

МАШИНОСТРОЕНИЕ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. ТРАНСПОРТ

doi: 10.51639/2713-0576_2023_3_2_44

УДК 539.67+620.17+621.778.1+621.983

ГРНТИ 55.20.15

ВАК 2.4.4

Осевые механические колебания в одиночных проводниках при электроимпульсном воздействии

* Скворцов О. Б., Стащенко В. И.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 101000
Россия, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4*email: * oleg.b.skvorcov@gmail.com, vis20-11@rambler.ru

Электропластический эффект проявляется как снижение сопротивляемости твёрдых электропроводящих материалов при их механической обработке. Этот эффект наблюдается в различных металлах, сплавах, кристаллических и порошковых материалах. В настоящее время отсутствует удовлетворительное описание механизма этого эффекта, несмотря на большой объём проводимых в разных странах экспериментальных исследований. Исследование динамики вибрационного отклика в проводнике на воздействие электрического импульса позволяет выявить важные особенности протекающих при этом физических процессов и предложить модель взаимодействия электрического импульса с материалом проводника. Такая модель объясняет зависимость отклика от полярности электрического воздействия, стабильность размаха отклика для самых разных материалов, поэтапное развитие процесса отклика в виде ударных процессов в моменты прихода фронтов электрического импульса и последующее формирование затухающего процесса колебаний, который не связан с изменениями тока через проводник. В основу модели положена гипотеза о возбуждении ударного отклика на ступенчатое электрическое воздействие. Возникающие затем вибрационные волны от фронтов импульса накладываются и создают вибропластический эффект в материале проводника при его обработке давлением. Формирование ударного воздействия связано с проявлением сил Лоренца при поляризации поверхности проводника во время начала действия скин-эффекта.

Ключевые слова: электропластический эффект, импульсный ток, пинч-эффект, скин-эффект, поляризация.

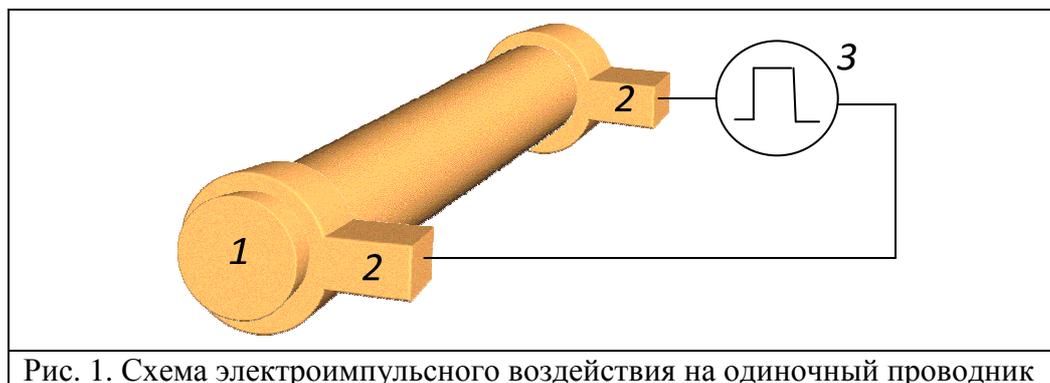
Теория и методы исследования

Воздействие интенсивных электрических токов на металлы сопровождается изменением их физических свойств. Такие воздействия используются при обработке металлов. Одним из таких методов обработки является использование электропластического эффекта [1–5]. При исследовании возможностей его использования важно понимание физических процессов, сопровождающих проявление электропластического эффекта. Для его объяснения было предложено множество гипотез. Такие объяснения как проявление пинч-эффекта, скин-эффекта, динамического теплового действия, «электронного ветра», взаимодействия электрических процессов с дефектами и дислокациями и т. д. не вполне согласуются с

