

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ РЕАГИРУЮЩЕЙ СТРУЕЙ НАТРИЙ-ВОДА РАЗЛИЧНЫХ СТАЛЕЙ

А н н о т а ц и я - A b s t r a c t

Изложены результаты экспериментального исследования стойкости сталей марки IX2M, IX18N10T, OX12H2M и Sanikro-3I в зоне взаимодействия натрия с водяным паром. В опытах использовалась мишень в виде трубы, внутри которой за счет инертного газа создавалось избыточное давление в 95 атм. Пар при температуре 315°C и давлении 100 атм подавался через сопло в объем натрия, где находился подвижный узел мишени. Получены зависимости времени и скорости разрушения этих сталей от расстояния до сопла и от толщины стенки мишени. Показано, что стойкость стали марки Sanikro-3I в зоне взаимодействия натрия с водяным паром в 2,5 раза выше, чем стали марки IX18N10T, в 3,5 раза, чем у стали марки OX12H2M и в 6 раз, чем у стали IX2M. Получены профили разрушения на тонких мишенях для двух сталей.

The results are stated on the experimental investigations of IX2M, IX18N10T, OX12H2M and Sanikro-3I steel resistances in the sodium-steam reaction zone. A target in the form of a pipe was used in the experiments within which the excessive pressure of 95 atm. was produced with an inert gas. Steam was supplied through the nozzle to the sodium tank in which there was a movable target unit. The dependence of time-to-failure and failure rate on the distance to the nozzle and target wall thickness was estimated for these steels. It was shown that the resistance of Sanikro-3I in the sodium-steam reaction zone was 2.5, 3.5, and 6 times that of IX18N10T, OX12H2M, IX2M steels, respectively. The failure curves were obtained on thin targets for two steels.

1. ВВЕДЕНИЕ

В работах, посвященных вопросу разрушения конструкционных материалов в зоне реакции натрия [1-5], отмечается, что наибольшую скорость разрушения по сравнению с нержавеющей аустенитными сталями имеют низколегированные перлитные стали. Высокий разброс получаемых экспериментальных результатов не дает возможности установить каких-либо точных закономерностей

скорости разрушения конструкционных материалов. Необходимо отметить, что в большинстве работ как зарубежных, так и отечественных стойкость конструкционных материалов в зоне взаимодействия теплоносителей определяется величиной скорости коррозии ($\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{час}$) образца по потере его веса. Такая оценка стойкости является, на наш взгляд, ошибочной при определении скорости разрушения материалов в зоне взаимодействия натрия с водяным паром.

Исследования показали [6], что в зоне взаимодействия натрия с паром различные стали имеют локальную форму разрушения. На небольших расстояниях от образца (мишени) до сопла, через которое подавался пар, форма разрушения имеет вид "коронн", с увеличением расстояния при неизменном диаметре сопла она переходит в плавную выемку. Учитывая, что разрушение не является равномерным по площади, что время прожигания мишени не зависит от ее размеров, скорость разрушения конструкционных материалов необходимо определять по максимальной глубине разрушения ($\text{мм}/\text{сек}$). Так, например, нами было установлено, что на расстоянии до 50 диаметров сопла максимальная скорость разрушения для стали марки IX2M и IX18N10T составляет 140 и 55 $\text{мм}/\text{сек}$ соответственно, т.е. в парогенераторе имеется возможность образования сквозных отверстий на соседних трубках толщиной 2,5 мм из стали марки IX2M через 20 сек, а из стали марки IX18N10T - через 45 сек.

Как уже отмечалось [6], в зоне реакции натрия с водой локального разрушения конструкционных материалов не обнаружено. Например, скорость коррозии стали IX18N10T при изменении начальной температуры натрия от 300 до 600°C увеличивалась в 6 раз и составила 0,01-0,06 $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{сек}$. Мишень находилась в этих опытах на расстоянии 20 диаметров от сопла. Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что наибольшую опасность для парогенератора представляет течь водяного пара в натрий, так как разрушение трубного пучка может произойти за время, гораздо меньшее, чем время обнаружения течи с помощью существующих датчиков. Итак, изучение стойкости различных сталей в зоне взаимодействия пара с натрием является, по-видимому, в настоящее время одним из важных вопросов в выборе конструкционного материала парогенератора.

2. МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

В ранее проведенных экспериментах по изучению процесса взаимодействия натрия с водой на различных моделях было выяс-

нено, что влияние сносящего потока натрия и эффекта охлаждения внутренней стенки водой на время прожигания мишени незначительно [6], поэтому в данной серии опытов по изучению стойкости различных сталей в зоне взаимодействия эти эффекты не имитировались.

Нами исследовались стали марки IX2M, OX12H2M, IX18H10T и Sanicko-3I, химический состав которых приведен в табл. I.

Эксперименты проводились на статическом стенде (рис. I). Перед опытом бак экспериментального участка I через вентиль H1 заправлялся натрием в количестве 2,5 кг из емкости чистого натрия 5 при избыточном давлении инертного газа в ней I-I,5 атм. Для контроля количества заправляемого натрия использовался подвижный контактный уровнемер. Во время разогрева бака I производилась несколько раз продувка сопла 6 инертным газом через вентили A5 и I5. Сопло с запорной иглой, имеющей дистанционное управление, вводится в натрий на расстоянии 100 мм от дна бака. Заправка дистиллятом дозатора 2 производилась через вентили П1 и П2, а затем определенное количество дистиллята перекачивалось в расходную емкость 3, где он нагревался до нужной температуры и давления. Во всех экспериментах использовался пар с температурой 315°C и давлением 100 атм. При выходе на необходимый режим пар через вентили Г4, Г5 при закрытом вентиле A5 из емкости 3 подавался через сопло диаметром 0,3 - 1,0 мм в натрий.

Подвижный узел мишени, который монтируется в баке экспериментального участка, представлен на рис. 2. Мишень из сталей IX2M и IX18H10T представляет собой отрезок трубки диаметром 20x2,5 мм, а из стали OX12H2M и Sanicko-3I диаметром 18x2,5 мм, внутри которых перед опытом создавалось избыточное давление аргона, равное 95 атм. Время разрушения мишени определялось по реактому падению давления газа с точностью не более 0,1 сек. Кроме того, фиксировалось суммарное время подачи пара для определения по РVT - данным количества поданного пара и секундного расхода.

После опыта измерялись диаметр сопла и толщина стенки трубки в районе разрушения с точностью 0,01 мм. Скорость разрушения мишени определялась отношением:

$$W = \delta / \tau, \text{ мк/сек,}$$

где δ - толщина стенки мишени;

τ - время разрушения.

Программа исследования стойкости различных сталей заключалась в изучении

- времени и скорости разрушения мишени в зависимости от расстояния между соплом и мишенью;
- времени и скорости разрушения мишени при постоянном расстоянии до сопла в зависимости от толщины ее стенки;
- профиля разрушения на мишенях в виде набора мембран из различных сталей.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех опытах начальная температура натрия была постоянной и равной 500°C, расход пара составлял I-II гр/сек (рис. 3, 4.5.6). На графиках рис. 3, 4 показана зависимость времени и скорости разрушения мишеней из сталей IX2M, OX12H2M и IX18H10T в виде трубки с толщиной стенки 1,5 мм от расстояния до сопла.

