

THE UNIVERSITY OF MICHIGAN

College of Engineering

Department of Mechanical Engineering

Cavitation and Multiphase Flow Laboratory

Report No. 01357-10-1

HYDROABRASIVE WEAR OF METALS UNDER CAVITATION

by S. P. Kozirev (in Russian)

Figure Legends and Bibliography Translated

by O. Ahmed (in English)

F. G. Hammitt

Financial Support Provided by:

National Science Foundation

Grant No. GK-1889

May 1970

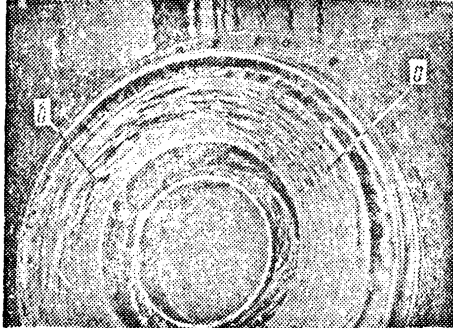
TABLE OF CONTENTS

| | Page |
|--|------|
| Introduction | 3 |
| Chapter I. Hydroabrasive Wear | 5 |
| Total and Local Hydroabrasive Wear | 5 |
| Cavitation | 12 |
| Chapter II. Equipment for Testing Wear of Metals by | |
| Abrasive Cavitation | 16 |
| Hydrodynamical Tunnels | 16 |
| Ultrasonic Installation | 16 |
| Chapter III. Study of Cavitation Phenomena and Cavitation | |
| Abrasive Wear in Hydrodynamical Tunnels | 29 |
| Equipment | 29 |
| Cavitation Phenomena and Wear Around Circular | |
| Profiles in Hydroabrasive Flow | 32 |
| Cavitation and Abrasive Cavitation Wear on | |
| Circular Rough Surfaces and the Resulting | |
| Appearance | 49 |
| Cavitation and Abrasive Cavitation Wear on | |
| Surfaces of Projected Corners | 57 |
| Chapter IV. Impacting Specimens with Water Jets | 62 |
| Experimental Data | 62 |
| Impacting Forces | 65 |
| Chapter V. Effect of Water Jet Velocity and Other Factors | |
| on Wear | 69 |
| Impacting Jets from Nozzles | 75 |
| Wear Tests | 78 |
| Simulation of Damage by Jets | 78 |
| Effect of Jet Diameter on Wear | 83 |
| Effect of the Jet Section From on the Wear | 87 |
| Effect of the Spacing between Nozzle and Specimen | |
| on Wear | 90 |
| Chapter VI. Cavitation Wear of Metals | 91 |
| Progress of Cavitation Wear with Time | 96 |
| Chapter VII. Hydroabrasive Wear on Electric Weld Seams | 126 |
| Studies of Stabilized Cavitation on Weld Seams | 126 |
| Hydroabrasive Wear on Weld Seams | 133 |
| Studies of Combined Cavitation-Abrasive Wear on | |
| Weld Seams | 135 |
| Literature | 136 |

атации). Слева виден участок *б* местного износа (со следами канавок), справа — участок *а* равномерного общего износа. Направление потока справа налево. Диаметр детали 1200 мм.

На фиг. 2 показана типовая эпюра износа этих двух участков (*а* — соответствует участку общего износа, *в* — местного).

На фиг. 3 показан участок *а* общего износа облицовки и участок *б* местного износа боковой части корпуса землесоса. Наибольшему износу подвержено место стыка деталей. Максимальная глубина выбоины составляет 25 мм.



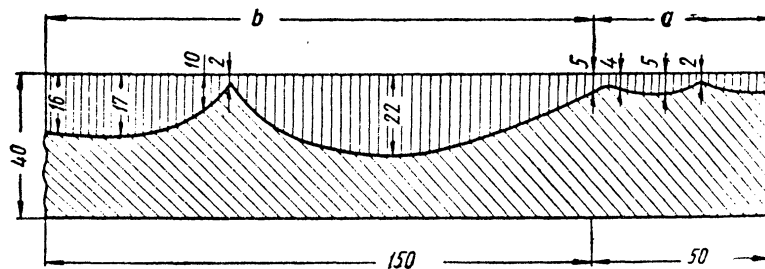
Фиг. 1. Износ передней крышки землесоса типа ЗГМ-2 (уменьшено в 10 раз):

а — участок общего износа; *б* — участок местного износа.

На фиг. 4 показан участок местного износа передней крышки землесоса. Максимальная глубина выбоины составляет 10 мм.

Подобные поверхности общего и местного износа наблюдаются у ряда деталей гидротурбин при их работе на воде, содержащей взвешенные наносы, у деталей турбобуров, работающих на глинистых растворах, углесосах и т. д.

На фиг. 5 показан износ лопатки 1 и обода 2 колеса турбобура, работавшего около 70 ч на глинистом растворе. Макси-



Фиг. 2. Типовая эпюра износа передней крышки землесоса.

имальная глубина канавок износа 6 мм. Максимальная линейная скорость вращения лопаток равна около 60 м/сек.

Таким образом, общий и местный гидроабразивный износ наблюдается у всех роторных гидромашин, работающих на воде, содержащей твердые частицы.

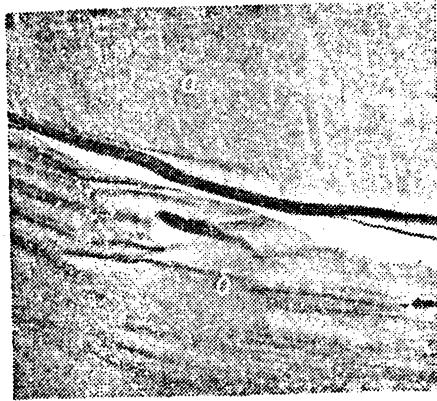
Как видно из приведенных примеров, местный износ характерен наличием глубоких выбоин канавообразной формы, причем размеры последних, если их характеризовать длиной, шириной

6

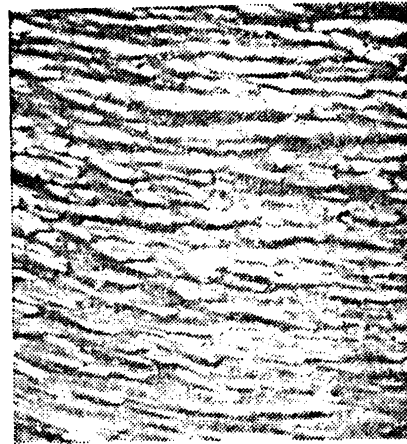
Figure 1. Wear on the Front Cover of a Suction Dredge Type ЗГМ-2 (reduced 10 times), *a*) edge section wear, *b*) inner section wear.

Figure 2. Standard Section Cut of Wear on the Front Cover of Suction Dredge.

и глубиной, колеблются в широких пределах, например, от $20 \times 8 \times 10$ мм до $250 \times 20 \times 35$ мм. При этом, если, например, величина общего износа за определенный период работы по тол-



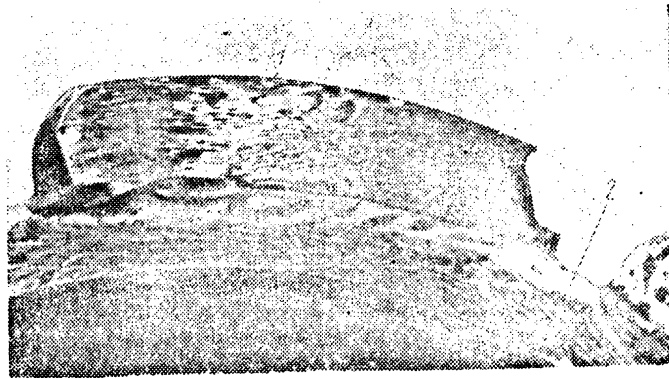
Фиг. 3. Износ в месте стыка облицовки и корпуса землесоса (уменьшено в 3 раза):
а — общий износ; б — местный износ.



Фиг. 4. Местный износ за электронаплавочными швами передней крышки землесоса (уменьшено в 6 раз).

щине детали составляет 3—5 мм, то местный износ за это же время достигает 15—25 мм.

Отсюда можно заключить, что местный износ протекает в несколько раз быстрее общего износа.



Фиг. 5. Износ лопатки и обода колеса турбобура:
1 — лопатка; 2 — обод.

Каждый тип детали может иметь определенные размеры поверхности, которая подвержена общему и местному износу. Передние крышки землесосов выходят из строя в основном из-за местного износа, и для данной детали, следовательно, он является ведущим. Трубы же, по которым транспортируется гидроабразивная смесь, выходят из строя из-за общего износа.

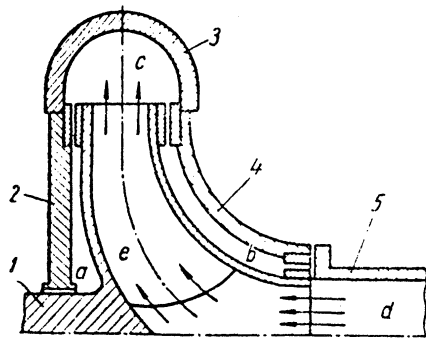
7

Figure 3. Wear at Joint Place between Lining and Cover of Suction Dredge (reduced 3 times); a) edge wear, b) inner wear.

Figure 4. Local Wear on an Electric Welding Seam on the Front Suction Dredge.

Figure 5. Wear on Blade and Rim of Turbine Rotor; 1) blade, 2) rim.

Необходимо отметить, что общий и местный износ зависят как от изнашивающих «качеств» потока (скорости, содержания абразивных частиц, их размеров и т. д.) и конструктивных особенностей поверхности (прямолинейная, криволинейная), так и от положения поверхности по отношению к направлению движения потока. Последнее обстоятельство имеет особо важное значение для случаев закрученных потоков, когда возникают дополнительные центробежные силы, прикладываемые к абразивным частицам. Так, например, если проследить движение гидроабразивной смеси в землесосе (фиг. 6), то увидим:



Фиг. 6. Направления движения гидроабразивного потока в землесосе: 1 — колесо; 2 — задняя крышка; 3 — улитка; 4 — передняя крышка; 5 — всасывающий патрубок; *a, b, c, d, e* — зоны, заполняемые гидроабразивным потоком.

гидроабразивной смеси в землесосе (фиг. 6), то увидим:

1. Во всасывающем патрубке 5 поток движется прямолинейно, горизонтально и параллельно изнашиваемой поверхности (зона *d*).

2. В межлопаточном пространстве рабочего колеса 1 (зона *e*) поток под воздействием контрвихря получает сложное завихренно-поступательное движение.

3. В отливном канале улитки 3 поток движется криволинейно.

4. В пространствах между рабочим колесом и крышками 4

и 2 (зоны *a* и *b*) поток закручивается. Изнашиваемые поверхности также расположены горизонтально и вертикально.

В случаях 2, 3 и 4 в потоке возникают центробежные силы, которые приложены к абразивным частицам и часто играют важную роль в общем износе. Но как видно из приведенной схемы, эти силы могут быть направлены под различными углами к изнашиваемой поверхности в зависимости от ориентации последней.

Если рассмотреть движение потока и в других роторных машинах (турбинах, турбобурах и т. д.), то можно выделить основные типовые схемы взаиморасположения элементов поверхностей и потоков в целом с учетом направления центробежных сил. При этом мы исходим из общего представления, что на абразивную частицу воздействуют только две основные силы: сила P_2 гидродинамического взаимодействия частицы и потока и центробежная сила P_c . При этом сила P_2 перемещает частицу вдоль изнашиваемой поверхности, а сила P_c прижимает ее к поверхности.

На фиг. 7 показаны основные схемы взаимного расположения поверхностей деталей и потока с учетом центробежных сил. В случае *a* центробежные силы отсутствуют; частицы к изнашиваемой поверхности 1 этими силами не прижимаются. В слу-

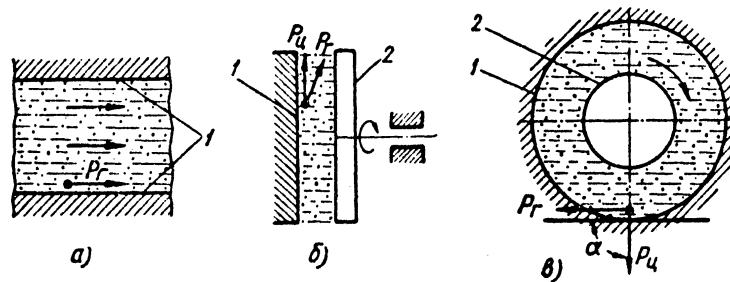
8

Figure 6. Flowing Direction of Hydroabrasive Stream through the Suction Dredge; 1) wheel, 2) back cover, 3) helix, 4) front cover, 5) suction lines (*a, b, c, d, e*, -- zones filled up with hydroabrasive stream).

чае *б* на частицы воздействует центробежная сила, направленная так, что она только изменяет направление и увеличивает силу, движущую частицы. В случае *в* центробежная сила уже прижимает частицы к изнашиваемой поверхности *1*; от поверхности *2* частицы той же силой отбрасываются.

Таким образом, поверхности деталей при общем износе могут изнашиваться как за счет трения между абразивом и поверхностью, так и за счет ударного воздействия частиц.

Перемещение абразивных частиц потоком сопровождается турбулентным перемешиванием жидкости. Степень соответствия перемещения твердых частиц перемещению жидкости зависит от количества твердых частиц, их размера, плотности и формы.



Фиг. 7. Типовые схемы расположения изнашиваемых поверхностей деталей относительно потока:
1 — неподвижная поверхность; 2 — вращающаяся поверхность.

Можно считать, что чем меньше размер твердых частиц, тем вероятнее их перемещение по траекториям, близким к траекториям перемешивания жидкости. Приближенно можно считать, что турбулентное перемешивание жидкости тождественно турбулентному перемешиванию смеси.

В связи с этим, в науке о гидротранспорте введено понятие турбулентного переноса, под которым понимается перераспределение примесей в потоке под воздействием переноса жидких масс из одного слоя в другой.

Кроме того, в потоке установлено наличие пульсаций скоростей. Измерение пульсаций электротермогидрометром показало, что мгновенные пульсационные скорости могут отклоняться от средней скорости потока на 40% [2].

Таким образом, в потоке имеет место непрерывное чередование случайных мгновенных скоростных полей. На абразивную частицу воздействуют массы жидкости различных скоростей, причем в некоторые мгновения скорость частиц вследствие этого может возрастать в любых направлениях.

По этой причине твердые частицы, содержащиеся в потоке, ударяют под различными углами по ограничивающей поток стенке, вызывая тем самым ее износ.

Figure 7. Typical Schematic for Surface Wear Details Relative to Flow; 1) stationary surface, 2) rotating surface.

На фиг. 8 приведен фотоснимок потока воды, движущегося по каналу с гладкими стенками. Снимок выполнен Л. Прандтлем фотокамерой, которая перемещалась со скоростью потока. У стенок канала видны вихри эллиптической формы с большой осью, направленной по течению. Произведенная также Л. Прандтлем киносъемка процесса развития вихрей показала, что в момент образования вихри имеют небольшие размеры, затем они растут и, достигнув определенного размера, распадаются, выбрасывая в поток отдельные массы воды. Если вихри формируются в потоке, содержащем абразивные частицы, то они вместе с жидкостью вовлекают в вихревое движение также и частицы. Кроме



Фиг. 8. Вихревая структура потока воды.

того, частицы могут засасываться центральной частью вихря, так как здесь всегда имеется пониженное давление [3]. При распаде такого вихря выбрасывается масса воды, содержащая абразивные частицы. Это также является причиной ударного воздействия абразивных частиц на изнашиваемую поверхность. Существование завихренности потока и роль ее при общем износе подтверждается волнистым видом изношенных поверхностей (см. фиг. 1).

Очевидно, завихрения образуются и в случае закрученного потока (см. фиг. 6), но сильно искажаются действием центробежных сил.

Таким образом, общий износ идет как за счет трения частиц о поверхность, так и за счет их ударного воздействия.

Количественное соотношение износа за счет трения и износа от ударного воздействия частиц может быть различным для каждой поверхности и каждого режима течения потока. Кроме того, поскольку искривления и завихрения потока движутся вместе с потоком, то это приводит к более равномерному износу поверхностей.

Figure 8. Vortex Structure of Water Flow.

При наблюдении за образованием местного износа на поверхностях деталей легко установить, что износ, как правило, возникает прежде всего за каким-либо местным препятствием (неровности обработки поверхности, бугорки электросварки, болтовые отверстия и т. д.).

Так, показанный на фиг. 3 местный износ в виде канавки образовался в районе щели-стыка облицовки и корпуса землеса. На фиг. 4 показан износ, образовавшийся за электронаплавочными швами.

В связи с этим, причиной образования местного износа следует считать завихрения и кавитационные явления, которые развиваются в возмущенном потоке за препятствием. Указанные явления имеют одну особенность: они воздействуют почти постоянно на один и тот же участок поверхности.

На фиг. 9 показана схема обтекания потоком неровности в виде порожка. В этом случае, как известно, при некотором значении числа Рейнольдса, линии тока 1 за препятствием 3 образуют замкнутую область,

в которой происходит круговое движение жидкости, т. е. образование вихря. Со временем вихрь увеличивается в размерах. При числе Рейнольдса, превышающем некоторое критическое значение, вихрь становится асимметричным (удлиненным в направлении течения) и покидает препятствие. Спустя некоторое время после отхода от препятствия вихрь распадается, а на его месте образуется новый вихрь и т. д.

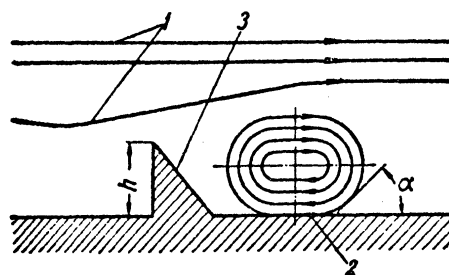
При этом оказывается, что значение $\frac{Nh}{v}$, называемое числом Струхала, для многих форм препятствий является примерно постоянным [4]. Параметры, входящие в число Струхала, означают:

- N — количество вихрей, образующихся за препятствием в единицу времени;
- h — высота препятствия;
- v — скорость потока.

По литературным источникам число Струхала для препятствия в виде порожка может быть принято равным 0,2.

В таком случае количество срывающихся вихрей в единицу времени

$$N = \frac{0,2v}{h}.$$



Фиг. 9. Схема образования вихря за препятствием в виде порожка:
1 — линии тока; 2 — изнашиваемая поверхность; 3 — препятствие.

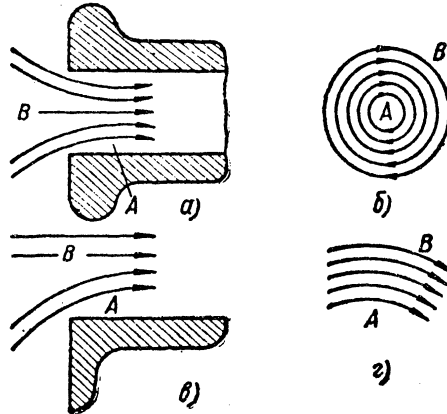
Figure 9. Schematic for the Formation of a Vortex Behind an Obstacle as Result of Flow Separation; 1) Laminar flow, 2) wear surface, 3) obstacle.

ниже. В этих местах в жидкости появятся кавитационные, т. е. заполненные паром и газом пузырьки или каверны.

Обычно считают, что образование кавитационных пузырьков или каверн начинает происходить в том случае, когда давление в жидкости падает до величины давления парообразования при данной температуре жидкости.

Кроме того, часто образование зон разного давления в потоке происходит за счет различных криволинейных течений.

На фиг. 10 схематично показаны некоторые случаи течений, при которых происходит образование зон различного давления в потоке. Зона пониженного давления *A* образуется при втекании потока в насадку или щель (фиг. 10, *a*), при вихреобразовании — в центре вихря (фиг. 10, *б*), при обтекании крутообтекаемых тел (фиг. 10, *в*) и при искривленном потоке (фиг. 10, *г*). Зоны *B* повышенного давления расположены на некотором расстоянии от зон *A*.



Фиг. 10. Зоны различных давлений в потоке жидкости.

При определенных условиях в зонах пониженного давления происходит образование кавитационных пузырьков или полостей. Для оценки возможности возникновения кавитации в потоке используется коэффициент кавитации *k*.

$$k = \frac{p - p_v}{0,5\rho v^2},$$

где *p* — статическое давление в потоке.

p_v — давление в точке образования кавитационной полости;

ρ — плотность жидкости;

v — скорость потока.

Чем больше величина *k*, тем меньше вероятность возникновения кавитации. Для каждого конкретного случая обтекания препятствия имеется критическое значение величины *k*, при котором возникает кавитация.

В конечном итоге кавитация приводит к нарушению нормального течения жидкости (например, в гидромашинах), которое сопровождается вибрацией агрегатов, снижением их мощности, снижением к. п. д. и кавитационными разрушениями поверхностей деталей.

По мере развития техники и интенсификации рабочих процессов машин, явление кавитации проявляется все в больших

Figure 10. Zones of Pressure Variations in a Fluid Flow.

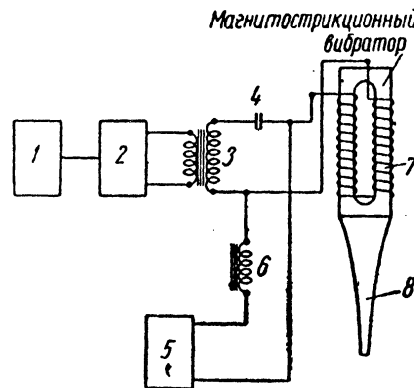
мых для испытания материалов на кавитационный износ в чистой воде.

По ряду причин нами был использован пакетный магнестрикционный вибратор. Последний изготовлен из тонких (0,2 мм) отожженных пермендюровых¹ пластин, склеенных в прямоугольный пакет 7 (фиг. 11), размерами 110×36×30 мм. К одному из концов пакета припаян трансформатор скорости (концентратор) 8, который представляет собой металлический конус. Применение концентратора позволяет получать на его конце повышенные амплитуды колебаний.

Магнестрикционный пакет имеет обмотку, состоящую из 44 витков провода типа ПВЛ-1, диаметром 1 мм. К обмотке, через усилитель ТУ-600, подается переменное напряжение от звукового генератора ЗГ-12. Параллельно на эту же обмотку подается постоянное напряжение подмагничивания от выпрямителя ВСА-5, которое способствует увеличению амплитуды колебаний вибратора. Дроссель 6 препятствует току высокой частоты от усилителя попадать в выпрямитель. Для того чтобы ток подмагничивания не проходил к выходному трансформатору усилителя, ставится соответствующий конденсатор 4.

Установка работает за порогом слышимости на частотах 18—22 кгц, поэтому необходимость в специальной звукоизолирующей защите отпадает. На фиг. 12 показана схема ввода ультразвуковых колебаний в гидроабразивный поток. Здесь магнестрикционный вибратор (пакет 11 и концентратор 12) сверху вставлен в рабочую камеру 1. Снаружи магнестрикционный пакет закрыт охлаждающим кожухом 5, в который под напором через штуцер подается охлаждающая пакет вода.

Вибратор посредством фланца крепится к охлаждающему кожуху, последний, в свою очередь, также посредством фланца прикреплен к верху рабочей камеры. Рабочая камера имеет два плексигласовых окна, через которые ведется наблюдение за образцом. Снизу, напротив концентратора, в камеру ввертывается держатель 18 образца, на который наверху подставка 17, поддерживающая образец 14. Образец крепится накидной гайкой 16.



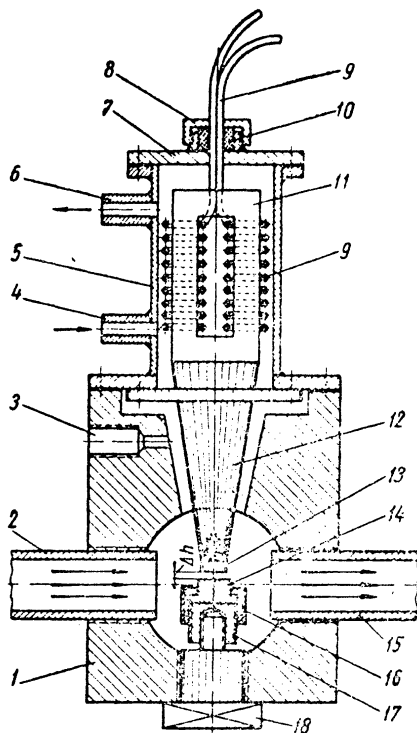
Фиг. 11. Принципиальная схема ультразвуковой установки для испытаний материалов на износ в гидроабразивном потоке:

1 — звуковой генератор ЗГ-12; 2 — усилитель мощности ТУ-600; 3 — выходной трансформатор; 4 — емкость; 5 — выпрямитель ВСА-5; 6 — дроссель; 7 — пермендюровый пакет; 8 — концентратор.

¹ Сплав кобальта, железа и ванадия.

Figure 11. General Schematic of Ultrasonic Facility for Testing Materials for Wear in Hydroabrasive Flow; 1) sound wave generation ЗГ-12, 2) power oscillator ТУ-600, 3) input transformer, 4) capacitor, 5) rectifier ВСА-5, 6) choke, 7) core, 8) vibrating horn.

В данном случае испытуемый образец неподвижен; это сделано для того, чтобы исключить ударное воздействие образца на абразивные частицы при его колебании. Образец устанавливается против торца колеблющегося концентратора с зазором, который для того, чтобы исключить прямое долбящее действие абразивных частиц, должен быть в несколько раз большим, чем диаметр частиц используемого абразива. При такой схеме образец при кавитации в чистой воде разрушается под воздействием кавитационных пузырьков, которые образуются в зазоре от колебаний торца концентратора. Гидроабразивный поток в рабочую камеру поступает по трубопроводу 2. Скорость потока в камере поддерживается достаточной для предупреждения оседания абразивных частиц. Частицы входят в зону кавитации и, получая дополнительные импульсы от колеблющегося торца концентратора и, главным образом, от пульсации кавитационных пузырьков, ударно воздействуют на рабочую поверхность образца. В результате, последняя подвергается сложному одновременному воздействию абразивных частиц и кавитации, что довольно близко воспроизводит протекание кавитационно-абразивного износа в реальных машинах. Необходимо отметить, что одновременно, хотя и с меньшей интенсивностью, происходит износ торца концентратора, поэтому для предупреждения его чрезмерного износа в торец плотно ввертывается вставка 13. Торец вставки периодически шлифуется; в случае необходимости вставка заменяется.



Фиг. 12. Схема ввода ультразвуковых колебаний в гидроабразивный поток:

1 — камера; 2 — подводный трубопровод; 3 — штуцер манометра; 4 — подвод охлаждающей воды; 5 — охлаждающий кожух; 6 — отвод воды; 7 — крышка; 8 — гайка; 9 — обмотка; 10 — сальник; 11 — пакет; 12 — концентратор; 13 — вставка; 14 — образец; 15 — отводящий трубопровод; 16 — гайка; 17 — подставка; 18 — держатель образца.

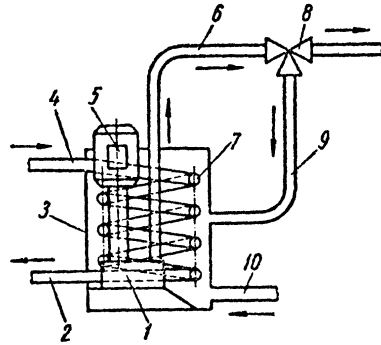
ратора, поэтому для предупреждения его чрезмерного износа в торец плотно ввертывается вставка 13. Торец вставки периодически шлифуется; в случае необходимости вставка заменяется.

Гидроабразивный поток из рабочей камеры по трубопроводу 15 (фиг. 12) отводится в сборный бак 3 (фиг. 13). Насос 1 непрерывно подает по трубопроводу 6 смесь воды и абразивных частиц в рабочую камеру. Для того чтобы абразивные частицы не оседали в баке, а также для регулирования скорости потока в рабочей камере, часть потока из напорного трубопровода 5

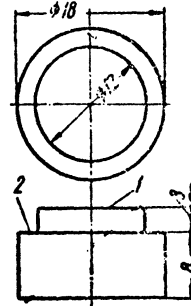
18

Figure 12. Schematic Representing Ultrasonic Vibration for Hydroabrasive Fluid; 1) compartment, 2) inlet pipe, 3) manometer tap, 4) cooling water inlet, 5) cooling jacket, 6) water outlet, 7) covering lid, 8) sealing nut, 9) lead wires, 10) stuffing box, 11) core, 12) vibrating horn, 13) horn tip, 14) specimen, 15) outlet pipe, 16) holding nut, 17) support, 18) specimen holder.

через трехходовой кран 8 по трубопроводу 9 перепускается обратно в бак. Здесь струя гидродинамическим действием все время поддерживает абразивные частицы во взвешенном состоянии. Для поддержания температуры потока постоянной служит змеевиковый холодильник 7. Измерение скорости потока производится приспособлением, основанным на применении трубки Пито, или путем замера расхода потока. Давление в рабочей камере регистрируется пружинным манометром с растянутой шкалой.



Фиг. 13. Сборный бак для гидроабразивной смеси:
1 — насос; 2 — отвод охлаждающей воды; 3 — бак; 4 — подвод воды; 5 — электродвигатель; 6 — напорный трубопровод; 7 — холодильник; 8 — трехходовой кран; 9 — перепускной трубопровод; 10 — подвод гидроабразивной смеси.



Фиг. 14. Образцы, испытываемые на износ на ультразвуковой установке:
1 — рабочая поверхность; 2 — заплечики.

Испытуемые образцы представляют собой ступенчатые цилиндры (фиг. 14). Оценка износа производится весовым методом. Испытуется не менее 3—4 образцов из одного материала. Разброс данных, например, при 10%-ной насыщенности воды кварцевым песком не превышает $\pm 8\%$.

Оценка износостойкости материала производится относительно износостойкости образца из армо-железа, которое принято за эталон. Испытание основных образцов и эталонных ведется поочередно в одинаковых условиях.

Таким образом, описанная установка позволяет испытывать материалы на износостойкость в условиях совместного кавитационно-абразивного воздействия. При этом, можно изменять интенсивность каждого из этих факторов от нуля до максимальных значений. Интенсивность абразивного воздействия меняется в зависимости от процентного содержания абразивных частиц в потоке, а интенсивность кавитационного воздействия — в зависимости от амплитуды колебаний концентратора и создания в рабочей камере избыточного давления вплоть до величины, при которой образование кавитационных пузырьков прекращается. Кроме того, небольшой объем потока (4—5 л) позволяет исследовать

2*

19

Figure 13. Assembled Container for Hydroabrasive Mixture; 1) pump, 2) cooling water inlet, 3) container, 4) water outlet, 5) electric motor, 6) supply pipe, 7) cooling coil, 8) 3-way valve, 9) by-pass pipe, 10) inlet of hydroabrasive mixture.

Figure 14. Specimen for Wear Tests in Ultrasonic Facility; 1) working surface, 2) mounting holder.

довать износостойкость материалов в различных средах (воде, кислотах, маслах и т. д.) с различным абразивом (песком, глиной, золой и т. д.).

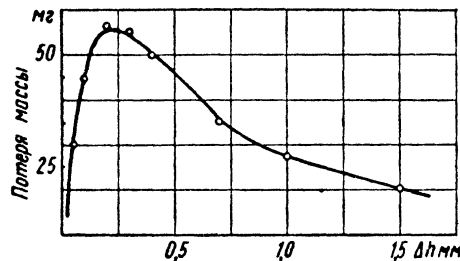
Интенсивность износа образцов зависит также от величины зазора Δh между образцом и торцом концентратора.

На фиг. 15 показана зависимость потери массы алюминиевого образца за 30 мин испытаний в чистой воде от зазора Δh . Кривая имеет явно выраженный максимум, который соответствует $\Delta h = 0,2 \div 0,3$ мм. Наличие максимума связано с тем, что наибольшим разрушающим действием обладают кавитационные пузырьки, собственная частота колебаний которых совпадает с частотой колебания концентратора. Диаметры таких пузырьков могут быть определены из формулы, приведенной Смитом [27]:

$$d = \frac{0,66}{f},$$

где d — диаметр пузырька в см;
 f — частота колебаний вибратора в кгц.

Для частот 20—22 кгц резонансный диаметр пузырьков равен 0,3—0,33 мм, что довольно близко совпадает с зазором, при котором в нашем случае наблюдается максимальный износ.



Фиг. 15. Износ в зависимости от зазора Δh между образцом и вибратором.

Таким образом, максимальный износ образца происходит в том случае, если величина зазора между образцом и торцом вибратора соответствует диаметру резонансных пузырьков.

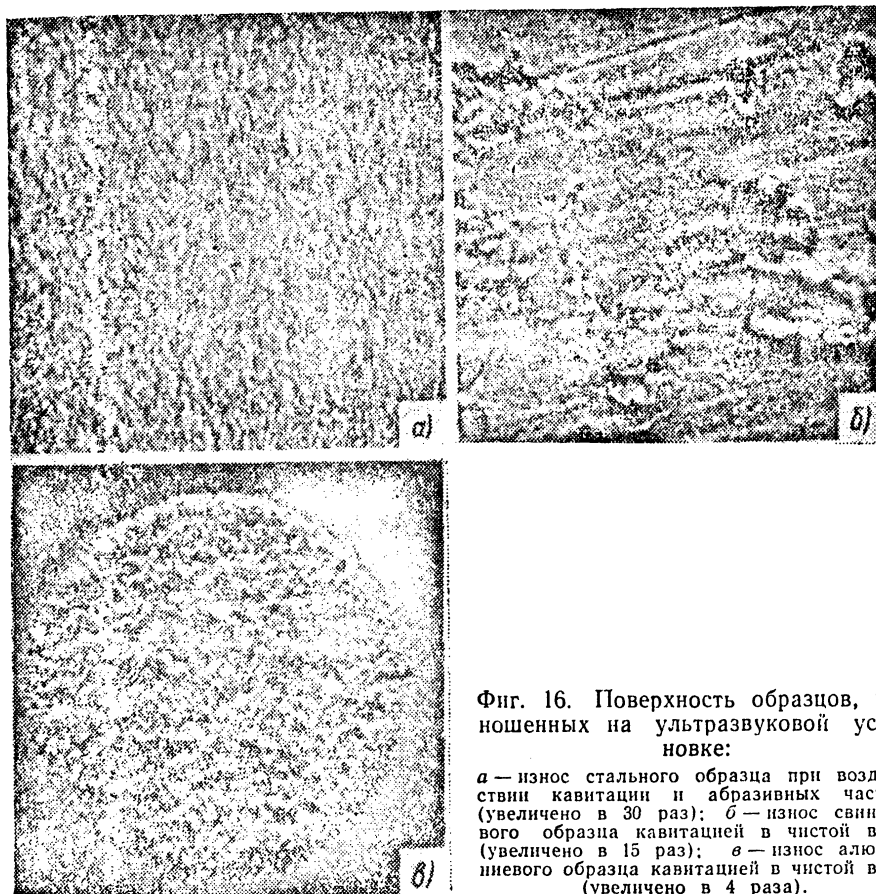
Поверхность образцов, изношенных при совместном воздействии кавитации и абразивных частиц, при насыщенности потока абразивными частицами 4—10%, имеет мелкие вмятины-отпечатки (фиг. 16, а).

