

МАРКЕР оцк↔гпу ПРЕВРАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗА И ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ИХ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Емельянов А.Н.[®], Голышев А.А., Молодец А.М.
Институт проблем химической физики РАН
© emelyanov@ifcp.ac.ru

Введение

Как хорошо известно, в области давлений ~12 ГПа железо и многие ферритные стали испытывают обратимый полиморфный переход из фазы с объёмно-центрированной кубической решёткой (оцк) в фазу с гексагональной плотноупакованной (гпу) решёткой. Этот переход имеет место как при статических, так и при динамических давлениях (см. [1-4] и ссылки в них). В условиях микросекундных ударно-волновых воздействий размагничивание стального образца обуславливает возникновение сильных электромагнитных импульсов [1]. Эти импульсы обычно рассматриваются как помехи (см. [2,3]) и, например, в [2] был предложен способ их подавления.

Вместе с тем, очевидно, что электромагнитный сигнал, обязательно сопутствующий полиморфному оцк↔гпу переходу в железе и сталях, может быть использован в методическом отношении для регистрации изменения магнитных свойств стали и косвенно самого перехода. С этой точки зрения представляется разумной разработка методики, основанной на использовании сопутствующего электромагнитного импульса в качестве маркера прямого и обратного перехода оцк↔гпу в железе и сталях при их ударно-волновом нагружении. В данном докладе представлена реализация этой идеи на примере прямого и обратного оцк↔гпу перехода при ударно-волновом нагружении железа Армко и ферритной стали 15Х2НМФА.

Конструкция и ударно-волновое нагружение датчика магнитного превращения.

Сигнал датчика магнитного превращения возникает вследствие изменения магнитного потока через контур, материал которого изменяет свои магнитные свойства при ударно-волновом нагружении. Датчик представляет собой зигзагообразную ленту исследуемого материала (Рис. 1, а). К концам датчика точечной сваркой приварены фольговые медные тоководы 2. Датчик 1 и тоководы 2 расположены в плоскости, параллельной фронту нагружающей ударной волны. Схема одномерного ударно-волнового нагружения датчика представлена на Рис. 1б. Здесь ударник 1 генерирует в металлической пластине 2 одномерный ударно-волновой импульс, который в дальнейшем приводит к реверберации волны сжатия в «мягком» слое 3, зажатом между двумя «жесткими» пластинами 2 и 4. Эта реверберация [5] обуславливает ступенчатое увеличение давления в слое 3, то есть, его ступенчатое ударное сжатие. В свою очередь, реверберация плоских волн напряжения возникает на каждой ступени и в чувствительных элементах датчика 5 и мanganинового датчика 6, расположенных в этом слое. В фазе разгрузки происходит плавное уменьшение давления в 5 и 6. Таким образом, профиль (изменение во времени) давления $P(t)$ в исследуемом материале имеет вид ступеней.

На Рис.2 графиком 1 показан расчётный профиль $P(t)$ в датчике, нагружаемом в эксперименте по схеме Рис.1. Расчёт проведён с использованием вычислительных приёмов [6] с уравнением состояния железа из [7] и упруго-пластической модели (см. [8]). Отметим, что используемый гидрокод предоставляет возможность расчёта как профилей напряжения, перпендикулярного фронту ударной волны, так и профилей давления.

Такой же расчёт был проведён и для мanganинового датчика, для которого были получены аналогичные модельные профили давления. Однако, на экспериментальном профиле давления 2, полученном с помощью мanganинового датчика 6, отсутствуют высокочастотные колебания на ступенях давления. Это несоответствие обусловлено ограниченными частотными характеристиками мanganиновой методики. Поэтому экспериментальный график 2 в данной работе используется главным образом в качестве отметчика времени прихода ударно-волновых возмущений в плоскость расположения датчиков.

