

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ПРОПУСКАНИИ ПО НИМ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА БОЛЬШОЙ ПЛОТНОСТИ

В. М. Гудьгавчук, А. П. Мухранов

(Москва)

Приведены результаты экспериментов по возбуждению продольных колебаний стальных, титановых и танталовых стержней с грузом на конце при пропускании по ним импульсов электрического тока плотностью $(0.7-2.6) \cdot 10^6 \text{ а/см}^2$ и длительностью менее четверти периода свободных колебаний стержней. Показано, что из двух возможных одновременно существующих механизмов возбуждения колебаний — радиально-го обжатия стержня электродинамическими силами и действия нестационарных термоупругих напряжений — основной вклад вносят термоупругие силы. При различной плотности тока определены амплитуды и периоды колебаний, а также вводимая в стержни энергия. Из полученных данных рассчитаны зависимости модуля упругости материала стержней от температуры в диапазоне от 270 до 2150° С.

1. Из основ электродинамики следует, что при протекании по проводнику электрического тока на проводник действует сжимающая сила электродинамического происхождения, направленная к оси (пинч-эффект). При токе, равномерно распределенном по сечению проводника, электродинамическое давление на единицу площади [1]

$$p = 10^{-7} I^2 / \pi r^2 \quad (1.1)$$

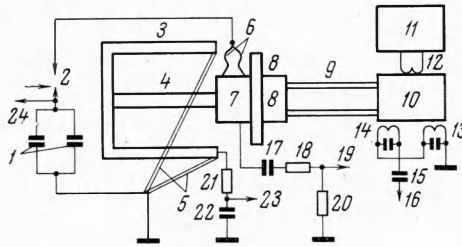
Здесь p — давление в н/м^2 , I — ток в амперах, r — радиус проводника в м.

Если через проводящий стержень, один конец которого неподвижно закреплен, а второй остается свободным¹, пропустить импульс тока достаточной силы длительностью менее периода свободных продольных колебаний стержня, то импульс радиального давления и нестационарные термоупругие силы, возникшие в результате быстрого нагрева металла, возбудят продольные колебания стержня. Период их при $M > m$, как известно [2], равен

$$T = 2\pi ((M + \frac{1}{3}m) l / Es)^{1/2} \quad (1.2)$$

Здесь m , l , s — масса, длина и площадь поперечного сечения стержня соответственно, E — модуль упругости. При уменьшении длительности импульса тока τ от величины, равной одному периоду, до значения, в несколько раз меньшего четверти периода, амплитуда колебаний будет возрастать из-за уменьшения степени разгрузки вещества во время нагрева. При $\tau < \frac{1}{4}T$ разгрузкой металла во время протекания тока можно пренебречь, т. е. такой импульс можно считать мгновенным.

Определим относительную амплитуду продольных колебаний $\varepsilon = \delta l / l$, вызванных импульсом тока длительностью $\tau < \frac{1}{4}T$, при отсутствии термоупругих сил (слабый нагрев стержня), считая, что масса стержня пренебрежимо мала по сравнению с массой груза. Приравняв упругую энергию деформированного стержня кинетической энергии груза M , имеем



Фиг. 1

$$\varepsilon = v (M / Es l)^{1/2}, \quad v = \frac{s\mu}{M} \int_0^{\tau} p(t) dt \quad (1.3)$$

Здесь v — скорость груза к моменту окончания импульса тока, выражение которой получено из второго закона механики, считая, что стержень передает грузу весь импульс давления электродинамических сил, μ — коэффициент Пуассона.

Объединяя выражения (1.1) и (1.3), получим

$$\varepsilon = \frac{\mu\beta}{10^7 \sqrt{EMls}}, \quad \beta = \int_0^{\tau} I^2(t) dt \quad (1.4)$$

Величину β принято называть «интегралом действия» тока [3].

Амплитуда колебаний стержня, вызванных действием только нестационарных термоупругих сил при указанных ранее предположениях относительно масс m и M

¹ Со свободным концом стержня жестко связан груз массой M , необходимый для увеличения периода колебаний до величины, превышающей длительность импульса тока, а также для соединения конца стержня с регистрирующим устройством и подключения гибких проводов.