В процессе износа, по мере углубления фронта износа в тело образца, вид изношенной поверхности не изменяется. Таким образом, при относительно большом содержании абразива в воде разрушение происходит главным образом за счет ударного воздействия абразивных частиц. Энергию частицы приобретают, как уже упоминалось, за счет действия кавитационных пузырьков и частично за счет колебаний торца концентратора.

Figure 15. Wear as Related to Spacing Δh between Specimen and Horn Tip.

Вид разрушенных поверхностей образцов, полученный при использовании чистой воды, такой же, как и в обычных магнито-стрикционных установках (фиг. 16, б и в).

По мере добавления в воду абразивных частиц, вид изношенных поверхностей изменяется. При малом содержании абразива кавитационный износ опережает абразивный и поверхность имеет характерные следы кавитационного износа (пластические отпе-



Фиг. 16. Поверхность образцов, изношенных на ультразвуковой установке:

а — износ стального образца при воздействии кавитации и абразивных частиц (увеличено в 30 раз); б — износ свинцового образца кавитацией в чистой воде (увеличено в 15 раз); в — износ алюминиевого образца кавитацией в чистой воде (увеличено в 4 раза).

чатки или питтинговые раковины), а при большом содержании абразива, наоборот, на поверхностях видны лишь одни следы абразивного воздействия.

СТРУЕУДАРНАЯ УСТАНОВКА

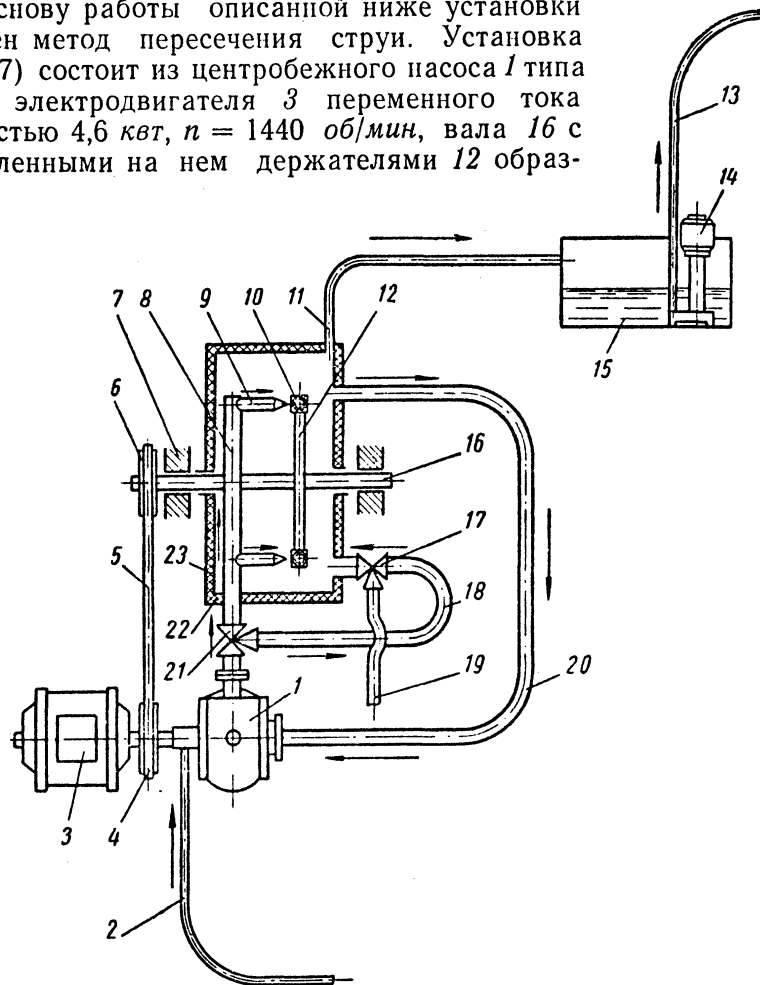
В рассмотренных выше установках (гидродинамической трубе и магнито-стрикционном вибраторе) кавитационная зона создается искусственно и износ образцов происходит за счет действия кавитации. В основу струеударных установок положена

21

- Figure 16. Surface Wear of Specimen Tested by Ultrasonic Facility.
- Wear on steel specimen by cavitation of abrasive particles.
 - Wear of lead specimen by cavitation of clear water (mag. x15).
 - Wear on aluminum specimen by cavitation of clear water (mag. x4).

идея удара некоторого объема воды о поверхность образца, поскольку в конечном итоге кавитационный износ происходит именно вследствие таких ударов.

В основу работы описанной ниже установки положен метод пересечения струи. Установка (фиг. 17) состоит из центробежного насоса 1 типа ЗК9А, электродвигателя 3 переменного тока мощностью 4,6 квт, $n = 1440$ об/мин, вала 16 с закрепленными на нем держателями 12 образ-



Фиг. 17. Схема струеударной установки (вид сверху; поз. 13—15 — вид сбоку):

1 — насос; 2 — подача воды в сальник; 3 — электродвигатель; 4 — ведущий шкив; 5 — клиновые ремни; 6 — ведомый шкив; 7 — подшипники; 8 — струераспределитель; 9 — насадки; 10 — образцы; 11 — сливной трубопровод; 12 — держатели образцов; 13 — труба отвода воды; 14 — насос; 15 — бак; 16 — вал; 17; 21 — трехходовые краны; 18 — перепускной трубопровод; 19 — трубопровод отвода смеси; 20 — всасывающий трубопровод; 22 — кожух-бак; 23 — резиновая облицовка.

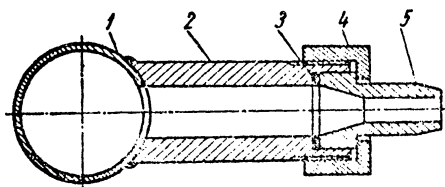
цов, кожуха-бака 22, клиноремненной передачи 4—6, трубопроводов и трехходовых кранов.

Работает установка следующим образом: центробежный насос 1 по всасывающему трубопроводу 20 из нижней части

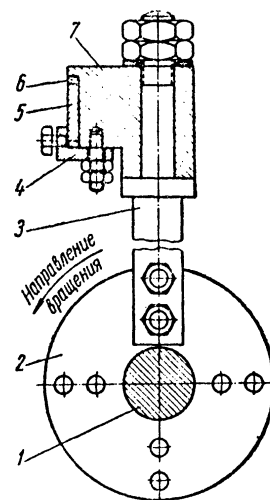
Figure 17. Schematic for Testing Materials by Impacting Jets (top view except 13--15 are side view); 1) pump, 2) feed water for stuffing box, 3) electric motor, 4) driving pulley, 5) belt, 6) driven pulley, 7) bearings, 8) jets distributor, 9) nozzles, 10) specimens, 11) overflow outlet, 12) specimen holder, 13) water outlet pipe, 14) pumps, 15) container, 16) shaft, 17 and 21) 3-way valves, 18) by-pass flow line, 19) inlet tube of water mixture, 20) circulating line, 22) container wall, 23) bubble liner.

бака 22 забирает гидроабразивную смесь (пульпу) и подает в напорную часть насоса. Отсюда часть пульпы через трехходовой кран 21 подается в струераспределитель 8, а часть по трубопроводу 18 перепускается обратно в нижнюю полость бака. При этом, перепускаемая пульпа своим гидродинамическим действием поддерживает абразивные частицы в баке все время во взвешенном состоянии. Кран 21 позволяет регулировать напор пульпы в струераспределителе и количество перепускаемой пульпы.

Далее пульпа из распределителя 8 поступает в сопла 9. В зависимости от необходимости, одновременно могут работать от четырех до одного сопла. Сопла расположены по квадрату распределителя (фиг. 18) и состоят из штуцера 2, насадки 5, накидной гайки 4 и прокладки 3. Насадки изготавливаются из износостойчивой стали. Для изучения зависимости износа от диаметра струи насадки изготовлены разных диаметров: 6, 8, 10 и 12 мм.



Фиг. 18. Устройство сопла струеударной установки:
1 — распределитель; 2 — штуцер; 3 — прокладка; 4 — накидная гайка; 5 — насадка.



Фиг. 19. Держатель образца:
1 — вал; 2 — диск; 3 — держатель; 4 — ограничитель; 5 — образец; 6 — кольцо; 7 — головка.

Гидроабразивные струи непосредственно у выхода из насадки пересекаются образцами 5 (фиг. 19), которые закреплены в специальных головках-держателях 7 ограничителями 4. Во избежание образования на рабочей поверхности образца водяной подушки, верхняя часть его свободна, что обеспечивает беспрепятственный сток гидроабразивной смеси с поверхности образца под воздействием центробежной силы. Головка 7 может быть повернута на штоке на требуемый угол; для фиксации угла внизу головки и штока имеется соответствующая шкала. Расстояние между центрами диаметрально расположенных образцов равно 350 мм; при необходимости это расстояние увеличивается до 500 мм заменой держателей.

Количество одновременно испытываемых образцов может колебаться от двух до четырех, при этом один из образцов является эталоном. Изменение линейной скорости образцов произво-

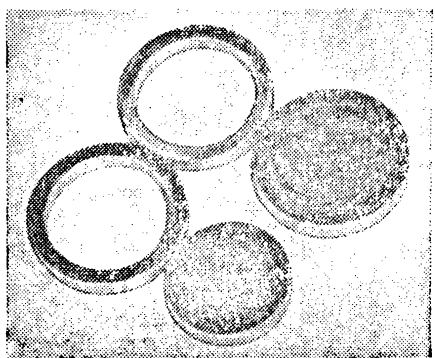
23

Figure 18. Lay out of Nozzle for Impacting Jet Facility; 1) distributor, 2) carbine, 3) gasket, 4) cape nut, 5) mouth piece.

Figure 19. Specimen Holder, 1) shaft, 2) disk, 3) holder, 4) limiter, 5) specimen, 6) ring, 7) head.

дится путем изменения диаметра окружности вращения образцов и числа оборотов приводного вала за счет передаточного числа клиноременной передачи. Вал с образцами приводится во вращение через клиноременную передачу от ведущего шкива, который насажен на муфту, соединяющую валы электродвигателя и насоса, или же — от независимого электродвигателя.

Струя гидроабразивной смеси после удара о поверхность образца разбрызгивается и стекает по стенкам кожуха-бака 22 (фиг. 17) вниз, где перемешивается с неработавшей смесью, и опять частично забирается насосом. Для предохранения абразивных зерен от чрезмерного дробления стенки кожуха облицованы листовой резиной 23, а все трубопроводы выполнены резиновыми.



Фиг. 20. Образцы для испытаний на износ и защитные кольца к ним.

Для предохранения от износа сальника насоса в сальник под напором подается чистая вода, которая таким образом непрерывно добавляется к основной циркулирующей смеси. Для предохранения от переполнения кожуха-бака в нем на высоте 300 мм от дна сделано отверстие, через которое по трубопроводу 11 избыток воды сливается в сборный бак 15 (на фиг. 17 вид сбоку).

Из бака 15 вода насосом 14 сбрасывается в канализацию. Вода, поступающая в систему через сальник насоса, играет также роль охлаждающей среды и поддерживает температуру смеси постоянной. Отработавшая гидроабразивная смесь из кожуха-бака удаляется основным насосом через трубопровод 19 при переключении крана 17.

Кожух-бак 22, в котором вращаются образцы, состоит из двух половин. Нижняя половина одновременно служит и сборным баком. В местах прохождения вала кожух имеет два сальника. Сбоку и сверху кожуха расположены два прозрачных окна диаметром 200 мм, которые служат для наблюдения за образцами и их замены. Кожух также имеет отверстие для залива воды и штуцер для термометра. Вся установка смонтирована на общей сварной раме. Для привода вала с образцами на раму может быть установлен электродвигатель. Длина установки 1400 мм, ширина 1200 мм, высота 1200 мм, масса 200 кг.

Образцы (фиг. 20), используемые в данной установке, представляют собой диски диаметром 20—30 мм и толщиной 6 мм. Во избежание износа боковой поверхности образцов, на них надеваются защитные кольца, изготовленные из того же материала, что и образцы.

Figure 20. Specimens for Wear Test and Their Shielding Head.

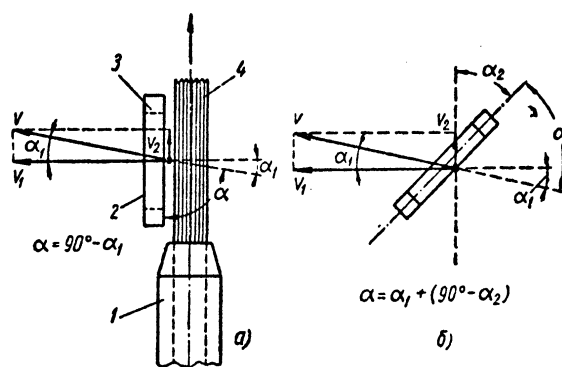
На фиг. 21 показано в плане взаимное расположение образца 2 и струи 4 в момент соударения. Образец своей плоской поверхностью ударяется о струю. При этом вода и абразивные частицы воздействуют на образец с некоторой суммарной скоростью

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2},$$

где v_1 — линейная скорость образца;

v_2 — скорость истечения струи из сопла.

В общем случае v , как видно из фиг. 21, а, всегда направлена под углом атаки α к поверхности, поэтому в дальнейшем необ-



Фиг. 21. Схема соударения струи воды и образца:
1 — сопло (насадка); 2 — образец; 3 — кольцо; 4 — струя воды.

ходимо учитывать и v_2 , несмотря на ее значительно меньшую величину по сравнению с v_1 . Таким образом, угол атаки α является функцией v_1 и v_2 .

Следовательно, при изучении зависимости износа образца от угла атаки, последний может быть подобран путем изменения скоростей.

Кроме того, в конструкции предусмотрена возможность поворота образцов непосредственно вокруг оси на необходимый угол. При этом, как видно из фиг. 21, б, угол атаки

$$\alpha = \alpha_1 + (90^\circ - \alpha_2),$$

где α_1 — угол атаки как $f(v_1, v_2)$;

α_2 — угол поворота образца от вертикальной оси;

v_1 определяется по известной формуле, связывающей число оборотов и линейную скорость. Число оборотов измеряется тахометром.

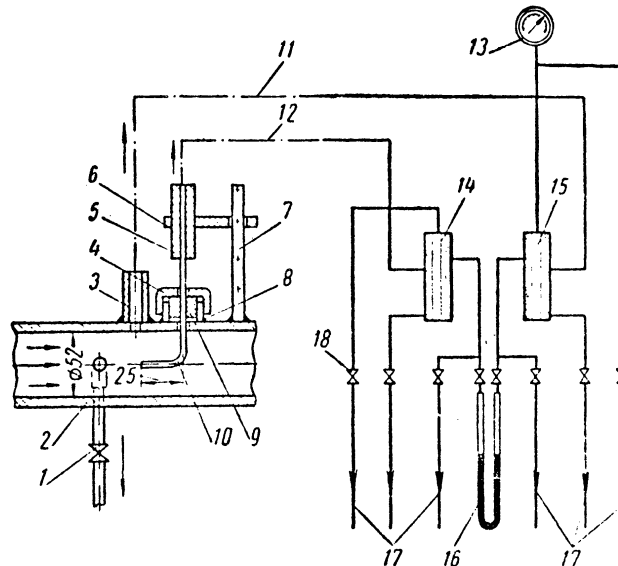
v_2 косвенно измеряется приспособлением с трубкой Пито. Трубка Пито 10 (фиг. 22) устанавливается на горизонтальной части трубопровода 2, подводящего поток к струераспределителю, и фиксирует сумму гидродинамического и скоростного напора. Через штуцер 3, соединенный с трубопроводом, фиксируется

25

Figure 21. Schematic for Impacting Water Jet and Specimen; 1) mouth piece, 2) specimen, 3) shielding head, 4) water jet.

только гидродинамический напор. Разность уровней фиксируется ртутным дифференциальным манометром 16.

Вертикальная часть трубки 10 проходит через сальник, состоящий из корпуса, накидной гайки 4 и резиновой пробки 9. Для регистрации положения трубки в различных точках по диаметру подводящей трубы имеется указатель положения, состоящий из направляющей 7, на которой нанесены риски, и планки 6, соединенной с трубкой. Штуцер 3 и трубка 10 соединены с дифференциальным манометром через отстойники 15 и 14; последние



Фиг. 22. Схема установки трубки Пито:

1 — кран для отбора проб; 2 — трубопровод; 3 — штуцер; 4 — гайка; 5 — держатель трубки; 6 — кронштейн; 7 — направляющая; 8 — корпус сальника; 9 — пробка; 10 — трубка; 11, 12 — трубопроводы подвода смеси; 13 — манометр; 14, 15 — отстойники; 16 — манометр; 17 — трубы продувки отстойников и манометров; 18 — кран для отбора проб.

имеют краны для выпуска воздуха и песка. К отстойнику 15 также подсоединен пружинный манометр с растянутой шкалой.

Трубка Пито, кроме того, позволяет производить забор смеси воды и абразивных частиц из любой точки по диаметру подводящего трубопровода через кран 18 для измерения насыщенности потока твердыми частицами. Это можно также сделать и через боковое отверстие в трубопроводе.

Скорость смеси определяется в трех точках по вертикальному диаметру трубопровода; численная величина определяется по формуле

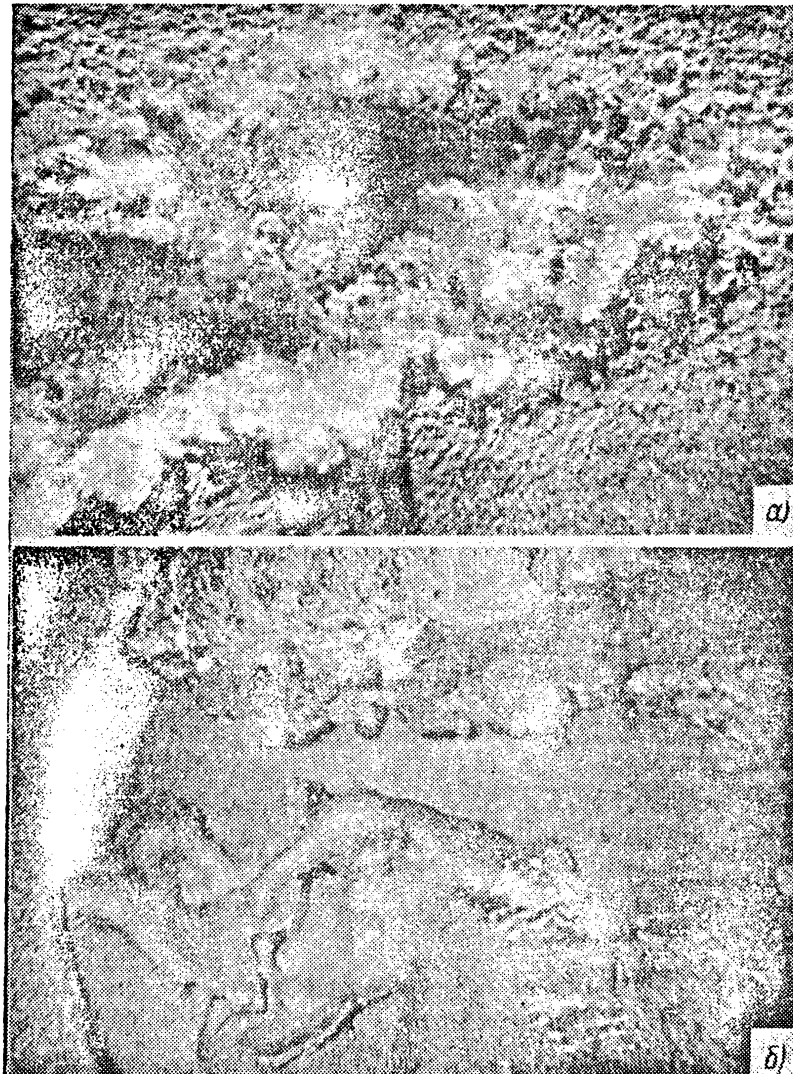
$$v_2 = k \sqrt{2gh},$$

где k — поправочный коэффициент, полученный при тарировке трубки объемным способом и равный 1,04;

26

Figure 22. Schematic for Pitot Tube; 1) sampling valve, 2) supply line, 3) tap, 4) sealing nut, 5) supporting tube, 6) cantilever, 7) slideway, 8) stuffing box, 9) plug, 10) tube, 11, 12) inlet tube of water mixture, 13) pressure gauge, 14, 15) settling tanks, 16) manometer, 17) draining pipes for tanks and manometer, 18) sampling valves.

$$h = \frac{\gamma_p - \gamma}{\gamma} h_p$$
 — скоростной напор, выраженный высотой столба воды. Здесь γ_p — удельный вес ртути; γ — удельный вес воды;
 h_p — разность уровней ртути в дифференциальном манометре.



Фиг. 23. Изношенная поверхность алюминиевых образцов, испытанных на струеударной установке (увеличено в 4 раза):
 а — на чистой воде; б — на воде с абразивными частицами.

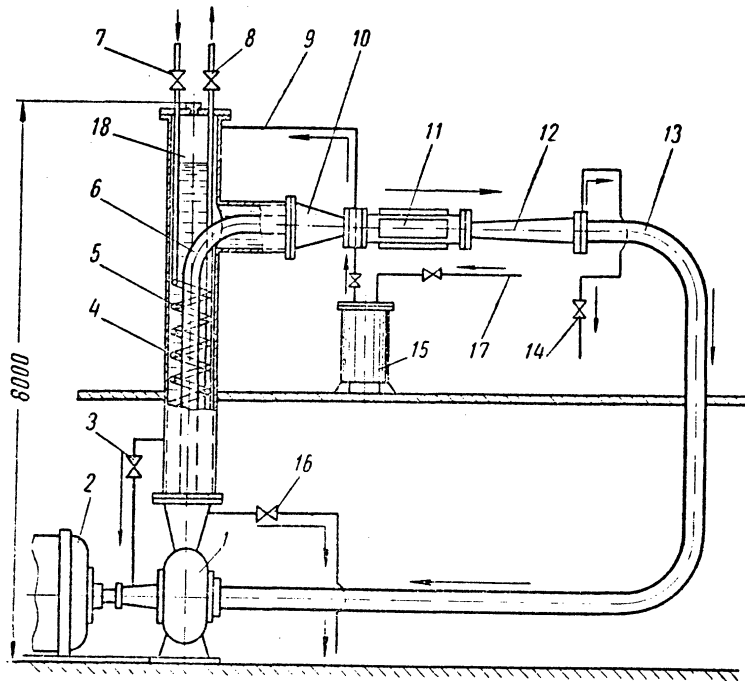
Зная скорость в подводящем трубопроводе и площадь его поперечного сечения, а также площади поперечных сечений сопел, можно подсчитать и скорости истечения струй. Для конт-

27

Figure 23. Damaged Surface of Aluminum Specimen Tested by the Impacting Jet Facility (x 4); a) pure water, b) water with abrasive particle.

ка 5. Установка оборудована системой манометров, которые позволяют контролировать скорость и давление потока.

В связи с тем, что кавитационные явления протекают с очень большими скоростями, при испытаниях была использована сверхскоростная кинокамера ССКС-1 с частотой съемки до 200 тыс. кадров в 1 сек. Кинокамера ССКС-1 разработана и изготовлена в Ленинградском институте точной механики и оптики И. И. Крыжановским. Напомним, что самая большая частота киносъемки,



Фиг. 24. Схема переоборудованной гидродинамической трубы:
 1 — насос; 2 — электродвигатель; 3 — труба промывки сальника; 4 — напорная труба; 5 — холодильник; 6 — нагнетательный трубопровод; 7 — труба подвода воды; 8 — труба отвода воды; 9 — трубопровод сжатого воздуха; 10 — конфузор; 11 — рабочая камера; 12 — диффузор; 13 — всасывающая труба; 14 — труба отбора проб; 15 — ресивер; 16 — труба слива воды; 17 — трубопровод воздуха от компрессора; 18 — уравнительная башня.

примененная для изучения кавитации в потоке воды американским исследователем Кнаппом, была равна только 20 тыс. кадров в 1 сек.

Сверхскоростные кинокамеры в отличие от использовавшихся ранее аппаратов сверхскоростной фотографии дают точное расположение кадров по шагу, что позволяет расшифровывать заснятые явления с достаточной точностью и обеспечивают возможность наблюдения развития процесса в динамике при демонстрации фильма на экране.

Камера ССКС-1 предназначена для киносъемки быстротекающих процессов длительностью от 0,0005 до 0,5 сек и обеспе-

30

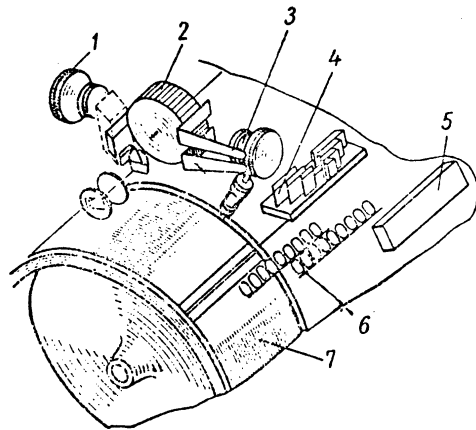
Figure 24. Schematic for a Hydrodynamic Tunnel Facility,
 1) pump, 2) electric drive, 3) pipe for flushing stuffing box, 4) pressure vessel, 5) cooling coil, 6) supply line, 7) cooling water inlet, 8) cooling water outlet, 9) air ventilating pipe, 10) nozzle, 11) test section, 12) diffuser, 13) recirculating line, 14) sampling line, 15) reservoir, 16) draining line, 17) air line from compressor, 18) equalizing tank.

чивает возможность их проекции на экран при помощи стандартных кинопроекторов для 35-миллиметровой пленки.

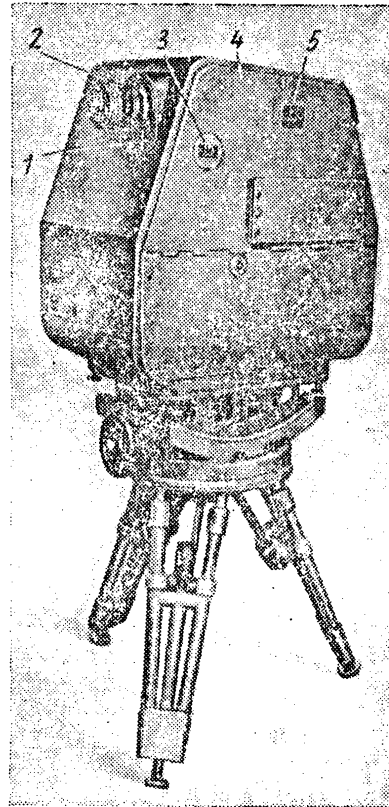
Габаритные размеры камеры: высота 705 мм, длина 740 мм и ширина 440 мм. Вес камеры со штативом 220 кг.

Ввиду уникальности кинокамеры ССКС-1, приведем краткое описание ее устройства. Принципиальная схема кинокамеры приведена на фиг. 25.

Камера имеет объектив 1, который строит изображение в центре многогранной вращающейся призмы 2, помещенной, в свою очередь, в фокусе объектива 3. Параллельный пучок света, выходящий из объектива 3, при помощи блока ромбических призм 4 разделяется на ряд отдельных пучков, несущих изображения. Эти пучки отражаются от зеркала 5 и попадают на объективы



Фиг. 25. Схема кинокамеры ССКС-1: 1, 3 — объективы; 2 — призма; 4 — ромбические призмы; 5 — зеркало; 6 — объективы многорядного блока; 7 — барабан.



Фиг. 26. Общий вид кинокамеры ССКС-1:

1 — рычаг видоискателя; 2 — объектив; 3 — видоискатель; 4 — рукоятка взвода затвора; 5 — замок дверцы.

многорядного блока 6. Каждый объектив блока дает изображение на аэрофотопленке, натянутой на вращающемся барабане 7.

Движение пленки и движение изображений предмета происходит синхронно, подобно двум обкатывающимся фрикционным дискам, на одном из которых пленка, а на втором — изображения, которые как бы печатаются на пленке. Период экспозиции регулируется электромагнитным двухлепестковым затвором.

31

Figure 25. Schematic for the Movie Camera: CCKC-1; 1, 3) objectives, 2) prism, 4) rhombic prisms, 5) mirror, 6) objective block, 7) drum.

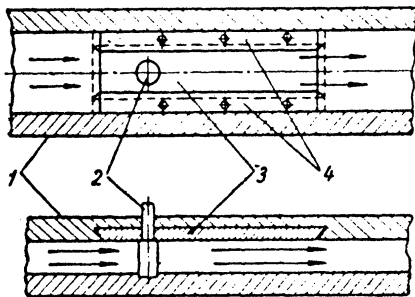
Figure 26. General View of the Movie Camera: CCKC-1; 1) view finder lever, 2) objective, 3) view finder, 4) gate notch grip, 5) door lock.

Общий вид камеры показан на фиг. 26. Камера снабжается синхронизирующим прибором, отметчиком времени, пультом управления и т. д.

Преимуществом данной кинокамеры, кроме высокой частоты съемки, является и то, что площадь получаемых кадров имеет относительно большие размеры. Так, высота кадров, полученных кинокамерой, которой пользовался Кнапп при частоте съемки 20 тыс. кадров в 1 сек, равна только около 2 мм. Высота кадров, полученных кинокамерой ССКС-1 при частоте съемки 60 тыс. кадров в 1 сек, равна 7,6 мм. Всего на пленке шириной 190 мм и длиной 1400 мм при этой частоте съемки размещается более 1300 рабочих кадров.

КАВИТАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИЗНОС ПРИ ОБТЕКАНИИ КРУГЛОГО ПРОФИЛЯ ГИДРОАБРАЗИВНЫМ ПОТОКОМ

Модель круглого профиля, за которым возникает кавитация, представляет собой латунный цилиндр диаметром 6 мм, кото-



Фиг. 27. Схема расположения круглой модели в испытательной камере: 1 — крышки камеры; 2 — цилиндр (модель); 3 — образец; 4 — накладки.

рый помещается в испытательную камеру по схеме фиг. 27. Рабочая камера с четырех сторон закрывается прозрачными крышками 1. Плоский свинцовый образец 3 крепится к одной из крышек защелками. Цилиндр 2 расположен горизонтально. Рабочая камера имеет проходное сечение 6×25 мм.

В опытах использовалась вода (из водопровода), в которую добавлялся чистый кварцевый песок с диаметром частиц 0,05—0,40 мм. Количество

песка в разных опытах составляло от 0,5 до 8% объема потока. Скорость без учета сужения камеры моделью равнялась 17 м/сек. Давление в уравнительной башне составляло 180 кн/м² (1,8 ат).

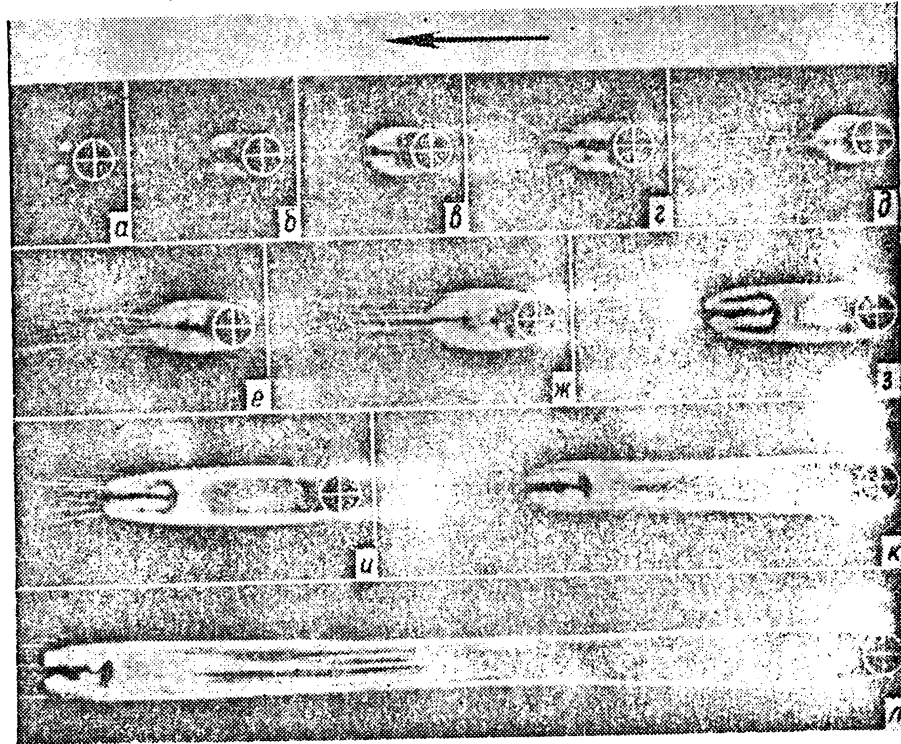
Визуальное наблюдение показало, что в гидроабразивном потоке развиваются все стадии кавитации, которые наблюдаются и в чистой воде при обтекании той же модели. Иначе говоря, в зависимости от величины коэффициента кавитации, происходит изменение структуры зоны кавитации от едва заметного мелькания кавитационных облачков до так называемой отрывной стадии. Так, при давлении в уравнительной башне (верхняя часть трубы 4 фиг. 24) гидродинамической трубы 1,8 ат и скорости гидроабразивного потока около 8 м/сек за цилиндром появляются два маленьких мелькающих кавитационных облачка (фиг. 28, а). Затем, по мере увеличения скорости потока, размеры облачков увеличиваются и они соединяются в одно облако (фиг. 28, ж). Скорость потока при этой стадии кавитации равна

32

Figure 27. Schematic for Arrangements of Cylindrical Model in the Test Section; 1) test section cover, 2) cylindrical model, 3) specimen, 4) holder.

около 17 м/сек. При дальнейшем увеличении скорости потока внутри кавитационной каверны начинает обозначаться просвет (фиг. 28, з), который в последующем увеличивается.

На фиг. 28, к, л показана отрывная стадия кавитации, которая характерна значительной длиной кавитационной зоны и тем, что на большей части зона кавитации свободна от парогазовых пузырьков. «Хвост» кавитации по-прежнему состоит из плотной массы паровоздушных пузырьков.



Фиг. 28. Различные стадии кавитации [4]. Направление потока показано стрелкой.

Все перечисленные стадии кавитации сопровождаются различными звуковыми эффектами (треск, щелчки различной силы, гудение и т. д.), однако сила звуков при кавитации в гидроабразивном потоке несколько слабее звуков при кавитации в чистой воде.

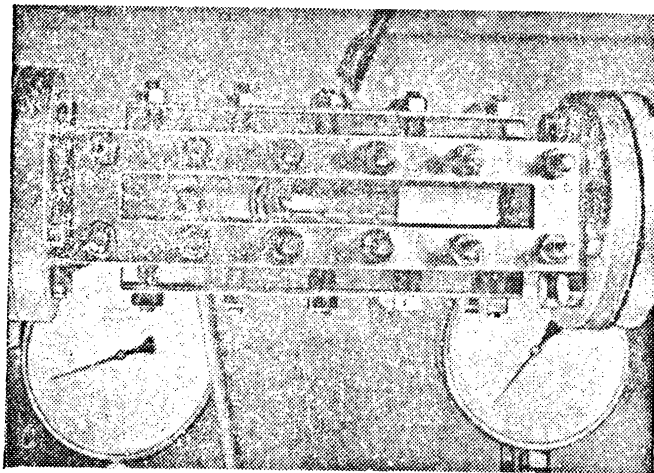
Было замечено, что при скорости 17 м/сек, в случае кавитации в чистой воде, длина кавитационной зоны, равная 18 мм, поддерживалась при гидростатическом давлении в уравнительной башне 140—150 кн/м² (1,4—1,5 ат). Для поддержания этой же длины зоны кавитации в гидроабразивном потоке требовалось давление 170—180 кн/м² (1,7—1,8 ат). Очевидно, возникновение кавитации в гидроабразивном потоке несколько облегчено.

