

УДК 532.522.2+620.193.13+620.193.15

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУИ НА МАТЕРИАЛ: ГИДРОАБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС

А. А. Штерцер, Б. Е. Гринберг

Конструкторско-технологический филиал Института гидродинамики  
им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск  
E-mail: asterzer@mail.ru

Экспериментально исследован износ стальных пластин в результате воздействия гидроабразивной струи в зависимости от расстояния между поверхностью образца и насадком, угла падения струи на пластину, концентрации абразива в воде и внешней среды (струя в воздухе, затопленная струя). Проведено сравнение полученных результатов с известными данными о структуре струи и струйном обтекании препятствия. Показано, что добавление в жидкость абразивных частиц позволяет изучать картину обтекания струей жидкости препятствия, поскольку по форме износа поверхности можно определять область воздействия ядра струи, область торможения и область пристенного течения до отрыва потока.

**Ключевые слова:** гидроабразивная струя, затопленная струя, испытания, износ, след износа.

**Введение.** Воздействие высокоскоростной (более 100 м/с) гидроабразивной струи на преграду из какого-либо материала приводит к интенсивному вымыванию этого материала, на чем основан принцип работы аппаратов гидроабразивной резки. При умеренных скоростях гидроабразивного потока (менее 100 м/с) происходит интенсивный гидроабразивный износ обтекаемой преграды, вызванный механическим воздействием на материал твердых частиц, перемещаемых потоком жидкости. В технике гидроабразивному износу подвергаются рабочие колеса и “улитки” земснарядов, лопасти и камеры гидротурбин, пульпопроводы гидротранспорта, рабочие колеса центробежных насосов и т. д. Разрушение материала происходит в результате срезания, выкрашивания, выбивания абразивными частицами частиц его поверхности. Кроме того, в результате многократного пластического деформирования этих участков поверхности имеет место усталостное разрушение.

Проблема выбора материалов и покрытий для деталей машин, работающих в условиях гидроабразивного износа, всегда остается актуальной. Для тестирования материалов используются различные способы, описанные, например, в [1], которые можно разделить на две группы. При использовании способов первой группы испытываемый образец перемещается (как правило, вращается) в емкости, заполненной жидкостью, содержащей абразив. Недостаток этих способов заключается в неточности определения концентрации абразива в месте контакта жидкости с образцом, так как часть абразивных зерен оседает на дно емкости. Это снижает точность тестирования и воспроизводимость условий испытания. При использовании способов второй группы закрепленный образец подвергается

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (грант № НШ-246.2012.1).

© Штерцер А. А., Гринберг Б. Е., 2013

воздействию потока (струи) жидкости с абразивом. Эти способы обеспечивают более точный контроль концентрации абразива в жидкости, поскольку осуществляется его дозированная подача в направляемый на образец поток. В качестве примера можно привести способ, при использовании которого испытываемый образец подвергается воздействию струи жидкости, содержащей абразивные частицы и химически активные добавки малой концентрации [2]. При тестировании концентрация абразивных частиц регулируется в диапазоне  $100 \div 1000$  мг/л, а химически активных добавок (кислоты) — в диапазоне  $1,5 \div 5,0$  %. Данный способ хорошо имитирует условия работы, например, погружных центробежных насосов, применяемых при добыче нефти.

В настоящей работе рассматриваются простой способ и устройство для испытаний материалов и покрытий на абразивный износ, также основанные на воздействии гидроабразивной струи на закрепленный образец. Данный способ позволяет в широком диапазоне менять расстояние от сопла до образца, угол падения струи, концентрацию абразива, а также проводить испытания со струей, истекающей в воздушную атмосферу, и с затопленной струей, когда сопло устройства и испытываемый образец погружены в жидкость. Это дает возможность имитировать различные условия работы того или иного материала или покрытия при наличии гидроабразивного износа. С использованием указанного способа проведены испытания покрытий из различных материалов, полученных методом детонационного напыления [3].

Для обеспечения воспроизводимости и достоверности результатов при тестировании материалов на гидроабразивный износ с использованием предложенного способа необходимо иметь отчетливое представление о процессах, протекающих при взаимодействии струи с преградой. С этой целью экспериментальные исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, проводились в двух постановках: со струей, истекающей в воздушную атмосферу, и с затопленной струей.