Электрическая цепь датчика идентична электрической цепи измерения электросопротивления мanganинового датчика при ударно-волновом нагружении [9] с использованием мостовой схемы Уитстона. Номиналы мостовой схемы, используемой в данной работе, приведены на Рис. 3. Чувствительный элемент датчика $R_S \approx 0.6 \Omega$ включён в левое плечо моста $R_S - R_1 - R_2 - R_3$ через высокочастотный кабель РК-75. Номинал балластного сопротивления $R_d \approx R_1 - R_S$. Величины сопротивлений R_d, R_5, R_6 подбираются так, чтобы высокочастотный кабель РК-75 был согласован со стороны моста. $R_7 \gg (R_1 + R_S)$. Ёмкость конденсатора C выбирается так, чтобы время $\tau = R_7 C$ было гораздо больше времени ударно-волнового нагружения сборки. Электронный ключ K (за ~20 мс) замыкается перед моментом нагружения датчика и размыкается спустя 100 мс. Переменное сопротивление R_4 служит для нулевой балансировки моста. Во время ударно-волнового нагружения происходит разбалансировка моста, которая регистрируется высокочастотным осциллографом Tektronix DPO4104B. Поскольку чувствительный элемент датчика вместе с тоководами представляет собой контур с током, то разбалансировка моста на Рис.3 происходит не только за счёт изменения активного электросопротивления R_S , но и за счёт э.д.с. электромагнитной индукции вследствие изменения магнитного потока через контур датчика. На Рис. 2 графиком 3 показаны типичные осциллограмма $U(t)$ в экспериментах с чувствительным элементом датчика, изготовленного из железа АРМКО и стали 15Х2НМФА.

Обсуждение результатов

В момент t_1 прихода первой ударной волны ступенчатого сжатия (см. Рис.2а) давление P_1 равно P_α (давление начала прямого магнитного превращения). Таким образом, отрицательный импульс U в области t_1 , обусловленный э.д.с. электромагнитной индукции при размагничивании образца железа, может служить маркером прямого превращения оцк↔гпу железа. Из-за высокочастотных колебаний (кривая 1) после момента t_1 давление на короткое время оказывается меньше давления P_ϵ обратного превращения оцк↔гпу железа. Вероятно, в интервале $t_1 < t < t_{\alpha\epsilon}$ происходят поочерёдные $\alpha \leftrightarrow \epsilon$ превращения материала датчика между магнитной α и немагнитной ϵ фазами, что обуславливает сложный профиль $U(t)$ в интервале $t_1 < t < t_{\alpha\epsilon}$. В момент прихода третьей ступени с амплитудой $P_2 \approx 20$ ГПа происходит полное $\alpha \rightarrow \epsilon$ превращение магнитной фазы α в немагнитную фазу ϵ , которое сопровождается вторым сильным отрицательным импульсом U длительностью $\Delta t_{\alpha\epsilon}$. В интервале $t_{\alpha\epsilon} < t < t_{\epsilon\alpha}$ железо находится в состоянии немагнитной фазы ϵ . Величина сигнала U определяется разбалансировкой моста только за счёт изменения активного электросопротивления чувствительного элемента датчика R_S .

После прохождения через максимум при 40 ГПа давление начинает плавно уменьшаться в волне разгрузки. Когда давление достигает величины $P_3 \approx 20$ ГПа на осциллограмме 3 в момент $t_{\alpha\epsilon}$ начинает формироваться положительный импульс U , длительностью $\Delta t_{\epsilon\alpha}$. Давление P_3 начала магнитного превращения $\epsilon \rightarrow \alpha$ можно соотносить с давлением P_ϵ начала обратного превращения оцк↔гпу при разгрузке железа. Также необходимо отметить, что в момент t_2 максимума U давление составляет величину P_4 , практически совпадающую с давлением $P_\epsilon = 12.3$ ГПа начала обратного превращения оцк↔гпу железа в волне разгрузки из [4]. Таким образом, положительный импульс U в области $t_{\alpha\epsilon}$ обусловленный э.д.с. электромагнитной индукции при намагничивании образца железа может служить маркером обратного превращения оцк↔гпу железа, протекающего за время $\Delta t_{\epsilon\alpha}$. Для железа АРМКО $\Delta t_{\alpha\epsilon} \approx \Delta t_{\epsilon\alpha} = 200$ нс.

Итак, сопоставление характеристик оцк↔гпу перехода железа при ударно-волновом нагружении с показаниями датчика магнитного превращения позволяет предположить, что давление и время магнитных превращений железа коррелируют с давлением и временем оцк↔гпу перехода железа при ударно-волновом нагружении. При этом датчик магнитного превращения позволяет установить факт прямого полиморфного оцк↔гпу перехода железа, а также давление $P_\alpha \approx 13.9$ ГПа его начала и длительность ≈ 200 нс этого процесса. Датчик позволяет также установить для железа факт обратного оцк↔гпу перехода и его длительность.