Figure 28. Various Conditions of Cavitation (Direction of Flow according to Arrow).

В дальнейшем изучалась стадия кавитации, при которой в чистой воде наблюдается интенсивное изнашивание. В этом случае величина λ , характеризующая длину кавитационной зоны, бралась равной 3.

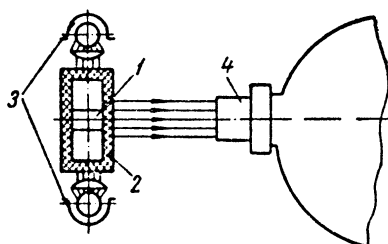
$$\lambda = \frac{l_1}{d},$$

где l_1 — длина зоны кавитации, считая от центра модели;
 d — диаметр модели.



Фиг. 29. Внешний вид испытательной камеры. В центре — белое облачко кавитации.

При визуальном наблюдении основные стадии кавитации представляются в виде сплошного белого облака, которое обте-



Фиг. 30. Схема киносъемки кавитации:

1 — круглый профиль; 2 — камера;
 3 — кинопроекторные фонари;
 4 — кинокамера.

кается абразивными частицами. Фактически же идет периодический процесс образования и срыва кавитации. На фиг. 29 в центре рабочей камеры видна кавитационная зона в виде белого сплошного облака.

Как уже говорилось, применение скоростной киносъемки позволяет проследить отдельные периоды развития кавитации. Киносъемка производилась, в основном, в отраженном свете по схеме фиг. 30. Для освещения зоны кавитации, которая возникала за круглым профилем 1, использовались четыре кинопроекторных фонаря 3, которые устанавливались сверху и снизу камеры 2. Свет от фонарей проходил к кавитационной зоне, отражался от нее и попадал в объектив кинокамеры 4.

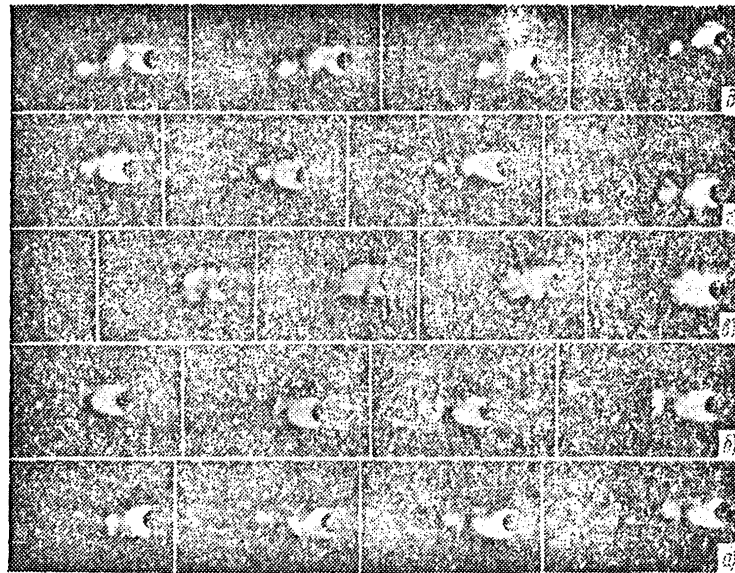
34

Figure 29. Actual View of the Test Section. In Center is Cavitation Cloud.

Figure 30. Schematic of Movie Photograph of Cavitation; 1) cylindrical profile, 2) test compartment, 3) light sources, 4) movie camera.

Киносъемка, в основном, производилась с частотой 60 тыс. кадров в 1 сек. Отдельные съемки были сделаны при частоте 130 тыс. и 200 тыс. кадров в 1 сек. Однако каких-либо особенностей в структуре кавитационных каверн при повышенной частоте съемки, по сравнению со структурой каверн при съемке в 60 тыс. кадров в 1 сек, обнаружено не было.

На фиг. 31 показано последовательное развитие кавитационных каверн, снятых с частотой 60 тыс. кадров в 1 сек. Здесь так же, как и при кавитации в чистой воде, наблюдается циклич-



Фиг. 31. Разновидности кавитационных каверн:
а — начальная разновидность.

ное развитие кавитационных каверн. Каверны растут поочередно справа и слева от модели, отрываются от нее и уничтожаются.

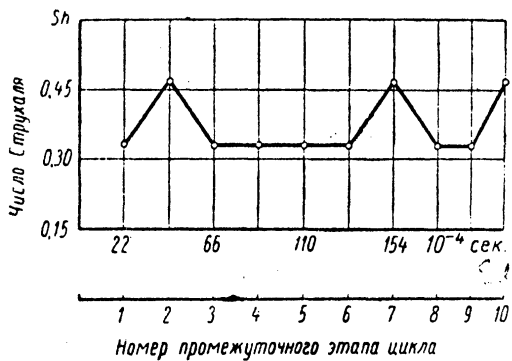
Применение киносъемки сверхвысокой частоты позволило выявить ряд особенностей процесса развития кавитации. Оказалось, что циклы развития и отрыва каверн неодинаковы и не постоянны во времени, т. е. форма каверн и характер их отрыва от поверхности модели повторяются через промежуточные этапы роста и отделения каверн. На фиг. 31 приведены кинокадры некоторых форм кавитационных каверн. Так, между повторяющейся разновидностью *а*, которая принята за начальную, наблюдается, примерно, еще 9 промежуточных разновидностей. Этап *б* характерен тем, что каверны, левая и правая, сливаются в одну, а отделение частей каверны происходит от хвоста стационарной каверны¹. Этап *в* характерен тем, что отрыв каверны происхо-

¹ Каверна, не отделившаяся от профиля.

Figure 31. Variations of Cavitation Clouds; a) initial varieties.

дит непосредственно от профиля, и т. д. Каждый из этапов занимает определенный промежуток времени. Этап *a* снова повторяется через 1350 кадров, т. е. через 0,022 сек.

Применение сверхскоростной киносъемки позволило также установить некоторые новые количественные характеристики процесса развития кавитации. При обработке кинограмм обращалось внимание, прежде всего, на характеристики, которые играют существенную роль в кавитационно-абразивном изнашивании: частоту срыва каверн, частоту их пульсации, скорости сокращения каверн и т. д. Можно ожидать, что если кавитацион-



Фиг. 32. Изменение числа Струхалия во времени.

ный процесс протекает в среде, содержащей абразивные частицы, то кавитационные пульсации, проходящие с большими скоростями, будут передаваться частицам, и последние, таким образом, могут получать дополнительные импульсы и активно влиять на износ.

Как уже отмечалось, процесс роста и срыва каверн с модели

происходит периодически, но, в зависимости от этапа развития, с разной частотой. Например, установлено, что за одно и то же время 0,0022 сек отделяются то две, то три каверны. При этом, если средняя частота срыва за весь период составляет 1040 гц, то в отдельные периоды она колеблется от 800 до 1350 гц. В связи с этим число Струхалия St , подсчитанное для скорости потока без учета сужения рабочей камеры моделью, также колеблется в пределах 0,35—0,47 (фиг. 32).

$$St = \frac{Nd}{v},$$

где N — число каверн, срывающихся с профиля в 1 сек;

d — диаметр профиля (цилиндрика);

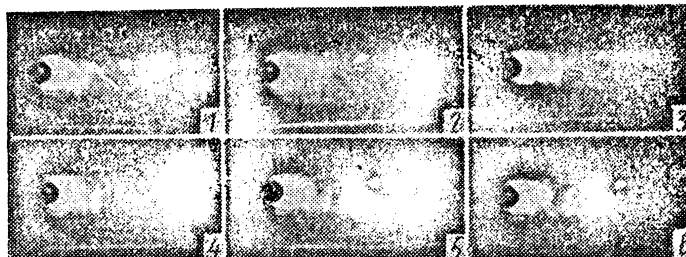
v — скорость потока, без учета сужения камеры профилем.

Обнаруженное колебание числа Струхалия связано с развитием каверн по этапам (фиг. 31). Большому значению числа Струхалия соответствует стадия отрыва коротких каверн непосредственно от модели (фиг. 31, *a*). Когда же идет отрыв каверн большего объема (фиг. 31, *в*), то число Струхалия получает меньшее значение. Это объясняется тем, что чем больший объем имеет каверна, тем большее время необходимо для ее роста и тем меньше, следовательно, каверна срывается с профиля в единицу времени.

36

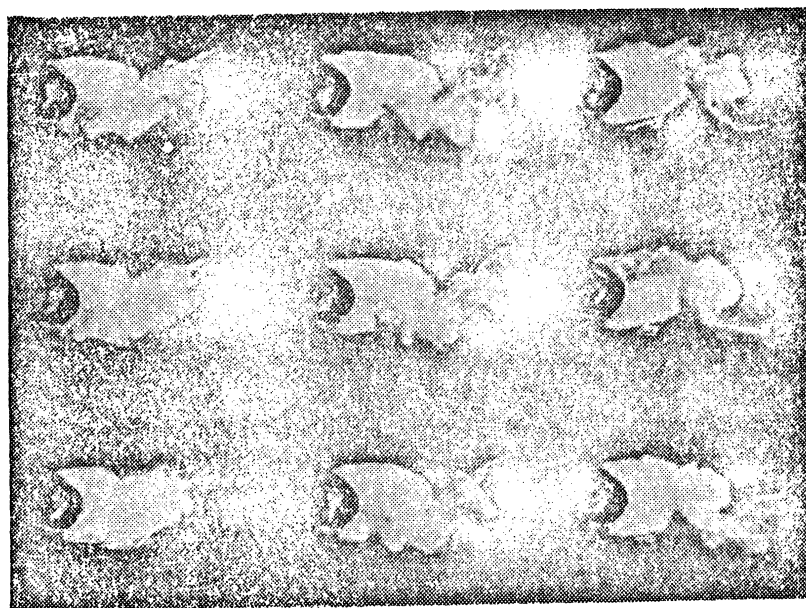
Figure 32. Variation of Strouhal number with Time (number of intermediate cycles).

Другой стороной развития каверны является ее пульсирующее действие. Так, например, если проследить за изменением форм стационарной каверны (т. е. каверны, еще не отделившейся от профиля), то увидим, что она как бы пульсирует, непрерывно и с большой скоростью меняя свою форму.



Фиг. 33 Деление стационарной каверны:
1-6 — последовательность деления.

Рост каверн в продольном направлении, т. е. по направлению течения потока, происходит ступенчато. Например, в течение $1,65 \cdot 10^{-4}$ сек граница хвоста каверны неподвижна, после $0,485 \times 10^{-4}$ сек каверна удлинится на 1,8 мм со скоростью более



Фиг. 34. Образование вмятин на кавернах.

40 м/сек. Затем наблюдается резкое укорочение каверны со скоростью до 80 м/сек. В поперечном направлении (по ширине) каверны происходит подобное же перемещение ее поверхности.

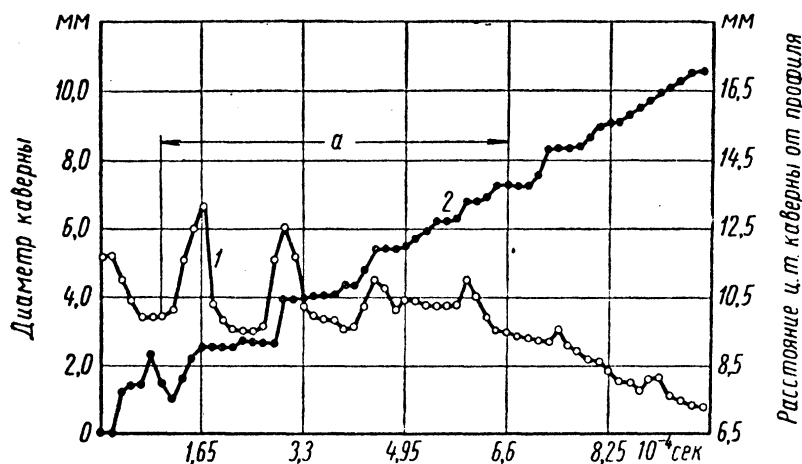
Отмеченные скоростные перемещения поверхности каверны можно условно представить как «удары», которые периодически

37

Figure 33. Various Stationary Cavities; 1-6) successive variations.

Figure 34. Generated Hollow Cavities.

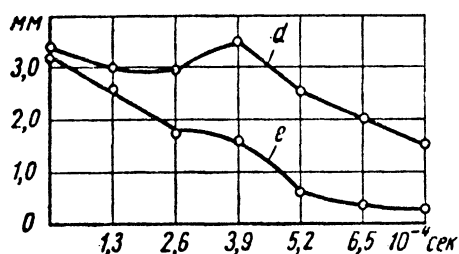
производит поверхность каверны по окружающей ее жидкости. При этом частота «ударов» в продольном направлении, в зависимости от стадии кавитации, равна 7—9 кГц. У некоторых стационарных каверн при определенной длине образуются шейки, по которым в дальнейшем происходит отделение части каверны (фиг. 33). В этот период шейки также пульсируют с частотами 10—20 кГц.



Фиг. 35. Изменение диаметра отделившейся каверны во времени: 1 — изменение диаметра; 2 — удаление центра тяжести каверны от профиля.

Помимо делений каверн наблюдается внезапное образование на них различных вмятин (фиг. 34).

Каверны, отделившиеся непосредственно от профиля или «хвоста» стационарной каверны, имеют самостоятельный цикл развития.



Фиг. 36. Уменьшение устойчивого диаметра d и амплитуды l расширения отделившейся каверны во времени.

В этот период они так же, как и стационарные каверны, пульсируют и видоизменяются во времени. На фиг. 35 показано изменение диаметра одной из отделившихся каверн (кривая 1). Полный цикл жизни отделившейся каверны составляет $16,5 \cdot 10^{-4}$ сек (100 кадров). После отрыва каверны от профиля ее диаметр сразу же сокращается с 5,0 до

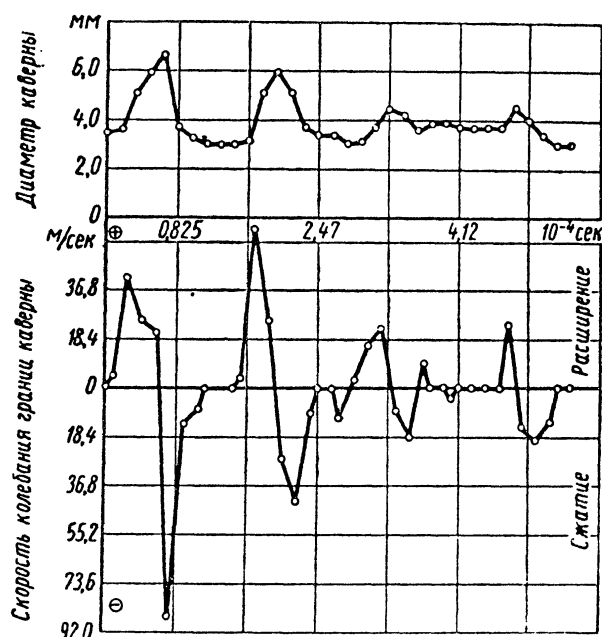
3,5 мм, затем, после некоторой паузы, происходит резкое расширение каверны диаметром до 6,7 мм, т. е. почти в два раза, и повторное сокращение до диаметра 3,0 мм и т. д. При этом обнаруживается, что каверна имеет как бы устойчивый минимальный диаметр, на который периодически накладываются пики мгновенных расширений.

38

Figure 35. Variation of Diameter of Separated Cavities with Time; 1) variation of diameter, 2) displacement of center of gravity of cavity from the profile.

Figure 36. Reduction of Stable Diameter d and Amplitude l of Expanding Separated Cavity with Time.

та стационарной каверны. Периоды времени, когда ц. т. неподвижен, достаточно точно совпадают с периодом спокойного состояния отделившейся каверны и с периодом равномерного роста стационарной каверны. Последнее обстоятельство также указывает на наличие связи между пульсациями хвоста стационарной каверны и каверны отделившейся. Величина скачков ц. т., по мере удаления от хвоста стационарной каверны, уменьшается.



Фиг. 37. Скорость колебания поверхности каверны по данным графического дифференцирования.

Отметим, что скачкообразное перемещение кавитационных пузырьков наблюдается и при ультразвуковой кавитации. Важной характеристикой каверны являются скорости перемещения ее поверхности во время пульсации.

Графическое дифференцирование участка *a* кривой 1 фиг. 35 показывает, что для отделившейся каверны средние скорости перемещения ее поверхности при расширении достигают 50 м/сек, а при сжатии — свыше 80 м/сек (фиг. 37).

Сравнение скоростей перемещения поверхности отделившейся каверны, подсчитанных по формуле Рэлея, не дает совпадений с опытами. Как известно, Рэлей полагал, что сокращение кавитационного пузырька происходит «свободно» под воздействием всестороннего давления жидкости. В этом случае радиальная скорость сокращения пузырька

$$v = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{p}{\rho} \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right)},$$

40

Figure 37. Velocity of Oscillation of the Cavity Surface as Obtained by Differentiation of Graphical Data.

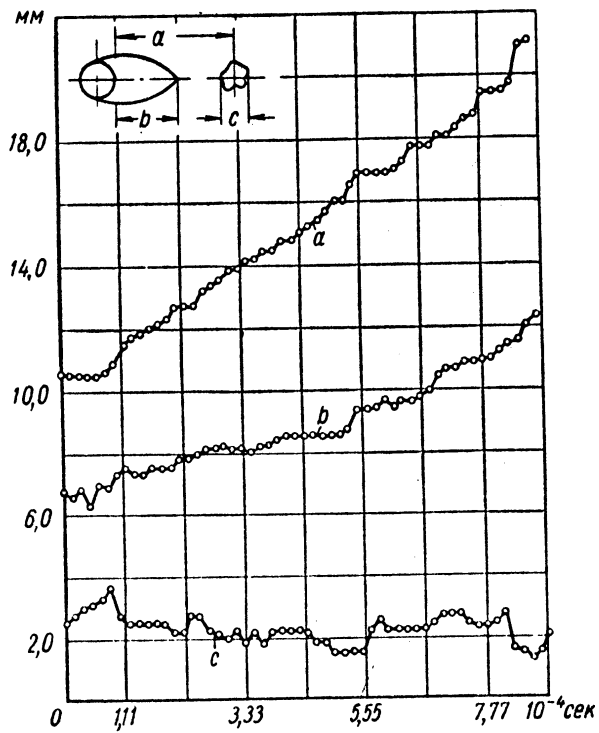


Figure 38. Variation of the Overall Cavity Size with Time.

Фиг. 38. Изменение основных размеров каверн во времени.

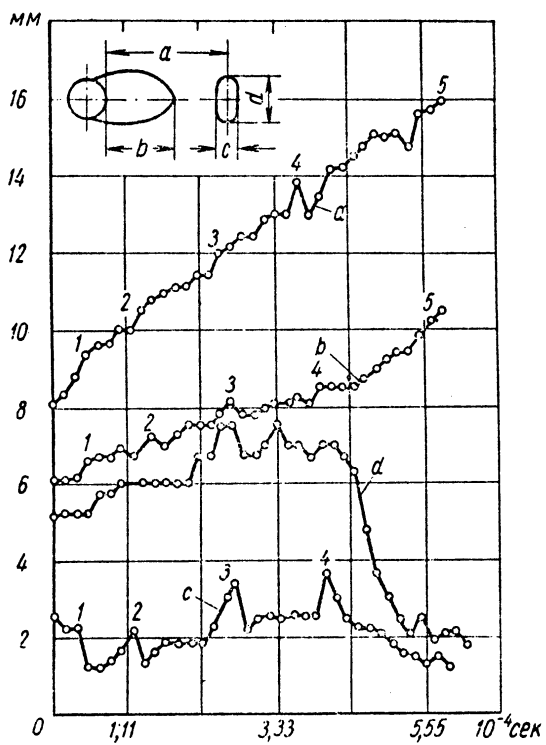
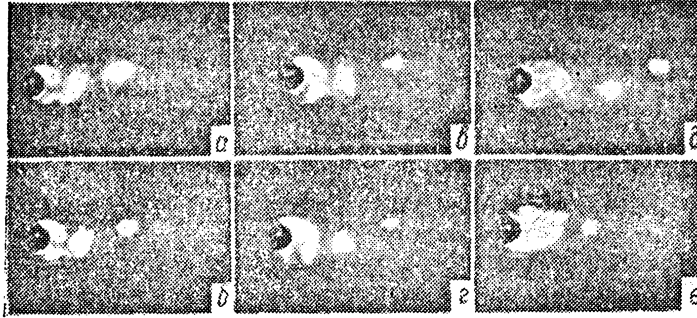


Figure 39. Oscillation of the Cavity Size with Time. The Figures Designate Successive Jumps.

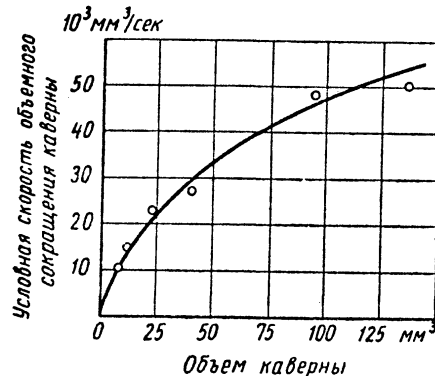
Фиг. 39. Колебание размеров каверн во времени. Цифрами обозначена последовательность скачков.

верн в случае срывной кавитации за круглым профилем вообще не наблюдается. Каверны не «захлопываются», а, периодически пульсируя, постепенно уменьшают свой устойчивый диаметр. При диаметре 0,5—1,5 мм каверна начинает периодически как бы менять цвет с белого на темный, и наоборот, а затем «рассасывается» и исчезает. Позднее, примерно через $0,33 \cdot 10^{-4}$ сек,



Фиг. 40. Изменение формы отделившихся каверн.

она вновь вырисовывается, имея прежние контуры и размеры, но с менее яркой окраской. Затем, только через $0,165 \cdot 10^{-4}$ сек, каверна исчезает окончательно.



Фиг. 41. Условная скорость объемного сокращения каверны в зависимости от ее объема.

Таблица 1

| № опыта | Кавитация | Содержание абразива в воде в % | Время испытания в ч | Потеря массы образца в мг |
|---------|-----------|--------------------------------|---------------------|---------------------------|
| 1 | Есть | — | 12 | 50 |
| 2 | Есть | 0,5 | 12 | 428 |
| 3 | Подавлена | 0,5 | 12 | 135 |
| 4 | Есть | 0,5 | 6 | 810 |
| 5 | Подавлена | 0,5 | 6 | 150 |

Время жизни каверн зависит от их размеров. Теоретически это время τ можно найти по формуле Рэлея [29]

$$\tau = 0,91 R_0 \sqrt{\rho/p},$$

где R_0 — начальный радиус каверны;

ρ — плотность жидкости;

p — гидростатическое давление в жидкости.

Однако по данным скоростной киносъемки фактическое время жизни каверны превосходит теоретическое в 10 раз.

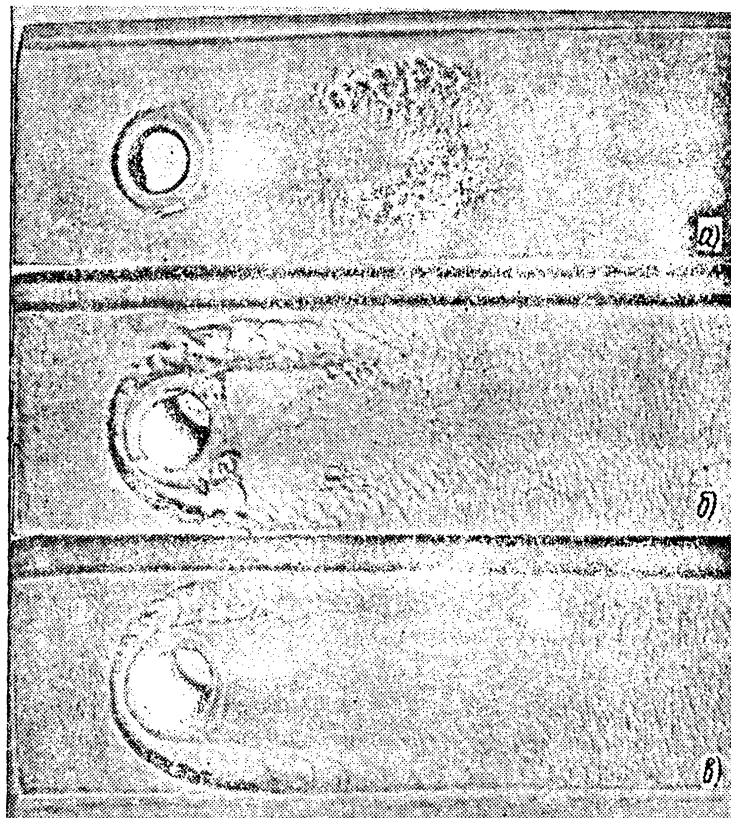
43

Figure 40. Variation of the Shape of a Separating Cavity.

Figure 41. Collapse Rate of Cavity as Related to its Volume.

Каждая каверна определенного размера имеет свою условную скорость объемного сокращения в $\text{мм}^3/\text{сек}$. Эта зависимость выражена графиком на фиг. 41. Здесь можно установить, что чем больше объем кавитационной каверны, тем больше условная скорость ее сокращения.

Для изучения кавитационно-абразивного износа были проведены опыты по износу свинцовых образцов при кавитации в



Фиг. 42. Изношенные образцы (увеличено в 1,5 раза):
a — кавитационный износ в чистой воде; *b* — кавитационный износ в гидроабразивной смеси; *c* — износ при отсутствии кавитации. Направление потока слева направо.

чистой воде и воде, содержащей кварцевый песок. Условия опытов были такими же, как и при киносъемке. Данные опытов приведены в табл. 1. При кавитации в чистой воде средняя потеря веса образцов в опыте № 1 составила 50 мг. Зона, поврежденная кавитацией, имеет вид двух факелов, вытянутых по направлению потока (фиг. 42, *a*). По расположению изношенная зона соответствует месту колебаний границ хвоста стационарных каверн и месту отрыва и интенсивных колебаний отделившихся каверн.

Изношенная поверхность покрыта кратерообразными впади-

44

Figure 42. Variable Specimens (mag. xl. 5); a) cavitation wear with pure water, b) cavitation wear with hydroabrasive mixture, c) wear without cavitation. Flow direction to the right.

нами диаметром от 0,2 до 1,5 мм; дно впадин имеет в поперечном разрезе полусферическую форму. Выдавленный из кратеров металл располагается вокруг них наплывами высотой до 0,6 мм. Наплывы образованы нагромождением отдельных слоев металла и имеют рваные края. Таким образом, вид зоны разрушения металла при кавитации в чистой воде говорит за то, что поверхность образца подвержена механическим ударам.

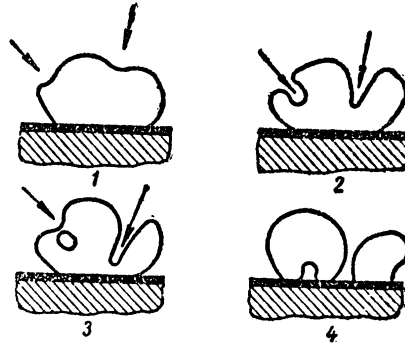
Наиболее распространенной теорией происхождения механических ударов является теория Рэлея [29], основанная на предположении «захлопывания» кавитационного пузырька в слое жидкости. Давление, развиваемое при этом,

$$p = 0,163 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 p_2,$$

где R_0 — первоначальный радиус пузырька;

R — радиус пузырька в рассматриваемый момент времени;

p_2 — гидростатическое давление в окружающей жидкости.



Фиг. 43. Потеря устойчивости кавитационным пузырьком:
1-4 — фазы изменения пузырька.

Как показывает анализ кинограмм, для срывной кавитации за круглым профилем максимальное отношение $R_0/R = 2$. Поэтому, согласно теории Рэлея, для данного типа кавитации развиваемое давление было бы равно только 300 кн/м^2 (3 кг/см^2), что явно недостаточно для разрушающего воздействия. Теория Рэлея в данном случае не применима в виду обнаруженной нами особенности жизни каверн, которые, как описано выше, не «захлопываются», а главным образом пульсируют. Корнфельд и Суворов [28], исходя из обнаруженной ими неустойчивости кавитационных пузырьков, полученных ультразвуковым методом, считают, что происходит как бы местное продавливание поверхности пузырька, в результате чего вода, врываясь в него в виде местной струйки, производит удар по поверхности образца (фиг. 43).

Как было показано выше, каверны срывной кавитации также обладают неустойчивостью. Следовательно, теория разрушающего действия, предложенная Корнфельдом и Суворовым, применима к срывной кавитации. В этом случае давления, достаточные для разрушения материалов, возникают при местной потере устойчивости поверхности каверны или при ее делении. Проникающая в полость каверны в этот момент масса воды производит удар по изнашиваемой поверхности; величина удара может быть приближенно оценена по формуле, приведенной Куком,

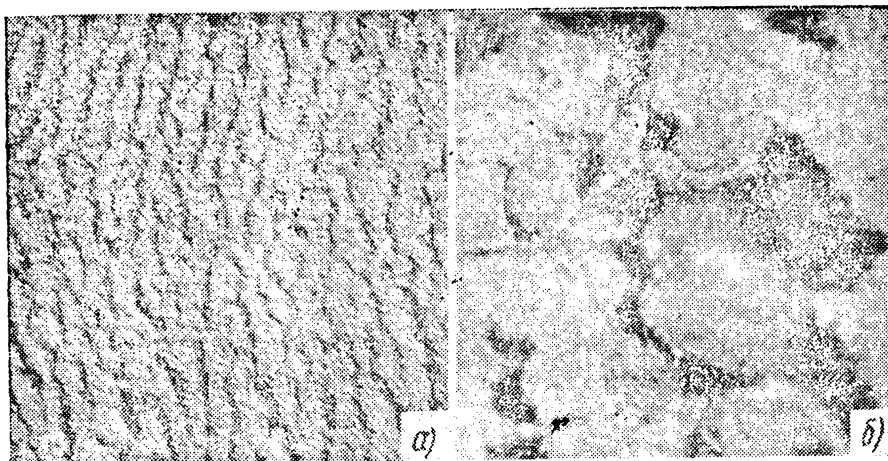
$$P = v \sqrt{\rho \beta},$$

Figure 43. Collapse of a Stable Cavitation Bubble; 1-4) phase changes of bubble.

ной зоной также имеет волнистый абразивный износ (фиг. 44, а).

На фиг. 44 показана зона совместного кавитационно-абразивного износа. Здесь видно нагромождение пластически деформированных слоев металла от кавитационного и абразивного воздействия.

Для того чтобы выяснить роль кавитации в условиях опыта № 2, был поставлен опыт № 3 при подавленной кавитации. Износ образца в этом случае происходил под воздействием только абразивных частиц в условиях срыва бескавитационных вихрей.



Фиг. 44. Отдельные участки изношенных образцов:

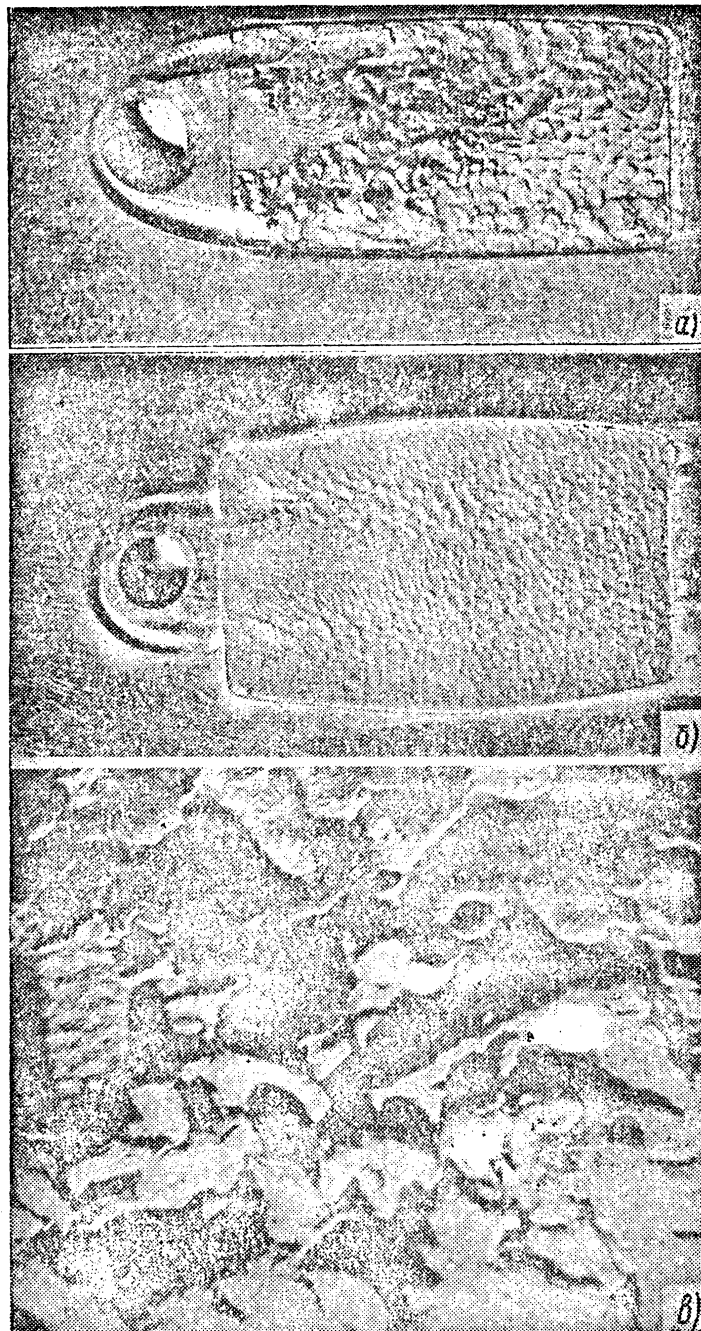
а — волнистый абразивный износ (увеличено в 8 раз); б — совместный кавитационно-абразивный износ (увеличено в 20 раз).

Износ в данном опыте в 3,2 раза меньше кавитационно-абразивного износа в опыте № 2. Это произошло главным образом вследствие дополнительных импульсов, которые получали абразивные частицы при пульсации кавитационных камер в опыте № 2. Участок образца внутри зоны кавитации имеет незначительные повреждения. Последнее можно объяснить искажением кавитационного обтекания цилиндрика вследствие образования перед ним двух канавок, которые благодаря слабому сопротивлению материала (свинца) абразивному износу, возникали на образце прежде, чем проявлялся кавитационный износ. В дальнейшем были приняты предупредительные меры против этого влияния¹ и также ставился опыт № 4 на кавитационно-абразивный износ и опыт № 5 при подавленной кавитации (табл. 1).

Кавитационно-абразивный износ образца в опыте № 4 протекал в 5 раз интенсивнее, чем при отсутствии кавитации. Участок поверхности под зоной кавитации по сравнению с опытами

¹ Участок образца перед профилем, где образовывались канавки, изготовлялся из латуни.