Характерной особенностью полученной зависимости (рис. 3, 4) для указанных выше сталей является наличие максимума скорости разрушения при $x/2R_0 = 25$, которая составляет 143; 81; 54 мк/сек соответственно для сталей IX2M, OX12H2M и IX18H10T. Как показали наши расчеты [7], при этом значении $x/2R_0 = 25$ наблюдается максимум на кривой изменения весовой концентрации паров щелочи. На рис. 5 представлена зависимость времени разрушения сталей от толщины стенки мишени при $x/2R_0 = 25$. Результаты аппроксимированы уравнениями:

$$\text{для стали IX2M} \quad \tau = 8,21\delta^{-2,06}, \text{ сек;} \quad (1)$$

$$\text{"- OX12H2M} \quad \tau = 13,7\delta^{-2,2}, \text{ сек;} \quad (2)$$

$$\text{"- IX18H10T} \quad \tau = 21,4\delta^{-3}, \text{ сек.} \quad (3)$$

В этих опытах трубки протачивались до различной толщины стенки. Следует заметить, что справедливость уравнений может, очевидно, нарушаться при увеличении толщины стенки более 2,5 мм вследствие влияния глубины локального выноса на гидродинамику реагирующей струи. При экстраполяции зависимости времени прожигания мишени до оси абсцисс получается остаточная толщина стенки для стали IX2M 0,25 мм и 0,14 мм для сталей OX12H2M и IX18H10T. Это объясняется потерей прочности материала мишени, обусловленной действием перепада давления, равного 95 атм, и высокой температурой в зоне взаимодействия теплоносителей.

В большинстве работ по исследованию взаимодействия натрия с водой использовались образцы конструкционных материалов без создания на них нагрузок, поэтому необходимо ввести понятие времени и скорости выноса материала. В нашем случае они характеризуют процесс утонения стенки мишени до нуля, т.е. ког-

да нет влияния избыточного давления и, следовательно, прочностных характеристик материала. Таким образом, используя зависимости (рис.5), время выноса материала описывается уравнениями:

$$\text{для стали IX2M } \tau_{\text{вын}} = 8,24 \cdot \delta, \text{ сек;} \quad (4)$$

$$\text{-- " -- OX12H2M } \tau_{\text{вын}} = 13,7 \cdot \delta, \text{ сек;} \quad (5)$$

$$\text{-- " -- IX18H10T } \tau_{\text{вын}} = 21,4 \cdot \delta, \text{ сек.} \quad (6)$$

Скорость выноса при этом является постоянной величиной и составляет 121,5; 73; 46,8 мк/сек соответственно для сталей

IX2M, OX12H2M и IX18H10T. При изменении расстояния между соплом и мишенью скорость выноса материала определяется соотношением

$$W_{\text{вын.}} = \Delta \delta / \tau_{\text{вын.}};$$

где $\Delta \delta$ - глубина выноса;
 $\tau_{\text{вын.}}$ - время действия реагирующей струи на мишень. Это соотношение использовалось при обработке результатов опытов по изучению стойкости стали *Sonicka-3I* (рис.6). Линейная зависимость времени разрушения от толщины стенки мишени (в диапазоне $\delta \leq 2,5$ мм) позволяет определить скорость выноса для других сталей при различных расстояниях до сопла, используя соотношение

$$\sqrt{W_{\text{вын.}}} = W \cdot \frac{1}{1 + \Delta \tau / \tau} \quad \text{мк/сек,} \quad (7)$$

где величина $\Delta \tau$ равна 2,06; 2,2; 3 сек соответственно для сталей IX2M, OX12H2M и IX18H10T. Вычисленные значения скоростей выноса для этих сталей представлены на рис.6.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОФИЛЯ РАЗРУШЕНИЯ

Для определения профиля разрушения в зависимости от начальной температуры натрия, времени подачи пара, материала мишени была выполнена серия опытов на тонких мишенях. Конструктивно узел сделан в виде набора круглых мишеней, которые с определенным шагом крепились на стойках. Использовались мишени из стали IX18H10T толщиной 0,1 мм и 0,3 мм и из ст.3 толщиной 0,3 мм. Пар с температурой 315°C под давлением 100 атм подавался через сопло диаметром 0,54-0,55 мм. После опыта узел мишеней демонтировался, производился замер диаметра отверстий, прожигаемых реагирующей струей в мишенях, и строился профиль разрушения в координатах x/R_0 , R/R_0 .

Было проведено три серии экспериментов.