**1. Постановка экспериментов.** Схема установки для испытаний материалов на гидроабразивный износ представлена на рис. 1. Емкость 1 служит корпусом установки и состоит из двух отсеков (см. рис. 1). В правом отсеке имеется контейнер 2 для осаждения абразива. Гидроабразивная головка 3 и испытываемый образец 4 устанавливаются на одном кронштейне внутри контейнера. Кронштейн крепится к крышке 5, которая в свою очередь соединяется с корпусом бака шарнирами и может откидываться вверх вместе с головкой. Левый отсек емкости 1 служит для подачи жидкости к источнику давления. В правой части контейнера для сбора абразива (см. рис. 1) имеется отсек, в основании которого расположен вентиль 7 для слива жидкости, поступающей в контейнер из гидроабразивной головки во время испытания. Патрубок 8 служит для слива и поддержания повышенного уровня жидкости в контейнере (при закрытом вентиле 7), необходимого при испытаниях с затопленной струей. В правый отсек контейнера из левого жидкость поступает через сетчатый фильтр 9. Бункер 10 служит для хранения абразива и крепится к баку кронштейном 11. В основании бункера имеется вентиль 12 для подачи абразива в смеситель 13. Дозирование подачи абразива осуществляется с помощью диафрагмы, расположенной в корпусе вентиля под его заслонкой над смесителем и имеющей калиброванное отверстие. В смесителе абразив, поступающий из бункера, смешивается с жидкостью и в виде суспензии подается по трубопроводу 6 в гидроабразивную головку. Заслонка вентиля 12 может иметь ручное управление с помощью рукоятки или электромеханическое с помощью привода 14. Насос 15 осуществляет подачу жидкости в гидроабразивную головку под определенным давлением по трубопроводу 20. Вентиль 16 служит для настройки необходимого давления жидкости. Настройка проводится с помощью манометра насоса. Через вентиль 16 и успокоитель 17 излишки жидкости сливаются обратно в левый отсек бака по трубопроводу 21. Вентиль 18 служит для настройки расхода жидкости, поступающей

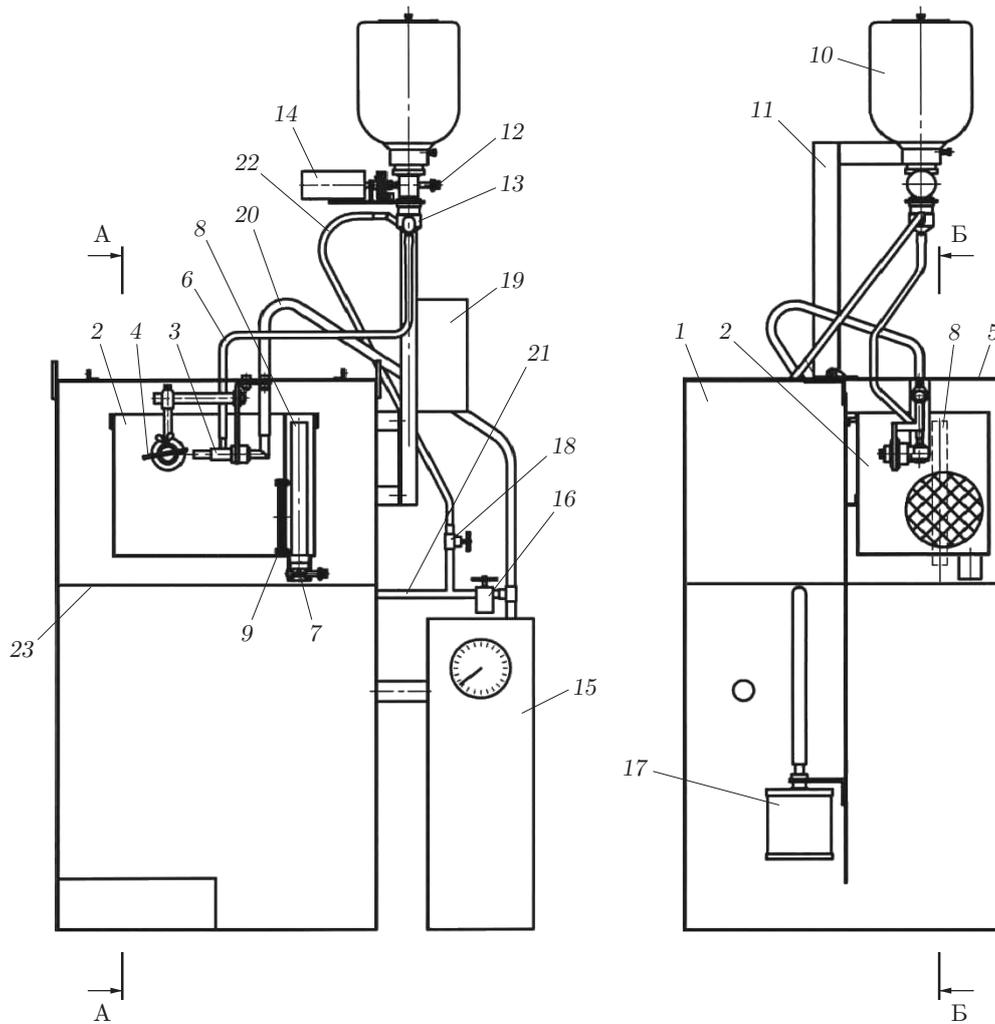


Рис. 1. Схема установки для испытаний материалов на гидроабразивный износ: 1 — корпус, 2 — контейнер, 3 — гидроабразивная головка, 4 — испытываемый образец, 5 — крышка, 6 — трубопровод для подачи гидроабразивной суспензии, 7 — вентиль для слива жидкости из контейнера, 8 — патрубок, 9 — сетчатый фильтр, 10 — бункер для зернистого абразива, 11 — кронштейн, 12 — вентиль для подачи абразива, 13 — смеситель, 14 — привод заслонки для подачи абразива, 15 — гидронасос, 16 — вентиль для настройки давления жидкости, 17 — успокоитель, 18 — вентиль подачи жидкости в смеситель, 19 — блок управления, 20 — трубопровод для подачи воды в гидроабразивную головку, 21 — трубопровод для слива лишней жидкости, 22 — трубопровод для подачи жидкости в смеситель; 23 — уровень жидкости

в смеситель 13, где образуется гидроабразивная суспензия. Блок управления 19 служит для управления работой установки в ручном или автоматическом режиме. Устройство держателя испытываемого образца позволяет устанавливать образец под определенным углом  $\alpha$  к оси струи, а также регулировать расстояние  $L$  от поверхности образца до насадка гидроабразивной головки.