На Рис.2б графиком 1 показан расчётный профиль давления в чувствительном элементе датчика, изготовленном из реакторной стали 15Х2НМФА. Поскольку массовое содержание легирующих добавок в стали невелико (не более 5%), то расчёт был проведён с уравнением состояния для железа, но с использованием упруго-пластических характеристик реакторной стали из [10]. Постановка эксперимента со сталью 15Х2НМФА такая же, как для железа АРМКО. Типичная экспериментальная осциллограмма представлена графиком 3 на Рис. 2б. Осциллограмма содержит отрицательный и положительный импульсы U . То есть, аналогично железу сталь 15Х2НМФА испытывает обратимый полиморфный оцк↔гпу переход при ударно-волновом нагружении. Параметры этого перехода для стали отличаются от таковых для железа. Первая ударная волна амплитудой $P_1 \approx 13$ ГПа не сопровождается появлением отрицательного импульса U . Отрицательный импульс U формируется только при давлении $P_2 \approx 25$ ГПа. Это означает, что давление P_α начала прямого оцк↔гпу перехода в стали 15Х2НМФА больше, чем в железе и находится в интервале $\sim 13 < P_\alpha < \sim 25$ ГПа. Во-вторых, длительность прямого перехода в стали составляет ≈ 300 нс, что в полтора раза превышает длительность прямого перехода для железа. Остальные характеристики – давление P_3 начала обратного оцк↔гпу перехода и соотношение между длительностью прямого и обратного переходов в стали совпадают с таковыми для железа.

Заключение

Разработан датчик магнитного превращения для исследования полиморфного перехода в ферромагнитных сталях. Методика основана на использовании электромагнитного импульса в качестве индикатора полиморфного перехода оцк↔гпу при ударно-волновом нагружении сталей. Зарегистрированы магнитные превращения во время прямого и обратного полиморфного перехода при плоском одномерном ударно-волновом нагружении железа АРМКО. Регистрируемые сигналы датчика коррелируют соответственно с прямым оцк↔гпу и обратным оцк↔гпу полиморфными переходами железа. Для корпусной стали 15Х2НМФА идентифицирован её обратимый полиморфный оцк↔гпу переход, давление и длительность которого превышают аналогичные характеристики для железа АРМКО.

По материалам доклада в ЖТФ представлена статья: А.М. Молодец, А.А. Голышев, А.Н. Емельянов, А.А. Козлов «Магнитные превращения и полиморфный переход ферромагнитных сталей при ударно-волновом нагружении».