1. Форма профиля разрушения в зависимости от материала мишени (рис.8):

$$t_{\text{Na}} = 500^\circ\text{C}; \quad d_0 = 0,54 \text{ мм}; \quad \Delta h = 5,3 \text{ мм}; \\ \delta = 0,3 \text{ мм}; \quad \tau_{\text{экс}} = 50 \text{ сек.}$$

Профиль разрушения на ст.3 более широкий ($R/R_0 \text{ max.} = 15$) и длинный, величина x/R_0 достигает значения ~ 240 , на стали IX18H10T ширина профиля $R/R_0 \text{ max.}$ равна 11, а длина x/R_0 равна 100. Это совпадает с результатами по стойкости различных сталей. Например, было определено, что стойкость перлитной стали типа IX2M приблизительно в 2,5 раза ниже, чем у стали IX18H10T.

2. Профиль разрушения в зависимости от времени подачи пара (рис.9). Использовалась сталь IX18H10T.

$$\delta = 0,1 \text{ мм}; \quad t_{\text{Na}} = 500^\circ\text{C}; \quad d_0 = 0,55 \text{ мм}; \\ \tau_{\text{экс}} = 49,5 \text{ сек}; \quad \tau_{\text{экс}} = 61 \text{ сек.} \quad \Delta h = 5,5 \text{ мм.}$$

По ширине профиля разрушения совпадают, различие наблюдается только по длине.

$$\tau_{\text{экс}} = 49,5 \text{ сек}; \quad x/R_0 = 220; \quad \text{пробито II мишеней}; \\ \tau_{\text{экс}} = 61 \text{ сек}; \quad x/R_0 = 260; \quad \text{пробито I3 мишеней.}$$

Таким образом, влияние времени подачи пара на профиль разрушения незначительно.

3. Изменение расстояния между мишенями (рис.10). Сталь IX18H10T.

$$\delta = 0,1 \text{ мм}; \quad d_0 = 0,54 \text{ мм}; \quad t_{\text{Na}} = 500^\circ\text{C}; \\ \tau_{\text{экс}} = 50 \text{ сек}; \quad \Delta h_1 = 5,1 \text{ мм}; \quad \Delta h_2 = 11,6 \text{ мм.}$$

Профили не совпадают по ширине и длине, струя становится более "дальнобойной" и узкой с увеличением расстояния между мишенями.

$$\Delta h_1 = 5,1 \text{ мм}; \quad x/R_0 = 220; \quad \text{пробито II мишеней}; \\ \Delta h_2 = 11,6 \text{ мм}; \quad x/R_0 = 320; \quad \text{пробито 7 мишеней.}$$

Это связано, по-видимому, прежде всего с тем, что при малом шаге струя прожигает большее количество мишеней. Связывая эти данные с результатами исследования профиля разрушения в зависимости от времени подачи пара, можно сказать, что профили разрушения приближаются по длине при равенстве эффективного времени действия струи. В данном случае для $\Delta h = 5,1$ мм это время

ориентировочно составляет:
 $\bar{t}_{\text{эфф.}} = 50 \text{ сек} \cdot \frac{\Pi}{\Gamma} = 78-79 \text{ сек}.$

Это подтверждает проверка вышеприведенных данных (п.2),

$\bar{t}_{\text{экс.}} = 61 \text{ сек}$ - пробито 13 мишеней;

$\bar{t}_{\text{жс}} = 49,5 \text{ сек}$ - пробито 11 мишеней,

тогда $\frac{\bar{t}_{\text{экс.}}}{\bar{t}_{\text{жс.}}} = \frac{\Pi_1}{\Pi_2}$; (1,2 → 1,185).

Следует остановиться на величине "дальнобойности" струиосо - бенно для больших расстояний между мишенями. Если полученные результаты связывать с трубным пучком парогенератора, то образовавшаяся течь пара в натрий становится опасной на расстоянии до $x/2R_0 = 160$. При рассмотрении конкретно любого трубного пучка парогенератора полученная величина $x/2R_0$ позволяет оценить минимально допустимую течь при его разуплотнении.

4. ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НАТРИЯ

В опытах использовалась сталь IX18N10T, $\delta = 0,1 \text{ мм}$ (рис. II).

Из табл. 2 видно, что скорость увеличения длины профиля разрушения уменьшается с ростом начальной температуры натрия.

Приведенные в работе результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Наибольшей стойкостью в зоне взаимодействия теплоносителей обладает сталь с более высоким содержанием никеля.
2. Стойкость стали *Sapicko-3I* в зоне взаимодействия натрия с водяным паром выше в 2,5 раза, чем у стали IX18N10T, в 3,5 раза, чем у стали OX12H2M, в 6 раз, чем у стали IX2M.
3. Профили, полученные на тонких мишенях, позволяют оценить размеры опасной зоны разрушения, возникающей при истечении пара в натрий.

Условные обозначения

d_0, R_0 - диаметр, радиус сопла соответственно, мм;

x - расстояние между мишенью и соплом, мм;

$\bar{t}, \bar{t}_{\text{вын.}}$ - время разрушения и выноса мишени соответственно, сек;

$\bar{t}_{\text{экс.}}$ - время подачи пара, сек;

δ - толщина стенки мишени, мм;

$\Delta \delta$ - глубина выноса стенки мишени, мм;

$W, W_{\text{вын.}}$ - скорость разрушения и выноса материала мишени, соответственно, мк/сек;

Δh - расстояние между мишенями;

R - радиус прожигаемого отверстия в мишени реагирующей струей, мм;

t_{Na} - начальная температура натрия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бландин Ю.Ф., Марков В.Г. Конструкционные материалы для установок с жидкометаллическими теплоносителями. Судпромгиз, Л. (1961).
2. Devine R.A., Gray T.A., Zyona T.M. . Венская конференция МАГАТЭ, реферат 85/15 (1966).
3. Brenchow N.V. and Chase W.Z. . Венская конференция МАГАТЭ, реферат 85/24 (1966).
4. Зотов В.В., Невзоров Б.А. и др. Коррозионная стойкость конструкционных материалов в натрии. В сб. статей: Жидкие металлы. М., Атомиздат (1967).
5. Козлов Ф.А., Кузнецов Э.К., Сергеев Г.П. Методы индикации, работа парогенератора и второго контура при малых течах воды в натрий. Доклад на совещании специалистов по реакциям натрия с водой. Мелекесс, СССР (1971).
6. Кульпин Б.В., Мазанов А.С. Аналитическое и экспериментальное исследование реагирующей струи вода-натрий. Доклад на совещании специалистов по реакциям натрия с водой. Мелекесс, СССР (1971).
7. Кульпин Б.В., Петухов В.П. К теории взаимодействия натрия с водой. Доклад на советско-французском семинаре по технологии быстрых реакторов, Дмитровград, СССР (1973).

Подписи к рисункам

Рис. I. Схема стенда: 1-экспериментальный участок; 2-дозатор; 3-емкость подготовки пара; 4-сборная емкость натрия; 5-емкость чистого натрия; 6-узел сопла.

Рис. 2. Подвижный узел мишени: 1-газовый баллон; 2-подвижная штанга с газовым объемом 200 см³; 3-стойка; 4-мишень; 5-сопло.

Рис. 3. Время разрушения мишеней ($\delta = 1,5 \text{ мм}$): 1-сталь IX2M; 2-сталь OX12H2M; 3-сталь IX18N10T в зависимости от расстояния до сопла $d_0 = 0,4-1 \text{ мм}$; точки-эксперимент.

Рис.4. Скорость разрушения мишеней ($\delta = 1,5\text{мм}$) в зависимости от расстояния до сопла ($d_0 = 0,4-1\text{мм}$): 1-сталь IX2М; 2-сталь OX12H2M; 3-сталь IX18H1OT

Рис.5. Время разрушения мишеней в зависимости от их толщин, при $x/2R_0 = 25$: 2-сталь IX18H1OT; 4-сталь OX12H2M; 6-сталь IX2М. Время выноса материала мишеней в зависимости от ее толщины, при $x/2R_0 = 25$: 1-сталь IX18H1OT; 3-сталь OX12H2M; 5-сталь IX2М.