В качестве испытываемых образцов использовались пластины из стали марки Ст.3 толщиной 2 мм и размером в плане примерно  $30 \times 70$  мм, в качестве рабочей жидкости — водопроводная вода. Источником давления служила трехплунжерная насосная установка с нерегулируемым расходом жидкости  $Q = 155 \text{ см}^3/\text{с}$ . В качестве абразива использовался порошок электрокорунда нормального (ГОСТ 28818-90, марка 13А, размер частиц  $315 \div 400$  мкм, зернистость № 32).

В экспериментах варьировались три параметра: расстояние между поверхностью образца и насадком гидроабразивной головки  $L$ , угол атаки струи относительно поверхности образца  $\alpha$  и расход абразива  $q$ ; расход рабочей жидкости  $Q = 155 \text{ см}^3/\text{с}$ , начальная скорость гидроабразивной струи  $u_0 = 31,3 \text{ м/с}$ , давление рабочей жидкости  $P = 0,5 \text{ МПа}$ , время воздействия струи на образец 1 ч и внутренний радиус насадка гидроабразивной головки (начальный радиус струи)  $R_0 = 2 \text{ мм}$  оставались постоянными. Износ  $\Delta m$  определялся как разность масс образца, определенных до и после испытаний. Для взвешивания использовались аналитические весы ЛВ 210-А с точностью измерения до 0,1 мг.

Результаты экспериментов приведены в табл. 1–3.

Таблица 1

Зависимость износа  $\Delta m$  от расстояния  $L$  между поверхностью образца и насадком гидроабразивной головки при  $\alpha = 20^\circ$ ,  $q = 1,22 \text{ г/с}$

Струя в воздухе		Затопленная струя	
$L$ , мм	$\Delta m$ , г	$L$ , мм	$\Delta m$ , г
10	0,0821	10	0,0976
25	0,1160	15	0,0887
50	0,1300	30	0,0726
75	0,1377	45	0,0337
100	0,1330	60	0,0225
125	0,1330	—	—
150	0,1289	—	—
230	0,1196	—	—

Таблица 2

Зависимость износа  $\Delta m$  от угла атаки струи  $\alpha$  при  $q = 1,22 \text{ г/с}$

$\alpha$ , град	$\Delta m$ , г	
	Струя в воздухе, $L = 60 \text{ мм}$	Затопленная струя, $L = 20 \text{ мм}$
5	0,0355	0,0494
15	0,1147	0,0756
35	0,1320	0,0819
55	0,1206	0,0788
75	0,1119	0,0634
90	0,0934	0,0627

Таблица 3

Зависимость износа  $\Delta m$  от расхода абразива  $q$ , связанного с диаметром  $d$  отверстия диафрагмы, дозирующей подачу абразива при  $L = 17$  мм,  $\alpha = 20^\circ$

$d$ , мм	$q$ , г/с	$\Delta m$ , г	
		Струя в воздухе	Затопленная струя
2,5	0,55	0,0510	0,0474
3,0	1,06	0,0874	0,0822
4,0	2,73	0,2691	0,1971
5,0	4,19	0,4700	0,2860
6,0	7,10	0,6940	0,5180
6,5	7,66	0,7043	0,5630

**2. Обсуждение результатов.** Сначала определим число Рейнольдса для истекающей из насадка струи. При плотности воды  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>, вязкости  $\eta = 0,105 \cdot 10^{-2}$  Па·с, скорости струи  $u_0 = 31,3$  м/с и радиусе струи  $R_0 = 2$  мм,  $Re = 2R_0\rho u_0/\eta = 119\,238$ . Таким образом, в терминах работы [4] струя является сильной, а движение в ней — турбулентным. Массовый расход абразива в опытах варьировался от 0,55 до 7,66 г/с (см. табл. 3), что при расходе воды  $Q = 155$  см<sup>3</sup>/с соответствует изменению массовой концентрации абразива в жидкости от 0,35 до 4,90 %. При этом объемная концентрация твердой фазы в жидкости меняется от 0,09 до 1,30 % (плотность корунда  $\rho_k = 3,9$  г/см<sup>3</sup>). Указанные концентрации твердых частиц можно считать малыми и не влияющими на движение жидкости в струе, однако даже такие концентрации абразива оказывают существенное по сравнению с чистой жидкостью без твердых примесей влияние на износ преграды.