и длительности импульса тока, равна kt_* , где k — коэффициент линейного расширения, t_* — нагрев стержня импульсом тока.

В конкретном эксперименте роль каждой из указанных причин возбуждения колебаний будет определяться физическими свойствами металла, его нагревом, размерами стержня, массой M и «интегралом действия» тока. В этом можно убедиться, если оценивать эффект, вызываемый каждой из рассматриваемых причин возбуждения колебаний, по отношению термоупругой силы к электродинамической, усредненных за четверть периода

$$\alpha = \frac{10^7 kt_* E T s}{8\mu\beta} \quad (1.5)$$

Цель описываемых экспериментов — измерение амплитуды и периода продольных колебаний стержней при пропускании по ним импульсов электрического тока различной плотности и длительностью менее четверти периода колебаний и определение при помощи полученных данных модуля упругости металла при различных температурах.

2. Экспериментальная установка (фиг. 1) состояла из генератора импульсов тока (два конденсатора ИМ5-150 I, заряжаемых от выпрямителя 2А, и разрядник 2) со схемой измерения напряжения на образце и тока, текущего через него, держателя образцов 3 и устройства для измерения продольных колебаний стержня.

Для измерения тока с ведущих к держателю шин 5 снимается напряжение, пропорциональное производной тока и интегрируется RC цепью 21, 22 (0.2 Мом, 5600 пф). С RC цепи напряжение поступает на усилитель¹ входа I осциллографа ОК-17М. Напряжение с омического делителя 18, 20 (1.2 ком, 54 ом), присоединенного к образцу через конденсатор 17 (12 мкф), подается на пластины входа II осциллографа.

Устройство для измерения амплитуды и периода колебаний работает на трансформаторно индуктивном принципе. Оно состоит из трех рядом расположенных катушек индуктивности 12, 13 и 14, по оси которых свободно перемещается ферритовый сердечник 10 (длиной 8 мм, диаметром 7.9 мм), жестко связанный через дюралюминиевую трубку 9 (длиной 75 мм, диаметром 6 × 1 мм) и изолирующую втулку 8 из капролона с дюралюминиевой муфтой 7, которая закрепляется на свободном конце стержня 4, и к которой подходят два гибких медных провода 6 длиной 100 мм, диаметром 2 мм.

Полный вес деталей, прикрепляемых к свободному концу стержня в опытах с титаном, талталом и нержавеющей сталью, равнялся 49.6, 51.3 и 42 г соответственно.

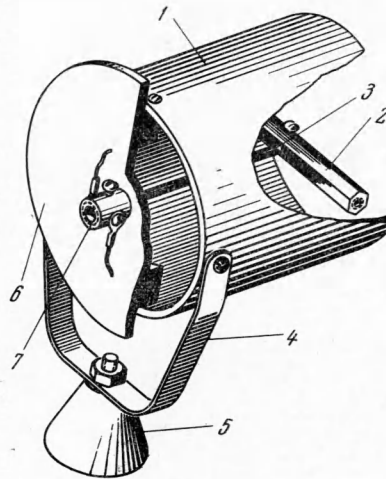
В первичную катушку 12 подается от генератора 100-И11 ток частотой 500 кГц. Вторичные катушки трансформатора 13 и 14 настроены в резонанс и соединены таким образом, что наводимые в них э.д.с. взаимно компенсируются при симметричном расположении ферритового сердечника относительно этих катушек. Сдвиг ферритового сердечника по оси катушек приводит к появлению напряжения на выходе трансформатора.

Для уменьшения наводок во время разряда батареи трансформатор экранируется, и снимаемое с него напряжение поступает на усилитель входа II ОК-17М через RC фильтр высоких частот (15 (5100 пф), входное сопротивление усилителя), сильно ослабляющий основную частоту разрядного контура (13.3 кГц).

Катушки трансформатора намотаны внавал по 80 витков проводов ПЭВ-2 диаметром 0.14 мм на плексигласовом каркасе; внутренний диаметр намотки 12 мм, ширина намотки каждой катушки 2 мм, расстояние между катушками 2 мм. Чувствительность описанного устройства такова, что перемещение сердечника на 0.1 мм вызывает отклонение луча (двойную амплитуду) на экране осциллографа ОК-17М на 10 мм; линейность характеристики сохраняется при перемещениях до 0.75 мм.