Рис.6. Скорость выноса материала мишени в зависимости от $x/2R_0$: 1-IX2М; 2-OX12H2M; 3-IX18H1OT; 4-*Sanikgo -3I*; точки-эксперимент.

Рис.7. Сборка мишеней: 1-сопло; 2-направляющая втулка; 3-тонкая мишень; 4-стойка; 5-узел крепления.

Рис.8. Форма профиля разрушения в зависимости от материала мишеней: ● -сталь IX18H1OT; ○ -сталь 3.

Рис.9. Профиль разрушения мишеней в зависимости от времени подачи пара: ● - = 61сек; ○ - = 49,5сек.

Таблица I Химический состав сталей, %

Марка стали	C	Mn	Si	S	P	O _г	Ni	Nb	Mo	Ti
IX2М	0,09	0,35	0,28	0,017	0,012	2,24	-	-	0,94	
OX12H2M	0,05	0,56	0,26	0,009	0,014	12,5	2,05	-	0,89	-
IX18H1OT	0,076	1,35	0,42	-	-	18	10,4	-	-	0,77
<i>Sanikgo -3I</i>	0,015	0,56	0,59	0,003	0,009	20,7	33,56	0,02	0,42	Co/Al 0,017/0,21

Таблица 2 Экспериментальные данные по профилю разрушения в зависимости от температуры

d_0 , мм	0,54	0,55	0,54	0,54	0,54
t_{No} , °C	360	390	455	500	600
$t_{экв}$, сек	50	50	49,5	49,5	51
x/R_0 max	150	170	220	230	240
число пробитых мишеней	7	8	II	II	12

Рис.10. Профиль разрушения в зависимости от расстояния между мишенями: ● - $h = 5\text{мм}$; ○ - $h = 11,6\text{мм}$

Рис.11. Влияние начальной температуры натрия на профиль разрушения: ⊕ - $t = 360^\circ\text{C}$; ● - $t = 390^\circ\text{C}$; ⊙ - $t = 455^\circ\text{C}$; ⊗ - $t = 500^\circ\text{C}$; ○ - $t = 600^\circ\text{C}$

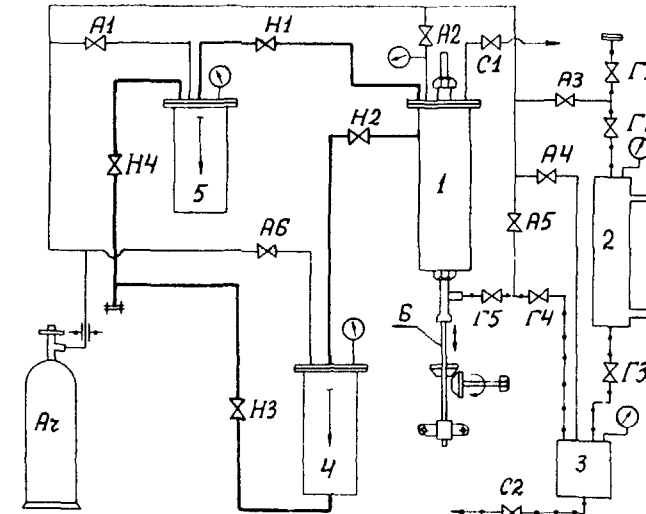


Рис.1. Схема стенда: 1-экспериментальный участок; 2-дозатор; 3-емкость подготовки пара; 4-сборная емкость натрия; 5-емкость чистого натрия; 6-узел сопла