В случае если струя воды истекает в воздух, даже на больших расстояниях от насадка она остается компактной. На рис. 2 показана водяная струя, истекающая со скоростью 25 м/с из сопла диаметром 6 мм [5], что близко к параметрам в проводимых экспериментах (диаметр сопла  $2R_0 = 4$  мм, скорость  $u_0 = 31,3$  м/с). На рис. 2 видно, что на начальном участке струя является ламинарной, но уже на расстоянии, равном диаметру струи, появляются осесимметричные волны неустойчивости, которые хаотически разрастаются, и процесс завершается выбросом мелких капель. Как установлено в работе [6], распад жидкой струи в воздухе происходит в результате роста указанных выше осесимметричных возмущений. Неустойчивость струи по отношению к таким возмущениям обусловлена действием поверхностного натяжения. В [7, 8] решается задача о развитии возмущений и распаде жидкой струи в воздухе и показано, что минимальное время до разрушения струи жидкости с малой вязкостью равно  $t \approx kt_0$  ( $k$  зависит от числа Рейнольдса,  $t_0 = (\rho R_0^3/\sigma)^{1/2}$  — параметр времени;  $\rho$  — плотность жидкости;  $R_0$  — начальный радиус струи;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости). В качестве числа



Рис. 2. Истечение воды из сопла диаметром 6 мм со скоростью 25 м/с [5]

Рейнольдса в задаче используется величина  $Re = (\rho R_0 \sigma)^{1/2} / \eta$ , где  $\eta$  — вязкость жидкости. Для воды ( $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma = 72,8 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$ ,  $\eta = 0,105 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ) при  $R_0 = 2 \text{ мм}$   $Re = 363$ ,  $t_0 = 0,01 \text{ с}$ . Согласно расчетам [7] при  $Re = 5$   $k \approx 20$ , при  $Re = 10$   $k \approx 17$ , при  $Re = \infty$   $k \approx 14$ . В рассматриваемом случае при  $Re = 363$  время до разрушения струи близко к значению  $t \approx 14t_0 = 0,14 \text{ с}$ . За это время при скорости  $31,3 \text{ м/с}$  струя проходит расстояние  $L \approx 4,3 \text{ м}$ , что превышает 1000 ее диаметров. Этим обусловлено то, что на расстоянии, равном  $230 \text{ мм}$ , струя в воздухе производит практически такой же абразивный износ образца, что и на расстоянии  $25 \text{ мм}$  (см. табл. 1). В ходе эксперимента визуально отмечено, что струя, генерируемая установкой, схема которой приведена на рис. 1, сохраняется без изменений на расстоянии как минимум до  $1 \text{ м}$ .

В результате воздействия падающей по нормали гидроабразивной струи ( $\alpha = 90^\circ$ ) на поверхности образца появляется круглый след с лункой в центре (рис. 3). Диаметр лунки соответствует начальному диаметру струи, а диаметр всего следа зависит от среды (воздух или вода) и расстояния между поверхностью образца и насадком гидроабразивной головки  $L$ . На рис. 3 видно, что вследствие перемешивания с окружающей жидкостью затопленная струя размывается значительно быстрее, чем струя в воздухе, так как след обработки имеет диаметр в три раза больше, чем у струи в воздухе, несмотря на то что расстояние между поверхностью образца и насадком в три раза меньше. При воздействии струи, падающей под углом, на поверхности образца образуется след овальной формы с лункой, имеющей также овальную форму, ширину, приблизительно равную диаметру насадка ( $4 \text{ мм}$ ), длину  $10 \div 12 \text{ мм}$  и глубину до  $0,3 \text{ мм}$  (рис. 4). (На рис. 3–6  $a$  — ширина следа.) Заметим, что при низкой концентрации абразива в струе на дне лунки образуется выступ, вытянутый в ее продольном направлении и имеющий ширину (диаметр при  $\alpha = 90^\circ$ ), приблизительно равную  $1,5 \text{ мм}$ . Вблизи внешнего контура лунки глубина обработки составляет примерно  $0,1 \text{ мм}$  и при удалении от лунки следы обработки постепенно исчезают. Наличие выступа обусловлено неоднородностью распределения абразива по се-

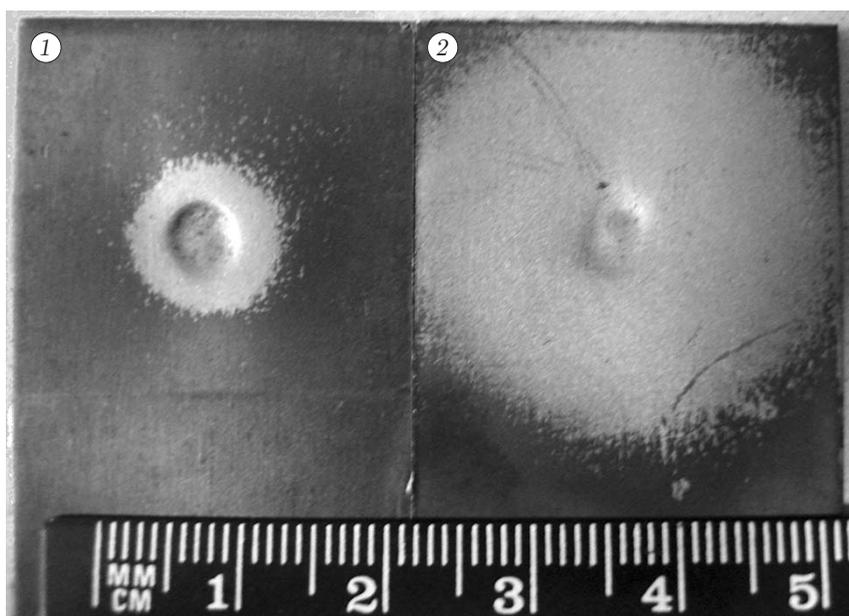


Рис. 3. Воздействие гидроабразивной струи на образец 1 (1) и образец 2 (2) при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $q = 1,22 \text{ г/с}$ :