Держатель образцов (фиг. 2) представляет собой горизонтально установленную дюралюминиевую трубу 1 диаметром 85 × 5 мм, длиной 95 мм, с одного конца которой по диаметру закреплен латунный шестигранный стержень 2 толщиной 14 мм, к середине которого привинчивается испытуемый стержень 3, а к другому концу трубы — к

¹ Для увеличения динамического диапазона и согласования входа усилителей с датчиками напряжений анодные нагрузки выходных каскадов усилителей входа I и входа II осциллографа ОК-17М увеличены до 2.4 и 2.8 ком соответственно, а входные сопротивления — до 0.47 Мом и 1 ком.



Фиг. 2

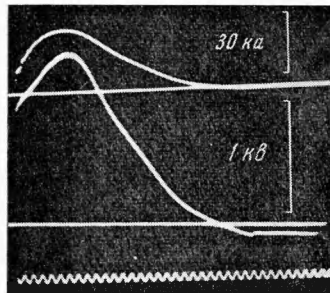
точкам, находящимся против мест закрепления латунного стержня, прикреплены две медные шины, подключаемые к одному из выводов конденсаторной батареи 5. На этом же торце трубы установлен плексигласовый диск 6 с направляющим отверстием в центре. Таким образом, получается симметричная относительно путей протекания тока система: от муфты 7 ток проходит по испытуемому стержню, расположенному на оси цилиндра, разветвляется в латунном стержне и возвращается по цилиндру обратно. Симметричная конструкция держателя необходима для исключения электродинамических сил, стремящихся вырвать стержень из зажимов.

Для создания мощных импульсов тока использовался разряд на стержень конденсаторной батареи емкостью 300 мкф, индуктивностью 0.47 мкГн через управляемый воздушный разрядник с графитовыми электродами.

3. В опытах использовались круглые стержни (отрезки проволоки) длиной 98 мм, нижеуказываемых металлов, диаметром 2г и весом *m*.

		2г, мм	<i>m</i> , г
Нержавеющая сталь	1X18H9T	1.59	1.56
Титан	BT1-1	1.96	1.30
Тантал	Ta 99.3%	1.51	2.66

Эксперименты выполнялись в воздухе в нормальных условиях с неотожженными и отожженными образцами, начиная с наименьшего разрядного напряжения V_0 . Отжиг производился в воздухе при 800° С в течение одного часа с последующим медленным остыванием. Перед каждым опытом трансформатор, установленный на каретке, перемещался в такое положение, где наступала компенсация напряжений во вторичных катушках.



Фиг. 3

образцов в мксек, V_0 — разрядное напряжение в кВ, Q — введенная в образец энергия в Дж, ϵ'_* , ϵ''_* — амплитуды колебаний неотожженного и отожженного образцов в %.

Таблица 1

V_0	ϵ'_*	ϵ''_*	T'	T''	I_m	Q	t^o
Нержавеющая сталь							
1.5	0.121	0.336	655	905	16.3	249	300
2.0	0.186	0.278	801	920	23.3	467	502
2.5	0.146	0.156	710	853	27.2	736	700
3.0	0.205	0.330	1440	1560	35.2	1090	930
Титан							
1.5	0.23	0.368	860	945	20.9	214	273
2.0	0.227	0.395	970	995	28.7	434	496
2.5	0.130	0.220	950	962	34.4	713	707
3.0	0.150	0.280	1270	1480	37.7	989	939
Тантал неотожженный							
1.5	0.221		805		24.6	191	520
2.0	0.222		850		33.1	364	941
2.5	0.167		885		39.0	656	1700
3.0	0.182		995		46.8	991	2150

На фиг. 3 представлена оциллограмма тока и напряжения, полученная в опытах с нержавеющей сталью при $V_0 = 3$ кВ (вверху ток, внизу напряжение, частота масштаба времени 500 кГц). Из оциллограммы вытекает, что разряд в этом случае аperiodический. Такой же характер разряда наблюдается в опытах с танталом и титаном. Время

ввода энергии (длительность импульса тока) в стержни из нержавеющей стали, тантала и титана составляет 42, 38 и 36 мксек соответственно. Вводимая в образцы энергия рассчитывалась путем численного интегрирования следующего соотношения [4]:

$$Q = \int_0^{\tau} I(t)V(t) dt - \frac{LI^2(\tau)}{2} \quad (3.1)$$

Здесь $I(t)$, $V(t)$ — ток, протекающий через образец и напряжение на нем, L — индуктивность образца. Погрешность измерения энергии составляла около 10%.