Figure 44. Separate Section of Damaged Specimen; a) wavy abrasive wear (mag. x 8.0), b) joint cavitation abrasive wear (mag. x 2.0).

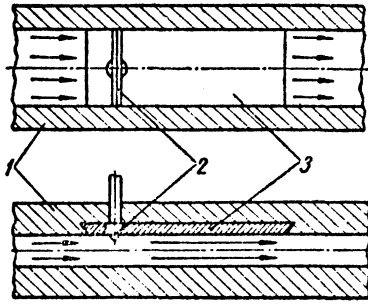


Фиг. 45. Вид изношенных образцов:
а — совместный кавитационно-абразивный износ (увеличено в 1,5 раза);
б — износ при отсутствии кавитации (увеличено в 1,5 раза); *в* — участок совместного кавитационно-абразивного износа (увеличено в 10 раз).

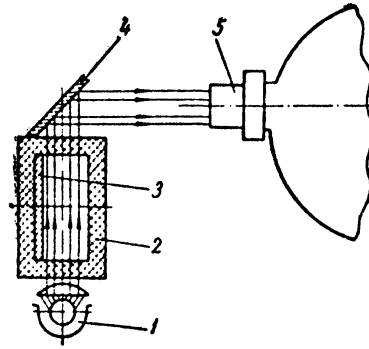
48

Figure 45. View of a Damaged Specimen; a) joint cavitation abrasive wear (mag. x 1.5), b) wear without cavitation (mag. x 1.5), c) joint cavitation abrasive wear (mag. x 10).

опытах составляло от 0,5 до 8% по объему. При этом, как и в случае кавитации в чистой воде при обтекании таких же порожков, в гидроабразивном потоке наблюдаются все стадии кавитационного обтекания, т. е. в зависимости от коэффициента кавитации происходит изменение структуры зоны кавитации от едва заметного мелькания кавитационных облачков, до так называемой отрывной стадии. В целом, при визуальном наблюдении,



Фиг. 46. Схема расположения порожка в испытательной камере: 1 — крышка; 2 — порожек; 3 — образец.



Фиг. 47. Схема кино съемки кавитации за порожком: 1 — фонарь; 2 — камера; 3 — порожек; 4 — зеркало; 5 — объектив.

основные стадии кавитации (более короткие) представляются в виде сплошного белого облака; фактически же идет периодический, очень быстрый процесс образования и срыва каверн.

В связи с этим для изучения кавитации в дальнейшем использовалась сверхскоростная кинокамера ССКС-1. Схема кино съемки, которая производилась в проходящем свете, показана на фиг. 47. Здесь свет от фонарей 1 проходит через кавитационную зону, возникающую за порожком 3, и падает на зеркало 4, затем отражается от него и попадает в объектив кинокамеры 5. Скорость потока в опытах поддерживалась равной 17 м/сек, давление воздуха в уравнительной башне трубы 250 кн/м² (2,5 ат).

На фиг. 48 показаны некоторые этапы развития кавитационных каверн при вышеуказанных условиях опыта. Как показала расшифровка кинограмм, здесь так же, как и при кавитации в чистой воде, наблюдается циклическое развитие кавитационных каверн. Каверны периодически возникают за порожком, отходят от него и затем уничтожаются.

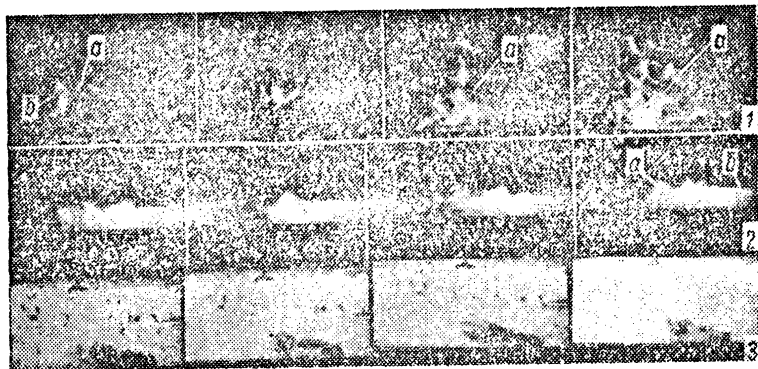
На верхних кадрах 1 фиг. 48 показан последовательный рост кавитационной каверны *a* за порожком высотой 1,0 мм (порожек расположен вертикально, слева от кавитационных облачков). На кадрах 2 показан боковой вид кавитационных каверн, снятых в отраженном свете. Порожек *b* в виде темного выступа расположен справа.

50

Figure 46. Schematic of the Arrangement of a Wedge in a Testing Compartment; 1) wall (cover), 2) wedge, 3) specimen.

Figure 47. Schematic for Movie Photograph of Wedge Cavitation; a) light source, b) test compartment, c) wedge, d) mirror, e) objective.

На кадрах 3 также показан боковой вид, но киносъемка каверн произведена в проходящем свете. Направление потока показано стрелкой. Кавитационные облачка первоначально зарождаются на некотором отдалении от вершины порожка, посередине канала, в месте наибольших скоростей, и представляют собой точки диаметром 0,2—0,3 мм. Затем они распространяются вдоль оси порожка.



Фиг. 48. Кинокадры кавитации за порожком: 1 — вид сверху; 2, 3 — вид сбоку; а — каверны; б — порожек. Стрелками показано направление потока.

Указанный характер зарождения и роста каверн объясняется тем, что последние зарождаются на осях вихрей, срывающихся с порожка, где происходит наибольшее падение давления.

Давление p_c на оси вихря может быть определено [31], как

$$p_c = p_\infty - \frac{\rho \Gamma_0^2}{4\pi^2 r_i^2},$$

где p_∞ — гидростатическое давление в потоке;

ρ — плотность жидкости;

r_i — радиус вихря;

Γ_0 — циркуляция, которая для замкнутой кривой [9] определяется из выражения

$$\Gamma_0 = \oint v \cos \alpha ds,$$

здесь v — скорость потока;

α — угол между направлением скорости v и касательной к кривой;

ds — элемент замкнутой кривой.

В дальнейшем каверна увеличивается в диаметре и из круглой делается эллипсовидной, вытянутой по направлению потока. При соответствующем коэффициенте кавитации каверна простирается до вершины порожка и становится стационарной.

Таким образом, в зависимости от коэффициента кавитации, размеры каверны в поперечном сечении изменяются в пределах от 1 до 20 мм. Чем меньше размер каверны, тем меньше развита кавитация. При кавитации за порожком, помимо отрыва ка-

4*

51

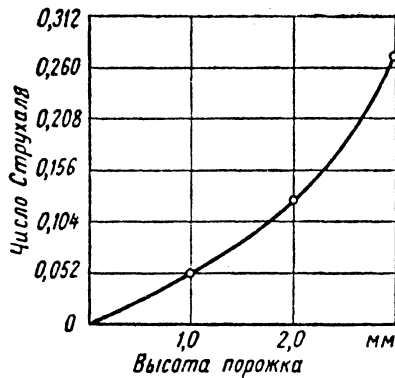
Figure 48. Movie Photographs of Cavitation by Wedge; 1) top view, 2, 3) side view; a) cavity, b) wedge; arrow designates direction of flow.

верны от порожка, наблюдается отделение частей от хвоста стационарной каверны.

Срыв или отход каверн от порожка ведет к тому, что место каверны занимает вода, которая устремляется в освобожденное пространство с большой скоростью. Это создает местные удары и увеличивает турбулентность потока. В зависимости от стадии кавитации и высоты неровности, частота срыва каверн колеблется от нескольких десятков до

десятков тысяч *гц*.

При одной и той же стадии кавитации и скорости потока количество срывающихся каверн в единицу времени растет с увеличением высоты порожка в следующей зависимости:



Фиг. 49. Изменение числа Струхалия в зависимости от высоты порожка.

| | | | |
|---|-----|------|------|
| Высота порожка в мм . | 1,0 | 2,0 | 3,0 |
| Количество срывающихся каверн в секунду . | 890 | 1070 | 1500 |

В связи с этим также изменяется и число Струхалия (фиг. 49)

$$St = \frac{Nh}{v},$$

где N — число срывающихся каверн в секунду;

h — высота порожка;

v — скорость потока.

В случае кавитации за порожками, как и при обтекании цилиндра, у всех наблюдаемых каверн (стационарных и отделившихся) обнаружена пульсация, т. е. периодическое быстрое изменение форм, размеров и т. д. В эти моменты происходит периодическое перемещение поверхности (условной оболочки) каверны на различных расстояниях. Перемещения условной оболочки происходят в миллионные доли секунды и протекают со скоростями, измеряемыми десятками метров в секунду. Поэтому пульсация каверн (их частота и скорость) также играет определенную роль при кавитационной эрозии.

На фиг. 50 показано изменение длины a стационарной каверны, удаление b условного центра тяжести свободной каверны от порожка и изменение ее высоты d и ширины c каверны во времени. Скорость потока была 17 м/сек, стадия кавитации соответствовала длине стационарной каверны около 5,0 мм. Высота порожка 2,0 мм. Насыщенность воды песком составляла 0,5% объема потока.

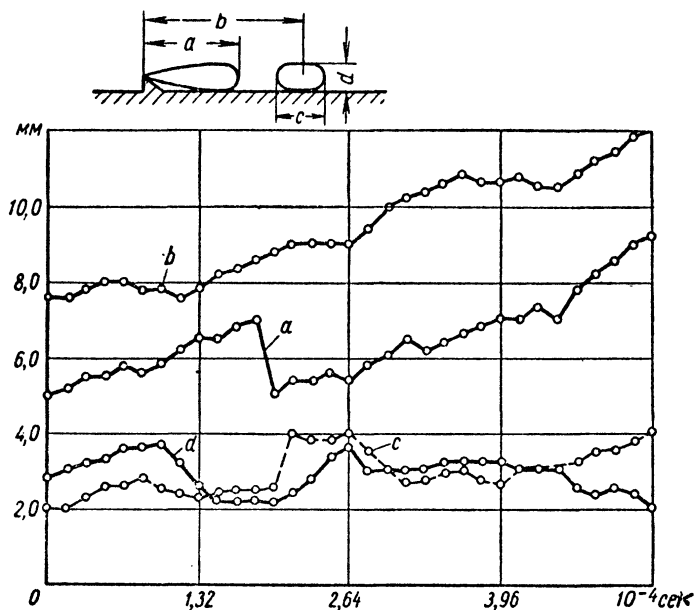
52

Figure 49. Variation of Strouhal Number in Relation to the Height of Wedge; Ordinate is Strouhal Number and Abscissa is Height of Wedge.

Частота перемещения, например границы хвоста стационарных каверн в продольном направлении, а также частота изменения размеров отделившихся каверн в большинстве случаев при вышеуказанных условиях составляет около 9 кгц. Перемещение поверхностей каверн происходит в среднем со скоростью 30 м/сек, а на отдельных участках достигает 45 м/сек.

На фиг. 51 показано колебание диаметра отделившихся каверн при скорости потока 14 и 17 м/сек.

В первом случае (1) была рассмотрена только что отделившаяся каверна, а во втором (2) — каверна, которая уже значительно удалась от хвоста стационарной каверны. Частота

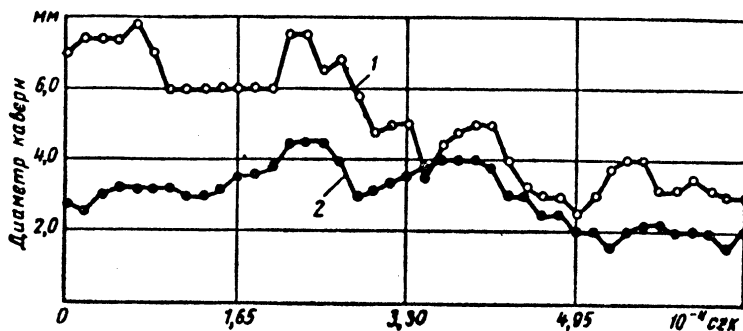


Фиг. 50. Изменение основных размеров каверны во времени.

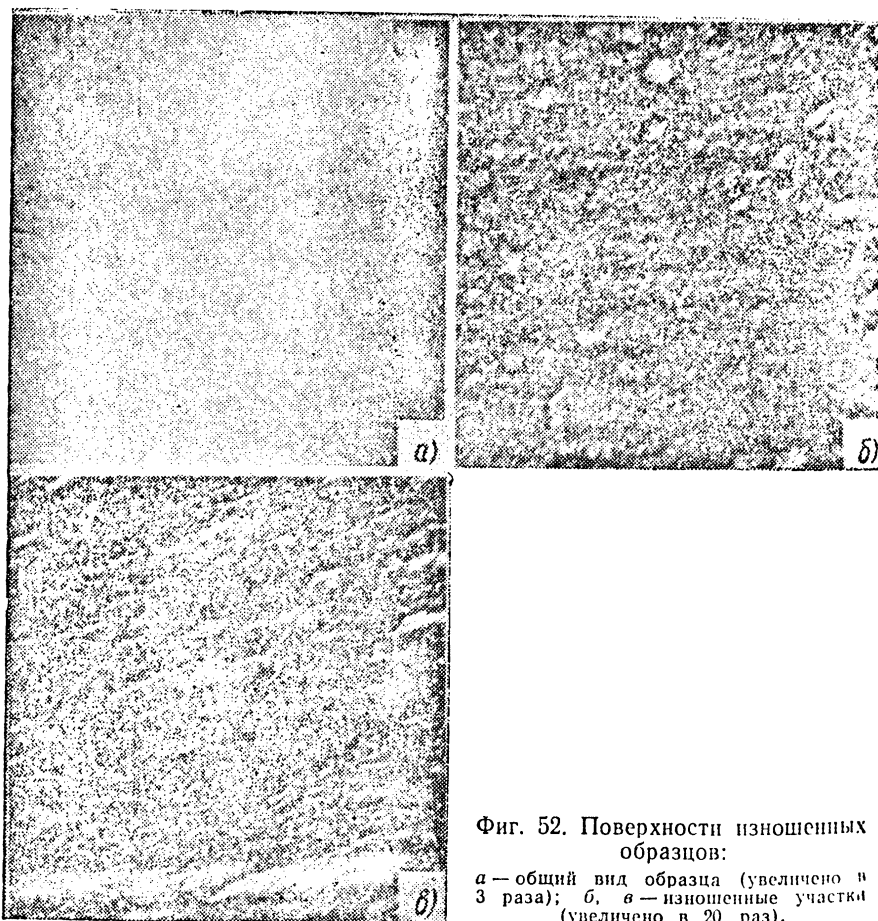
пульсаций этих каверн примерно одинакова и равна 9 кгц, но максимальная скорость пульсаций для первой каверны превосходит 40 м/сек, а для второй равна только 30 м/сек.

Таким образом, хотя в последнем случае скорость потока увеличена, кавитационная каверна имеет меньшую скорость пульсаций. Из этого и других рассмотренных примеров можно установить, что чем больший размер имеет отделившаяся каверна, и чем ближе она расположена к стационарной каверне, тем выше скорость ее пульсаций.

Анализ кинограмм, снятых при частоте $6 \cdot 10^4$ кадров в сек, показал, что полного «захлопывания» кавитационных каверн при кавитации порожков не наблюдается. Каверны лишь пульсируют, постепенно уменьшаясь в диаметре и снижая амплитуду пульсаций. Достигнув диаметра 0,5—2,0 мм, каверны как бы



Фиг. 51. Изменение диаметра отделившихся каверн во времени:
 1 — при скорости потока 14 м/сек; 2 — при скорости потока 17 м/сек.



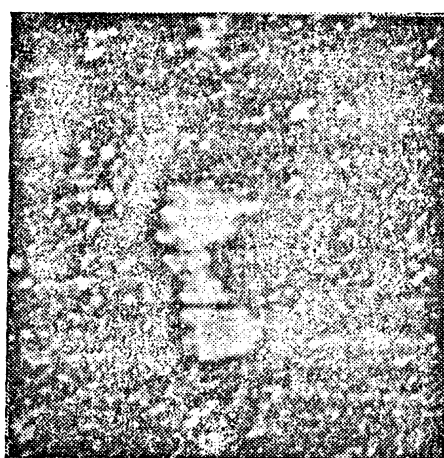
Фиг. 52. Поверхности изношенных образцов:
 а — общий вид образца (увеличено в 3 раза); б, в — изношенные участки (увеличено в 20 раз).

Figure 51. Variation of the Diameter of a Separating Cavity with Time; 1) flow velocity, 14 m/sec, 2) flow velocity, 17 m/sec.

Figure 52. Surfaces of Damaged Specimens; a) general view of specimen (mag. x 3), b, c) damaged sections (mag. x 2).

Все рассмотренное выше говорит за то, что частицы, ударяющиеся о поверхности образца, имеют большие скорости, которые, очевидно, значительно выше скорости потока. Это положение, а также и то, что частицы внедряются н о р м а л ь н о к поверхности, говорит о получении частицами дополнительных импульсов, направленных перпендикулярно к поверхности. Источником таких импульсов являются пульсирующие каверны.

В зоне наибольших пульсаций частицы под воздействием кавитационных импульсов резко меняют первоначальное на-



Фиг. 53. След срезания абразивной частицей (увеличено в 70 раз).

правление и с силой ударяются перпендикулярно о поверхность. На этом участке поверхности видны главным образом вмятины. В зоне, удаленной от основной области кавитации, где кавитационные импульсы значительно ослаблены, частицы только искривляют свои траектории и подходят к поверхности образца под различными углами. На этом участке видны большей частью следы резания (фиг. 52, в).

Для оценки интенсивности совместного кавитационно-абразивного износа ставились опыты № 1 и 2 (табл. 2) по износу латунных образцов.

Опыт № 1 протекал в условиях совместного воздействия кавитации и абразивных частиц. Потеря массы образца за 6 ч составила 190 мг.

Таблица 2

| № опыта | Кавитация | Скорость потока в м/сек | Содержание абразива в воде в % | Длина зоны кавитации в мм | Потеря массы образца в мг |
|---------|-----------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | Есть | 17 | 0,5 | 6—8 | 190 |
| 2 | Подавлена | 17 | 0,5 | — | 65 |

В опыте № 2, путем создания давления в уравнительной башне трубы до 600 кн/м^2 (6 ат), кавитация была подавлена и износ протекал под воздействием только абразивных частиц в условиях срыва бескавитационных вихрей. Износ за 6 ч составил 65 мг. Таким образом, наличие кавитации в данных опытах увеличивает интенсивность абразивного износа образца примерно в три раза, по сравнению с износом без кавитации.

56

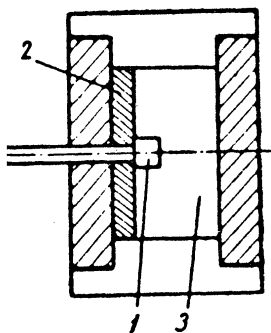
Figure 53. Microscopic Trace of Specimen Part (70 x mag.)

На поверхности образца видно, что увеличение износа при этом происходит как в зоне кавитации, так и вне ее. Увеличение износа непосредственно в зоне кавитации произошло, по-видимому, прежде всего за счет вхождения абразивных частиц в местные струи, которые возникают при делении или потере устойчивости каверн, а также за счет получения частицами дополнительных импульсов при пульсации каверн.

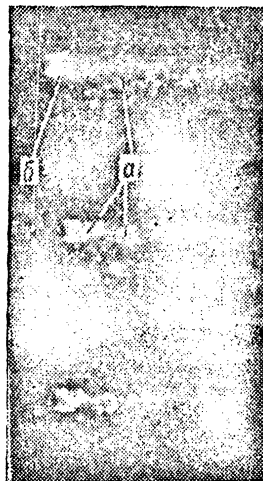
Увеличение износа вне зоны кавитации происходит только за счет пульсаций каверн, распространяющихся на окружающее пространство.

КАВИТАЦИЯ И КАВИТАЦИОННО-АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ПРИ ОБТЕКАНИИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВЫСТУПА

В данном опыте изучалась кавитация, возникающая за выступом, который имитировал часто встречающиеся неровности в виде выступающих болтов, или, например, отдельных электронаплавочных бугорков. Кавитационная зона создавалась за выступом 1 (фиг. 54), который имел высоту 1 мм и ширину 2 мм. Выступ 1 вместе с образцом 2 мон-



Фиг. 54. Схема расположения выступа в испытательной коробке:
1 — выступ; 2 — испытуемый образец; 3 — рабочая камера.



Фиг. 55. Кинокадры кавитации за выступом:
а — каверна; б — выступ.

тировался в рабочей камере 3 гидродинамической трубы. Остальные условия опыта соответствовали условиям изучения кавитации за порошками.

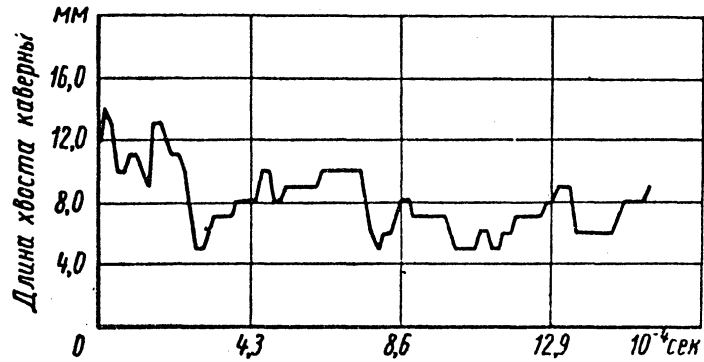
На фиг. 55 показаны кинокадры некоторых этапов развития кавитационных каверн. Направление потока — слева направо. Выступ б расположен слева от кавитационных каверн а. Как показала расшифровка кинограмм, здесь так же, как при кавитации в чистой воде, наблюдается циклическое развитие кавита-

57

Figure 54. Schematic for Arrangements of a Projection in Testing Compartment; 1) projection, 2) tested specimen, 3) compartment.

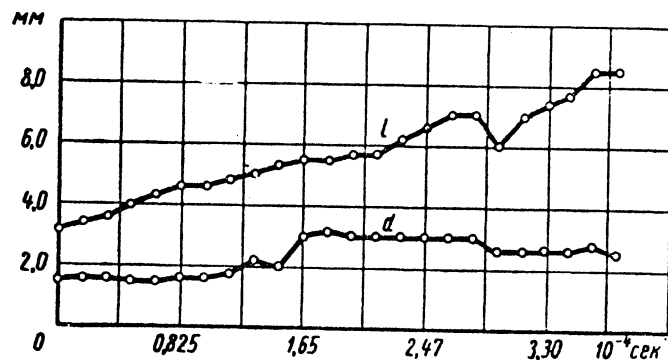
Figure 55. Movie Photographs of Cavitation with Projection; a) cavity, b) projection.

ционных каверн. Каверны периодически возникают за выступом, отходят от него и затем уничтожаются. Кавитационные облачка вначале зарождаются на некотором удалении от выступа, в центре срывающихся вихрей. Затем каверны вырастают в объеме



Фиг. 56. Изменение длины стационарной каверны при кавитации за выступом.

и примыкают к выступу; в этом случае каверна становится стационарной. По мере дальнейшего удлинения каверны по направлению потока, от ее конца начинают отделяться части. При менее развитых стадиях каверны имеют небольшие размеры и отходят от выступа, не примыкая к нему. Иногда уже отделив-



Фиг. 57. Изменение диаметра d кавитационной каверны и удаление l ее ц. т. от выступа.

шиеся каверны вновь соединяются с основной каверной. На кавернах наблюдается образование различных вмятин, неровностей и т. д.

Как уже отмечалось, при кавитационно-абразивном износе играют роль такие характеристики кавитации, как частота срыва каверн, частота их пульсации и скорости сокращения каверн. В зависимости от стадии кавитации, скорости потока и

58

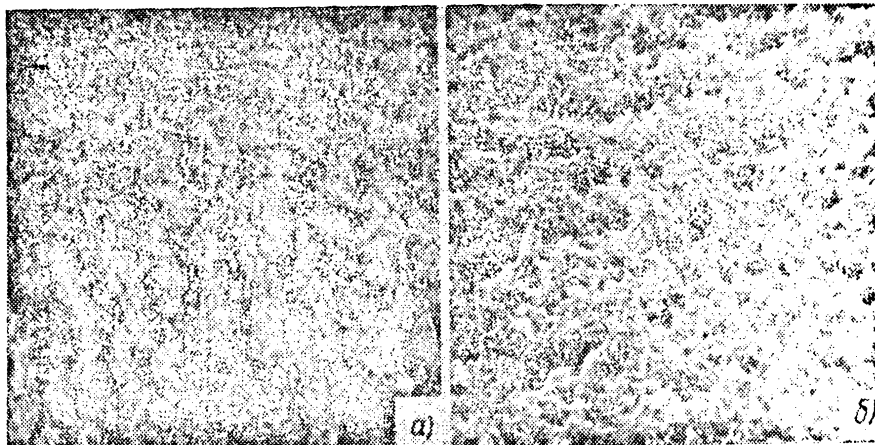
Figure 56. Variation of the Length of the Cavity Boundary by Projection Cavitation.

Figure 57. Variation of Diameter d of Cavity and its Displacement l from the Projection.

Таблица 3

| № опыта | Кавитация | Скорость потока в м/сек | Содержание абразива в воде в % | Длина зоны кавитации в мм | Потеря массы образца в мг |
|---------|-----------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | Есть | 17 | 0,5 | 6—8 | 104 |
| 2 | Подавлена | 17 | 0,5 | — | 38 |

В опыте № 2 путем создания гидростатического давления в трубе до 600 кн/м^2 (6 ат) кавитация была подавлена, и износ поверхности протекал под воздействием только абразивных частиц в условиях срыва бескавитационных вихрей. Износ этого



Фиг. 58. Поверхности образца, изношенного при кавитации в гидроабразивном потоке:
а — участок в зоне кавитации (увеличено в 10 раз); б — участок вне зоны кавитации (увеличено в 30 раз).

образца за 2 ч составил 38 мг. Таким образом, наличие кавитации в данных опытах увеличивает интенсивность гидроабразивного износа образца примерно в три раза.

На фиг. 58, а показаны поверхности образца, изношенного при наличии кавитации. Здесь можно выделить характерный волнистый участок, который расположен в зоне кавитации, а прилегающие поля образца как бы испещрены отдельными вмятинами. На фиг. 58, б с увеличением в 30 раз показан один из боковых участков с подобными вмятинами. Более отдаленные участки зоны кавитации повреждений почти не имеют.

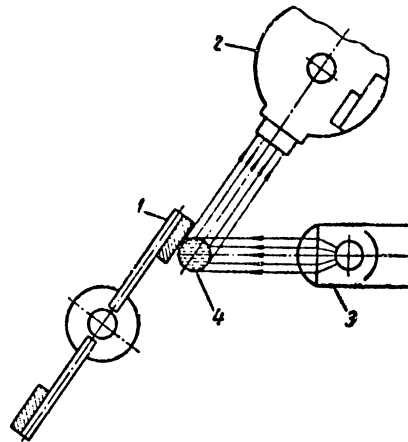
На поверхности образца, который изнашивался гидроабразивным потоком, но при отсутствии кавитации, также имеются участки волнистого износа и участок с отдельными вмятинами.

60

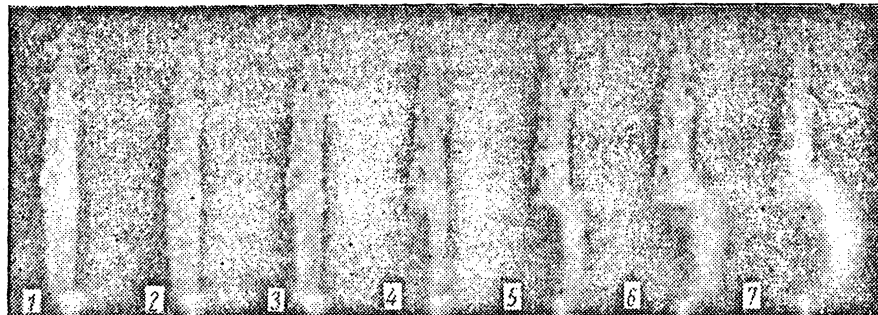
Figure 58. Specimen Surface, Damaged by Cavitation in Hydro-Abrasive Flow; a) section in cavitation zone (mag. x 10), b) section outside cavitation zone (mag. x 30).

из квадратной насадки сечением 7×7 мм под напором 30 кн/м^2 (3 м вод. ст.). На кадрах 1 и 2 видно, как образец сближается со струей. На кадрах 3 и 4 происходит деформация струи, образец как бы входит в струю. На кадрах 5, 6 и 7 происходит расширение (распыление) струи. Схематически момент деформации струи (вид сбоку) показан на фиг. 61.

Таким образом, процесс соударения состоит из двух этапов. На первом этапе происходит деформация поперечного сечения струи: она из квадратной делается прямоугольной (фиг. 61). На кинокадрах 3 и 4 (фиг. 60) видно, как изменяется высота струи. Противоположная сторона струи еще не деформируется и не разбрызгивается. На втором этапе происходит как бы расширение деформированной части струи и ее распад на мелкие капли, которые отлетают от поверхности образца. На кинокадрах 5, 6, 7 этот процесс наблюдается в виде все время увеличивающегося облака, которое движется вперед образца.



Фиг. 59. Схема кино съемки процесса соударения струи и образца:
1 — образец; 2 — кинокамера; 3 — фонарь;
4 — струя.



Фиг. 60. Последовательные кинокадры удара образца о струю воды.

Подобная картина наблюдалась при всех скоростях соударения, принятых при исследовании.

При этом оказалось, что деформация Δa струи тем больше, чем меньше скорость соударения (табл. 4).

$$\Delta a = a - a_1,$$

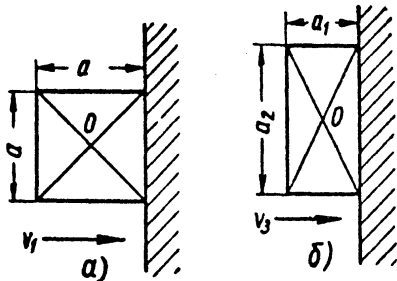
где a — толщина струи до удара;

a_1 — толщина струи после деформации.

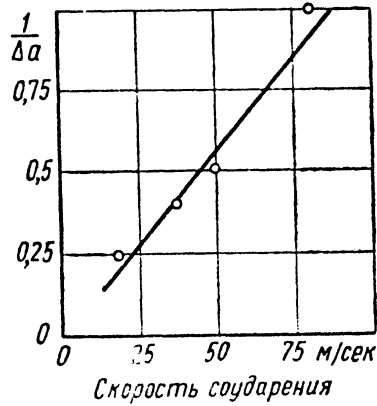
Figure 59. Schematic of Movie Photography for the Process of Impacting Jets and Specimen; 1) specimen, 2) movie camera, 3) light source, 4) jet.

Figure 60. Successive Movie Photographs of Specimen Struck by Water Jets.

Зависимость между величинами $\frac{1}{\Delta a}$ и скоростью соударения выражается прямой (фиг. 62). Из установленной зависимости можно констатировать, что чем больше Δa , тем больше время контакта струи и образца на первом этапе удара, или чем больше



Фиг. 61. Схема деформации поперечных размеров струи в момент удара: а — первый этап; б — второй этап.



Фиг. 62. Зависимость величины деформации струи от скорости удара.

Таблица 4

| Скорость соударения в м/сек | Величина в мм | | | |
|-----------------------------|---------------|-------|------------|----------------------|
| | a | a_1 | Δa | $\frac{1}{\Delta a}$ |
| 80 | 8,6 | 7,6 | 1,0 | 1,0 |
| 50 | 8,4 | 6,4 | 2,0 | 0,5 |
| 36 | 8,4 | 5,9 | 2,5 | 0,4 |
| 18 | 8,4 | 4,4 | 4,0 | 0,25 |

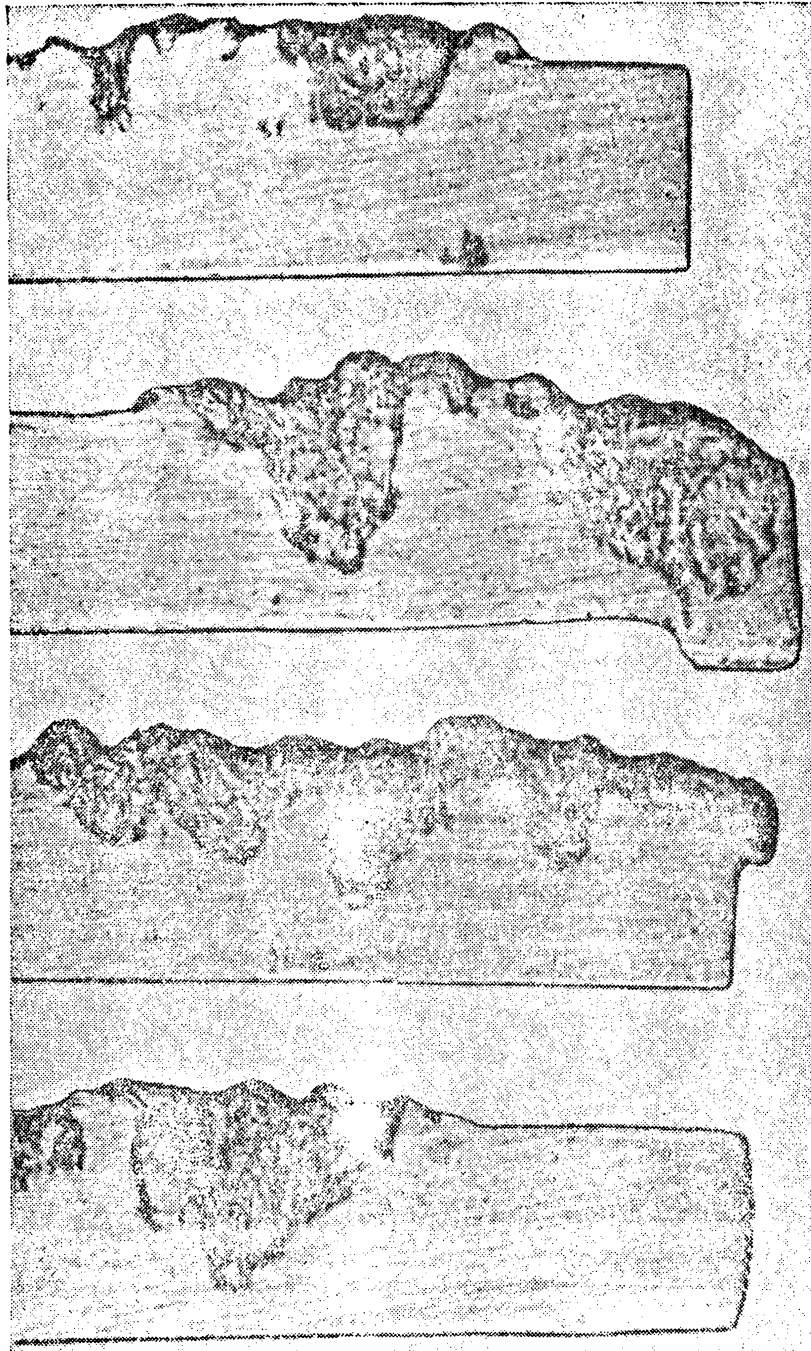
скорость соударения, тем меньше время контакта струи и образца при ударе.