1 — струя в воздухе,  $L = 60 \text{ мм}$  (см. табл. 2),  $a \approx 10 \text{ мм}$ ; 2 — затопленная струя,  $L = 20 \text{ мм}$  (см. табл. 2),  $a \approx 31 \text{ мм}$

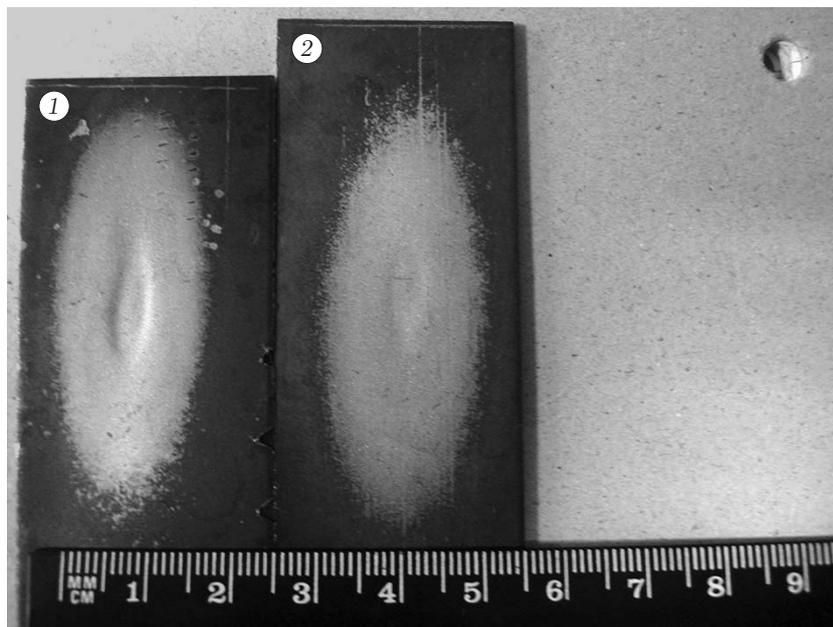


Рис. 4. Воздействие гидроабразивной струи на образец 3 (1) и образец 4 (2) при  $\alpha = 20^\circ$ ,  $q = 1,22$  г/с:

1 — струя в воздухе,  $L = 230$  мм (см. табл. 1),  $a \approx 18$  мм; 2 — затопленная струя,  $L = 10$  мм (см. табл. 1),  $a \approx 20$  мм

чению струи; эта неоднородность связана с конструкцией гидроабразивной головки, т. е. с методом подачи абразивной суспензии в струю. Перед попаданием основной струи в насадок в нее подается абразивная суспензия; вследствие этого рабочая жидкость, перемешиваясь с суспензией, вытесняет абразив к периферии и прижимает его к стенкам насадка. Заметим, что при увеличении концентрации абразива выступ в центре лунки постепенно исчезает.

Полученные следы обработки соответствуют структуре затопленной струи, описанной в [9]. Струя состоит из начального, переходного и основного участков. На начальном участке от  $0 \leq x \leq x_i$  ( $x$  — расстояние вдоль струи от насадка до рассматриваемой точки) сохраняется ядро струи, в котором скорость жидкости всюду одинакова и равна  $u_0$ . Ядро имеет коническую форму с радиусом основания  $R_0$  и вершиной в точке  $x = x_i$ . Таким образом, на оси струи скорость жидкости остается постоянной до конца начального участка  $x = x_i$ , а затем начинает уменьшаться, поэтому на некотором расстоянии  $x > x_i$  на основном участке струйное течение приобретает такой же вид, что и течение из точечного источника. Диаметр затопленной струи увеличивается, а граница струи и окружающей жидкости представляет собой конус с углом раствора  $\beta \approx 25^\circ$  [4]. Условный точечный источник находится на расстоянии  $x_0 = R_0 / \operatorname{tg}(\beta/2)$  от выходного сечения насадка в направлении, противоположном движению струи, т. е. внутри насадка. В рассматриваемом случае  $x_0 = 9$  мм. При удалении от насадка скорость струи уменьшается как по ее оси (при  $x > x_i$ ), так и по всему сечению. Это происходит вследствие вовлечения (подсоса) струей больших объемов жидкости из окружающей среды и перемешивания с ней. Согласно [9] длина начального участка определяется выражением  $x_i \approx 8R_0$ , а радиус струи в конце начального участка  $R_i \approx 2,16R_0$ . В рассматриваемом случае ( $R_0 = 2$  мм) получаем длину начального участка  $x_i \approx 16$  мм, радиус струи в конце начального участка  $R_i \approx 4,32$  мм. Абсцисса конца переходного участка  $x_t \approx 1,49x_i$ , радиус струи в этой точке  $R_t \approx 2,75R_0$  [9]. Соответственно при  $R_0 = 2$  мм  $x_t \approx 23,84$  мм,  $R_t \approx 5,5$  мм. Скорость жидкости на оси

струи в основной зоне ( $x > x_i$ ) определяется по формуле  $u_m \approx 12,4R_0u_0/(x_0 + x)$  [9]. Таким образом, при указанных в табл. 1 значениях  $L = 10, 15$  мм, когда затопленная струя еще сохраняет ядро, ее скорость на оси  $u_m = u_0 = 31,3$  м/с, а при  $L = 20, 30, 45, 60$  мм  $u_m = 26,8; 19,9; 14,4; 12,9$  м/с соответственно. При таком достаточно резком уменьшении скорости с увеличением  $L$  износ, вызываемый затопленной струей, также быстро уменьшается (см. табл. 1).