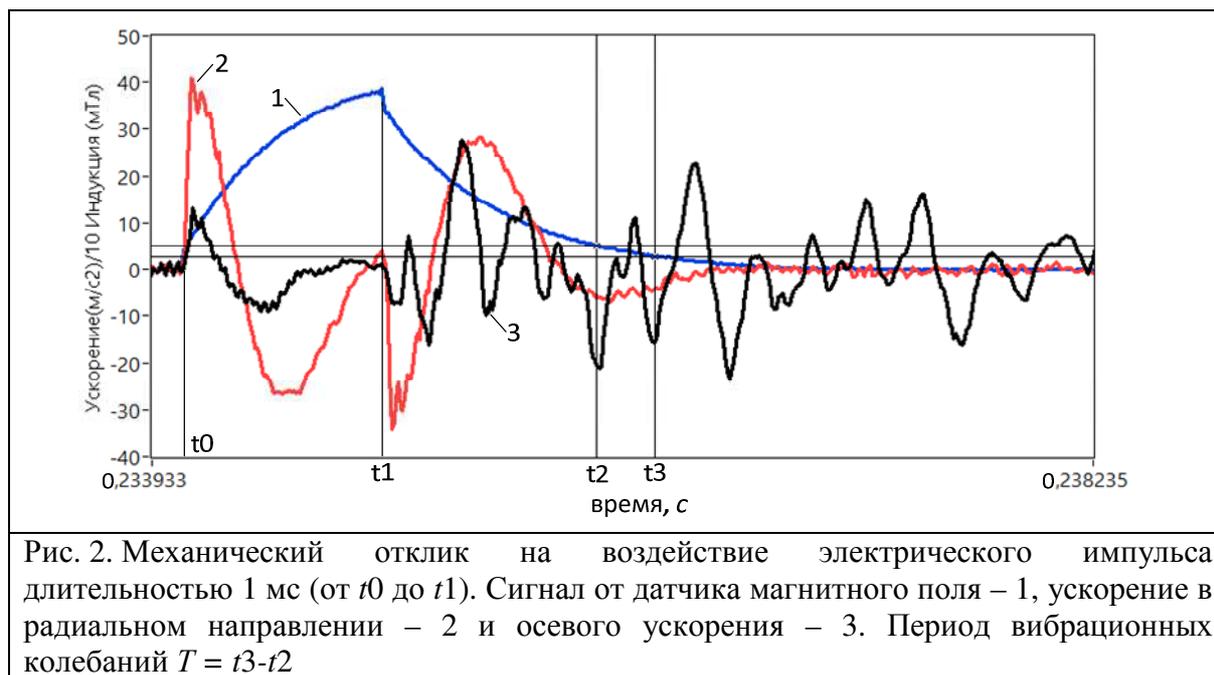
экспериментальными данными. К числу экспериментально наблюдаемых особенностей относятся:

- полярный характер механического отклика, при котором реакция в виде вибрационного колебания проводника по своему знаку зависит от знака внешнего электрического воздействия;
- Общий характер вибрационного отклика для самых разных металлов и сплавов;
- Электропластический эффект наблюдается в кристаллических, аморфных и порошковых материалах;
- Эффективность электропластического эффекта наиболее сильно проявляется при относительно коротких по времени электрических импульсах;
- Максимальное механическое действие связано с моментами прихода фронтов внешнего электрического импульса и не совпадает с моментами максимального уровня тока через материал;
- Знак механического отклика противоположен для переднего и заднего фронтов однополярного электрического импульсного воздействия;
- Механический отклик наблюдается и при воздействии короткого электрического импульса, тепловое действие тока от которого несущественно;
- Сходные с электропластическим эффектом явления в металлах наблюдаются и при отсутствии электрического внешнего воздействия, если на образец воздействует внешняя высокочастотная вибрация.

Пример схемы эксперимента с воздействием внешнего электрического импульса представлен на рис. 1. На симметричный электрический проводник от внешнего генератора поступают одиночные электрические импульсы длительностью 50...150 мкс. Эти импульсы создают в образце ток с плотностью 300...1000 А/мм². Величину тока через образец можно контролировать датчиком магнитного поля. В качестве такого датчика можно использовать бесконтактный датчик Холла, выходной сигнал которого пропорционален величине магнитной индукции.