Таким образом, сжатие и расширение струи воды при ударе соответствуют в какой-то степени поведению при ударе твердых тел. Как известно, такая аналогия доказана теоретическими и экспериментальными исследованиями жидкостей различной вязкости, проведенными Корифельдом. П. П. Кобеко [10] по этому вопросу пишет, что при резких ударных нагрузках релаксация не успевает развиваться заметным образом даже в маловязких системах, и последние реагируют на внешнее воздействие как упругие тела.

64

Figure 61. Schematic of Diametrical Size Deformation of the Jet at the Moment of Impact; 1) before striking surface, 2) after striking surface.

Figure 62. Dependence of the Rate of Deformation on the Velocity of the Jet.



Фиг. 63. Поперечный разрез алюминиевых образцов, испытанных на струеударной установке (увеличено в 3 раза).

5*

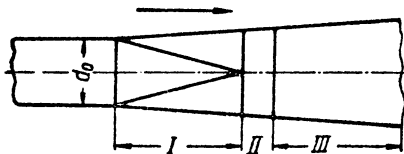
67

Figure 63. Diametrical Section of an Aluminum Specimen Tested by Impacting Jet Facility (mag. x 3).

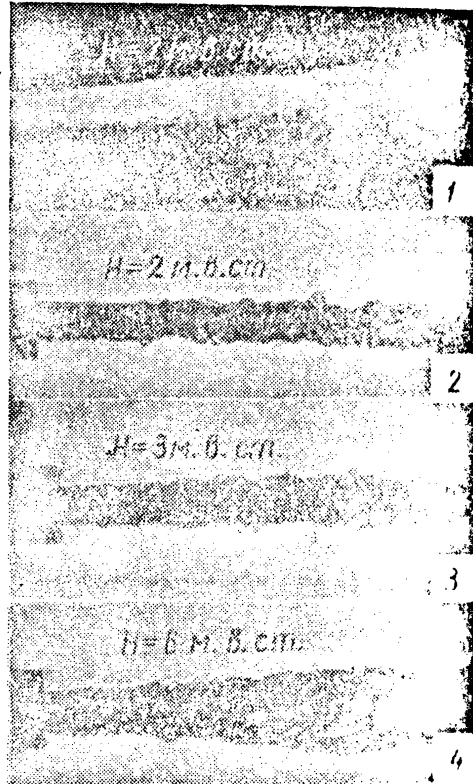
ным; к нему примыкают переходный и основной участки [12].

Свободная¹ струя имеет такое же строение. При истечении струи воды в воздух на начальном участке движение воды происходит относительно сплошной, компактной массой. Переходный участок характерен переходным состоянием потока от сплошного к несплошному, с разделением его на отдельные струйки. На основном участке поток движется в виде отдельных струек и капель. Поверхность струи здесь представляет собой поверхность разрыва жидкости, обладающую свойством неустойчивости. На этой поверхности возникают волны и вихри, под воздействием которых струя аэрируется и в дальнейшем распадается.

На фиг. 65 показан вид струй, вытекающих из насадки струеударной установки под различным напором. Сопло круглое диаметром 8 мм. Фотографии представ-



Фиг. 64. Схема строения затопленной струи:
I — начальный участок; II — переходный участок; III — основной участок; d_0 — диаметр насадки.



Фиг. 65. Кадры скоростной кино съемки струй, вытекающих под разным напором:
1, 2 — напор 20 кн/м² (2 м вод. ст.);
3 — напор 30 кн/м² (3 м вод. ст.);
4 — напор 60 кн/м² (6 м вод. ст.)

ляют собой отдельные кинокадры, снятые с частотой $8 \cdot 10^4$ кадров в 1 сек кинокамерой СКС-2 в проходящем и отраженном свете. Струя образцами не пересекалась.

На кадре 1 снята струя в отраженном свете в момент ее роста в длину при напоре 20 кн/м² (2 м вод. ст.). На кадрах 2, 3 и 4 сняты установившиеся струи в проходящем свете при напоре 20, 30 и 60 кн/м² (2, 3 и 6 м вод. ст.) Здесь видно, что поверхность струй покрыта волнами; высота волн и их количество изменяются

¹ Струя жидкости, вытекающая в газообразную среду или жидкость меньшей плотности.

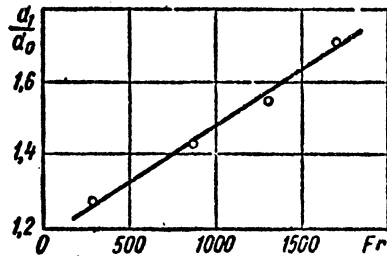
Figure 64. Schematic of the Assembly for a Submerged Jet;
I) inlet section, II) transitional section, III) basic section; d_0 — nozzle diameter.

Figure 65. High Speed Movie Frames for the Jet, Flow in the Right Direction; 1, 2) pressure 20 kg/m², 3) pressure 30 kg/m², 4) pressure 40 kg/m².

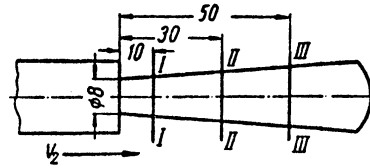
наковыми размерностями. Критерием-симпликсом называется отношение двух одноименных, т. е. имеющих одинаковые размерности, величин.

Это условие в выражении (е) также выполнено.

Семь из десяти величин, входящих в зависимость (а), не имеют одинаковых размерностей, и в выражении (е) мы имеем соответственно три критерия-симплекса; d_1/d_0 ; $\rho_a/\rho_{жс}$; $\nu_a/\nu_{жс}$.



Фиг. 66. Степень расширения струи в зависимости от критерия Fr.



Фиг. 67. Схема замеров диаметра струи: I, II, III — места замеров.

Не изменяя общего количества критериев в выражении (е), изменим критерии

$$\rho_a \rho_{жс}^{-1} v_2^{-2} \text{ на } \rho_a \rho_{жс}^{-1} v_2^{-2} \text{Re}^2 (\text{Ga})^{-2/3} = \rho_a \rho_{жс}^{-1} \nu_{жс}^{-2/3} g^{-2/3}$$

и

$$\rho_a d_0 \sigma^{-1} \text{ на } \rho_a d_0 \sigma^{-1} (\text{Ga})^{-1/3} = \rho_a \nu_{жс}^{2/3} \sigma^{-1} g^{-1/3},$$

где

$$\text{критерий Рейнольдса } \text{Re} = \frac{v_2 d_0}{\nu_{жс}},$$

$$\text{критерий Галилея } \text{Ga} = \frac{g d_0^3}{\nu_{жс}^2}.$$

Затем, приняв $\rho_a \rho_{жс}^{-1}$ и $\nu_a \nu_{жс}^{-1}$ постоянными, выражению (е) придадим следующий вид:

$$\frac{d_1}{d_0} = F_3 \left(\text{Re}; \text{Ga}; \frac{\rho_a}{\rho_{жс} \nu_{жс}^{2/3} g^{2/3}}; \frac{\rho_a \nu_{жс}^{2/3}}{c g^{1/3}} \right). \quad (\text{ж})$$

Исходя из того, что при истечении струи воды из насадки струеударной установки два последних критерия в выражении

(ж) являются постоянными, а также из отношения $\text{Fr} = \frac{v_2^2}{g d_0} = \frac{\text{Re}^2}{\text{Ga}}$, выражению (ж) придадим окончательный вид

$$\frac{d_1}{d_0} = F_4 (\text{Fr}, \text{Ga}).$$

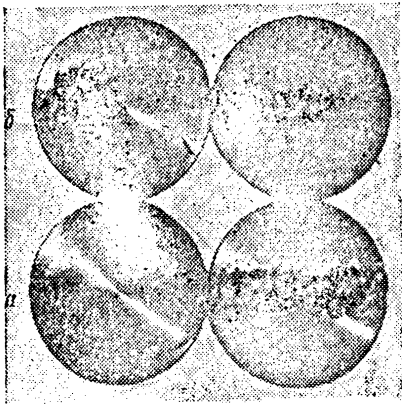
Произведенная скоростная киносъемка струй, вытекающих из насадки струеударной установки с различными скоростями (напорами) в атмосферу, позволила экспериментально устано-

Figure 66. Degree of Expansion of the Jet as a Function of Fr. Number.

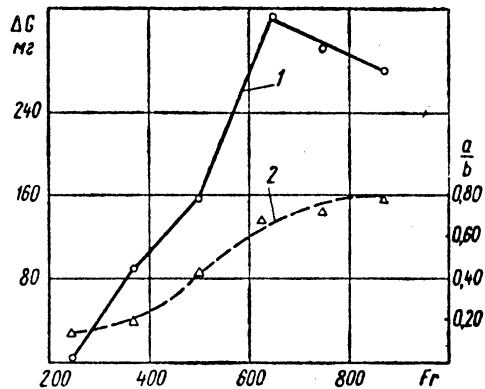
Figure 67. Schematic for the Locations of Measuring the Jet Diameter.

При этих условиях зона максимального износа имеет наибольший диаметр и наибольшую глубину (фиг. 68).

При дальнейшем увеличении напора H , как уже упоминалось, износ падает, отношение $\frac{a}{b}$ в этот момент слабо возрастает, а глубина и диаметр зоны максимального износа уменьшаются. Однако это не означает, что с увеличением H больше 25 кн/м^2 (2,5 м вод. ст.), зона максимального износа должна сдвигаться по ходу струи. Специально поставленный эксперимент при $H = 50 \text{ кн/м}^2$ (5 м вод. ст.) и перемещении образца по ходу струи



Фиг. 68. Поверхности образцов, изношенные при различных напорах струи.



Фиг. 69. Зависимость износа ΔG и отношения $\frac{a}{b}$ от критерия Fr

на различные расстояния Δh подтвердил, что при увеличении Δh износ уменьшается. Наличие зоны максимального износа и ее явно выраженное перемещение, а также наличие максимума при износе, наводят на мысль о существовании в струе определенной зоны, которая каким-то образом интенсифицирует износ.

И. Н. Богачев и Р. И. Минц [15], исследуя износ металлов на подобной установке и при подобных параметрах опыта, обнаружили увеличение износа по мере некоторого удаления образца от насадки (фиг. 71). Наибольший износ при определенном Δh они объясняют наличием в струе в этом районе кавитационной зоны.

Для выяснения этого вопроса нами была проведена высокоскоростная киносъемка струи воды, вытекающей из насадки под различными напорами. Киносъемка производилась в отраженном и проходящем свете, однако, каких-либо «пустот» в струе не было обнаружено. Кроме того, нами искусственно в струе создавалась зона «пустоты» в области соударения с образцом (фиг. 72). Для этого в насадку I по центру было вмонтировано препятствие II , имеющее на конце выступающую головку диаметром 2—4 мм.

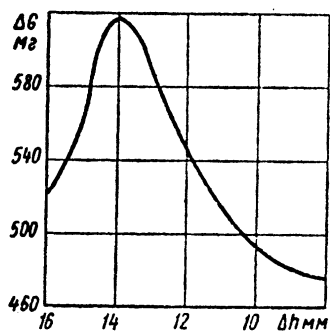
76

Figure 68. The Surfaces of Specimens Exposed to Different Jet Velocities.

Figure 69. The Dependence of the Damage Loss ΔG and the Ratio a/b on the Fr. Number.

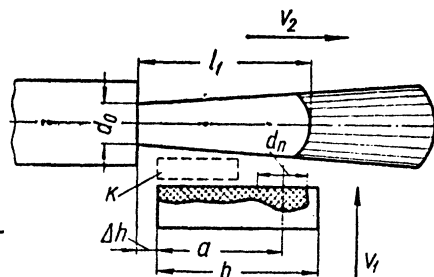
При обтекании препятствия струей воды, непосредственно за препятствием создавалась «пустотная» зона. Эту зону можно было при необходимости перемещать вдоль струи за счет перемещения препятствия 4. Образец 3 пересекает струю в районе образованной зоны. При этом, при всех возможных вариантах расположения зоны и при различных скоростях истечения струи износ образца был в несколько раз меньше по сравнению с износом в сплошной струе.

Опыт показывает, что при указанных скоростях 3—5 м/сек даже в условиях закрытого потока и при наличии соответствующего препятствия (например в гидродинамической трубе), кавитация возникает с трудом. Как показывают наши исследования, образование и перемещение зоны максимального износа связано с наличием ядра струи на ее начальном участке, и максимальное разрушающее действие струи наблюдается, когда соударение с образцом происходит на переходном участке струи, т. е. в конце ее ядра (см. фиг. 64).



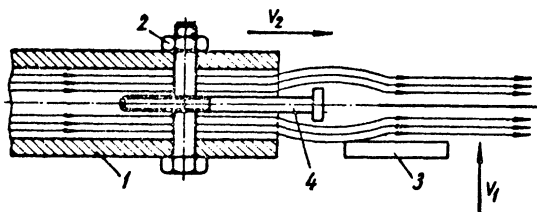
Фиг. 71. Изменение износа в зависимости от зазора Δh между насадкой и кромкой образца.

мере увеличения H происходит рост начального участка (ядра) струи в длину, однако после того, как ядро достигнет определенной длины, последняя уменьшается. Таким образом, по мере увеличения H участок струи, создающий максимальный износ, перемещается по ходу струи; в этом случае также происходит перемещение зоны максимального износа по поверхности образца. Затем, после достижения какого-то H , вследствие усиления



Фиг. 70. Схема взаимного расположения струи воды и образца при ударе: l_1 — ядро струи; Δh — зазор между образцом и насадкой; v_1 — скорость образца; v_2 — скорость струи; d_n — диаметр зоны максимального износа; k — образец.

Как уже упоминалось, длина каждого участка струи зависит от скорости струи или от напора H . Например, по



Фиг. 72. Схема обтекания препятствия струей: 1 — насадка; 2 — болт с гайкой; 3 — образец; 4 — препятствие.

77

Figure 70. Schematic for a Mutual Arrangement of the Water Jet Striking the Specimen Under Test; l = length of the Jet; Δh = space between specimen and mouthpiece; v_1 = specimen velocity (= 50 to 200 m/sec.); v_2 = jet velocity (= 4-10 m/sec.); d_n = diameter of maximum damage zone; k = specimen.

Figure 71. Measured Damage as Related to the Spacing Δh Between Mouthpiece and a Chrome Specimen.

Figure 72. Schematic for a Jet Induced by the Flow Around an Obstacle; 1) mouth piece, 2) bolt with a nut, 3) specimen, 4) obstacle.

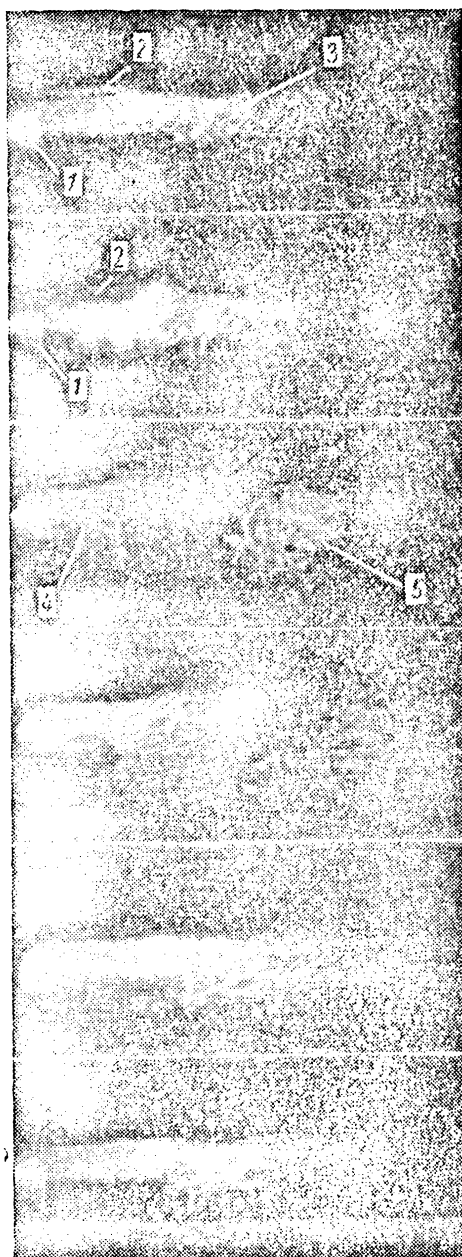
В момент, когда держатель образца 2 боковой частью перекрывает отверстие насадки 1, струя продолжает вытекать, ударяя о боковую поверхность держателя, и дробится на отдельные струйки. Вследствие этого торец струи 4 после прохождения держателя имеет раздробленный вид. При дальнейшем удлинении струи, под воздействием сопротивления воздуха возмущения торца струи увеличиваются и распространяются на значительную часть длины восстанавливаемой струи. Поэтому возможная длина основного участка (ядра) струи соответственно уменьшается. Однако в целом, в пределах исследованных напоров 5—70 кн/м² (0,5—7,0 м вод. ст.), установлено, что с ростом общей длины восстановленной струи растет и длина ядра. Поэтому длина восстановленной струи играет важную роль в износе образца при его соударении со струей.

Длину восстановленной струи можно определить теоретически. Обработка кинограмм показала, что рост длины струи после разрушения во времени происходит линейно; это значит, что струя удлиняется с равномерной скоростью. В таком случае длина струи

$$l_r = \Delta t v_2,$$

где v_2 — скорость истечения струи;

$\Delta t = \frac{s}{v_1}$ — время между последующими соударениями;



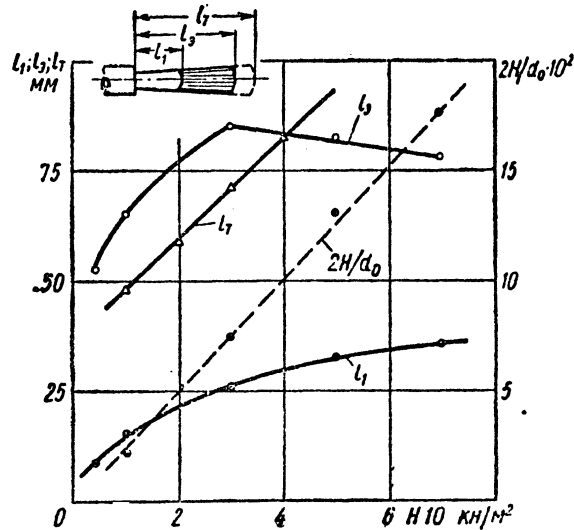
Фиг. 73. Кадры скоростной киносъемки процесса разрушения струи:

1 — насадка; 2 — образец; 3 — струя; 4 — восстановленная струя; 5 — отсеченная часть струи.

79

Figure 73. High Speed Movie Frames for the Process of Jet Damage; 1) mouth piece, 2) specimen, 3) jet, 4) jet recovery, 5) Fragments of Jet.

v_1 — линейная скорость вращения образцов;
 $s = \frac{\pi D}{a}$ — путь, который проходит образец до удара;
здесь D — диаметр окружности вращения образцов; a — число образцов, одновременно расположенных по окружности.



Фиг. 74. Зависимость длины восстановленной струи от напора при истечении:

l_1 — длина ядра; l_T — длина струи теоретическая; l_e — длина струи экспериментальная; $2H/d_0$ — отношение напора к диаметру насадки.

Тогда

$$l_T = \frac{\pi D}{a v_1} v_2^2$$

С другой стороны,

$$v_1 = \pi D n$$

и

$$v_2 = \sqrt{2gH},$$

где n — число оборотов образцов в секунду;

H — напор струи при истечении;

g — ускорение силы тяжести.

Окончательно получим

$$l_T = \frac{\sqrt{2gH}}{an}.$$

В последнем выражении величины g и a постоянные, следовательно, для определенного диаметра насадки восстановленная длина струи является функцией H и n . Указанная зависимость нами проверена экспериментально по данным киносъемки.

80

Figure 74. Dependence of the Length of Recovered Jet on the Pressure of the Outflow; l - length of range, l_T - theoretical jet length, l_e - experimental jet length, $2H/d_0$ - ratio of the pressure to the mouthpiece diameter.

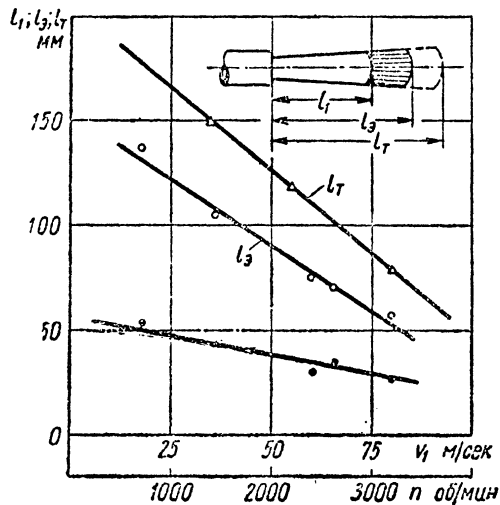
На фиг. 74 показано изменение длины восстановленной струи в зависимости от напора H при $n=53$ об/сек и $a=2$. Здесь видно, что длины струй, полученные экспериментально (l_3) и теоретически (l_T) при напоре до 40 кн/м^2 (4 м вод. ст.), примерно совпадают. При дальнейшем повышении H фактическая длина струи падает вследствие увеличивающегося распыления третьего участка струи. Распыление происходит по мере увеличения скорости струи в связи с ростом сопротивления воздуха. Длина l_1 ядра струи с увеличением напора медленно возрастает.

Возвращаясь к результатам опыта по износу в зависимости от напора (см. фиг. 69), и исходя из вышеполученных результатов, можно сделать некоторое добавление.

Как видно из фиг. 74, для насадки диаметром 8 мм при $H=25 \div 35 \text{ кн/м}^2$ ($2,5 \div 3,5 \text{ м вод. ст.}$) длина l_1 ядра восстановленной струи равна $25 \div 30 \text{ мм}$; при этом поверхность струи на этой длине имеет относительно мало возмущений. По мере дальнейшего увеличения H длина ядра растет, однако интенсивность поверхностных возмущений увеличивается, а это, как уже говорилось, приводит к «съеданию» ядра, т. е. последнее становится как бы менее компактным. Чем больше H , тем больше происходит «съедание»

ядра, и его разрушающая способность падает. Таким образом, для данных условий опыта наиболее эффективным оказывается ядро, формирующееся при $H = 25 \div 35 \text{ кн/м}^2$ ($2,5 \div 3,5 \text{ м вод. ст.}$).

Исследования зависимости длины восстановленной струи и ядра от числа оборотов n образца в секунду производились при постоянном напоре $H=30 \text{ кн/м}^2$ (3 м вод. ст.) и диаметре насадки 8 мм . Число оборотов образца применялось в пределах $12 \div 53$ в 1 сек ($750 \div 3200 \text{ об/мин}$). Из результатов, представленных на фиг. 75, видно, что в пределах указанных оборотов длина l_3 восстановленной струи уменьшается с повышением n . Изменение теоретической длины l_T струи имеет такой же характер. В этом случае длина ядра струи также уменьшается, но менее интенсивно. Нами были также проведены исследования влияния диаметра насадки на длину восстановленной струи при $H=30 \text{ кн/м}^2$



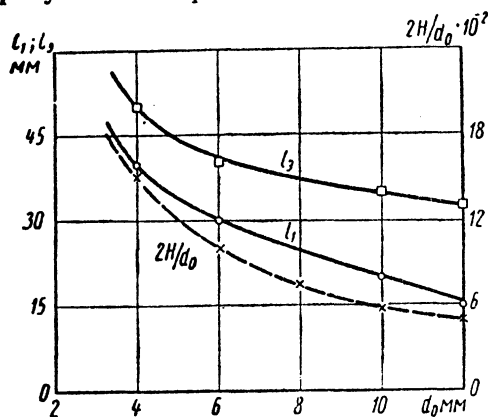
Фиг. 75. Зависимость длины восстановленной струи от скорости ее соударения с образцом:

l_1 — длина ядра; l_T — длина струи теоретическая; l_3 — длина струи экспериментальная.

Figure 75. Dependence of the Length of the Recovered Jet on Velocity and its number of Impacts with the Specimen; l - length of range, l_T - theoretical jet length, l_3 - experimental jet length, $2H/d_0$ - ratio of the pressure to the mouthpiece diameter.

(3 м вод. ст.) и $n=3200$ об/мин. В данном случае как длина l восстановленной струи, так и длина l_1 ее ядра по мере увеличения диаметра насадки уменьшаются (фиг. 76).

Наиболее резкое уменьшение длин l_1 и l_2 происходит на участке с диаметром насадки 4—8 мм. Поскольку длина восстановленной струи или длина ядра играет важную роль при износе образцов, то для получения оптимального износа и сопоставимых результатов крайне необходимо знание закономерностей восстановления струй в струеударной установке.



Фиг. 76. Зависимость длины восстановленной струи от диаметра d_0 насадки: l_1 — длина ядра; l_2 — длина струи экспериментальная.

Подводя некоторый итог, можно сделать вывод, что разрушающая способность струи зависит от двух основных факторов: длины ядра восстановленной струи и состояния ее поверхности. В таком случае, если, например, в опыте величины n , a и v_1 остаются постоянными, то износ в основном будет определяться напором H струи и диаметром d_0 насадки, так как эти параметры входят одновременно в критерий

Фруда (Fr), который характеризует разрушающую способность ядра с точки зрения поверхностных возмущений, и вместе с тем от этих же параметров зависит длина восстановленного ядра, которая также влияет на износ.

В реальных условиях эти два фактора действуют совместно. В зависимости от величины напора ведущую роль при износе может играть как длина ядра струи (при меньших значениях H), так и интенсивность поверхностных возмущений (при больших значениях H). Для каждого диаметра насадки и для каждой скорости соударения струи с образцом имеется определенный разграничивающий напор.

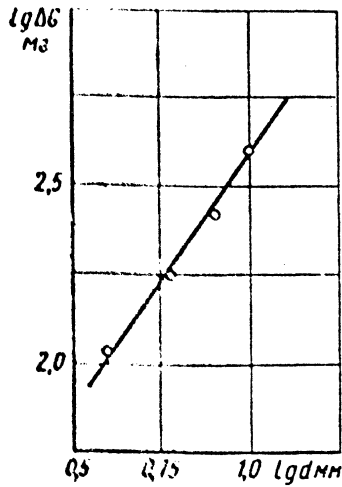
Таким образом, исходя из приведенных соображений и используя выражение для скорости истечения струи $v_2 = \sqrt{2gH}$, критерий $Fr = \frac{v^2}{gd_0}$ можно преобразовать в выражение

$$Fr = \frac{2H}{d_0}$$

и в таком виде использовать как «универсальный» параметр для оценки износа в зависимости от длины ядра восстановленной струи и состояния ее поверхности. Это хорошо подтверждается

Figure 76. Dependence of the Length of the Recovered Jet on the Diameter of the Mouthpiece d_0 ; l - length of range, l_T - theoretical jet length, l_2 - experimental jet length, $2H/d_0$ - ratio of the pressure to the mouthpiece diameter.

б) При оценке влияния диаметра насадки на длину струи восстановленной струи нами был установлен характер зависимости



Фиг. 77. Зависимость износа от диаметра струи (в логарифмических координатах).

ности износа образца (потери его массы ΔG) от диаметра насадки d_0 при напоре $H_{2m} = 20 \text{ кг/м}^2$ (2 м вод. ст.) и напоре $H_{3m} = 30 \text{ кг/м}^2$ (3 м вод. ст.). Условия опыта были те же, что и в предыдущем опыте (стр. 83).

Как видно из фиг. 78, для диаметра насадки $d_0 = 4 \text{ мм}$ и при напоре H_{2m} потеря массы образца составляет 100 мг. Увеличение напора до H_{3m} не дает заметного увеличения потери массы. Здесь можно предположить, что напоры H_{2m} и H_{3m} значительно превосходят значение, при котором износ максимален.

При переходе к $d_0 = 6 \text{ мм}$ износ образца увеличивается как при H_{2m} , так и при H_{3m} . Здесь сказывается увеличение массы воды и, возможно, снижение интенсивности поверхностных возмущений в связи с падением Re .

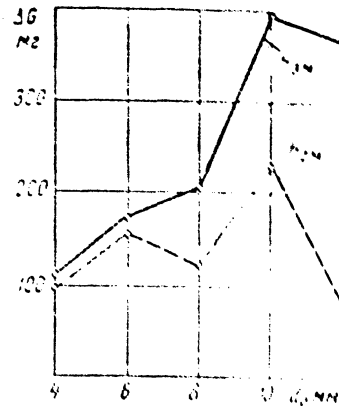
Для $d_0 = 8 \text{ мм}$ при H_{3m} наблюдается уменьшение износа образца по сравнению с износом при $d_0 = 6 \text{ мм}$, так как в этом случае длина ядра струи увеличивается.

При переходе к $d_0 = 10 \text{ мм}$ при H_{2m} наблюдается увеличение износа образца по сравнению с износом при $d_0 = 8 \text{ мм}$, вследствие

длины струи с увеличением диаметра насадки при постоянном напоре (фиг. 75). Как видно из этой зависимости, влияние длины ядра струи на износ может быть сложным, и линейной зависимости между длиной ядра и диаметром насадки здесь нет.

в) Третьим фактором, влияющим на износ и зависящим также от диаметра насадки, является состояние поверхности струи, так как диаметр насадки входит как переменная величина в критерий Re .

Таким образом, в общем случае влияние диаметра насадки на износ является сложным и зависящим от перечисленных выше факторов. Это наглядно подтверждается опытом. На фиг. 78 показан характер зависи-

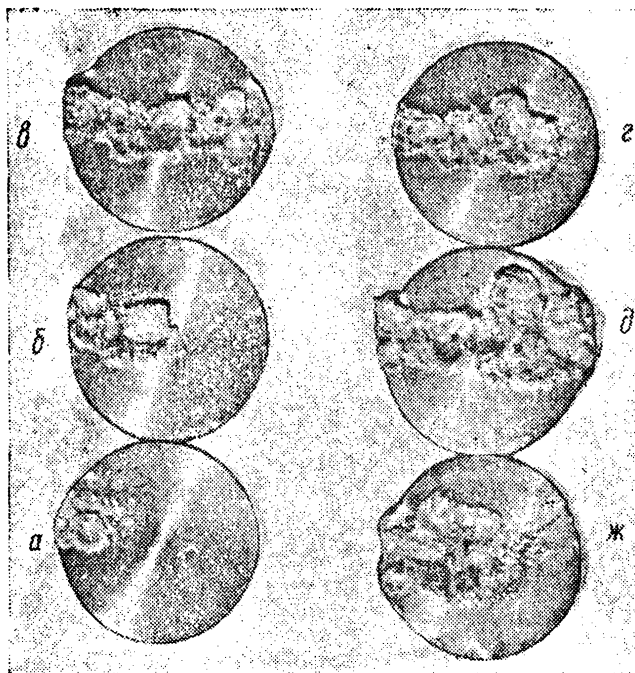


Фиг. 78. Зависимость износа от диаметра струи при разных напорах:

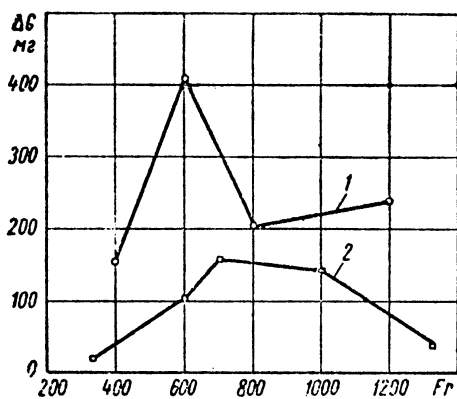
H_{2m} - напор 20 кг/м² (2 м вод. ст.); H_{3m} - напор 30 кг/м² (3 м вод. ст.).

Figure 77. Dependence of Damage on the Diameter of the Jet (on log scale).

Figure 78. Dependence of the Damage on the Diameter of the Jet at Different Pressures; H_{2m} - pressure of 20 kg/m² (2 m of water), H_{3m} - pressure of 30 kg/m² (3 m of water).

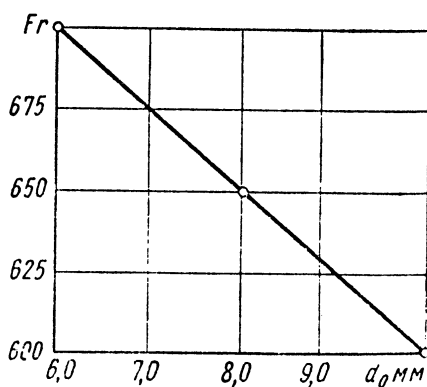


Фиг. 79. Изношенные образцы.



Фиг. 80. Зависимость износа от критерия Fr:

1 — насадка диаметром 10 мм; 2 — насадка диаметром 6 мм.



Фиг. 81. Оптимальное значение критерия Fr для насадок различного диаметра.

Figure 79. Damaged Specimen.

Figure 80. Dependence of the Damage on Fr. Number; 1) 10 mm mouthpiece, 2) 6 mm mouthpiece.

Figure 81. Optimum values of Fr. for different mouthpiece diameters.

насадки $d_0=8$ мм максимальный износ соответствует $Fr=650$. Для $d_0=6$ мм $Fr=700$, а для $d_0=10$ мм $Fr=600$ (фиг. 80).

Условия опыта для данных фиг. 80 не отличались от приведенных на стр. 83, за исключением напора, который для каждой насадки изменялся в пределах $5-70$ кн/м² (0,5—7 м вод. ст.).

На фиг. 81 показана зависимость наивыгоднейших для износа значений числа Fr от диаметра насадки. Используя найденную зависимость, легко можно

подобрать необходимую для максимального износа величину напора для любого диаметра насадки в пределах $6-10$ мм. Для этого следует найти соответствующее значение критерия Фруда и из зависимости $Fr = \frac{2H}{d_0}$ подсчитать H .

Указанные значения числа Fr найдены нами для наиболее часто используемой линейной скорости образца, равной 80 м/сек, и двух одновременно испытываемых образцов, и справедливо для струй круглой формы.

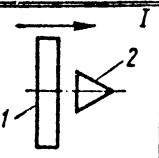
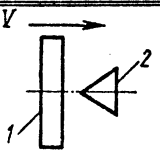
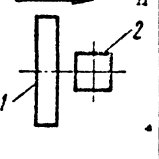
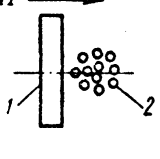
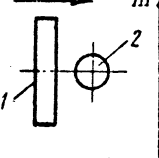
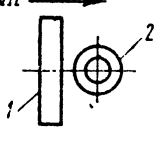
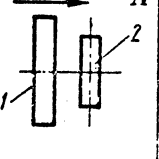
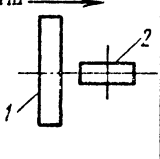
ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ СТРУИ НА ИЗНОС ОБРАЗЦА

До настоящего времени этот вопрос не исследовался. Нами исследованы струи с круглым, квадратным, прямоугольным и треугольным сечением. Схемы соударений струи и образца представлены на фиг. 82.