Очевидно, струя воды в воздухе также имеет центральную (ядро) и периферийную области, на периферии происходит частичное перемешивание жидкости с воздухом. В отличие от износа, создаваемого затопленной струей, при воздействии струи в воздухе с увеличением  $L$  от 10 до 75 мм износ сначала растет, а при дальнейшем увеличении  $L$  до 230 мм постепенно уменьшается (см. табл. 1). С ростом  $L$  ширина овального следа обработки  $a$  непрерывно увеличивается (при  $L = 10$  мм  $a \approx 10$  мм, при  $L = 75$  мм  $a \approx 16$  мм, при  $L = 100$  мм  $a \approx 17 \div 18$  мм), затем до  $L = 230$  мм практически не меняется. Увеличение ширины  $a$  и степени износа при увеличении  $L$  свидетельствует о том, что при малых значениях  $L$ , когда уменьшение скорости струи незначительно, растет производительность периферийной области струи. При этом формирование лунки центральной областью струи происходит более интенсивно в начале процесса, затем оно замедляется, скорее всего, вследствие образования гидравлической подушки.

Данные проведенных экспериментов позволяют утверждать, что на степень износа преграды при воздействии на нее гидроабразивной струи оказывают влияние как скорость центральной и периферийной частей струи, так и картина обтекания преграды гидроабразивным потоком. На рис. 4 видно, что размеры следов от воздействия струи в воздухе при  $L = 230$  мм и затопленной струи при  $L = 10$  мм на образцах 3, 4 примерно одинаковы. Это может свидетельствовать об одинаковом характере обтекания образцов. Однако износ в результате действия струи в воздухе в 1,23 раза больше (см. табл. 1), т. е. скорость струи в воздухе выше, чем скорость затопленной струи (это также подтверждает более глубокая лунка на образце 3). При сравнении образца 5 (рис. 5), обработанного струей в воздухе при  $L = 10$  мм, и образца 7 (рис. 6), обработанного затопленной струей при  $L = 15$  мм, видно, что при одной и той же скорости в ядре струи ( $u_m = u_0 = 31,3$  м/с) картины обтекания различны, поскольку размеры следов износа разные. Несмотря на то что расстояние было больше и струя была затопленной, износ образца 7 несколько больше (см. табл. 1).

Образование лунки и периферийной области износа соответствует характерным областям течения затопленной струи, соударяющейся с плоской преградой [10]. При натекании струи на преграду можно выделить несколько областей течения. На поверхности преграды существует зона торможения натекающей жидкости, при натекании по нормали толщина этой зоны торможения составляет  $0,25L$  [10]. В центре области торможения (на оси струи) видна описанная выше лунка (см. рис. 3), радиус области торможения  $r \leq 4R_0$ . Вокруг области торможения существуют область пристенного течения и, далее, область отрыва потока. В работе [10] эта картина течения приведена для случая соударения струи с преградой по нормали; очевидно, при соударении под углом она сохраняется. В рассматриваемом случае ( $R_0 = 2$  мм) получаем радиус зоны торможения 8 мм. С учетом этого, изучая следы воздействия гидроабразивной струи на преграду, можно составить представление о картине обтекания. При соударении с препятствием (в области торможения) и растекании (в области пристенного течения) струи наблюдается износ поверхности вследствие воздействия абразивных частиц, а в области отрыва потока гидроабразивное воздействие отсутствует. Поэтому можно утверждать, что граница пятна износа совпадает с линией отрыва потока. Механизмы износа в области торможения и пристенного течения различны. Абразивные частицы, движущиеся в центральной части струи, проходя зону торможения, частично теряют скорость и, соударяясь с преградой, формируют

