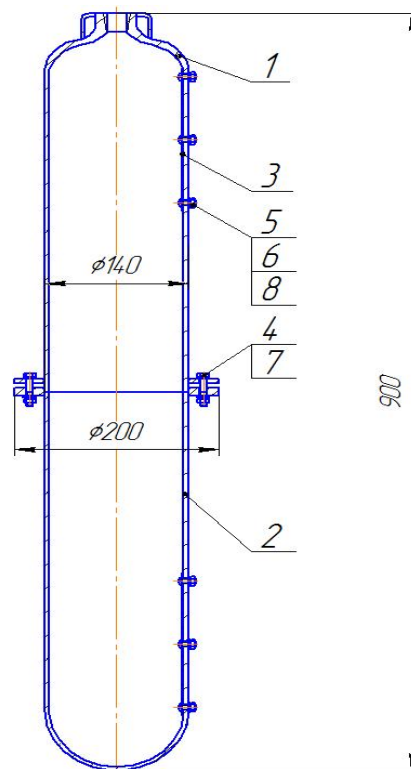


Рис. 7. Физическая модель для проведения эксперимента на баллоне для воздуха 10-200У ГОСТ 949-73 (диаметр 140 мм, длина 900 мм, объем 10 л): 1 – горловина с фланцем; 2 – дно с фланцем; 3 – пластина; 4 – болт М6×35; 5 – винт М6×25; 6 – гайка М12; 7 – шайба пружинная 6 ГОСТ 6402-70; 8 – шайба А.6 ГОСТ 11371-78

Экспериментальные исследования очистки внутренней поверхности

Исследования проводились на стенде очистки внутренней поверхности баллона ICS80+180 (Италия) и стенде для очистки внутренней поверхности баллонов ПКТБА-СОМ (Россия). Энергоноситель – источник сжатого воздуха давлением 0,6 МПа класса чистоты не грубее 12 по ГОСТ 17433–80.

Баллон с дробью устанавливался вертикально, горловиной вниз, в соответствии с определенными ранее технологическими наладками [2–4]. Поток воздуха, движущийся по спирали вдоль цилиндрической части баллона, увлекал за собой дробь и передавал ей заряд кинетической энергии. Поток дроби при ударе о внутреннюю поверхность совершал работу по снятию поверхностного слоя материала со стенок баллона. При достижении дроби верхней точки баллона подача сжатого воздуха прекращалась. Частицы дроби под действием силы тяжести, переходящей из кинетической в потенциальную энергию, опали в нижнюю часть баллона. Далее процесс обработки повторялся до достижения необходимой шероховатости поверхности.

Для оценки эффекта очистки внутренней поверхности баллонов высокого давления пульсирующим потоком дроби применялся метод контроля в соответствии с ГОСТ Р ЕН 13018-20 и РД 34.10.130–96 и оценка шероховатости и твердости поверхности.

Для осмотра внутренней поверхности использовался гибкий управляемый видеоскоп *jProbe FX*, имеющий поле обзора 60° с глубиной поля зрения 15–100 мм и разрешением сенсора 640 × 480 точек на дюйм.

Для измерения шероховатости поверхности использовался «Сейтроник ПШ8-4 (С.С.)».

На основании проведенных исследований получены критические значения параметра шероховатости ($Ra_{кр}$) для внутренней поверхности горловины, цилиндрической части и днища газового баллона (табл. 2).

Таблица 2

Критические значения параметра шероховатости ($Ra_{кр}$)
внутренней поверхности горловины, цилиндрической части
и днища газового баллона 10-200У ГОСТ 949–73

	Горловина	Цилиндрическая часть	Днище
$Ra_{кр}$ (аналитический расчет), мкм	1,16	0,05	0,15
$Ra_{кр}$ (эксперимент), мкм	0,16	0,04	0,10

Заключение

Сопоставление результатов аналитических расчетов и физического эксперимента с учетом ряда приведенных выше допущений и упрощений показало достаточную согласованность результатов (относительно небольшой разброс значений параметра шероховатости внутренней поверхности), что подтверждает значение дисперсии адекватности $S_a^2 = 0,19$. Неравномерная погрешность предсказания по длине баллона объясняется различием в углах контакта цилиндрической части и дна с горловиной. Дальнейшее уточнение аналитических расчетов для обеспечения большей сходимости результатов значительно повысит трудоемкость, однако не сможет ее полностью обеспечить, в связи с этим для подтверждения адекватности результатов расчетов САЕ моделирования

полученная сходимость результатов достаточна. Таким образом, предлагаемая методика позволяет с достаточной для производственных целей точностью прогнозировать результаты подготовки внутренних поверхностей сосудов под давлением.