Вибрационный отклик в образце можно контролировать датчиком вибрации, который закреплён на образце. Для анализа быстропротекающих процессов, как датчик магнитного поля, так и акселерометр должны обеспечивать измерение быстропротекающие датчики процессов. В качестве датчика вибрации используется трёхкомпонентный пьезоэлектрический малогабаритный акселерометр АП20. Такой акселерометр позволяет измерять ускорение в частотном диапазоне до 50 КГц для проводника в осевом и радиальном направлении. На рис. 2 представлены получаемые датчиков сигналы. Сигналы от акселерометра могут быть преобразованы двойным интегрированием в сигналы перемещения. Для образцов при токе импульса 400 А амплитуда перемещений достигает 50...150 мкм. Такие перемещения легко обнаружить и тактильно, без использования измерительной аппаратуры.



Для анализа происходящих процессов предпочтительнее использовать измерение ускорений, поскольку при двойном интегрировании практически полностью подавляются быстрые высокочастотные изменения. Анализ экспериментальных данных показывает, что в поперечном направлении проводник при действии электрического импульса испытывает доминирующие изгибные деформации, а процессы радиального растяжения и сжатия незначительны.

Полученные результаты и их обсуждение

Получаемый вибрационный отклик на основе экспериментальных данных можно представить как последовательное формирование на каждом из фронтов электрического импульса короткого механического удара, приложенного к материалу образца. Такой механический удар вызывает последующие затухающие механические волновые процессы распространения деформаций. Знаки таких механических откликов противоположны для переднего и заднего фронтов электрического импульса и для электрических импульсов противоположной полярности. Для коротких электрических импульсов в материале наблюдается скин-эффект и ток распространяется только в поверхностном слое металла. Происходящие процессы поясняются схемой на рис. 3. Толщина скин-слоя δ в проводнике радиусом r . Проводник имеет длину l ; и представлен элементом сечения толщиной Δl . Через скин-слой протекает ток плотностью J_A . Этот ток создаёт у поверхности проводника кольцевое магнитное поле B_R . На проводник с током в таком поле действует сила Лоренца F_L в радиальном направлении. Такая сила всегда направлена по радиусу к центру проводника независимо от направления тока и ответственна за проявление пинч-эффекта. Эта сила создает сжимающее механическое напряжение, распределенное по всей площади поверхности металла образца. Величина этой силы недостаточна для заметного деформирования металла, но она воздействует на свободные электроны в материале и их радиальное перемещение вызывает эффект поляризации поверхности материала. Процесс поляризации протекает быстро и заканчивается из-за проявления сил Кулона при поляризации.