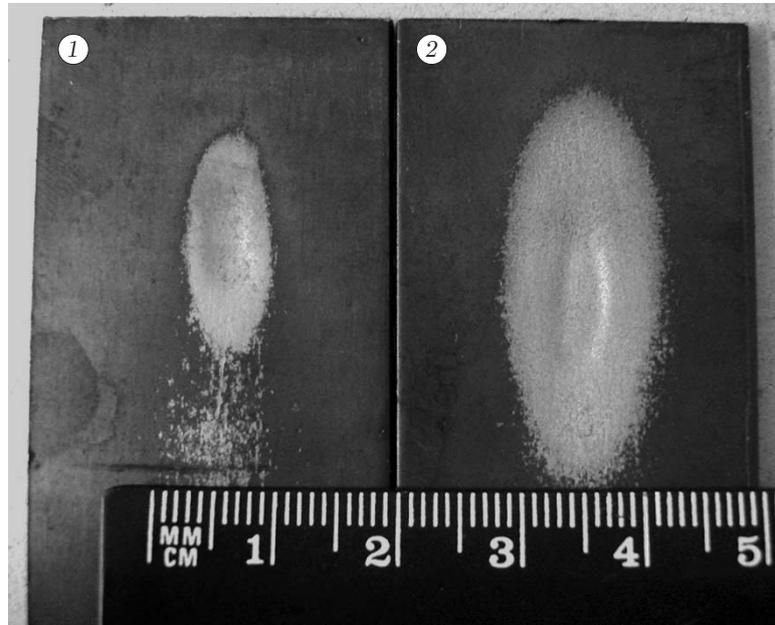


Рис. 5. Воздействие гидроабразивной струи в воздухе на образец 5 (1) и образец 6 (2) при  $\alpha = 20^\circ$ ,  $q = 1,22$  г/с:

1 —  $L = 10$  мм (см. табл. 1),  $a \approx 7$  мм; 2 —  $L = 50$  мм (см. табл. 1),  $a \approx 13$  мм

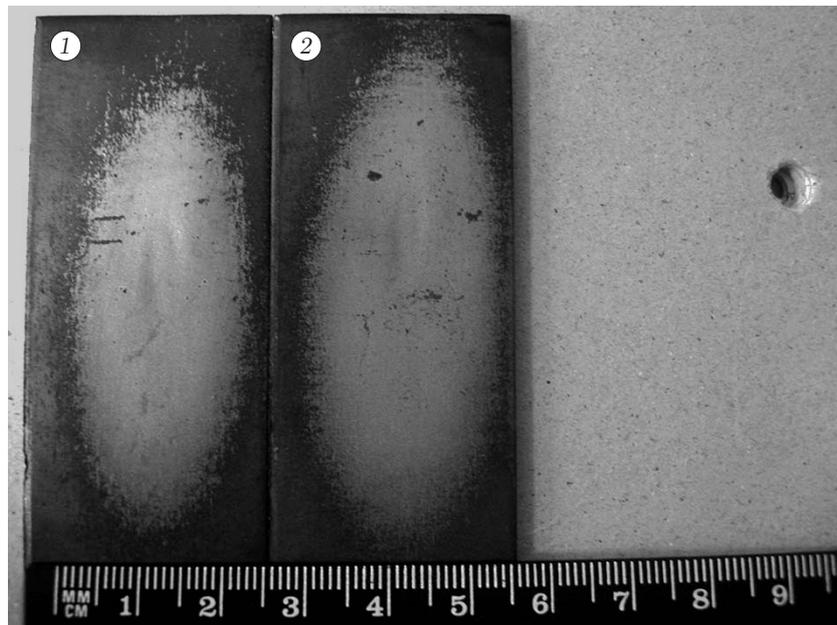


Рис. 6. Воздействие затопленной гидроабразивной струи на образец 7 (1) и образец 8 (2) при  $\alpha = 20^\circ$ ,  $q = 1,22$  г/с:

1 —  $L = 15$  мм (см. табл. 1),  $a \approx 21$  мм; 2 —  $L = 45$  мм (см. табл. 1),  $a \approx 26$  мм

лунку. Частицы, движущиеся в периферийной части струи, также проходят зону торможения, при этом их траектория отклоняется от оси струи и часть из них, попадая в область пристенного течения и двигаясь по касательной к преграде, оставляют царапины на ее поверхности. Таким образом, при воздействии гидроабразивной струи на преграду реализуются два механизма износа: путем выбивания микрочастиц материала абразивной частицей и путем срезания поверхностных микрочастиц (царапание). По мнению авторов настоящей работы, след гидроабразивного воздействия струи на преграду совпадает с областями торможения и пристенного течения, а добавление в жидкость малых количеств абразива позволяет экспериментально определять картину течения при обтекании жидкостью препятствия. Например, на рис. 3 видно, что при соударении с пластиной по нормали область отрыва течения для воздушной струи начинается при  $2r \approx 10$  мм (образец 1), а для затопленной — при  $2r \approx 31$  мм (образец 2).

С учетом сказанного выше можно объяснить, почему при действии струи в воздухе с увеличением  $L$  износ сначала увеличивается, затем уменьшается (см. табл. 1). С ростом  $L$  от 10 до 100 мм увеличивается размер пятна обработки, т. е. размер зоны пристенного течения. При этом также увеличивается область контакта абразивных частиц, движущихся в приповерхностном слое, с образцом, что приводит к увеличению не только центральной лунки, но и износа в целом. Максимальный износ наблюдается при  $L = 75$  мм (см. табл. 1). При дальнейшем увеличении  $L$  становится существенным уменьшение скорости струи и соответственно абразивных частиц, поэтому износ начинает плавно уменьшаться. В случае затопленной струи ее скорость уменьшается значительно быстрее, поэтому с ростом  $L$  износ не увеличивается.