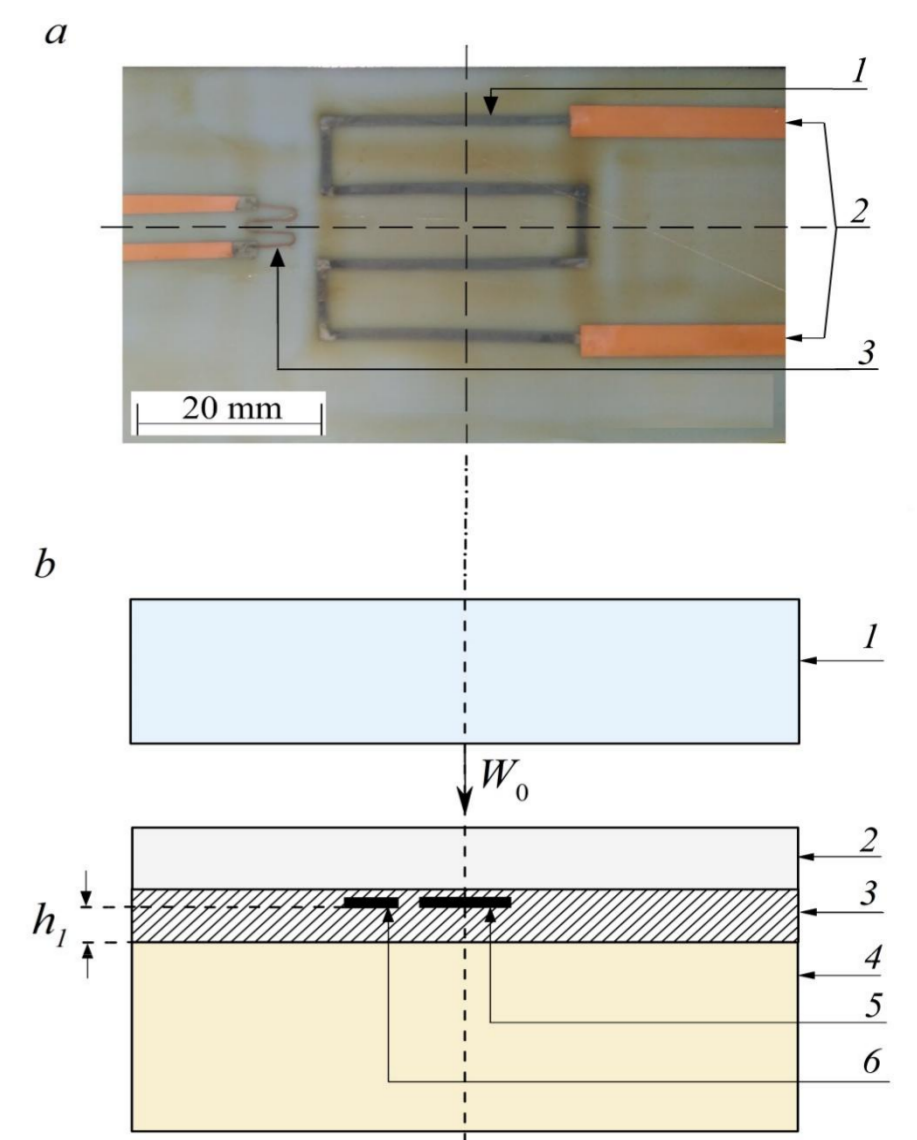


Рис.1 Конструкция датчика и ударно-волновое нагружение измерительной ячейки: а – измерительная ячейка датчика магнитного превращения, 1 – чувствительный элемент используемого датчика толщиной 0.06 мм, 2 – медные тоководы толщиной 0.03 мм, 3 – мanganиновый датчик давления толщиной 0.06 мм; б – плоское одномерное ударно-волновое нагружение измерительной ячейки, 1 – дискообразный алюминиевый ударник толщиной 7.0 мм с плоской частью диаметром 60 мм, разогнанный продуктами взрыва до скорости $W_0 = 2.3(1)$ км/с, 2 – вольфрамовая пластина толщиной 1.45(1) мм, 3 – изолирующий материал (тефлоновые плёнки, склеенные вакуумной смазкой) толщиной $h_0 = 2.45(1)$ мм, 4 – стальная (сталь 12Х18Н10Т) пластина из немагнитного материала толщиной 4 мм, 5 – чувствительный элемент датчика магнитного превращения, 6 – чувствительный элемент мanganинового датчика давления. 5 и 6 расположены в одной плоскости на расстоянии $h_1 = 1.75$ мм от поверхности 4.