Условия опыта были следующими:

| | |
|--------------------------------------|---|
| Материал образцов | Алюминиевый сплав АД1 |
| Линейная скорость образца | $v_1 = 80$ м/сек |
| Напор струи | $H = 25$ кн/м ² (2,5 м вод. ст.) |
| Зазор между соплом и кромкой образца | $\Delta h = 3,0$ мм |
| Площадь проходного сечения насадок | $F = 50$ мм ² |
| Время испытаний | $\Delta t = 2$ мин |

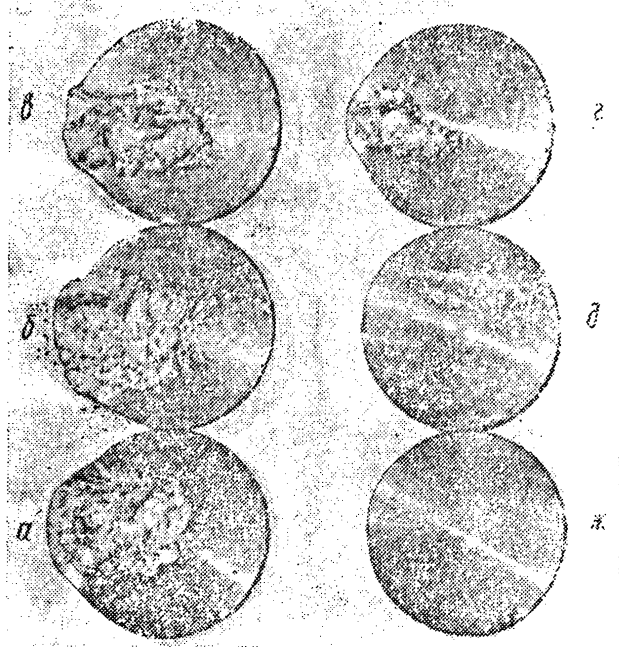
Площади проходных сечений для каждой насадки сохранялись постоянными.

| Схема соударения | ΔG МГ | Схема соударения | ΔG МГ |
|---|---------------|--|---------------|
|  | 310 |  | 4,0 |
|  | 281 |  | 2,0 |
|  | 194 |  | 95,0 |
|  | 150 |  | 51,0 |

Фиг. 82. Схемы соударения струй (2) различного сечения с образцом (1).

Figure 82. Schematic of Impacting Jets (2) and Different Sections of Specimens (1).

Максимальный износ образца наблюдался при соударении его со струей треугольного сечения (схема I, фиг. 82) и в том случае, когда удар образца приходился по основанию треугольника (фиг. 83, а). Если же удар приходился по вершине треугольника, то образец изнашивался очень мало (фиг. 83, ж).



Фиг. 83. Изношенные образцы.

По интенсивности износа образца за струей треугольного сечения идет струя квадратного сечения, затем — круглого. При ударе образца по большой стороне прямоугольника струи прямоугольного сечения (схема IV, фиг. 82) износ образца происходит в десятки раз интенсивнее, чем при ударе по малой стороне прямоугольника (схема VIII).

Незначительный износ образца наблюдался в случае струи кольцевого сечения (схема VII) и в случае пучка струй (схема VI).

Поверхности испытанных образцов показаны на фиг. 83.

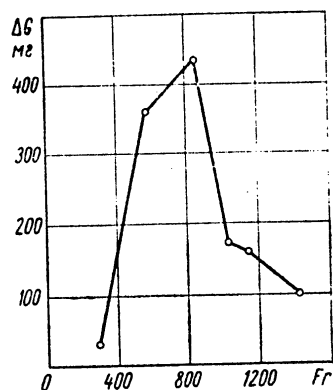
| Обозначено на фиг. 83 | а | б | в | г | д | ж |
|-----------------------------|---|----|----|------|----|---|
| Схема соударения по фиг. 82 | I | IV | II | VIII | VI | V |

Figure 83. Damaged Specimens.

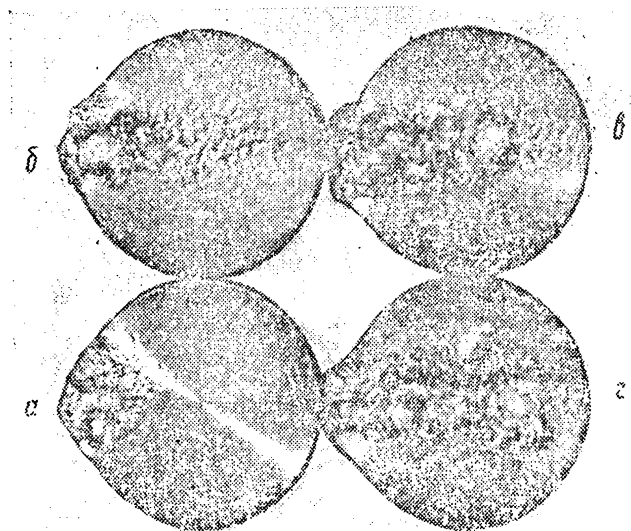
Очевидно, что разрушающее действие струй зависит от их массы, длины ядра и интенсивности поверхностных возмущений. Вместе с тем, как видно из опытов, на износ образца в значительной степени влияет схема удара, что связано с особенностями гидродинамики удара в каждом конкретном случае.

Нами была изучена разрушающая способность струи квадратного сечения при различных значениях Fr . Как видно из фиг. 84, здесь также наблюдается резко выраженный максимум износа при $Fr = 800$. Условия опыта были теми же, как и в первых опытах по износу (стр. 75).

На фиг. 85 показан вид разрушенной поверхности образцов при соударении со струей квадратного сечения при разных напорах. При напоре 10 кн/м^2 (1 м вод. ст.) (фиг. 85, а) струя не успевает полностью восстанавливаться между ударами. Для образцов в и г напор струи был соответ-



Фиг. 84. Зависимость износа от критерия Fr для струи квадратного сечения.



Фиг. 85. Образцы, разрушенные при соударении со струей квадратного сечения (увеличено в 1,5 раза).

венно 10 и 30 кн/м^2 (1 и 3 м вод. ст.). Дальнейшее увеличение напора до 50 кн/м^2 (5 м вод. ст.) приводит к распаду ядра восстановленной струи и по поверхности образца происходит как бы удар разрозненных капель (фиг. 85, б). Износ образца в этом случае сильно уменьшается.

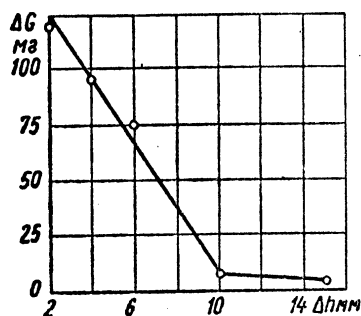
89

Figure 84. Dependence of Damage on Fr . for Jets of Square Cross-Section.

Figure 85. Specimens Damaged by Impacts from Jets of Square Cross-Section (mag. x 1.5)

ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРА МЕЖДУ НАСАДКОЙ И ОБРАЗЦОМ НА ИЗНОС

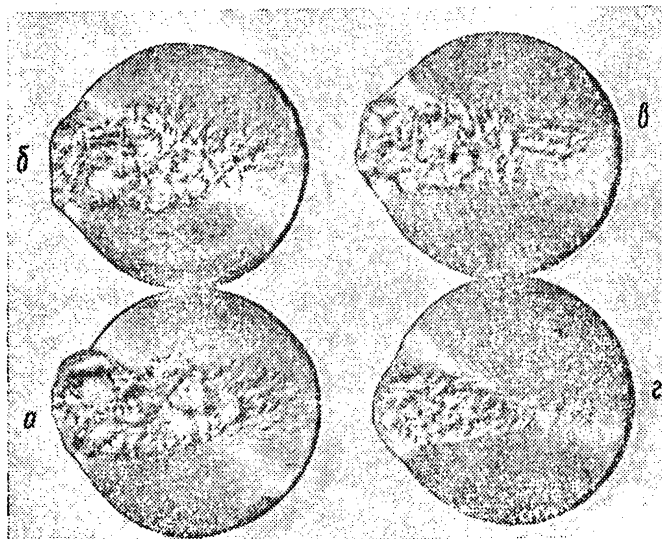
Зависимость величины износа от зазора Δh между насадкой и кромкой образца изучалось для насадки квадратной формы. Условия опыта были следующими:



Фиг. 86. Зависимость износа от зазора Δh между насадкой и кромкой образца.

Материал образцов Алюминиевый сплав АД1
 Линейная скорость образцов $v_1 = 80$ м/сек
 Напор струи $H = 30$ кн/м² (3,0 м вод. ст)
 Зазор между насадкой и кромкой образца $\Delta h = 2 \div 15$ мм
 Площадь проходного сечения насадки $F = 50$ мм²
 Время испытаний $\Delta t = 1,0$ мин

Результаты опыта представлены на фиг. 86. Здесь видно, что с увеличением Δh износ образца (потеря массы) уменьшается. Это объясняется тем, что при перемещении образца по ходу струи, при неизменном



Фиг. 87. Разрушение поверхности образцов (увеличено в 1,5 раза).

напоре, образец выходит из зоны максимального износа. Это хорошо иллюстрируется видом разрушенных поверхностей на фиг. 87. Здесь *а* соответствует $\Delta h = 2$ мм, *б* — $\Delta h = 4$ мм, *в* — $\Delta h = 6$ мм, *г* — $\Delta h = 15$ мм.

Figure 86. Dependence of the Damage on the Distance ΔH Between the Mouthpiece and a Chrome Specimen.

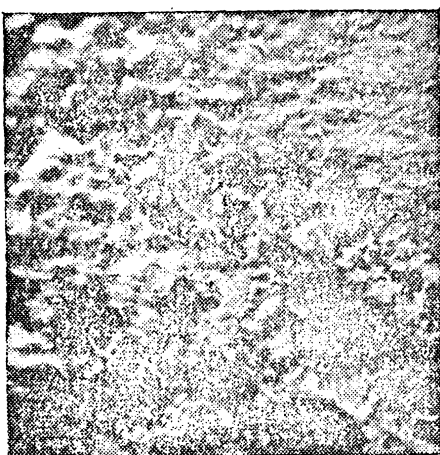
Figure 87. Damaged Surface of a Specimen (mag. x 1.5).

виду вся картина представляет собой как бы многократно передеформированную вязкую массу.

Наблюдения за динамикой развития кратеров показали, что последние образуются постепенно. По мере роста глубины и диаметра кратера также растет и величина наплыва вокруг него. Позже некоторые из вершин наплывов отпадают. Слияние двух кратеров в один приводит к удалению большей части граничащего наплыва.

Участки поверхности образца, прилегающие к основной зоне разрушения, покрыты более мелкими отпечатками.

Развитие износа во времени протекает нелинейно. Так, из 12 ч времени испытаний около 40% времени занимает «инкубационный период», т. е. период, в течение которого износа (при оценке его по потере массы) не наблюдается. В этот период происходит постепенное образование вмятин-отпечатков.



Фиг. 88. Поверхность образца, разрушенная кавитацией в гидродинамической трубе (увеличено в 10 раз).

Внешний вид зоны разрушения образца при кавитации в гидродинамической трубе говорит за то, что разрушение происходит прежде всего под воздействием механических сил. В основе этих сил лежат удары масс струей воды о поверхность образца, о чем говорит образование лунок-отпечатков и кратеров с полусферическим дном. Удары возникают при колебаниях каверны или потере ими устойчивости.

Для качественного сопоставления полученных результатов ставились опыты по износу также свинцовых образцов ультразвуковой кавитацией.

Условия опыта были следующими:

- Амплитуда колебаний $\lambda = 40 \text{ мк}$
- Частота колебаний $f = 21 \text{ кгц}$
- Зазор между вибратором и образцом $\Delta h = 1,5 \text{ мм}$
- Время испытаний $\Delta t = 5 \text{ мин}$

Кавитация происходила в неподвижной воде.

Разрушенная поверхность образца в данном случае также покрыта кратерами-впадинами, вокруг которых образованы наплывы (фиг. 89). Износ происходит вследствие отделения частиц металла с вершин наплывов. Здесь так же, как и в случае опытов в гидродинамической трубе, при износе наблюдается инкубационный период.

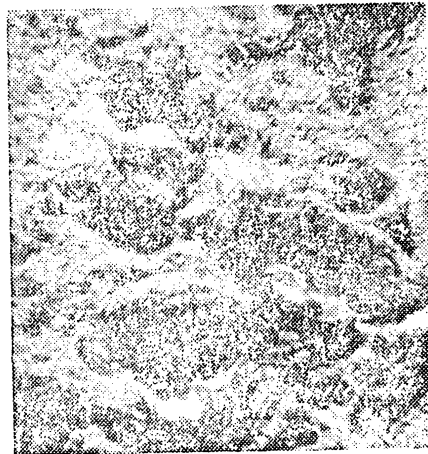
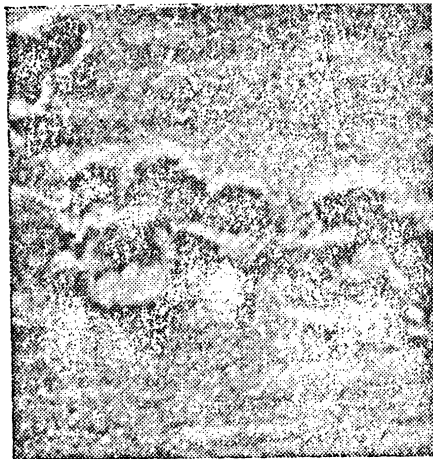
Наконец, образцы, изготовленные из этого же свинца, были испытаны на струеударной установке.

Figure 88. The Surface of a Specimen that has been Damaged by Cavitation in a Hydrodynamic Tunnel.

Условия опыта были следующими:

| | |
|--|----------------------------|
| Линейная скорость образцов | $v_1 = 40 \text{ м/сек}$ |
| Скорость истечения струн | $v_2 = 4 \text{ м/сек}$ |
| Зазор между насадкой и кромкой образца | $\Delta h = 3 \text{ мм}$ |
| Диаметр насадки | $d_0 = 4 \text{ мм}$ |
| Время испытания | $\Delta t = 2 \text{ мин}$ |
| Число ударов | $N = 6000$ |

И в этом случае разрушенная поверхность по внешнему виду сходна с участками образцов, изношенных в гидродинамической трубе, и ультразвуковым вибратором (фиг. 90).



Фиг. 89. Поверхность образца, разрушенная кавитацией в ультразвуковой установке (увеличено в 10 раз).

Фиг. 90. Поверхность образца, разрушенная на струеударной установке (увеличено в 10 раз).

Таким образом, при трех совершенно различных способах испытания получается одинаковая картина разрушения поверхности. Это позволяет сделать вывод об общности сил, производящих разрушения. Во всех трех случаях разрушение происходит вследствие бомбардировки поверхности массами струй воды.

На фиг. 79 показана поверхность образцов из алюминия, испытанных на струеударной установке. Здесь также видно образование наплывов и вмятин. Отделение металла происходит от вершин наплывов, вследствие многократного деформирования. Продукты износа представляют собой частицы неправильной формы с рваными краями. Каждая частица имеет следы деформаций, на них наблюдаются наслоения, вмятины и т. д. (фиг. 91).

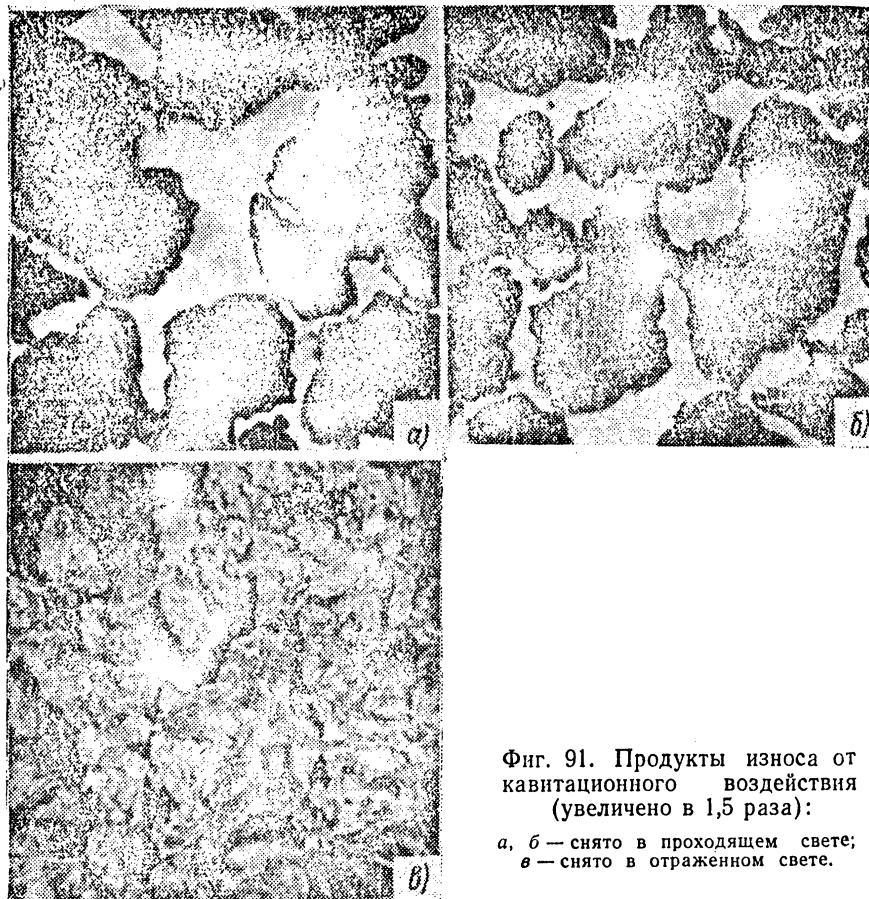
Наблюдения за развитием износа, например, образца из стали Ст. 3 при испытаниях на струеударной установке при скорости соударения 60 м/сек показывает, что в начальный промежуток времени после $54 \cdot 10^4$ ударов на поверхности образца появляются отдельные мелкие раковины от выкалывания металла (фиг. 92, а).

93

Figure 89. The Surface of a Specimen that has been Damaged by Cavitation in an Ultrasonic Set Up (mag. x 10).

Figure 90. The Surface of a Specimen that has been Damaged by Water Jet Set Up.

Затем по мере увеличения числа ударов количество раковин растет, а существующие увеличиваются главным образом в диаметре; кроме того, происходит удаление металла между раковинами. После $81 \cdot 10^4$ ударов оказывается удаленным слой металла почти на всей площади образца; толщина удаленного слоя примерно равна глубине первоначальных раковин (фиг. 92, б).



Фиг. 91. Продукты износа от кавитационного воздействия (увеличено в 1,5 раза):

а, б — снято в проходящем свете;
в — снято в отраженном свете.

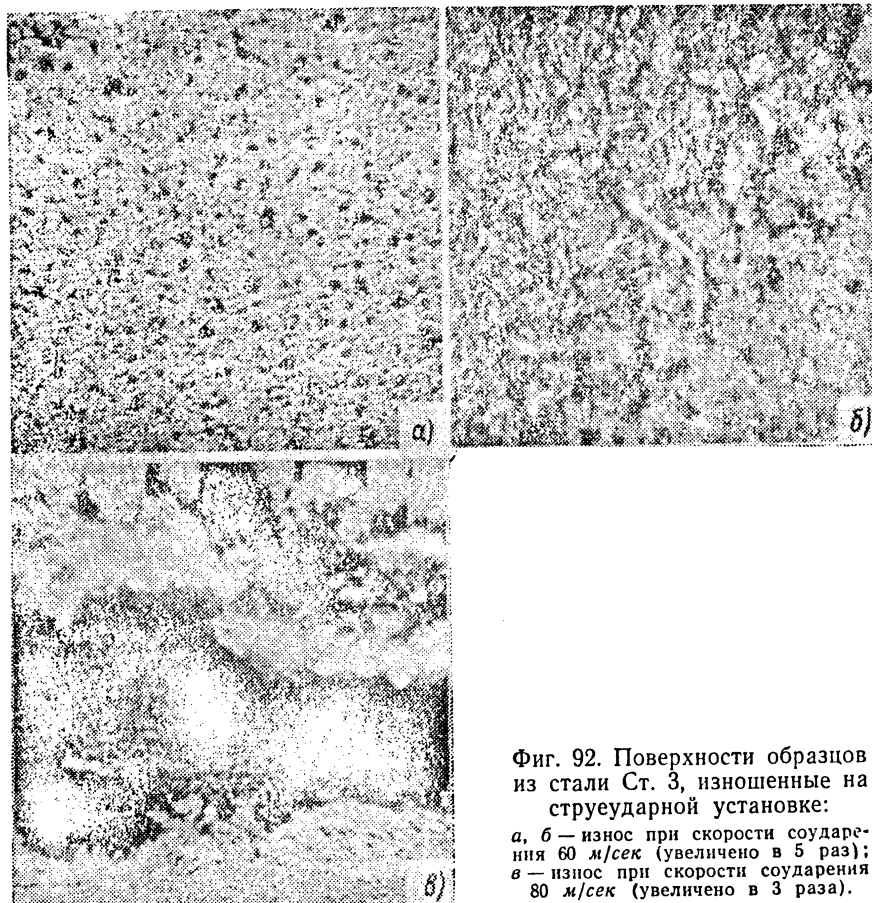
Это доказывает, что в начальный момент износа при определенной интенсивности механических ударов происходит наклепывание поверхностного слоя металла на определенную глубину; затем металл выкрашивается с поверхности и происходит удаление слоя. В последующем снова происходит наклепывание обнаженных участков и их удаление.

При увеличении скорости соударения струи и образца до 80 м/сек картина разрушения поверхности образца вначале сохраняется такой же, как и при скорости 60 м/сек, но затем

Figure 91. Damage Induced by Cavitation (mag. x 1.5); a, b) taken with light transmission, B) taken with light reflection.

происходит значительное расширение зоны износа как по площади, так и в глубину (фиг. 92, в).

Таким образом, при кавитационном износе мы, с одной стороны, имеем главным образом наличие механических ударов по поверхности материала, а с другой, — способность материала про-



Фиг. 92. Поверхности образцов из стали Ст. 3, изношенные на струеударной установке:

а, б — износ при скорости соударения 60 м/сек (увеличено в 5 раз);
в — износ при скорости соударения 80 м/сек (увеличено в 3 раза).

тивостоять этим ударам. Поэтому износ материала будет зависеть от интенсивности механического воздействия и способности материала сопротивляться этим воздействиям. Можно отметить наиболее типичные варианты механизма износа:

1. Материал сильно пластичен (свинец, алюминий, медь и др.), а сила удара значительно превосходит предел текучести. Износ в этом случае происходит вследствие многократного передеформирования пластически выдавленного из лунок металла.

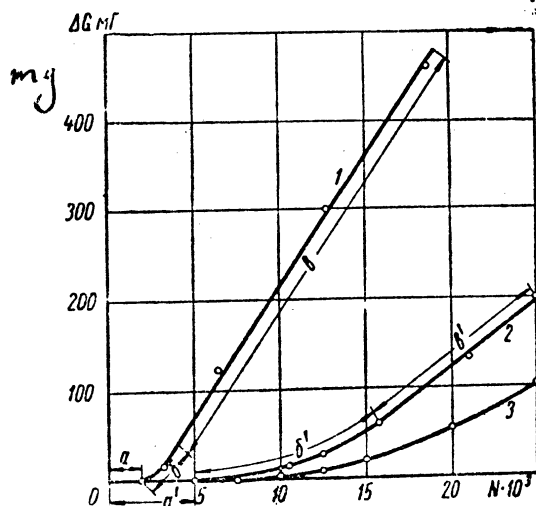
2. Сила ударов недостаточна для значительного поверхностного деформирования металла. В этом случае происходит накле-

95

Figure 92. The Surface of Steel Specimens Ct .3 Tested on a Water Jet Set Up; a, b) the damage caused by jet velocity, 60 m/sec. , (mag. x 5), B) the damage caused by jet velocity, 80 m/sec. , (mag. x 3).

участок линейной зависимости износа поверхности от числа ударов.

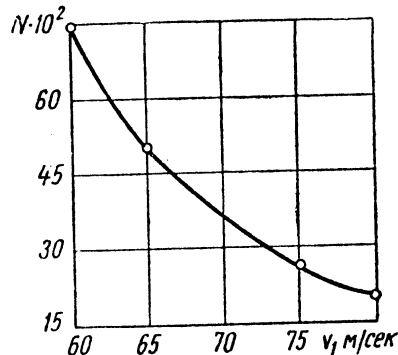
Указанный характер кривых и наличие участков связаны с особенностями кавитационного износа. На первом участке *a* при



Фиг. 93. Зависимость кавитационного износа (потери массы ΔG) образца от числа N ударов:

1 — при линейной скорости v_1 образца 80 м/сек.;
2 — при $v_1 = 65$ м/сек.; 3 — при $v_1 = 60$ м/сек.

начале износа в поверхностном слое металла происходит «накапливание» деформаций или иных повреждений. На втором участке *б*



Фиг. 94. Зависимость длительности «инкубационного» периода кавитации (выраженного числом N ударов) от скорости соударения v_1 .

«подготовленные» объемы металла начинают отделяться с поверхности образца, но не скачком, а растянуто по времени. Здесь можно предполагать степенную зависимость потери массы образца от числа ударов. Участку *в* соответствует развитая стадия износа. Как видно из графика фиг. 93, с увеличением скорости соударения длина участков *a* или продолжительность «инкубационного» периода резко уменьшается. В обычной системе координат зависимость между инкубационным периодом, выраженным числом ударов N , и скоростью v_1 носит параболический характер (фиг. 94), а в логарифмической системе координат — линейный. Эта зависимость выражается уравнением

$$\lg N = c - d \lg v_1,$$

где c и d — постоянные для данного материала и условий опыта.

После преобразования получим приближенную зависимость продолжительности «инкубационного» периода кавитации, выраженного числом ударов N , от скорости соударения струи и образца:

$$N = 125 \cdot 10^7 v_1^{-3}.$$

Зависимость справедлива только для данных условий опыта.

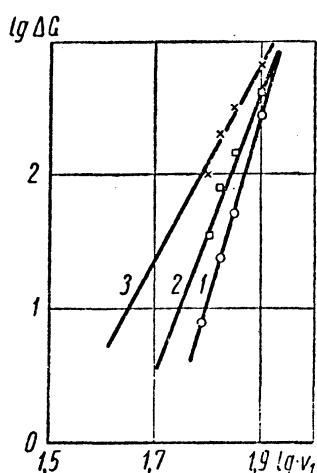
7 2148

97

Figure 93. The Dependence of Cavitation Damage (Mass Loss ΔG) of Specimen on the Number of Impacts N ; 1) under linear velocity v_1 of specimen (Aluminum type ADI), 80 m/sec., 2) under linear velocity v_1 of specimen, 65 m/sec., 3) under linear velocity v_1 of specimen, 60 m/sec.

Figure 94. The Dependence of the Duration (inception) of the Cavitation Period (expressed by the number of impacts N) on the Velocity of the Jet N .

Из приведенного выражения видно, что длительность «инкубационного» периода, выраженная числом ударов N , сильно зависит от скорости соударения струи и образца.



Фиг. 95. Зависимость износа образца от скорости соударения (в логарифмических координатах):
1 — при числе ударов $N = 12,5 \times 10^3$; 2 — при $N = 17 \cdot 10^3$; 3 — при $N = 25 \cdot 10^3$.

Практически можно подобрать такие условия, когда одним-двумя ударами объема воды можно произвести разрушение поверхности образца с потерей части его массы. «Инкубационный» период при этом фактически равен нулю и кривая износа простирается от начала координат.

Ранее в гл. IV была установлена зависимость для оценки силы кавитационного удара. Если в этой формуле

Таблица 6

| Скорость соударения в м/сек | Число ударов | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| | $12,5 \cdot 10^3$ | $17 \cdot 10^3$ | $25 \cdot 10^3$ |
| | Потеря массы образца в мг | | |
| 60 | 9 | 36 | 100 |
| 65 | 25 | 80 | 100 |
| 70 | 50 | 145 | 316 |
| 80 | 280 | 420 | 630 |

положить все величины, кроме v_1 , постоянными, то получим

$$P = Av_1^3.$$

Сравнивая эту формулу с вышеприведенной формулой для N , нетрудно видеть, что

$$N = \frac{B}{P},$$

т. е. длительность «инкубационного» периода обратно пропорциональна силе удара в момент соударения струи воды и образца. Эта зависимость оправдывается также и логически. Если мы рассмотрим длительность переходных участков b (фиг. 93), выраженных числом ударов N в зависимости от скорости v_1 , то также увидим, что с увеличением скорости соударения резко уменьшается длина этих участков. Наличие «инкубационного» периода и двух других участков при развитии износа во времени, а также зависимость их длительности от скорости соударения, оказывают сложное влияние и на зависимость износа от скорости соударения.

На фиг. 95 в логарифмических координатах показана зависимость износа образцов ΔG от скорости соударения v_1 для различного числа ударов N (табл. 6).

Здесь мы видим, что с ростом числа ударов происходит уменьшение наклона прямых износа.

Figure 95. The Dependence of the Wear of a Specimen on the Velocity of the Jet (on a log scale); 1) for number of impacts $N = 12,5 \times 10^3$; 2) $N = 17 \times 10^3$; 3) $N = 25 \times 10^3$.

В пределах исследованных чисел ударов, для алюминия потеря массы образца выражается следующей приближенной эмпирической зависимостью:

$$\Delta G = cv^n,$$

где c — величина, зависящая от числа ударов N ; значения c для исследованных N :

| | | | |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $N \cdot 10^3$ | 12,5 | 17 | 25 |
| c | $70 \cdot 10^{-26}$ | $42 \cdot 10^{-18}$ | $25 \cdot 10^{-10}$ |

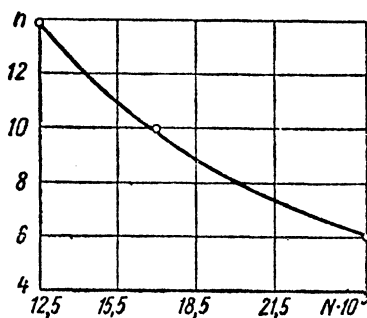
n — показатель степени;

$$n = 36^{1 - \frac{N}{5 \cdot 10^4}}$$

Для исследованных чисел ударов n изменяется в пределах 14—6 (фиг. 96).

Если мы на фиг. 93 кривые износа пересечем ординатами, соответствующими числам ударов $12,5 \cdot 10^3$; $17 \cdot 10^3$ и $25 \cdot 10^3$, то увидим, что, например, ордината, соответствующая $N = 12,5 \cdot 10^3$ для скоростей 60 и 65 м/сек проходит через переходные участки b , на которых износ незначителен, а для скорости 80 м/сек она проходит через прямолинейный участок v , на котором износ резко возрастает. В результате такого перехода от слабых переходных стадий износа (b) к участку интенсивного износа (v) мы имеем высокий показатель $n = 14$. Если мы проведем ординату из точки, соответствующей 10^3 ударам, то можем получить еще больший показатель n , и, наоборот, по мере перемещения вправо и отдаления от «инкубационного периода» (a), происходит уменьшение показателя n . Так, в случае, когда ордината, соответствующая $N = 25 \cdot 10^3$, проходит по участкам интенсивного износа не только для скорости 80 м/сек, но и для $v_1 = 65$ м/сек, мы имеем падение n до 6. Если ордината пройдет для всех скоростей ударов только через участки развитого износа (v), то мы по-видимому можем получить показатель n , равный 3, значение которого может быть обосновано уже из энергетических соображений, например, из зависимости силы удара объемов воды и их скорости (стр. 66).

В заключение отметим, что поскольку и для других металлов картина развития износа во времени сохраняется такой же, как и для алюминия, то и для них указанные зависимости износа от скорости, по-видимому, также справедливы.



Фиг. 96. Изменение показателя степени n (при скорости удара) от числа соударений.

Figure 96. The Variation of the Exponent n (for the velocity of the jet) with the Number of Impacts N .

ГЛАВА VII

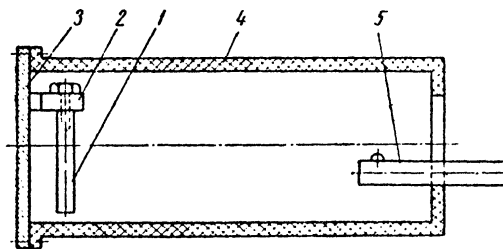
ГИДРОАБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС

Гидроабразивный износ имеет некоторые общие свойства с износом в газовом или воздушном потоке, содержащем абразивные частицы. Из обзора существующих мнений относительно механизма износа металлов абразивными частицами, находящимися в газовом потоке, можно установить, что одна группа исследователей рассматривает процесс износа как явление чисто механическое, а другая — как коррозионно-механическое. При этом, процесс механического разрушения представляется как отрыв или выбивание отдельных частиц металла, как срезание микростружек и как усталостный процесс.

О механизме износа деталей землесосов и гидротурбин, работающих в потоке воды с абразивными частицами, существует единое мнение: износ может происходить как в результате срезания микростружек металла, так и за счет выбивания отдельных его частиц.

ИЗНОС ПРИ УДАРАХ АБРАЗИВНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Нами предварительно было проведено исследование удара одиночных свободных абразивных частиц о плоскую поверхность,



Фиг. 97. Приспособление для изучения единичных ударов абразивных частиц:

1 — образец; 2 — держатель; 3 — крышка; 4 — коробка; 5 — ружье (метатель).

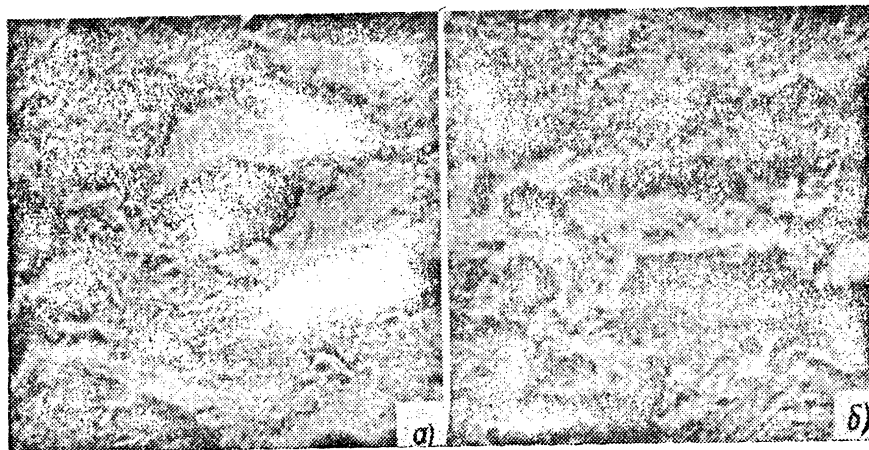
для чего было создано простое приспособление (фиг. 97). Оно состоит из метателя 5 абразивных частиц, прозрачной коробки 4 и доньшка 3, на котором укреплен держатель 2 образца 1. В качестве метателя абразивных частиц использовалось мелкокалиберное ружье. Абразивным материалом

служили отдельные песчинки диаметром 2 мм, скорость удара частиц — более 100 м/сек. Образцы 1 представляют собой сменные круглые диски диаметром 80 мм. Для изучения характера внедрения абразивных час-

Figure 97. Set Up for the Testing with Single Impacts with Jets with Abrasive Particles; 1) specimen, 2) holder, 3) lid, 4) enclosure, 5) gun.

тиц под углом к поверхности образцы можно поворачивать на необходимый угол.

Эксперименты, проведенные на образце из стали Ст.3 ($HV 10/30-130$), показали, что удары частиц под углом 90° к его поверхности вызывают образование лунок-отпечатков. Вытесненный из лунок металл расположен вокруг в виде валиков-напльвов, которые часто имеют радиальные трещины. При последующих ударах частиц этот валик может быть перемещен обратно внутрь ранее образованной лунки (фиг. 98, а) и т. д. Если же удар частицы приходится по кромке валика, то может произойти



Фиг. 98. Следы ударов абразивных частиц на поверхности образца (увеличено в 15 раз).