Температура титана и тантала рассчитывалась по известной [5] теплоемкости от температуры. Для нержавеющей стали значение теплоемкости при 20° С (0.12 кал/г град) взято из работы [6]; температурная зависимость теплоемкости принималась такой же, как у железа.

Осциллограммы продольных колебаний стержней приведены на фиг. 4: *a* — отожженная сталь 1X18H9T при $V_0 = 1.5$ кв, *b* — неотожженный титан BT1-1 при $V_0 = 2.0$ кв, *c* — неотожженный тантал при $V_0 = 2.0$ кв, *г* — отожженный тантал при $V_0 = 2.5$ кв; метки времени через 100 мксек. На первой волне колебаний стальных стержней видны наложенные колебания дюралюминиевой трубки с периодом 200 мксек. Наиболее сильно колебания трубки проявляются в опытах с отожженным танталом (фиг. 4, *г*), где они оказались настолько велики, что не позволили произвести измерения периода и амплитуды колебаний стержня. В результате обработки осциллограмм продольных колебаний стержней получены зависимости первого периода T и амплитуды колебаний в первом периоде (относительно исходного состояния) ϵ_* от разрядного напряжения V_0 . Ввиду того что амплитуда измерялась через $1/2T$ после начала колебаний, а разгрузка металла наступает через $1/4T$, измеренная величина ϵ_* представляет собой удвоенную амплитуду относительно стационарного состояния нагретого стержня. Среднеквадратичная ошибка измерения периода не превышала величины 2%, а амплитуды 6.5%.

Как видно из табл. 1, амплитуда колебаний сложным образом зависит от разрядного напряжения: в ряде случаев она сначала уменьшается с ростом V_0 , а затем возрастает. Уменьшение амплитуды, по-видимому, связано с увеличением роли пластической деформации. Из данных табл. 2, где приведены величины α , «интегралы действия» тока β , измеренные ($1/2\epsilon_*$) и рассчитанные (kt_*) амплитуды колебаний неотожженных стержней при наименьшем разрядном напряжении 1.5 кв, видно, что рассчитанные амплитуды превышают измеренные. Можно предположить, что это объясняется влиянием пластической деформации и искривлением стержней.

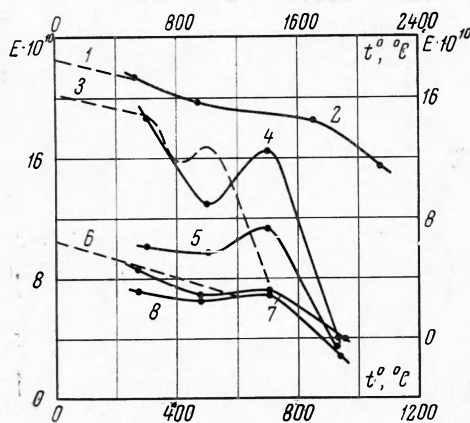
Таблица 2

Металл	kt_0^*	μ	kt_* , %	$1/2 \epsilon_*$, %	β , $a^2 \text{ сек}$	α
Сталь	16.6	0.291	0.465	0.06	1490	1000
Титан	8.5	0.32	0.165	0.12	7250	200
Тантал	6.5	0.3	0.325	0.11	12030	274

Тот факт, что величины α , рассчитанные по соотношению (1.5), находятся в пределах от 200 до 1000, показывает, что возбуждение колебаний происходит почти целиком за счет термоупругих сил. Заметим, что наибольшая плотность тока в опытах (см. табл. 1) достигала $2.6 \cdot 10^6$ а/см² (тантал), а наименьшая — $0.7 \cdot 10^6$ а/см² (титан).