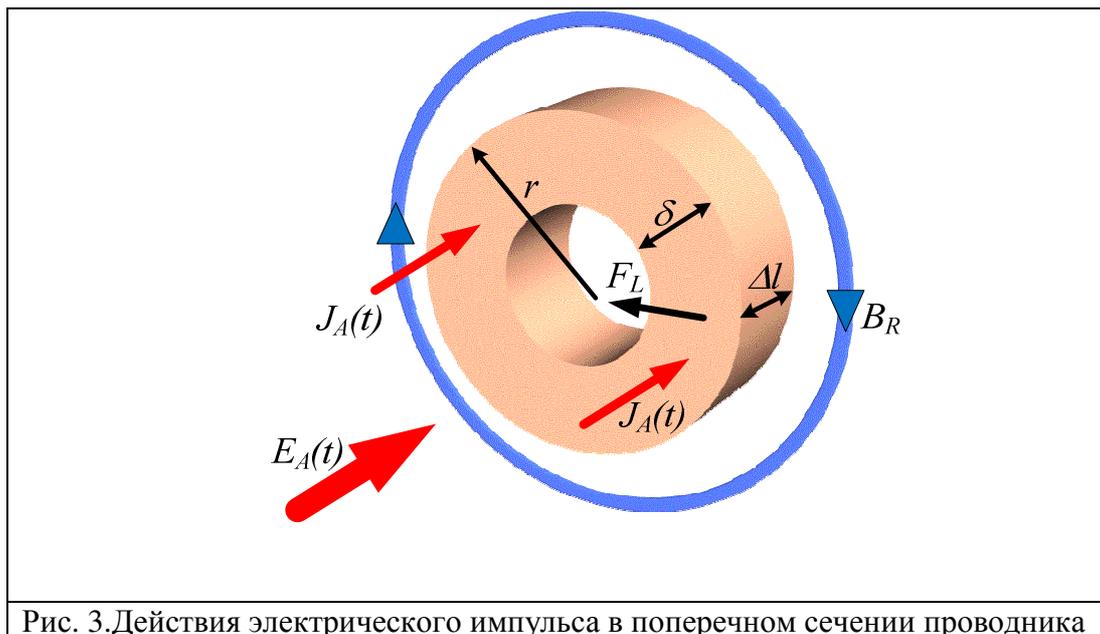


Рис. 3. Действия электрического импульса в поперечном сечении проводника

Кратковременный радиальный ток поляризации взаимодействует в каждом из сечений с кольцевым магнитным полем B_R . Такое взаимодействие для каждого сечения проводника приводит к формированию сил Ампера в осевом направлении. Такие силы для всех сечений проводника направлены в одном направлении и суммируются. Таким образом, создаётся импульс осевой силы в виде удара малой длительности, направление которого зависит от направления внешнего электрического воздействия. Ударный импульс вызывает появление затухающих механических колебаний. Действие этих колебаний приводит к появлению вибропластического эффекта если металл образца в это время подвергается обработке давлением (волочение, прокатка, штамповка и т. п.).

Действие осевой динамической силы может быть непосредственно измерено при использовании датчика динамической силы. Схема такого эксперимента представлена на рис. 4.

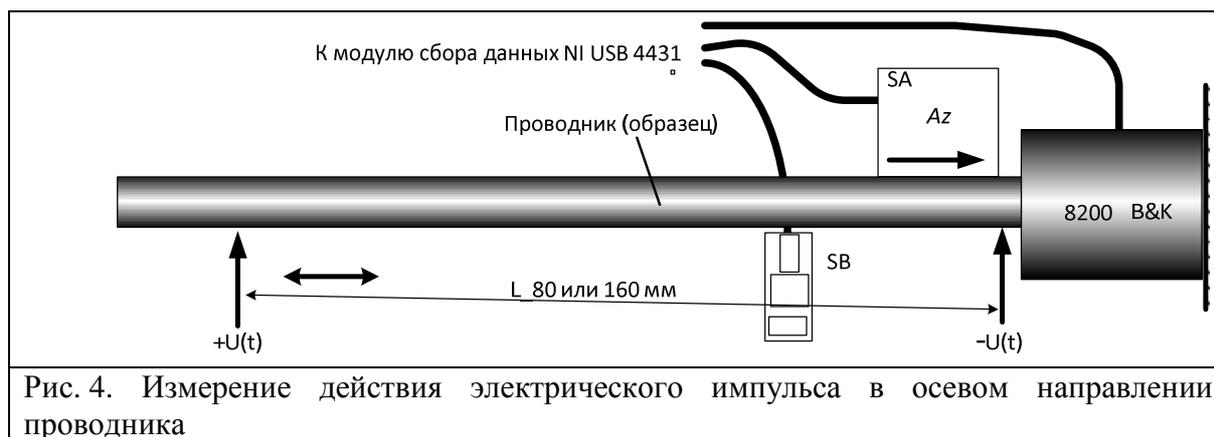
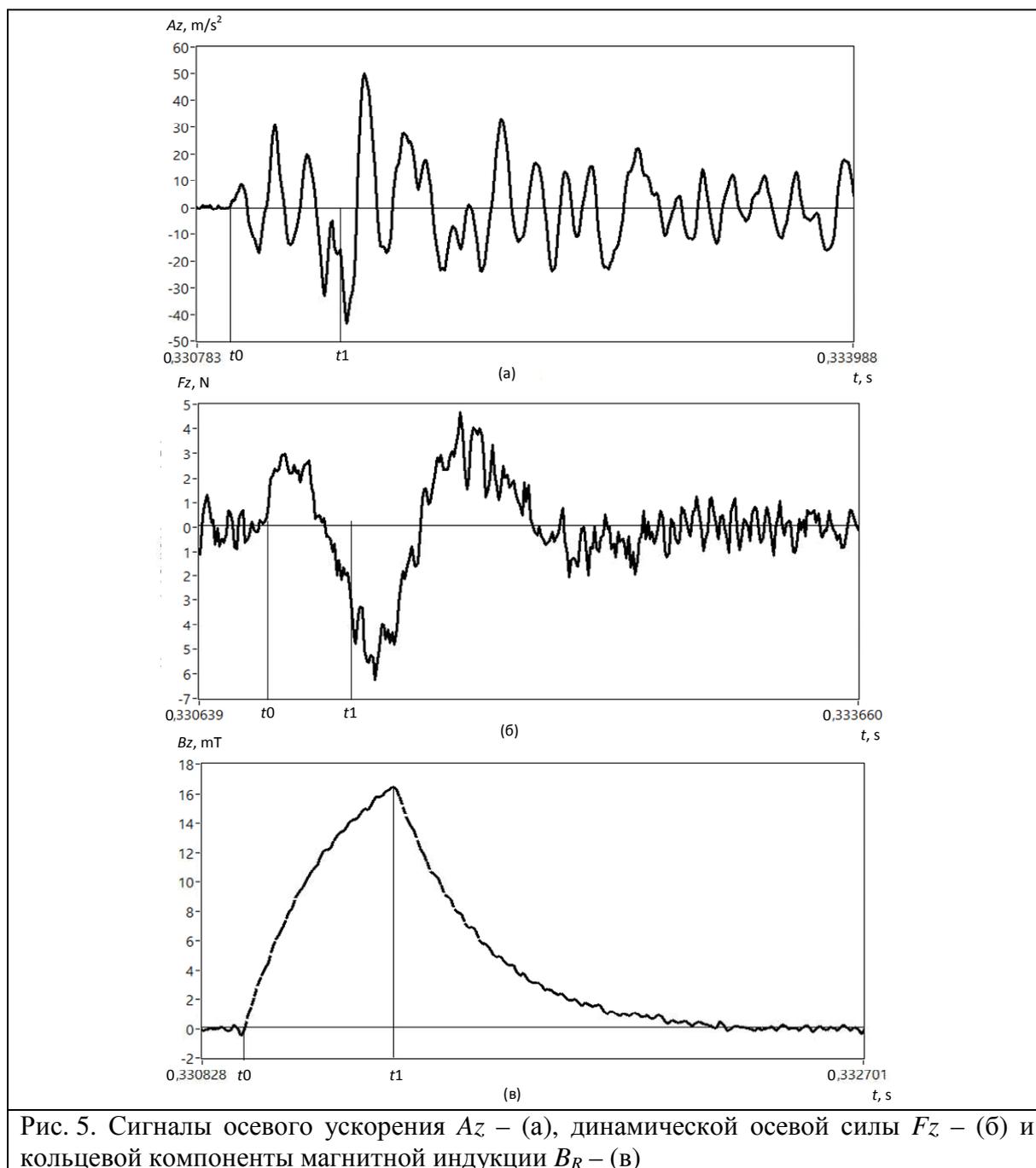