Библиографический список

1. **Шевцов, С. Н.** Моделирование динамики гранулированных сред при вибрационной отделочно-упрочняющей обработке : дис. ... д-ра техн. наук / Шевцов С. Н. – Ростов-на-Дону, 2001. – С. 18–55.
2. **Tarantseva, K. R.** Using SolidWorks for analysis of effective pulse of blast cleaning / K. R. Tarantseva, A. V. Trazanov // International Scientific-Practical Conference – Innovative Informative Technologies in Industry and Social Economic Sphere. Part 3. – Prague, 2014. – April 21–25. – P. 150–154.
3. **Тразанов, А. В.** Очистка внутренней поверхности баллонов пульсирующим потоком дробы в кипящем слое / А. В. Тразанов, К. Р. Таранцева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2013. – № 2. – С. 146–152.
4. **Тразанов, А. В.** Анализ эффективности импульсной дробеструйной очистки внутренней поверхности сосудов / А. В. Тразанов, К. Р. Таранцева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 1. – С. 155–159.
5. **Тразанов, А. В.** Моделирование процесса импульсной дробеструйной обработки внутренней поверхности сосудов / А. В. Тразанов, К. Р. Таранцева // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 5. – С. 137–141.
6. **Тразанов, А. В.** Прогнозирование долговечности газовых баллонов в процессе технического освидетельствования / А. В. Тразанов, К. Р. Таранцева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2018. – № 11. – С. 45–49.
7. **Гурин, П. А.** Проектирование технологии отделочно-упрочняющей центробежной обработки на основе имитационного моделирования : дис. ... д-ра техн. наук / Гурин П. А. – Пенза, 2013. – С. 73–123.
8. **Зверовщиков, А. Е.** О формировании шероховатости поверхности на труднодоступных участках профиля детали при объемной центробежной обработке гранулированными средами / А. Е. Зверовщиков, В. З. Зверовщиков, А. В. Понукалин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 3 (15). – С. 114–122.

References

1. Shevtsov S. N. *Modelirovanie dinamiki granulirovannykh sred pri vibratsionnoy otdelochno-uprochnyayushchey obrabotke: dis. d-ra tekhn. nauk* [Simulating the environment shotting dynamics under vibratory finishing and reinforcing treatment: dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences]. Rostov-on-Don, 2001, pp. 18–55. [In Russian]
2. Tarantseva K. R., Trazanov A. V. *International Scientific-Practical Conference – Innovative Informative Technologies in Industry and Social Economic Sphere. Part 3*. Prague, 2014, April 21–25, pp. 150–154.
3. Trazanov A. V., Tarantseva K. R. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*. [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2013, no. 2, pp. 146–152. [In Russian]
4. Trazanov A. V., Tarantseva K. R. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*. [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2014, no. 1, pp. 155–159. [In Russian]
5. Trazanov A. V., Tarantseva K. R. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*. [XXI century: results of the past and problems of the present plus]. 2014, no. 5, pp. 137–141. [In Russian]

6. Trazanov A. V., Tarantseva K. R. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and oil-and-gas machine building]. 2018, no. 11, pp. 45–49. [In Russian]
7. Gurin P. A. *Proektirovanie tekhnologii otdelochno-uprochnyayushchey tsentrobezhnoy obrabotki na osnove imitatsionnogo modelirovaniya: dis. d-ra tekhn. nauk* [Design of a finishing and reinforcing centrifugal treatment technology on the basis of imitation modelling: dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences]. Penza, 2013, pp. 73–123. [In Russian]
8. Zverovshchikov A. E., Zverovshchikov V. Z., Ponukalin A. V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2010, no. 3 (15), pp. 114–122. [In Russian]

Тразанов Александр Викторович

начальник участка,
ООО «Новоуренгойский газохимический комплекс» (Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Новый Уренгой, ул. Южная, 2А)

E-mail: Alex05TN588@yandex.ru

Trazanov Aleksandr Viktorovich

Sector manager, “Novourengoyskiy gazokhimicheskiy complex” LLC (2A Yuzhnaya street, Novy Urengoy, Yamalo-Nenets autonomous district, Russia)

Таранцева Клара Рустемовна

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнологий и техносферной безопасности, Пензенский государственный технологический университет (Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ ул. Гагарина, 1а/11)

E-mail: krtar2018@bk.ru

Tarantseva Klara Rustemovna

Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of biotechnology and technosphere safety, Penza State Technological University (1a/11 Baydukova lane/Gagarina street, Penza, Russia)

Зверовщиков Александр Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: azwer@mail.ru

Zverovshchikov Aleksandr Evgen'evich

Doctor of engineering sciences, professor, head of sub-department of mechanical engineering technology, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Тразанов, А. В. Анализ динамики движения единичной дроби в процессе импульсной дробеструйной обработки внутренней поверхности корпусных и емкостных деталей / А. В. Тразанов, К. Р. Таранцева, А. Е. Зверовщиков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 3 (51). – С. 88–99. – DOI 10.21685/2072-3059-2019-3-8.