срез металла валика и частично стенки лунки. В результате «бомбардировки» поверхность образца сплошь покрывается лунками и перемычками (фиг. 98, б). Продукты износа поверхности представляют собой отдельные частицы металла (фиг. 99).

Таким образом, износ в данном случае происходит вследствие удаления пластически выдавленного металла как за счет его многократного деформирования, так и за счет его среза при ударах частиц.

Здесь необходимо оговориться, что характер разрушения зависит от угла атаки [16]. И. В. Крагельский [17], [18] высказывает, а затем и предлагает количественную теорию износа твердых тел, исходя из усталостной природы этого явления. При этом указывается, что при пластическом оттеснении материала возможно отделение частиц металла вследствие малоциклового усталости.

Можно сказать, что износ поверхности металла свободными абразивными частицами при угле атаки 90° происходит за счет проникновения частиц на некоторую глубину в поверхность пре-

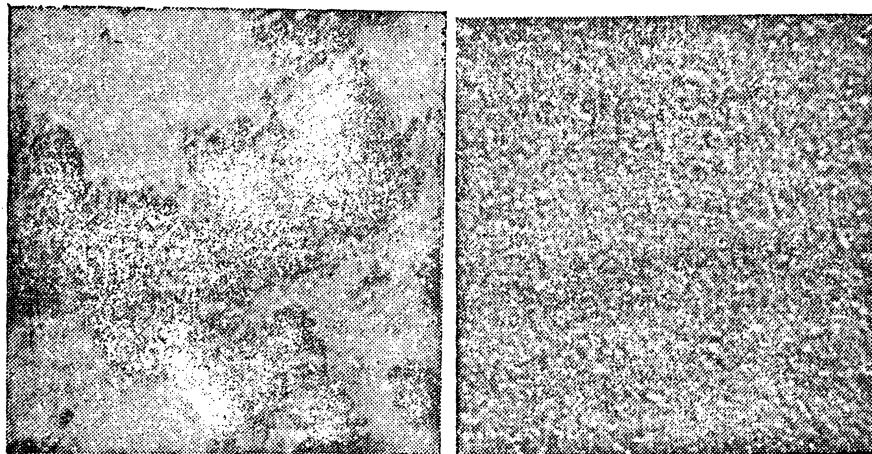
101

Figure 98. The Effect of a Jet with Abrasive Particles on the Surface of a Specimen (mag. x 15).

градусы. Таким образом, износостойкость материала зависит от его способности противостоять этому проникновению.

Перейдем к рассмотрению износа абразивными частицами в потоке воды. Исследование этого вопроса проводилось нами на струеударной установке. Параметры опыта были выбраны с таким расчетом, чтобы вода играла только роль носителя абразивных частиц и не вызывала износа образца. Угол атаки частиц во всех опытах колебался в пределах $80-90^\circ$.

В этом случае, как и при ударе свободно летящей частицей, износ происходит за счет внедрения частицы в поверхность об-



Фиг. 99. Продукты износа металла (увеличено в 10 раз).

Фиг. 100. Поверхность образца, изношенная при соударении со струей воды, содержащей абразивные частицы (увеличено в 30 раз).

разца. Изношенные поверхности покрыты лунками-впадинами (фиг. 100).

Необходимо подчеркнуть, что, так как износ происходит главным образом за счет удаления наплывов металла, образованных в результате внедрения частиц, то характер образования этих наплывов должен влиять на интенсивность износа. Так, например, при статическом вдавливании частицы кварцевого песка, пластически выдавленный металл располагается вокруг лунки валиком относительно небольшой высоты, но относительно большой ширины. Если же частицу такого же диаметра внедрить на эту же глубину ударом, то образованный валик имеет значительно большую высоту, при этом валик часто имеет трещины. Это обстоятельство значительно облегчает его последующее удаление.

При различных, фигурировавших при испытании скоростях соударения частиц и поверхности образца (в пределах $18-80$ м/сек), наблюдается линейная зависимость увеличения износа во времени. На фиг. 101 показано изменение износа армко-железа и ста-

102

Figure 99. Induced Damage on Metal (mag. x 10).

Figure 100. Wear on Specimen Surface Caused by a Water Jet with Abrasive Particles (mag. x 10).

ли 1X18H9T во времени или в зависимости от числа ударов N . Условия опыта были следующими:

| | |
|--|---|
| Скорость соударения струи и образца | $v_1 = 80$ м/сек |
| Напор струи | $H = 30$ кн/м ² (3 м вод. ст.) |
| Содержание абразива в воде по объему | $\Pi = 0,6\%$ |
| Зазор между насадкой и образцом | $\Delta h = 5$ мм |
| Насадка квадратного сечения со стороны отверстия | $a = 7$ мм |
| Диаметр частиц кварцевого песка | $D = 0,2$ мм |
| Время испытаний | $\Delta t = 40$ мин |
| Суммарное число соударений | $N = 12 \cdot 10^4$ |

В соответствии с этим картина поверхностных разрушений во времени также не изменяется. Глубина отпечатков-лунок, образованных ударами песчинок, как показали замеры, во времени также остается постоянной.

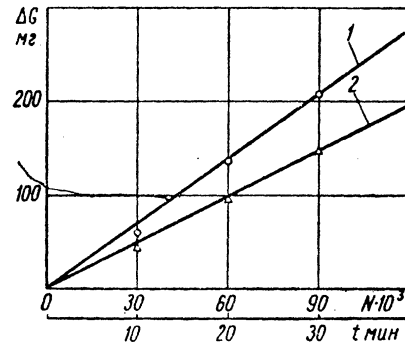
Необходимо отметить, что при применении в настоящее время в производственных условиях абразивно-жидкостной обработки металлов, которая имеет некоторую общность с износом в нашем случае, по данным Ш. М. Билика [19] также наблюдается линейное увеличение съема металла во времени, а шероховатость поверхностей уже после 40—60 сек времени также не изменяется. Эти факты в какой-то степени подтверждают достоверность наших данных. С увеличением содержания абразивных частиц в воде глубина отпечатков остается постоянной; такая зависимость также наблюдается и в абразивно-жидкостной обработке.

Потеря массы образцов с увеличением содержания абразивных частиц для различных металлов увеличивается линейно (фиг. 102). Условия опыта были следующими:

| | |
|--|---|
| Скорость соударения струи и образца | $v_1 = 46$ м/сек |
| Напор струи | $H = 30$ кн/м ² (3 м вод. ст.) |
| Содержание абразива в воде по объему | $\Pi = 2 \div 10\%$ |
| Зазор между насадкой и образцом | $\Delta h = 3$ мм |
| Насадка квадратного сечения со стороны отверстия | $a = 7$ мм |
| Диаметр частиц кварцевого песка | $D = 0,2$ мм |
| Суммарное число ударов | $N = 64 \cdot 10^3$ |

Было проведено также исследование зависимости износа от скорости соударения частиц и образца при различном содержании абразивных частиц в воде. Условия исследования были такими же, как и в предыдущем опыте, за исключением скорости соударения струи и образца: $v_1 = 18 \div 80$ м/сек.

Износ изучался при постоянном общем числе ударов для скоростей 18, 36, 46, 66 и 80 м/сек. При этом для каждой скорости

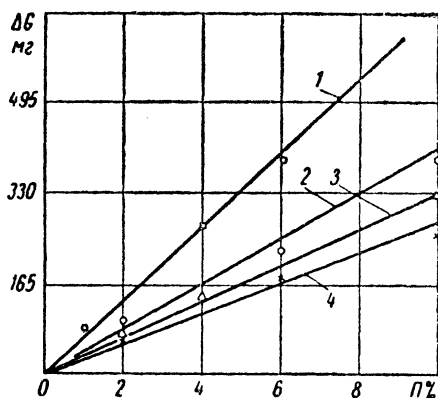


Фиг. 101. Изменение гидроабразивного износа во времени:
1 — армо-железо; 2 — сталь 1X18H9T.

Figure 101. The Dependence of Hydro-Abrasive Wear over Time; 1) cast iron, 2) steel, 1 X18 H 9 T.

износ исследовался при содержании абразива в воде 1,2, 4,6 и 10% по объему. Результаты экспериментов для армко-железа представлены в табл. 7.

Обработка результатов показала, что износ в зависимости от скорости возрастает в степени 2,2, постоянной для всех величин



Фиг. 102. Зависимость износа от количества абразивных частиц:
1 — латунь; 2 — армко-железо; 3 — сталь Ст. 3; 4 — сталь 1X18H9T.

Таблица 7

| Скорость соударения в м/сек | Содержание абразива в % | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-----|-----|-----|------|
| | 1 | 2 | 4 | 6 | 10 |
| 18 | 3 | 7 | 9 | 12 | 21 |
| 36 | 13 | 33 | 69 | 102 | 168 |
| 46 | 39 | 80 | 159 | 231 | 375 |
| 66 | 84 | 170 | 350 | 480 | 825 |
| 80 | 111 | 225 | 429 | 669 | 1110 |

содержания абразива при исследовании (фиг. 103). Износ в этом случае можно выразить эмпирической формулой

$$\Delta G = cv_1^n; \quad (и)$$

здесь коэффициент c является функцией содержания абразивных

частиц в воде. Эта зависимость представлена на фиг. 104. Приближенно

$$c = 0,008П, \quad (к)$$

где $П$ — содержание абразивных частиц в воде в процентах по объему.

Тогда зависимость между износом и переменными v_1 и $П$ примет вид:

$$\Delta G = 0,008Пv_1^{2,2};$$

здесь износ оценивается в мг, скорость — в м/сек.

Такое же исследование было проделано для стали Ст. 3, стали 1X18H9T и латуни Л80. Обработка результатов опытов показала, что показатель степени n при скорости соударения v_1 также в среднем для всех материалов равен 2,2 (табл. 8).

Таблица 8

| Материал | Содержание абразива в % | | | |
|-------------------------|-------------------------|-----|------|------|
| | 2 | 4 | 6 | 10 |
| | Показатель степени n | | | |
| Латунь Л80 | 2,30 | 2,2 | 2,12 | 2,1 |
| Сталь Ст. 3 | 2,28 | 2,2 | 2,22 | 2,22 |
| Сталь 1X18H9T | 2,28 | 2,2 | 2,80 | 2,23 |

Figure 102. The Dependence of Wear on the Quality of the Abrasive Particles; 1) brass, 2) cast iron, 3) steel Ct -3, 4) steel, 1 X 18 H 9 T.

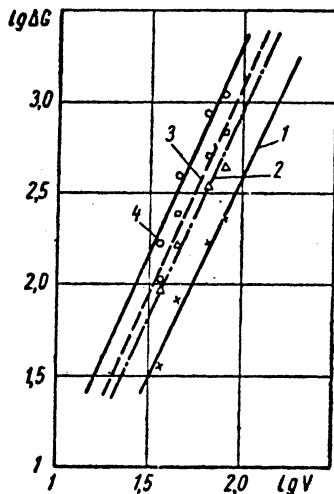
Величина износа здесь также выражается эмпирической зависимостью типа (и).

Значения коэффициента c для этих материалов при разном содержании абразива в воде приведены в табл. 9.

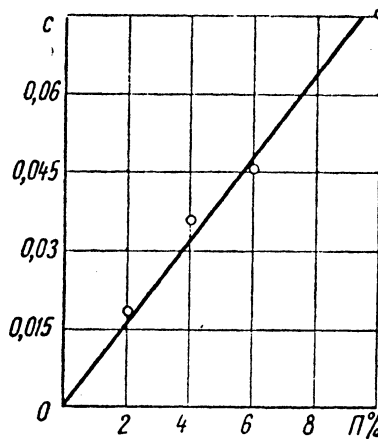
Таблица 9

| Материал | Содержание абразива в % | | | |
|-------------------------|-------------------------|--------|--------|-------|
| | 2 | 4 | 6 | 10 |
| | Коэффициент c | | | |
| Латунь Л80 | 0,022 | 0,055 | 0,077 | 0,10 |
| Сталь Ст. 3 | 0,0091 | 0,0180 | 0,0362 | 0,047 |
| Сталь 1Х18Н9Т | 0,0066 | 0,0134 | 0,023 | 0,031 |

Из табл. 9 видно, что здесь, как и для армко-железа, зависимость между коэффициентом c и содержанием абразива Π яв-



Фиг. 103. Зависимость износа от скорости удара (в логарифмических координатах) при различном содержании абразива: 1—2% абразива; 2—4%; 3—6%; 4—10%.



Фиг. 104. Зависимость коэффициента c от содержания абразивных частиц в воде.

ляется линейной и выражается формулой типа (к), но для каждого материала — со своим значением числового коэффициента.

Таким образом, износ исследованных материалов в функции от скорости соударения и содержания абразива в воде выражается следующей приближенной зависимостью:

$$\Delta G = c_1 \Pi v_1^{2,2},$$

где c_1 — для армко-железа 0,008; для стали Ст. 3 0,0050; для стали 1Х18Н9Т 0,0035; для латуни Л80 0,011.

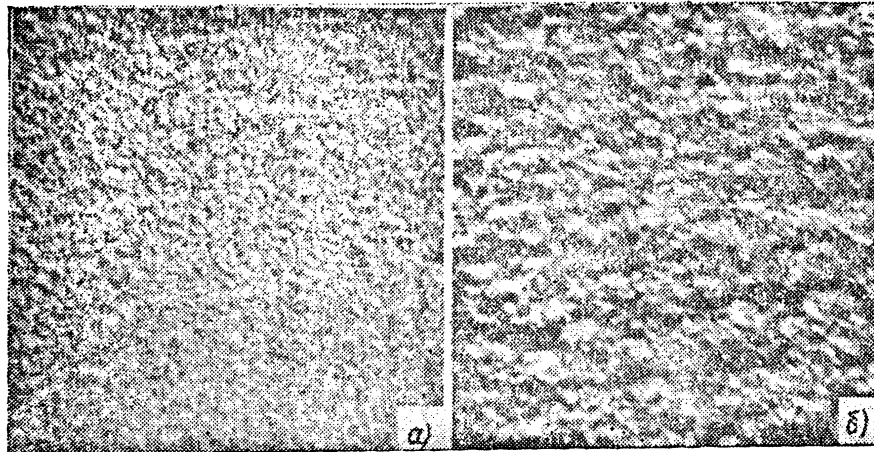
105

Figure 103. The Dependence of Wear on Jet Velocity (on a log scale) with Various Quality of Abrasive; 1) 2% abrasive, 2) 4%, 3) 6%, 4) 10%.

Figure 104. The Dependence of the Coefficient C on the Quantity of Abrasive Particles in Water.

При всех указанных скоростях картина изношенной поверхности не изменяется, за исключением размеров лунок-отпечатков, которые с увеличением скорости также увеличиваются (фиг. 105).

На фиг. 106 показана зависимость износа образца от глубины s отпечатков и от объема лунок ΔB_2 . Условия опыта те же, что и на стр. 103 ($v_1 = 18 \div 80$ м/сек), при содержании абразива в воде 10%. Здесь видно, что кривая I зависимости износа от глубины отпечатков имеет вид параболы.



Фиг. 105. Вид изношенной поверхности образцов из армо-железа при различных скоростях v_1 удара абразивных частиц (увеличено в 30 раз):
а — при $v_1 = 18$ м/сек; б — при $v_1 = 80$ м/сек.

Таким образом, нами установлено, что гидроабразивный износ происходит главным образом за счет удаления пластически выдавленного металла из лунок, образованных ударами частиц. Также установлено, что глубина и объем отпечатков-лунок во времени не меняется, а износ во времени растет линейно. Это говорит за то, что при установившемся износе в среднем условно на каждый новый объем отпечатка (на каждый объем пластически выдавленного металла) приходится какая-то определенная часть удаленного металла, при этом соотношение этих объемов для данных v_1 и Π является постоянным.

Пусть в этом случае
 ΔB_1 и ΔG_1 — соответственно средние объем и масса удаленного металла;
 ΔB_2 и ΔG_2 — объем и масса пластически выдавленного металла при одном ударе частицы;
 тогда

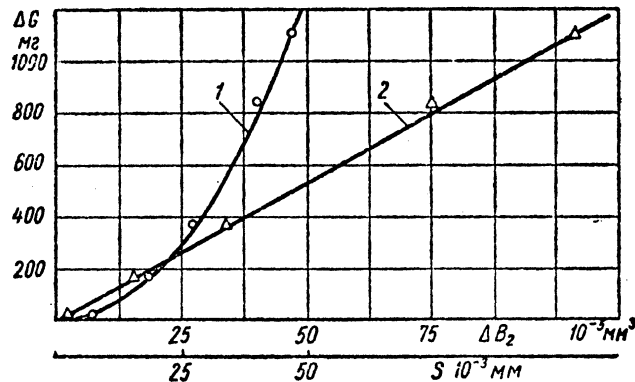
$$\frac{\Delta B_1}{\Delta B_2} = \frac{\Delta G_1}{\Delta G_2} = k. \quad (л)$$

106

Figure 105. The Shape of the Surface of 2 Specimens of Cast Iron Tested Under Velocity v_1 of a Jet with Abrasive Particles (mag. $\times 30$); a) $v_1 = 18$ m/sec., b) $v_1 = 80$ m/sec.

Это соотношение справедливо для определенного содержания абразива в воде и определенной скорости удара. Рассмотрим, как влияют эти факторы на указанное соотношение.

Прежде всего нами было установлено, что глубина и объем отпечатков-лунок остаются постоянными и при увеличении содержания абразива в воде (Π), а износ в это время растет линейно (фиг. 102). Это доказывает, что соотношение (л) остается в этом случае постоянным и равным k . Если бы это было не так, то мы не имели бы линейной зависимости износа от Π . Например, при увеличении или уменьшении k мы получили бы одну из параболических зависимостей износа в функции от Π .



Фиг. 106. Зависимость износа от глубины s отпечатков абразивных частиц (1) и от объема ΔB_2 лунок (2).

При оценке влияния скорости соударения v_1 на k , напомним, что с увеличением v_1 увеличивается глубина лунок-отпечатков. Зависимость износа от глубины лунок выражается криволинейно (фиг. 106, кривая 1), но зависимость износа от объема пластически выдавленного металла ΔB_2 выражается прямолинейно (фиг. 106, прямая 2). Последнее доказывает, что и в этом случае соотношение (л) справедливо.

Как видно из фиг. 101, 102 и 103 указанные закономерности гидроабразивного износа верны не только для армо-железа, но и для латуни, стали Ст. 3 и стали нержавеющей, поэтому можно утверждать, что соотношение (л) в пределах каждого материала остается постоянным и не зависит от v_1 , Π и продолжительности износа.

Таким образом, коэффициент k для данных условий опытов зависит только от материала. Тогда на основании соотношения (л) средний объем удаленного металла при ударе одной частицы равен

$$\Delta B_1 = k \Delta B_2, \quad (м)$$

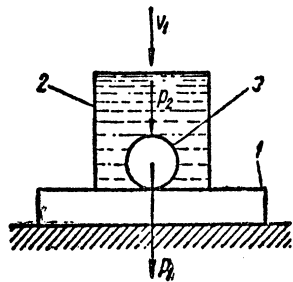
где k — коэффициент, постоянный для всех условий;

107

Figure 106. The Dependence of Wear on the Depth S of the Impressions of Abrasive Particles (1) and on the Volume ΔB_2 of the hole (2).

ΔV_2 — объем пластически выдавленного металла при ударе одной частицы.

Объем пластически выдавленного металла можно определить теоретически. Рассмотрим схему сил, приложенных к частице в момент удара (фиг. 107). Для удобства образец 1 примем неподвижным; объем воды 2, содержащей абразивные частицы 3, ударяет о поверхность образца со скоростью v_1 . Работа частицы в момент удара складывается из потери кинетической энергии, а также из работы приложенных к частице сил: гидродинамического сопротивления, поддерживающей силы и силы тяжести.



Фиг. 107. Схема сил, действующих на абразивную частицу при ударе:

1 — образец; 2 — объем воды; 3 — абразивная частица.

Вследствие малости абразивных частиц, значения поддерживающей (Архимедовой) силы и силы тяжести незначительны (по сравнению, например, с силой, возникающей при ударе частицы за счет ее движения). Учитывая также, что указанные силы направлены в противоположные стороны, можем ими пренебречь.

Рассмотрим силу гидродинамического (лобового) сопротивления P_2 . В данном случае эта сила наиболее полно проявляется при торможении частицы в момент ее удара о преграду. В это время объем воды деформируется; в процессе деформации вода, окружающая заторможенную частицу, обтекает последнюю со скоростью, равной v_1 , и, вследствие эффекта лобового сопротивления частицы, производит на последнюю давление.

В понятие силы лобового сопротивления P_2 входит так называемая сила сопротивления давления и сила сопротивления трения. Первая объединяет, в свою очередь, два компонента: вихревое сопротивление $P_{2в}$ и силу $P_{2ц}$, которая определяется как результат воздействия на частицу циркуляционного потока. Полная сила лобового сопротивления получает в конечном итоге выражение

$$P_2 = \frac{1}{2} c_x \rho F v_1^2, \quad (II)$$

где c_x — коэффициент лобового сопротивления, который включает в себя коэффициенты сопротивления перечисленных выше компонентов сил гидродинамического сопротивления;

ρ — плотность жидкости;

F — площадь поперечного сечения абразивной частицы;

v_1 — скорость потока относительно заторможенной частицы.

Коэффициент c_x зависит от числа Рейнольдса и может быть найден по графикам, данным В. С. Яблонским [20]. Для нашего случая, принимая частицу за шар, для числа Рейнольдса $Re = 10^4$ значение $c_x = 0,4$.

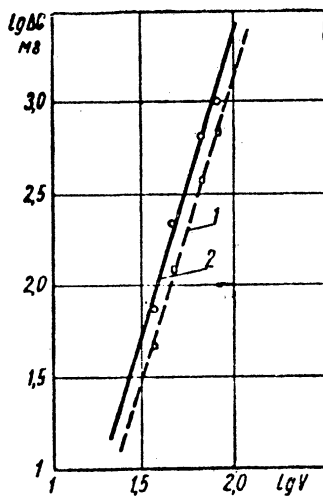
108

Figure 107. Schematic of the Force Exerted on the Abrasive Particle by the Jet; 1) specimen, 2) water slug, 3) abrasive particle.

Таблица 10

| Скорость удара в м/сек | Износ в мг при содержании абразива в воде | | | |
|------------------------|---|------------|----------|------------|
| | 2% | | 10% | |
| | Из опыта | По формуле | Из опыта | По формуле |
| 18 | 7 | 10,6 | 21 | 49 |
| 36 | 33 | 42 | 168 | 212 |
| 45 | 80 | 70 | 375 | 347 |
| 66 | 170 | 143 | 825 | 715 |
| 80 | 225 | 210 | — | — |

Формула износа (ш) получена для разных скоростей удара при постоянном числе ударов. Однако оценку износа можно так-



Фиг. 108. Зависимость износа образцов из армо-железа от скорости удара частиц при одинаковом времени испытаний (в логарифмических координатах): 1 — при содержании абразива в воде 6%; 2 — при содержании абразива в воде 10%.

Подставив это значение N в формулу (ш), получим

$$\Delta G = \frac{k\alpha\gamma_1\gamma_2(B_4\Pi) \Delta t v_1^3 (1 - k_2^2)}{2g\pi D_3 H_{м. дин}} \quad (10)$$

Как видно, в это выражение износа, как и следовало ожидать, скорость удара v_1 входит уже в третьей степени. Экспериментальная проверка этого факта показывает, что показатель сте-

114

Figure 108. The Dependence of the Wear of Specimen of Cast Iron on the Velocity of a Jet Slug individually (on log scale) 1) under abrasive quantity 6% in water, 2) under abrasive quantity 10% in water.

Таблица 11

| Скорость удара в м/сек | Содержание абразива в воде в % | |
|------------------------|--------------------------------|------|
| | 6 | 10 |
| | Износ в мг за 20 мин | |
| 36 | 46 | 76 |
| 46 | 122 | 220 |
| 66 | 388 | 648 |
| 80 | 678 | 1100 |

же произвести и за постоянный отрезок времени. Для этого необходимо число ударов N выразить через скорость удара. Для нашего случая эта связь имеет вид:

$$N = \frac{v_1}{\pi D_3} \Delta t,$$

где Δt — время;

D_3 — диаметр окружности, по которой вращаются образцы.

Для случая кавитации в потоке эта связь иная.

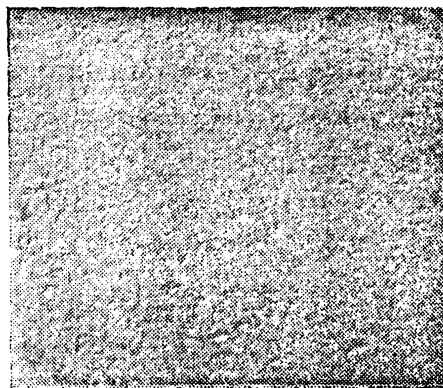
Подставив это значение N в формулу (ш), получим

пени n при скорости v_1 равен 3,1 (фиг. 108). Здесь прямая 1 показывает зависимость износа образца из армко-железа при содержании абразива в воде 6%; а прямая 2 — при содержании 10%. Условия опытов соответствуют данным на стр. 103 (внизу).

Результаты опытов приведены в табл. 11.

Как уже упоминалось, коэффициент k , входящий в формулы (ш) и (ю), найден экспериментально при допущении, что каждая абразивная частица участвует в износе и производит отделение какого-то объема металла. Однако такое допущение можно сделать только в целях упрощения картины, тем более, что это не отражается на подсчете износа.

В заключение необходимо отметить, что многие детали различных гидромашин при гидроабразивном износе также подвержены ударным воздействиям абразивных частиц под углами 60—90°. На фиг. 109 приведен вид поверхности люка трубопровода землесоса, на которой видны вмятины — следы ударов твердых частиц.

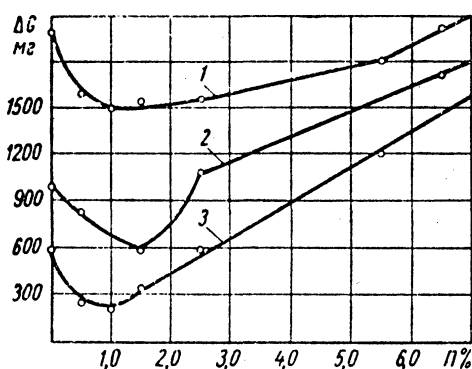


Фиг. 109. Вид изношенной поверхности люка трубопровода землесоса (уменьшено в 5 раз).

Figure 109. The Shape of the Surface of the Hatch on a Suction Dredge Pipe.

СОВМЕСТНЫЙ КАВИТАЦИОННО-АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС

В процессе совместного кавитационно-абразивного износа на изнашиваемую поверхность совместно воздействуют удары водяных струй и абразивных частиц, содержащихся в них. В результате происходит как бы наложение одного вида износа на другой.



Фиг. 110. Изменение кавитационно-абразивного износа в зависимости от содержания абразивных частиц в воде: 1 — армо-железо; 2 — сталь Ст. 3; 3 — сталь 1X18H9T.

При этом, вследствие различия механизма этих двух воздействий, совместный износ может протекать по иным законам, чем разобранные нами выше. Напомним особенности кавитационного и абразивного видов износа, протекающих по отдельности:

а. Зависимость кавитационного износа от скорости удара объема воды выражается показателем степени в пределах 6—14, а зависимость абразивного износа от скорости — только во 2-й степени.

б. Развитие кавитационного износа во времени является сложным (фиг. 93), в то время как абразивный износ во времени протекает линейно (фиг. 101).

в. В процессе кавитационного износа обнаруживается «инкубационный» период, в течение которого видимого износа не происходит; при абразивном износе такого периода практически не обнаруживается.

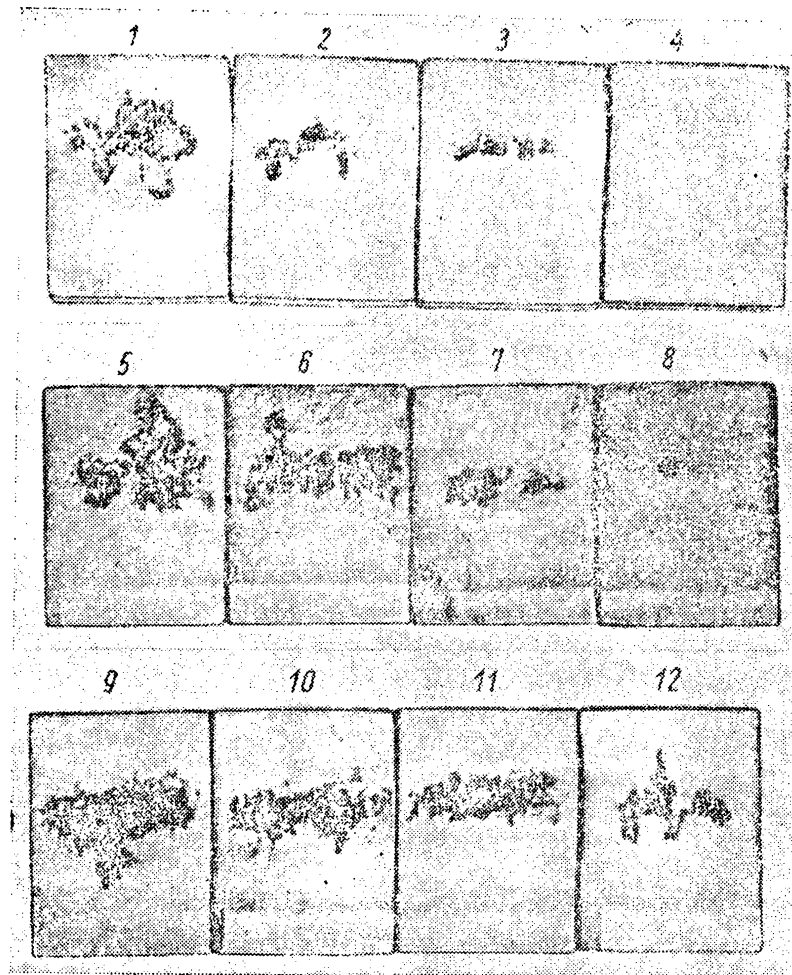
г. Разрушение металлов при кавитационном воздействии происходит главным образом вследствие усталостных явлений, протекающих с большим числом циклов нагружений. Абразивный износ протекает почти при одноактных нагружениях-ударах.

Рассмотрим основные варианты совместного износа.

1. Время совместного износа, или число соударений струи воды, содержащей абразивные частицы, и образца, меньше «ин-

Figure 110. The Dependence of the Cavitation Abrasive Wear on the Quantity of the Abrasive Particles in Water; 1) cast iron, 2) steel Ct -3, 3) steel, 1 X18 H 9 T.

кубационного» периода для кавитационного износа. В этом случае кавитационный износ еще не успевает проявиться и мы имеем только абразивный износ. Износ в зависимости от содержания абразивных частиц в струе протекает линейно (фиг. 102). Поверхности изношенных образцов имеют следы только абразивного воздействия.



Фиг. 111. Поверхности образцов при кавитационно-абразивном износе: 1, 2, 3, 4 — образцы из стали 1X18H9T; 5, 6, 7, 8 — образцы из стали Ct -3; 9, 10, 11, 12 — образцы из армо-железа.

2. Время совместного износа значительно превышает «инкубационный» период изнашиваемого металла. Кроме того, последний обладает относительно высокой кавитационной стойкостью. В этом случае кавитационный износ при использовании чистой воды достигает уже значительных величин (фиг. 110),

117

Figure 111. The Surfaces of Specimens Damaged by Cavitation; 1, 2, 3, 4) specimens of steel, 1 X 18 H 9 T; 5, 6, 7, 8) specimens of steel, Ct -3, 11, 12) specimens of steel, cast iron.

тационную стойкость меньше, чем армо-железо, то падение износа по мере присадки абразива вообще не наблюдается. Вместе с тем здесь в какой-то период не происходит и увеличения износа; последний имеет почти постоянное значение. Криволинейный участок совместного износа здесь выглядит, примерно, прямой линией, параллельной оси ординат. Лишь при дальнейшем увеличении содержания абразива η (более 3%) наблюдается линейное возрастание износа.

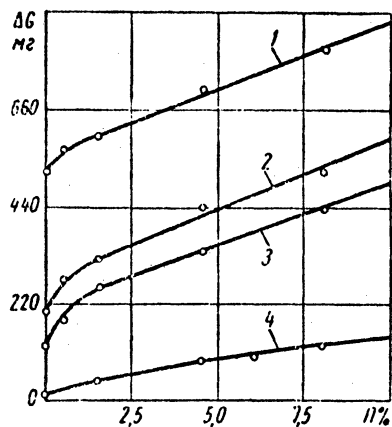
3. Третьим вариантом, который может представлять интерес, является случай, когда интенсивность кавитационного износа значительно превосходит интенсивность абразивного износа. При этом «инкубационный» период для кавитационного износа является незначительным, т.е. сила ударов струй чистой воды такова, что приводит к разрушению металла за несколько ударов.

Это может произойти или вследствие дальнейшего увеличения скорости удара, или при использовании металлов низкой кавитационной стойкости.

На фиг. 112 показана соответствующая третьему варианту зависимость износа образцов из алюминия от содержания абразива в воде.

Условия опытов соответствуют данным на стр. 118, за исключением числа ударов N , которое равнялось $19 \cdot 10^3$.

Результаты опытов сведены в табл. 13.



Фиг. 112. Зависимость кавитационно-абразивного износа от содержания абразивных частиц в воде при разных скоростях.

Таблица 13

| Скорость удара частиц в м/сек | Содержание абразива в воде в % | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 0,5 | 1,5 | 4,5 | 8 | 10 |
| | Износ образцов в мг | | | | | |
| 51 | 12 | — | 44 | 92 | 128 | 152 |
| 62 | 120 | 180 | 260 | 340 | 440 | 492 |
| 66 | 200 | 272 | 320 | 444 | 524 | 600 |
| 76 | 520 | 568 | 600 | 708 | 800 | 860 |

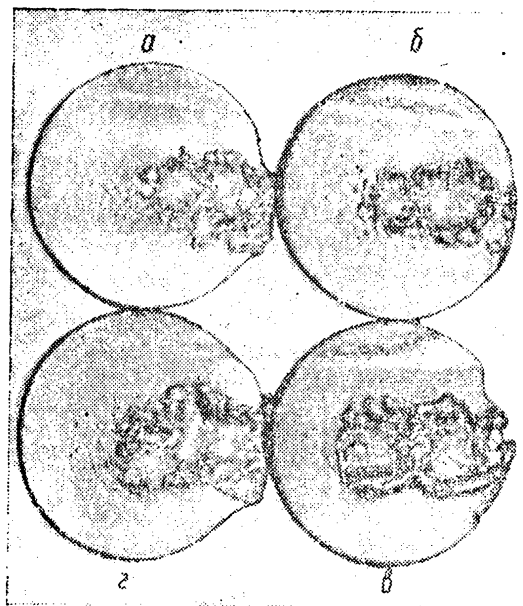
Из табл. 13 и фиг. 112 видно, что при скорости удара частиц $v_1 = 51$ м/сек и добавлении абразива в воду до 1,5% износ по сравнению с ударами чистой водой увеличился почти в 4 раза.