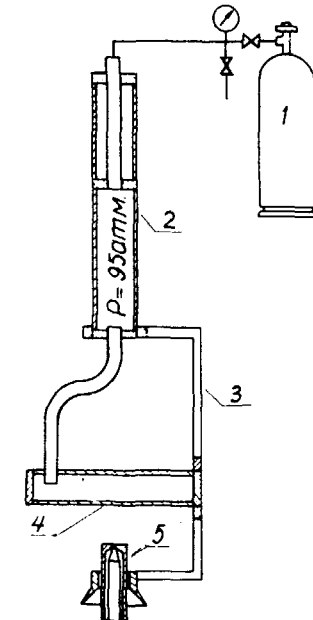


Рис.2. Подвижный узел мишени: 1-газовый баллон; 2-подвижная штанга с газовым объемом 200 см³; 3-стойка; 4-мишень; 5-сопло

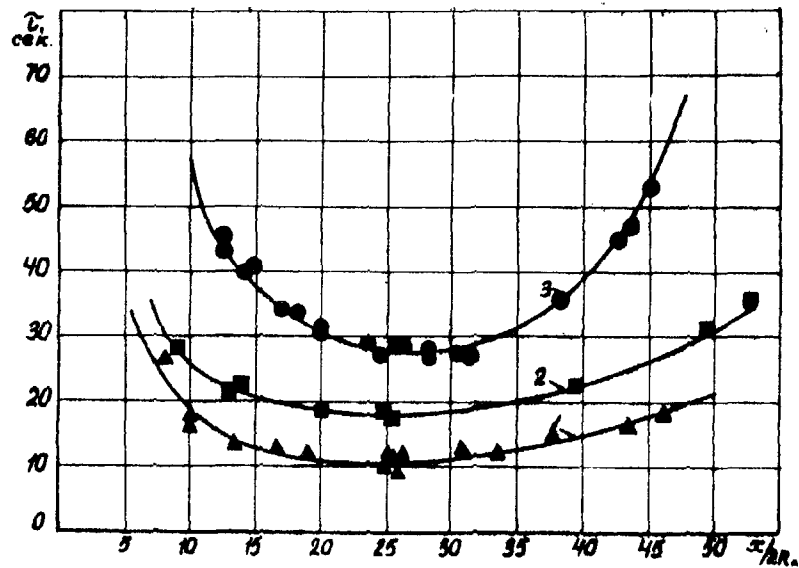


Рис. 3. Время разрушения мишеней ($\delta = 1,5 \text{ мм}$): 1-сталь IX2M; 2-сталь OX12H2M; 3-сталь IX18H10T в зависимости от расстояния до сопла. $d_0 = 0,4-1 \text{ мм}$; точки-эксперимент

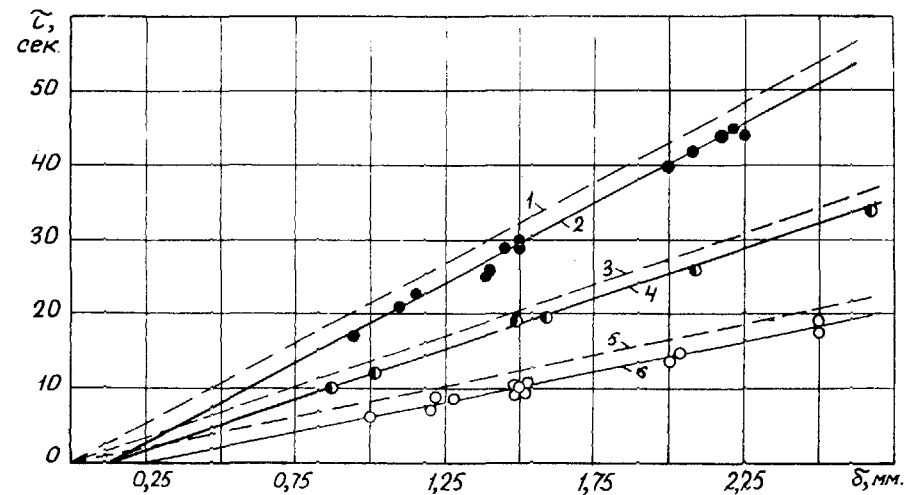


Рис. 5. Время разрушения мишеней в зависимости от их толщины, при $x/2R_0 = 25$: 2-сталь IX18H10T; 4-сталь OX12H2M; 6-сталь IX2M. Время выноса материала мишеней в зависимости от ее толщины, при $x/2R_0 = 25$: 1-сталь IX18H10T; 3-сталь OX12H2M; 5-сталь IX2M