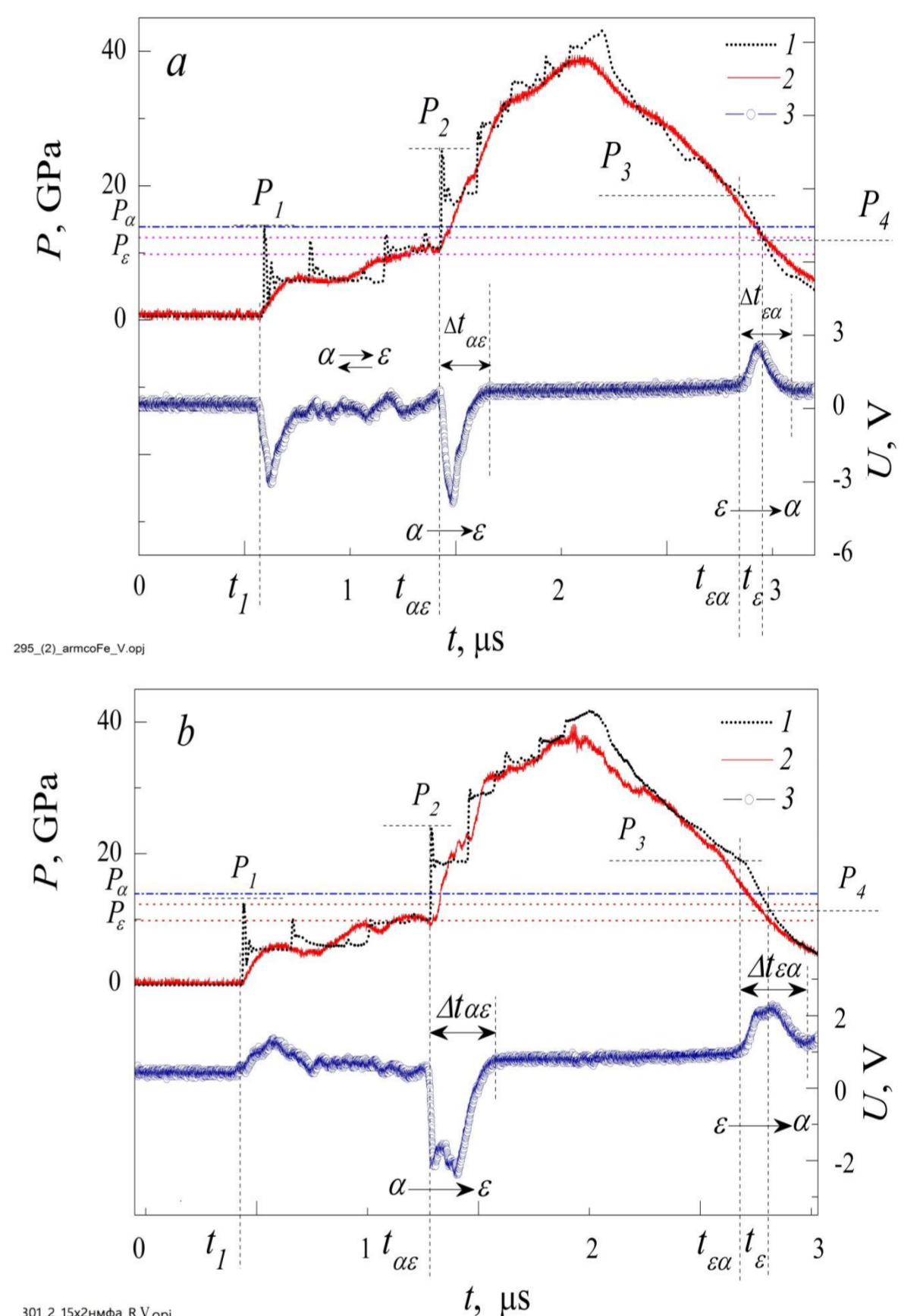


Рис.2 Ударно-волновое нагружение и функционирование датчика магнитного превращения, содержащего чувствительный элемент из железа АРМКО (а) и стали 15Х2НМФА (б). 1 – расчётный профиль давления, 2 – профиль давления в изолирующем материале, 3 – показания U датчика магнитного превращения. Штрихпунктирная горизонтальная линия $P_\alpha = 13.9$ ГПа – давления начала прямого оцк↔гпу превращения железа при ударно-волновом нагружении из [2], верхняя и нижняя пунктирные линии P_ϵ - давления начала обратного оцк↔гпу превращения железа при ударно-волновом нагружении соответственно из [2] ($P_\epsilon = 12.3$ ГПа) и [4] ($P_\epsilon = 9.8$ ГПа).