119

Figure 112. The Dependence of Cavitation Abrasive Damage on the Quantity of Abrasive Particles in Water at Different Velocities.

Для скорости 62 м/сек увеличение износа произошло более чем в 2 раза, а для скорости 66 м/сек — в 1,5 раза.

При еще больших скоростях удара увеличение износа происходит в меньшей степени. Кривые изменения износа имеют по два характерных участка. Первые участки криволинейные и соответствуют быстрому нарастанию износа по мере увеличения содержания абразива в воде; вторые участки прямолнейные и



Фиг. 113. Поверхности алюминиевых образцов при кавитационно-абразивном износе.

соответствуют более медленному нарастанию износа. Как видно, в данном случае, в противоположность опытам, отраженным на фиг. 110, при добавлении абразива наблюдается не уменьшение износа, а, наоборот, его резкое возрастание. Изношенные поверхности образцов в этом случае, при любом содержании абразива в воде, сохраняют следы кавитационного воздействия. На фиг. 113, а показана поверхность образца, разрушенная ударами чистой воды при скорости $v_1 = 66$ м/сек, а на фиг. 113, б поверхность, разрушенная при этой же скорости, но при добавлении в воду абразива в количестве 0,5% по объему. На фиг. 113, в показана поверхность образца, испытанного при скорости $v_1 = 75$ м/сек при соударении со струей чистой воды, а на фиг. 113, г показан образец, испытанный при той же скорости удара, но при содержании абразива в воде в количестве 8%.

Из приведенных видов поверхностей изношенных образцов можно установить, что интенсивность кавитационных разрушений при наличии абразива в воде в данном случае остается постоян-

120

Figure 113. The Surface of Aluminum Specimens Damaged by Cavitation Abrasive.

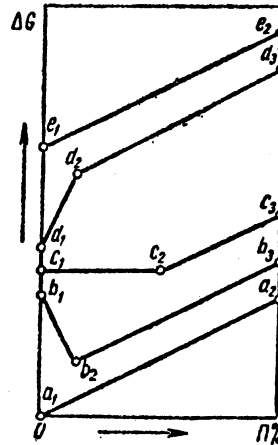
ной; абразивные частицы как бы зачищают неровности, полученные от воздействия кавитации.

Для удобства все полученные выше основные зависимости кавитационно-абразивного износа рассмотрим совместно. На фиг. 114 линии a_1a_2 , $b_1b_2b_3$, $c_1c_2c_3$ относятся к варианту, когда кавитационный износ протекает с значительным «инкубационным» периодом. Линия a_1a_2 характеризует износ в том случае, когда продолжительность его меньше длительности «инкубационного» периода. Кавитационный износ в этом случае отсутствует и наблюдается обычный гидроабразивный износ. То же происходит и в случае, когда скорость абразивного износа значительно превосходит скорость износа от кавитации. На участке b_1b_2 , по мере увеличения содержания абразива в воде, происходит уменьшение совместного износа. Последнее происходит под воздействием абразивного износа, который накладывается на износ от ударов объемов воды.

Как отмечалось ранее, кавитационный износ, если он протекает с длительным «инкубационным» периодом, начинается с образования микротрещин в поверхностном слое металла, которые затем сильно прогрессируют вглубину и приводят, таким образом, к выколу относительно больших объемов металла. Абразивный износ производит шлифовывание тонкого слоя металла и в этом случае предохраняет поверхность от зарождения кавитационных трещин и выкола.

Уменьшение кавитационно-абразивного износа может происходить до тех пор, пока скорость кавитационного износа несколько больше скорости абразивного. Как только за счет увеличения количества абразива скорость абразивного износа начнет превышать скорость износа от кавитации, то на участке b_2b_3 происходит возрастание износа. При этом абразивный износ опережает кавитационный и тем самым как бы подавляет его. Это хорошо подтверждается видом изношенных поверхностей (фиг. 111).

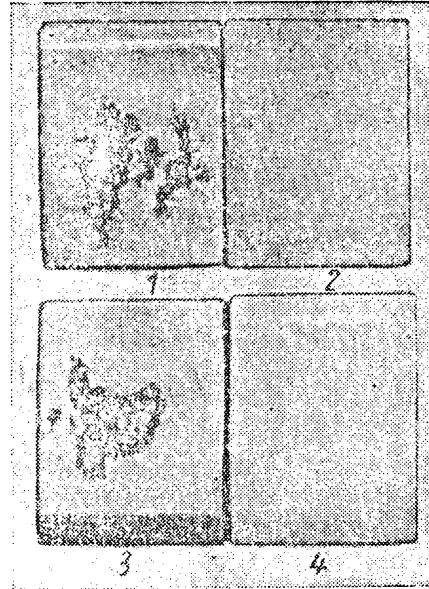
Линия c_1c_2 (фиг. 114) характеризует износ в том случае, когда скорость кавитационного износа значительно опережает скорость абразивного. В этот момент интенсивность абразивного воздействия недостаточна для изменения хода кавитационного износа. Лишь в дальнейшем, по мере увеличения количества абразива, абразивный износ начинает накладываться на кавитационный и, таким образом, увеличивать совместный износ (участок c_2c_3).



Фиг. 114. Характер зависимостей кавитационно-абразивного износа от содержания абразивных частиц в воде.

Figure 114. The Dependence of Abrasive Cavitation Damage on the Quantity of Abrasive Particles in Water.

новлено, что первые следы износа на поверхности образца появились через 40 мин, а к концу испытаний глубина полученной раковины достигла 5,2 мм (фиг. 115, 1). Затем ставился второй опыт с таким же образцом и при тех же условиях опыта. Однако в данном случае образец изнашивался непрерывно в течение 40 мин, т. е. в течение времени «инкубационного» периода, а затем снимался с установки, и с его поверхности наждачной бумагой сошлифовывался поверхностный слой толщиной 0,05 мм. После этого образец снова подвергался испытанию в течение 40 мин и затем поверхностный слой толщиной 0,05 мм удалялся еще раз. В итоге за 120 мин испытаний на поверхности образца заметных следов износа не получено (фиг. 115, 2). Общая толщина сошлифованного слоя образца за две операции составила 0,1 мм, глубина раковины кавитационного износа за это же время составляет 5,2 мм. Таким образом, двумя периодическими сошлифовываниями износостойкость образца из стали Ст. 3 в данном случае как бы повысилась в 52 раза.



Аналогичные опыты были проделаны на образцах из нержавеющей стали 1Х18Н9Т. Глубина раковины кавитационного износа за 120 мин непрерывных испытаний оказалась равной 3,6 мм (фиг. 115, 3). Сошлифовывание слоя толщиной 0,05 мм на этом образце производилось также дважды через 40 мин испытаний. В результате образец видимого износа не получил (фиг. 115, 4). Сошлифовывание в данном случае повысило износостойкость в 36 раз.

При соответствующем подборе толщины удаляемых слоев металла и периодов между шлифованиями величины износостойкости могут быть уточнены.

Из приведенных опытов видно, что уменьшение износа при введении абразива в струю воды не вызывается какими-то изменениями в струе, так как струя здесь оставалась неизменной.

Таким образом, при совместном кавитационно-абразивном воздействии возможно множество вариантов протекания совместного износа, при этом величина его по сравнению с кавитаци-

Figure 115. The Surface of Specimens after Impact from a Jet of Pure Water Slugs.

Условия опыта соответствуют данным на стр. 118.

По данным табл. 14 на фиг. 116 в логарифмических координатах построена зависимость совместного кавитационно-абразивного износа от скорости соударения образца и струи воды.

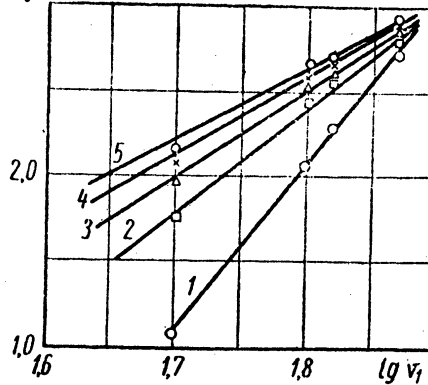
Эмпирическая формула $\lg \Delta G$ этой зависимости имеет вид:

$$\Delta G = Av_1^n,$$

где A и n — зависят от содержания Π абразива в воде. Некоторые значения A и n для алюминия даны в табл. 15.

Таблица 15

| Π в % | A | n |
|-----------|---------------------|-----|
| 0 | $79 \cdot 10^{-17}$ | 9,5 |
| 2,5 | $32 \cdot 10^{-10}$ | 6 |
| 5 | $28 \cdot 10^{-8}$ | 5 |
| 7,5 | $21 \cdot 10^{-7}$ | 4,6 |
| 10 | $30 \cdot 10^{-6}$ | 4 |



Фиг. 116. Зависимость кавитационно-абразивного износа от скорости соударения (в логарифмических координатах):

1 — в чистой воде; 2-5 — при содержании в воде абразивных частиц в % по объему: 2,5% (2), 5% (3); 7,5% (4) и 10% (5).

Уравнение зависимости n от Π имеет вид:

$$n = 9,5^{1 - \frac{\Pi}{24}},$$

где Π — содержание абразива в воде в % по объему.

Как было показано ранее, кавитационный износ, в зависимости от стадии износа, зависит от скорости v_1 соударения в степени $n = 14 \div 6$, а абразивный износ зависит от скорости только в степени $n = 2$. Поэтому при совместном кавитационно-абразивном износе по мере преобладания абразивного износа наблюдается уменьшение показателя степени n .

Figure 116. The Dependence of Abrasive Cavitation Wear on the Velocity of the Jet (on a log scale); 1) pure water; 2-5) water and abrasive particles at volumetric % of 2.5%, 5%, 7.5% and 10%, respectively.

Таблица 17

| Наплавки | $H_{\mu \max}$ | $H_{\mu \min}$ | HV | Наплавки | $H_{\mu \max}$ | $H_{\mu \min}$ | HV |
|----------|----------------|----------------|------|----------|----------------|----------------|------|
| ЭТН-1 | 830 | 480 | 300 | ОЗИ-1В | 840 | 670 | 550 |
| ЭТН-2 | 840 | 470 | 350 | ВСН-6 | 509 | 786 | 415 |
| ОЗИ-1 | 508 | 503 | 484 | БХ | 1200 | 792 | 1016 |
| Т-620 | 747 | 685 | 657 | КБХ | 763 | 684 | 720 |
| ЭН-60М | 726 | 592 | 635 | УС | 707 | 480 | 550 |

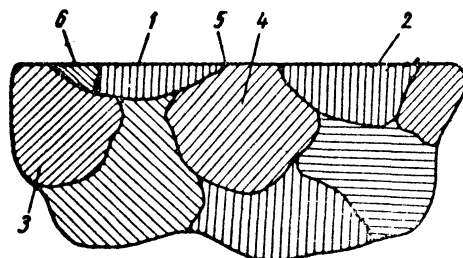
Результаты испытаний наплавов на кавитационный износ при вышеуказанных условиях опыта представлены в табл. 18.

Таблица 18

| Наплавки | Потеря массы в мг | | Относительная износостойкость ξ_1 |
|----------|-------------------|---------|---------------------------------------|
| | образца | эталона | |
| ЭТН-1 | 145 | 3760 | 26 |
| ЭТН-2 | 95 | 3810 | 40 |
| ОЗИ-1 | 623 | 3740 | 6 |
| Т-620 | 77 | 3840 | 50 |
| ЭН-60М | 50 | 3600 | 72 |
| ОЗИ-1В | 20 | 3835 | 200 |
| ВСН-6 | 106 | 3618 | 34 |
| БХ | 279 | 3915 | 15 |
| КБХ | 18 | 4170 | 232 |
| УС | 93 | 3734 | 40 |

Среди наплавов этой группы наиболее устойчивой против кавитационного воздействия оказалась наплавка КБХ (смесь карбидов, боридов хрома и железного порошка). Порошок КБХ

дает наплавленный металл с высоким содержанием углерода и хрома с добавками бора. Структурно наплавленный слой состоит из эвтектики и избыточных кристаллов борида и карбида. Кристаллы в виде правильных шестиугольников равномерно распределены по полю шлифа. Износ наплавки КБХ при ударах объемов воды, как показывают наблюдения, протекает одновременно



Фиг. 117. Схема разрушения наплавов по границам зерен:

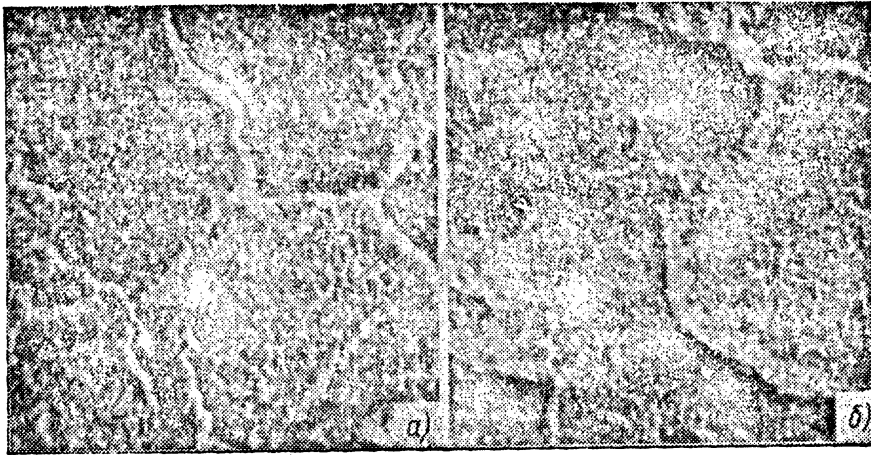
1-4 — зерна металла; 5 — микротрещина; 6 — выкол частицы.

менно по границам зерен или микрообъемов и отдельных структурных составляющих в пределах микрообъемов. При этом износ по границам протекает более интенсивно.

Механизм износа, протекающий по границам зерен, представляется следующим: зерна наплавки или их скопления на поверх-

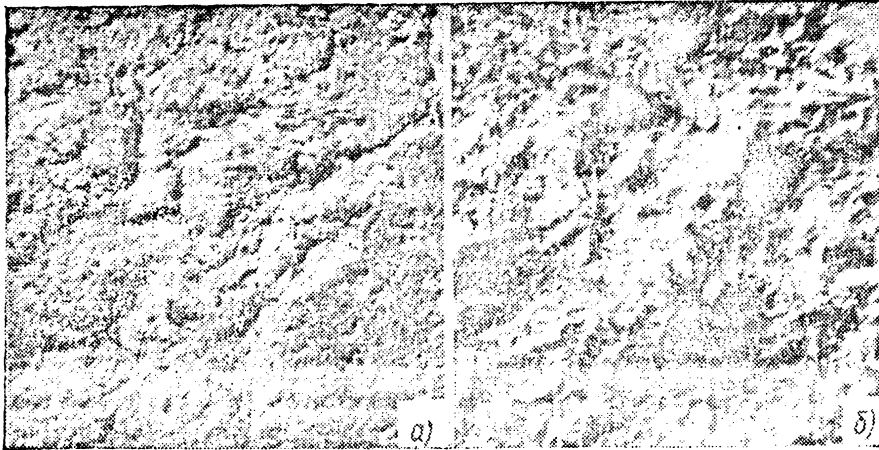
Figure 117. Schematic of the Damage for a Seam Welding Grain Boundary; 1-4) boundary of the metal, 5) micro-crack, 6) displaced grain.

ности образца имеют различную ориентацию и различное расположение относительно поверхности (фиг. 117). Одни зерна (1, 2) пересекаются поверхностью, чем облегчаются условия их



Фиг. 118. Выколы частиц по границам зерен наплавки КБХ (увеличено в 100 раз):
а — начальная стадия; б — последующая стадия.

выкрашивания, другие (3, 4) сохраняют значительное сцепление с окружающими зернами, находясь как бы в заклиненном со-



Фиг. 119. Развитие износа наплавки КБХ (увеличено в 100 раз):
а — выкол зерна; б — сплошной износ.

стоянии. Под воздействием переменных усилий через некоторый промежуток времени по границам этих зерен 1, 2 появляются микротрещины 5, затем после распространения трещины в глуби-

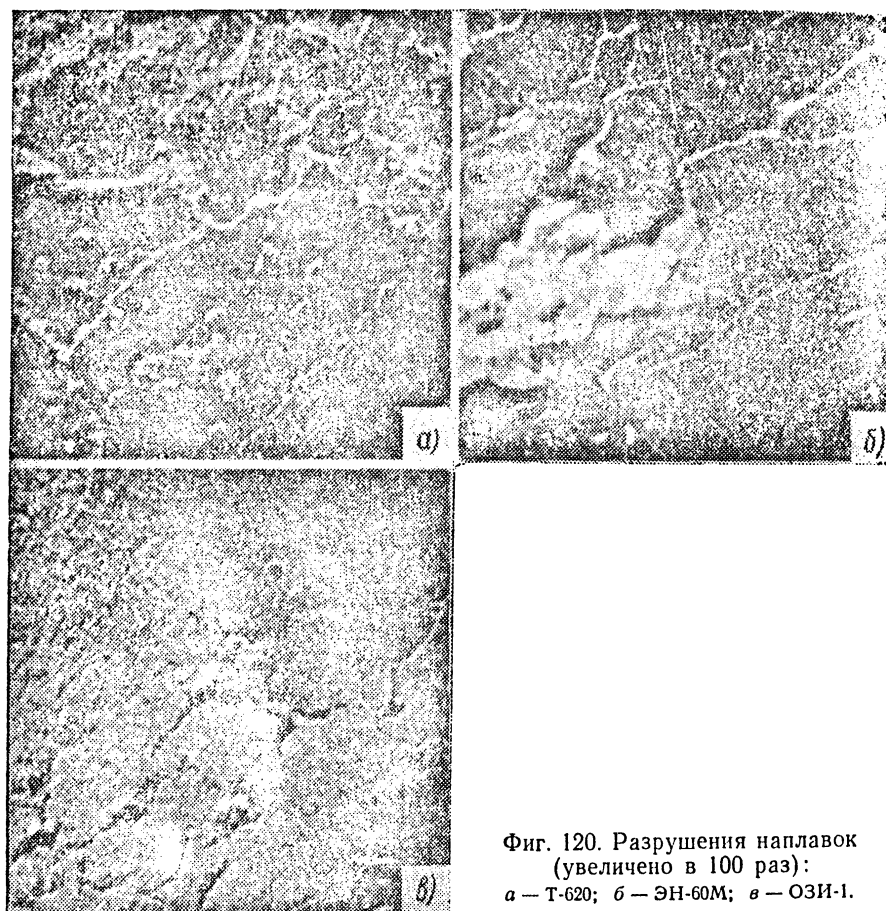
9 2148

129

Figure 118. Displaced Grains at the Grain Boundary for a Seam Welding, КБХ (mag. x 100); a) initial stage, b) final stage.

Figure 119. The Development of Damage for a Seam Welding КБХ (mag x 10); a) displaced boundary, b) complete damage.

ну происходит отделение частиц металла *б* вдоль тонкой кромки зерна. На фиг. 118 показаны выколы частиц металла по границам зерен наплавки КБХ. Затем, когда трещины распространяются вглубь, с охватом зерна, оно отделяется полностью (фиг. 119, *а*).



Фиг. 120. Разрушения наплавов (увеличено в 100 раз):
а — Т-620; *б* — ЭН-60М; *в* — ОЗИ-1.

Одновременно с поверхности зерен происходит удаление отдельных микрочастиц. На фиг. 118 эти выколы видны в виде мелких белых пятен, беспорядочно расположенных на поле зерна. Однако отделение этих частиц идет менее интенсивно, чем разрушение границ зерна. Вид поверхности образца после 2,5 ч испытаний показан на фиг. 119, *б*.

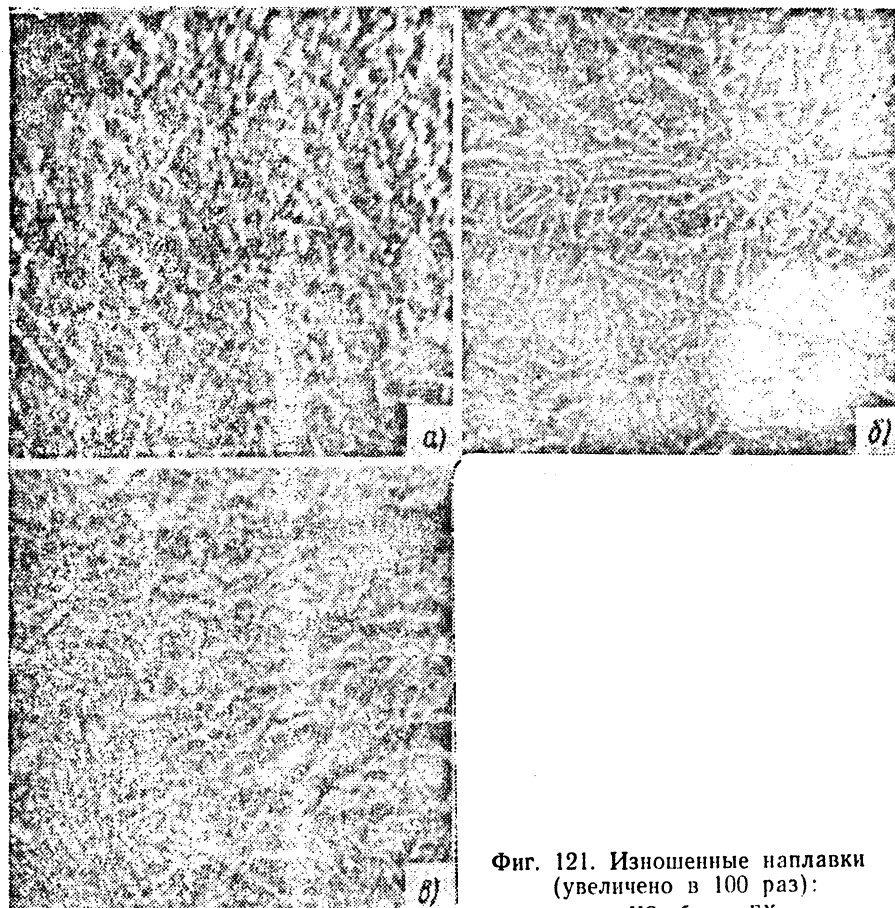
Характер разрушения наплавов ЭН-60М, Т-620 и ОЗИ-1 аналогичен рассмотренному, но проявляется с бóльшей интенсивностью.

130

Figure 120. Damaged Seam Weldings (mag. $\times 100$); *a*) Т-620, *б*) ЭН-60М, *в*) ОЗИ-1.

На фиг. 120, б показано разрушение наплавки ЭН-60М, на фиг. 120, в — начало разрушения поверхности наименее износостойчивой наплавки ОЗИ-1.

Несколько по-иному разрушаются наплавки УС, ЭТН-1 и ЭТН-2. Здесь происходит равномерное выкалывание небольших объемов металла (фиг. 121, а), но в целом потери массы образца большие.



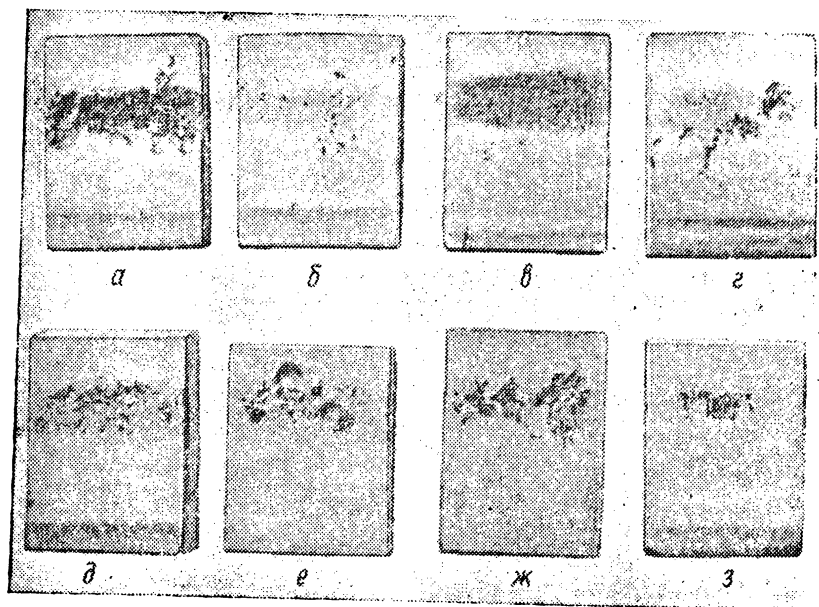
Фиг. 121. Изношенные наплавки (увеличено в 100 раз):
а — УС; б, в — БХ.

Представляет интерес характер износа наплавки БХ. Эта наплавка состоит из кристаллов боридов хрома и эвтектики. В начальный момент разрушения происходит выкалывание боридов хрома и на поверхности образуются канавки, соответствующие форме и размерам боридов (фиг. 121, б). Затем, по мере развития износа, происходит удаление оставшихся выступов эвтектики (фиг. 121, в).

131

Figure 121. Damaged Seam Weldings (mag. x100); а) УС, б, в) БХ.

Вид макроразрушений для большинства наплавов также не одинаков. На фиг. 122 представлен вид поверхностей некоторых наплавов после 100 мин испытаний на струеударной установке. Из рассмотренного выше можно видеть, что стойкость наплавов против ударного воздействия объемов воды (кавитационного износа) определяется комплексом факторов, куда входит, прежде всего, способность отдельных структурных составляющих, а



Фиг. 122. Разрушения наплавов:
 а — эталон; б — КБХ; в — Т-620; г — ЭН-60М; д — БХ; е — УС; ж — ОЗИ-1;
 з — ЭТН-1.

также зерен и их границ, противостоять высокочастотному ударному воздействию объемов воды. Четкой связи для этой группы наплавов между износостойкостью и твердостью не наблюдалось.

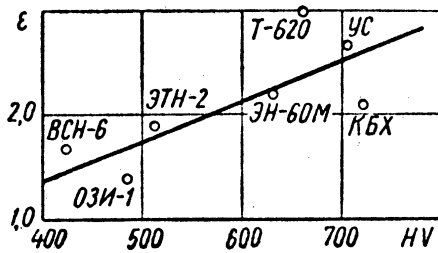
Необходимо отметить, что испытанные наплавки имеют существенное различие по химическому составу, микроструктуре и твердости, поэтому пока не представляется возможным оценить влияние легирующих элементов на износостойкость по отдельности.

Таким образом, отдельно взятые химический состав наплавов, твердость их структурных составляющих и микроструктура не определяют износостойкости однозначно. Износостойкость зависит от сочетания множества этих и других факторов, поэтому качество наплавки может быть выявлено пока только лишь при испытании на износ.

132

Figure 122. Damaged Seam Weldings; a) standard, b) КБХ, в) Т-620, г) ЭН-60М, д) БХ, е) УС, ж) ОЗИ-1, з) ЭТН-1.

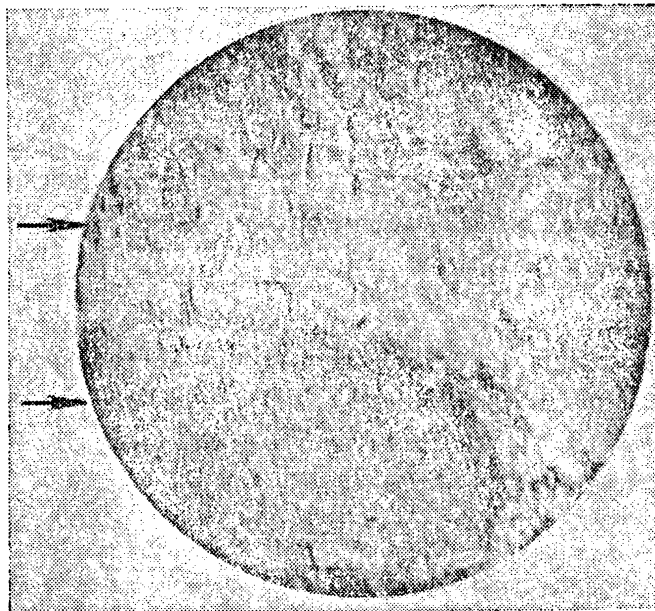
В целом механизм гидроабразивного износа наплавки соответствует механизму износа однородных металлов (гл. VII). Но, если наплавка имеет участки, резко неоднородные по микро-



Фиг. 123. Зависимость относительной износостойкости ϵ_2 наплавки от их твердости HV .

твердости и другим свойствам, то износ ослабленных участков протекает более интенсивно. Так, например, на поверхности наплавки БХ под микроскопом видны выступающие бориды хрома; менее износоустойчивая основа вокруг боридов изнашивается быстрее. Если сравнить характеры износа при кавитационном и гидроабразивном износе, то можно установить, что при гидроабразив-

ном износе происходит удаление частиц металла значительно меньших размеров, чем при кавитационном, и, таким, образом, износ поверхности происходит более равномерно.



Фиг. 124. Износ наплавки крышки люка улитки землеса (уменьшено в 6 раз).

По данным табл. 19 видно, что при переходе от кавитационного к гидроабразивному износу происходит резкое падение относительной износостойкости и, вместе с тем, износостойкость как бы нивелируется.

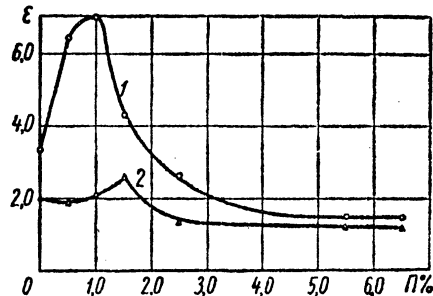
134

Figure 123. The Dependence of the Relative Stable Wear ϵ_2 of Seam Welding on Hardness HV .

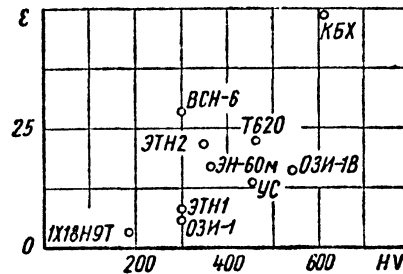
Figure 124. Wear on a Seam Welding on the Corner of Hatch of a Helix of a Suction Dredge (mag. x6).

произведен только путем его испытания на совместный кавитационно-абразивный износ.

Данные по совместному износу наплавов приведены в табл. 20. В общем случае, из табл. 20 можно видеть, что при переходе от кавитационного износа к кавитационно-абразивному, происходит падение величины относительной износостойкости наплавов в несколько раз и, вместе с тем, происходит как бы нивелирование износостойкости. Так, если, например, при кавитационном



Фиг. 125. Относительная износостойкость ϵ сталей при кавитационно-абразивном износе: 1 — сталь 1X18H9T; 2 — сталь Ст. 3.



Фиг. 126. Зависимость от относительной износостойкости ϵ наплавов от их твердости при кавитационно-абразивном износе.

износе отношение наибольшей износостойкости наплавов к наименьшей равно 38, то при кавитационно-абразивном оно равно 12, а при гидроабразивном только 1,5.

Таблица 20

| Наплавка | Потеря массы в мг | | Относительная износостойкость |
|----------|-------------------|---------|-------------------------------|
| | образца | эталона | |
| ЭТН-1 | 343 | 2740 | 8 |
| ЭТН-2 | 119 | 2615 | 22 |
| ОЗИ-1 | 453 | 2719 | 6 |
| Т-620 | 127 | 2805 | 22 |
| ЭН-60М | 153 | 2600 | 17 |
| ОЗИ-1В | 156 | 2610 | 16 |
| ВСН-6 | 90 | 2535 | 28 |
| БХ | 653 | 2610 | 4 |
| КБХ | 57 | 2800 | 49 |
| УС | 193 | 3514 | 13 |

Соответственно, вид изношенных поверхностей этих наплавов также меняется. При совместном износе не происходит выколов больших объемов металла, как это наблюдалось для этих наплавов при кавитационном износе.

Закономерной связи между твердостью и износостойкостью при совместном износе наплавов (фиг. 126) также не наблюдается.

136

Figure 125. Relative Stable Wear ϵ for Steel Under Abrasive Cavitation Wear; 1) steel, 1 X18 H 9 T, 2) steel, Ct -3.

Figure 126. The Relation Between Relative Stable Wear ϵ of a Seam Welding on its Hardness, Under Abrasive Cavitation Wear.

LITERATURE CITED

- 1) Lorentz, V. F., "Wear Data by Using Abrasive Medium, Works in the First All Union Conference in Friction and Wear in Machines", TI, IZ-VO. AN USSR, 1939.
- 2) Velikanov, M. A., "Movement Drifts", Printing 1948.
- 3) Goncherov, V. N., "Movement Drifts in Uniform Flow", ONTI, 1938.
- 4) Shalnev, K. K., "Hydromechanical Aspects of Cavitation Erosion", Izvestia AN. USSR, OTN, No. 1, 1958.
- 5) Kviatkovsky, V. S., Shapov, G. F., Onakhelashvil, M. M., et al, "Small Hydroturbines", Mashgiz, 1950.
- 6) Shal'nev, K. K., "The Structure of a Cavitation Damage on Circular Profile", Izvestia AN. USSR, TN No. 5, 1954.
- 7) Orakhelashvil, M. M., "Stabilized Wear in Reaction Type Hydro-turbines", The State Engineering Publication, 1960.
- 8) Dovlnev, V. B., "Struggle with Wear in Hydroturbines with Drift Influence", VNIIG, The Province Lecture, No. 18, 195
- 9) Proskomo, G. F., "Hydrodynamic Turbo-machines", Mashgiz, 1954.
- 10) Kobeko, P. P., "Amorphous Material", published by AN. USSR, 1954.
- 11) "Friction and Boundary Lubrication", edited by I. V. Kragelshov, published in foreign literature.
- 12) Ahamovitch, G. N., "Turbo-film of Free Jets", Physmatgiz, 1948.
- 13) Kouzentsov, P. I., and Tslaf, L. Y., "On the Problem of Break-up of Liquid Jets into Drops", Technical Journal of Physics, Vol. XXVIII, No. 6, 1958.
- 14) Sedov, L. I., "Similarity Methods and Measurements in Mechanics", G. ITTL, 1954
- 15) Bogashev, I. N., and Mintz, R. I., "Cavitation Damage of Carbo-ferrous Alloys", Machgiz, 1959.
- 16) Khroushov, M. M., and Babishev, M. A., "Investigation on Metals Wear", A. N. USSR, 1960.
- 17) Kragilsky, I. V., "Wear as a Results of Repeated Deformation of Surface Layer", Publication of the Higher Education Institution - Physics, 1959, No. 5.
- 18) Kragilsky, I. V., "About Wear Protection of Rubber", (Rubber and India rubber), 1959, No. 11.



- 19) Balik, M. , "Liquid Abrasive for Metals Treatment", Machgiz, 1960.
- 20) Yblonsky, V. S. , "Critical Technical Range of Hydromachine", Physmatgiz, 1961.
- 21) Davidenkov, N. N. , "Dynamical Investigations of Metals", ONTI, 1936.
- 22) Savuin, M. N. , "Slender Fraction Jets", Machgiz, 1955.
- 23) Blyaim, E. E. , "Effect of Concentration of Sand in Water on Cavitation Damage of Steel Under Test by Blowing Stand", Electric Machines Structure, 1961, No. 1.
- 24) Shtange, I. N. , "Investigations on the Working Parts of Hydroturbines", Technical Hydro-Systems Body", 1955, No. 6.