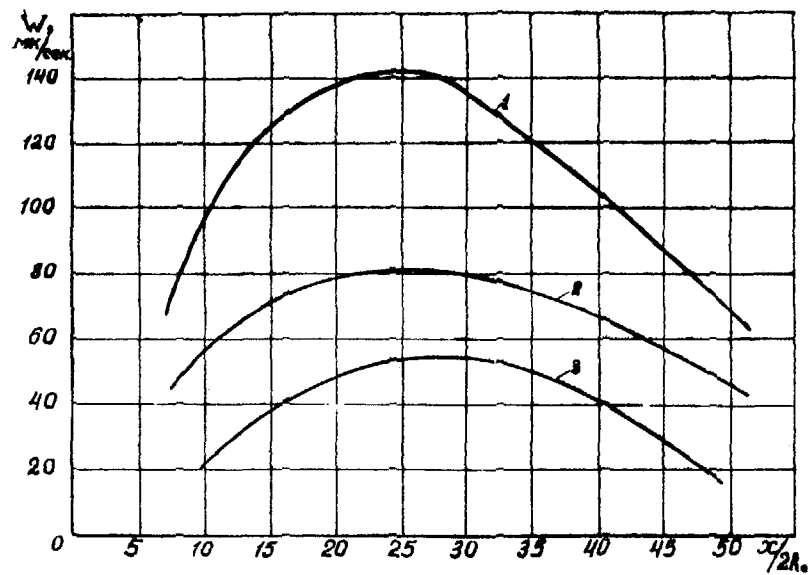


Рис. 4. Скорость разрушения мишеней ($\delta = 1,5 \text{ мм}$) в зависимости от расстояния до сопла ($d_0 = 0,4-1 \text{ мм}$): 1-сталь IX2M; 2-сталь OX12H2M; 3-сталь IX18H10T

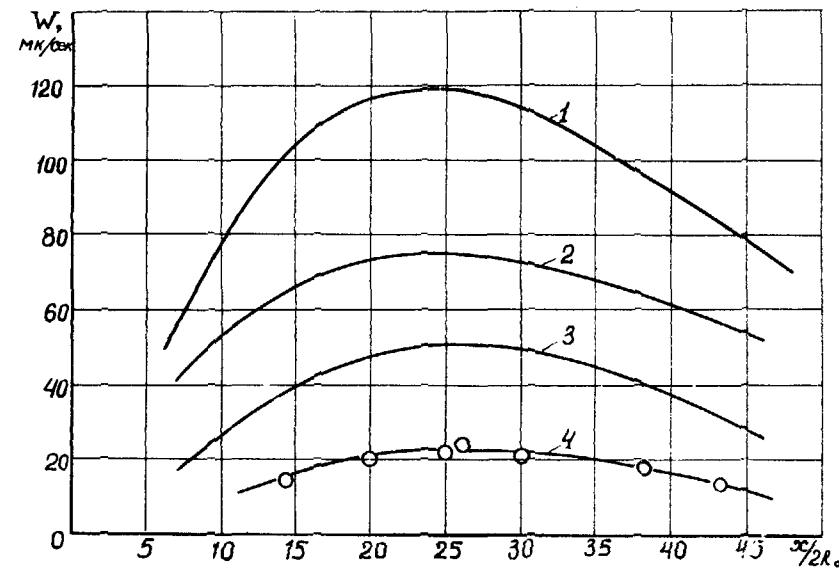


Рис. 6. Скорость выноса материала мишени в зависимости от $x/2R_0$: 1-IX2M; 2-OX12H2M; 3-IX18H10T; 4-Boniko-3I; точки-эксперимент