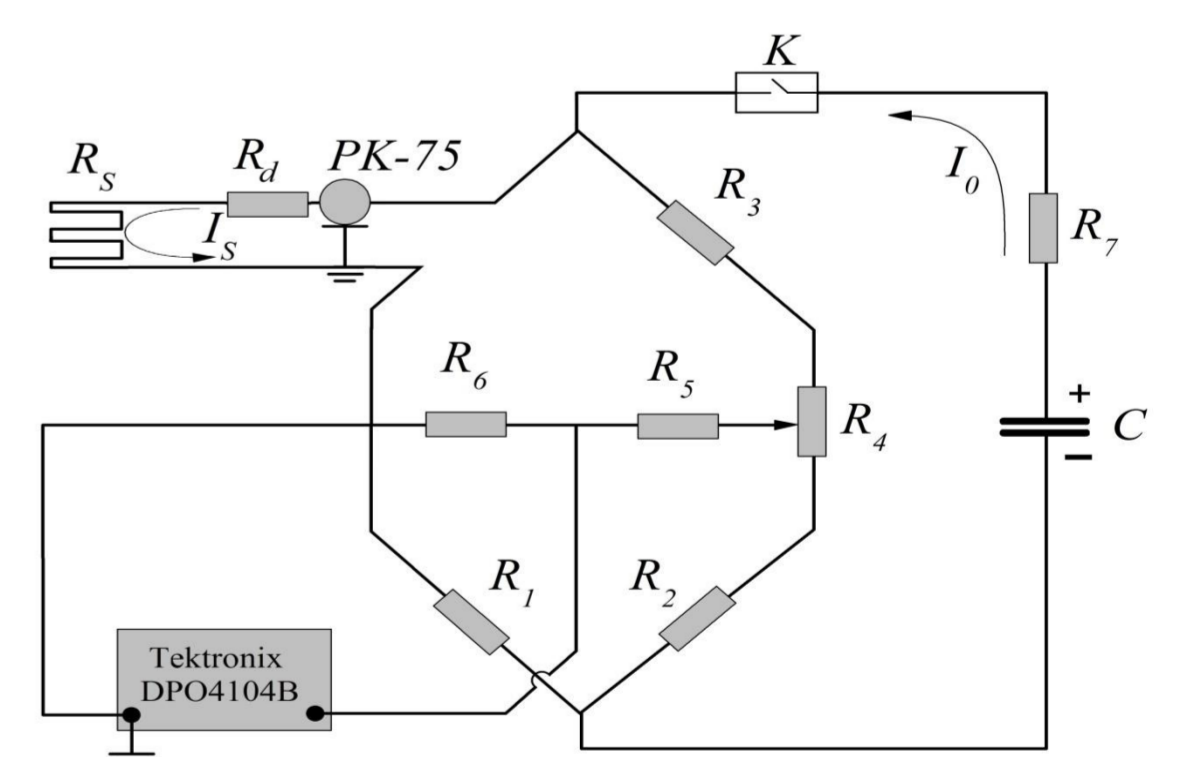


Рис.3 Электрическая цепь датчика. R_S – чувствительный элемент датчика, $I_S \approx 3.13$ А, R_d – балластное сопротивление, $PK-75$ – высокочастотный кабель длиной 10 м, $R_1 = 1.8 \Omega$, $R_2 = R_3 = 150 \Omega$, R_4 – переменное сопротивление 68 Ω , $R_5 = 180 \Omega$, $R_6 = 220 \Omega$, $R_7 = 91 \Omega$, $I_0 \approx 3.16$ А, C – конденсатор ёмкостью 1000 мкФ, предварительно заряженный до 300 В. Входное сопротивление осциллографа Tektronix DPO4104B составляет 1 М Ω .

Список литературы

- [1] R.N. Keeller, A.C. Mithcell. Sol.St.Com, **7**, 271-274 (1969).
- [2] А.В. Ананьин, А.Н. Дрёмин, Г.И. Канель. ФГВ, **17**(3) 93(1981).
- [3] Y. Bi, H. Tan, F. Jing. J.Phys.: Condens.Matter. **14**, 10849 (2002).
- [4] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. J.Appl.Phys. **45**(11) 4872 (1974).
- [5] С.С. Наботов, А.Н. Дрёмин, В.И. Постнов, В.В. Якушев. ПЖЭТФ, **29**(7), 407-410 (1979).
- [6] А.М. Молодец, А.А. Голышев. ФТТ, **61**(8), 1492-1498 (2019).
- [7] А.М. Молодец А.М. ФТТ, **55**(11), 2090-2094 (2013).
- [8] М.Л. Уилкинс. Вычислительные методы в гидродинамике (Мир, М., 1967). С.212-263. [Пер. с англ.: М.Л. Wilkins, in: Methods of Computational Physics, edited by B. Alder, S. Fernbach, and M. Rotenberg. (Academic, New York, 1964), Vol. 3, pp. 211-263.]
- [9] Los Alamos Shock wave Profile data, Editor Charles E. Morris, University of California Press, Berkeley, Los Angeles, London, 1982, ISBN 0-520-04007-4.
- [10] Г.И. Канель, Г.В. Гаркушин, А.С. Савиных, С.В. Разоренов, С.А. Атрошенко. ЖТФ, **90**(3), 441-449 (2020).