Рассмотрим зависимость износа от угла падения струи. Как для струи в воздухе, так и для затопленной струи при увеличении  $\alpha$  от 5 до  $35^\circ$  наблюдается рост износа, при  $35^\circ < \alpha \leq 90^\circ$  — уменьшение (см. табл. 2). Соотношение величин износа при  $\alpha = 35^\circ$  и  $\alpha = 90^\circ$  для струи в воздухе составляет 1,4, для затопленной струи — 1,3. Наличие максимума при  $\alpha = 35^\circ$  обусловлено тем, что выбивание и срезание материала абразивной частицей зависят от соотношений величин нормальной и тангенциальной составляющих ее скорости. Данный экспериментальный результат показывает, что оптимальное соотношение компонент скорости достигается при  $\alpha = 35^\circ$ . Отмечается сходство износов при воздействии гидроабразивной и воздушно-абразивной струй. В тестах на эрозионный износ на образец из сопла направляется струя воздуха, содержащая частицы абразива. Установлено, что максимальный эрозионный износ имеет место при  $\alpha = 30^\circ$  [11].

Очевидно, что при увеличении концентрации абразива в струе износ испытываемого образца также должен увеличиваться. Это подтверждают результаты проведенных экспериментов (см. табл. 3). Анализ данных показывает, что износ увеличивается практически прямо пропорционально росту объемной концентрации абразива при  $q = 0,55 \div 7,66$  г/с. При этом в случае обработки струей в воздухе с ростом  $q$  износ увеличивается быстрее, чем при обработке затопленной струей.

Оценим концентрацию в жидкости вымываемого материала, поскольку его частицы могут оказывать влияние на процесс износа, образуя подушку над формирующейся лункой. При расходе воды  $Q = 155$  см<sup>3</sup>/с, времени испытания  $t = 1$  ч и износе материала  $\Delta m = 0,7043$  г (максимальное значение приведено в табл. 3) получаем, что объемная концентрация частиц стали ( $\rho = 7,8$  г/см<sup>3</sup>) в воде составляет  $100\Delta m / (Q\rho t) = 1,62 \cdot 10^{-5}$  %. Выше показано, что объемная концентрация абразивных частиц равна  $0,09 \div 1,30$  %. Таким образом, концентрация абразива на 4–5 порядков больше концентрации стали, поэтому частицы изнашиваемого материала не могут оказывать существенного влияния на процесс износа.

**Заключение.** Разработаны способ и устройство для испытаний материалов и покрытий на гидроабразивный износ, позволяющие воздействовать на испытываемый образец как струей в воздухе, так и затопленной струей. Параметры испытаний (угол падения струи на образец, расстояние между насадком сопла и образцом и т. д.) могут меняться в широком диапазоне и таким образом имитировать условия эксплуатации той или иной детали.

Для гидроабразивной струи с начальным диаметром 4 мм и скоростью 31,3 м/с установлено, что износ, вызываемый затопленной струей, резко уменьшается при увеличении расстояния от поверхности образца до насадка. При воздействии струи в воздухе с увеличением расстояния  $L$  от 5 до 75 мм износ сначала возрастает, затем, при  $75 \text{ мм} < L < 230 \text{ мм}$ , постепенно уменьшается.

При воздействии как струей в воздухе, так и затопленной струей максимальный износ образцов наблюдается при угле падения струи  $\alpha = 35^\circ$ . С увеличением концентрации абразива в жидкости износ образцов растет прямо пропорционально.

В некоторых случаях добавка малых количеств абразива в жидкость, обтекающую преграду, позволяет получить информацию о различных областях течения. В частности, в случае взаимодействия струи с преградой по следам гидроабразивного износа можно определить область воздействия ядра струи и границу между областью пристенного течения и областью отрыва потока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Комбалов В. С.** Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: Справ. / Под ред. К. В. Фролова, Е. А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008.
2. **Пат. 2444719 РФ, МПК G 01 N 3/56.** Способ испытания материалов на гидроабразивный и коррозионный износ / Н. И. Смирнов, Н. Н. Смирнов; Оpubл. 10.03.12, Бюл. № 7.
3. **Shtertser A. A., Ulianitsky V. Yu., Tsarakhov K. A., Grinberg B. E.** Characterization of detonation sprayed coatings // Proc. of the Intern. thermal spray conf. ITSC-2011, Hamburg, 27–29 Sept. 2011. Duesseldorf: DVS Media GmbH, 2011. P. 1036–1038.
4. **Ландау Л. Д.** Теоретическая физика: Учеб. пособие: В 10 т. Т. 4. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. М.: Наука, 1988.
5. **Альбом течений жидкости и газа** / Сост. М. Ван-Дайк. М.: Мир, 1986.
6. **Rayleigh L.** On the instability of jets // Proc. London Math. Soc. 1879. V. 10. P. 4–13.
7. **Чесноков Ю. Г.** Нелинейное развитие капиллярных волн в струе вязкой жидкости // Журн. техн. физики. 2000. Т. 70, вып. 8. С. 31–38.
8. **Чесноков Ю. Г.** Короткие капиллярные волны на поверхности растягивающейся цилиндрической струи вязкой жидкости // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 3. С. 56–52.
9. **Абрамович Г. Н.** Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960.
10. **Волков К. Н.** Взаимодействие круглой турбулентной струи с плоской преградой // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 1. С. 55–67.
11. **Kleis I.** Solid particle erosion. Occurrence, prognosification and control / I. Kleis, P. Kulu. Tallinn: Tallinn Univ. Technol., 2005.

*Поступила в редакцию 31/VIII 2012 г.,  
в окончательном варианте — 19/XI 2012 г.*