Рассчитанные по формуле (1.2) и данным табл. 1 температурные зависимости модуля упругости в н/м², а также опубликованные данные представлены на фиг. 5. Здесь 1 — тантал [8], 2 — неотожженный тантал, 3 — сталь 1X18H9T [7], 4 — неотожженная сталь 1X18H9T, 5 — отожженная сталь 1X18H9T, 6 — титан [8], 7 — неотожженный титан BT1-1, 8 — отожженный титан BT1-1; для кривых 1 и 2 оси координат — вверху и справа, для остальных кривых оси — внизу и слева.

Как видно из приведенных результатов, при помощи описываемого метода можно измерять модуль упругости при температурах, более высоких, чем другими методами. Измеренные температурные зависимости имеют следующие особенности: во-первых,



Фиг. 5

модуль упругости неотожженных металлов больше, чем отоженных — это согласуется с теорией, во-вторых, частично (сталь при $t^\circ < 400^\circ \text{C}$, тантал при $t^\circ = 520^\circ \text{C}$, титан при $t^\circ < 500^\circ \text{C}$) полученные результаты согласуются с опубликованными, а частично (сталь при $t^\circ > 400^\circ \text{C}$, титан при $t^\circ > 500^\circ \text{C}$) заметно отличаются. Так, для нержавеющей стали максимум на кривой смещен в сторону более высоких температур на 200°C . Не исключено, что причиной этого расхождения является ошибка в определении температуры, хотя в данном случае эта ошибка выйдет за пределы погрешности измерений. Относительно большая погрешность определения температуры (10—15%) обусловлена тем, что в данной работе основное внимание уделялось изучению механизма возбуждения продольных колебаний, а не измерению с высокой точностью температурного хода модуля

упругости. При выполнении подобных измерений температуру следует определять непосредственно (а не расчетом), например, методами [нестационарной оптической пирометрии [9,10].

В заключение отметим, что для уменьшения длительности импульса тока примерно на порядок можно воспользоваться обрывом тока в разрядной цепи при образовании паузы тока, как сделано в работах [11, 12]. Для этой цели в разрядную цепь последовательно со стержнем необходимо включить одну или несколько параллельно соединенных медных проволок с суммарным сечением, меньшим, чем у стержня; длина этих проволок должна быть выбрана такой, чтобы длительность паузы тока была не менее двух — трех периодов колебаний стержня.

Поступила 2 II 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. Keilhacker M. Über den Mechanismus der explosionsartigen Verdampfung von Kupferdrähten durch sehr intensive Stromstöße und das Verhalten des Kupfers bei den dabei auftretenden hohen Drucken und Temperaturen. Z. angew. Phys., 1960, В. 12., № 2.
2. Тимошенко С. П. Теория колебаний в инженерном деле. ГНТИ. 1932.
3. Андерсон Г., Нейлсон Ф. Применение понятия «интеграл действия» в исследованиях взрывающейся проволоочки. Сб. «Взрывающиеся проволоочки», Изд. иностр. лит., 1963.
4. Протопопов Н. А., Кульгавчук В. М. К теории механизма возникновения паузы тока и ударных волн при нагреве металла импульсами электрического тока большой плотности. Ж. техн. физ., 1961, т. 31, № 5.
5. Справочник химика, т. 1, Госхимиздат, 1951.
6. Бабиков А. А. Нержавеющие стали. Госхимиздат, 1956.
7. Безухов Н. И., Бажанов Л. В., Гольденблат И. И., Николаенко Н. А., Синюков А. М. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур. Изд. «Машиностроение», 1965.
8. Köster W. Die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls reiner Metalle. Z. Metallkunde, 1948, В. 39, № 1.
9. Мейфилд Е. Радиационные измерения температуры взрывающихся проволок. Сб. «Взрывающиеся проволоочки», Изд. иностр. лит., 1963.
10. Кульгавчук В. М., Шишкин Ю. Б., Березин И. А. Измерение температуры в первой стадии электрического взрыва проволок. Теплофизика высоких температур, 1966, т. 4, № 3.
11. Кульгавчук В. М. Получение мощных радиоимпульсов при помощи электрического взрыва металлических проволок. Приборы и техн. эксперимента, 1965, № 1.
12. Кульгавчук В. М. Высоковольтные быстродействующие предохранители для конденсаторных батарей. Приборы и техн. эксперимента, 1966, № 2.