Рис. 4. Измерение действия электрического импульса в осевом направлении проводника

Результаты такого измерения представлены на рис. 5. На нем показаны сигналы осевого ускорения, осевой динамической силы и изменения магнитного поля.



Представленный механизм формирования вибрационного отклика в материале проводника описывает зависимость полярности механического отклика при изменении полярности внешнего электрического воздействия. Он также описывает процесс генерации кратковременного ударного механического импульса в моменты начала фронтов электрического импульса. Направление осевого ударного процесса при этом меняется на обратное при переходе к другому фронту или к другой полярности импульса, что и наблюдается при экспериментах.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Суркаев А. Л., Усачев В. И., Кумыш М. М. Исследование миллисекундного электрического взрыва металлических проводников / Письма в ЖТФ. Т. 37. Вып. 23. 2011. С. 97–104
2. Батаронов И. Л. Механизмы электропластичности / Соросовский образовательный журнал, № 10. 1999.. С. 93–99.
3. Троицкий О. А., Сташенко В. И., Скворцов О. Б., Савенко В. С., Самуйлов С. Д., Терещук В. С., Зайцев С. В., Иванов А. М. Интенсивная пластическая деформация металла при токовых и СВЧ - воздействиях. Новые данные и закономерности / Изд-во «Ким Л.А.». М.: 2020. 342 с.
4. Zhichao Cai Study on the orientation detection of surface cracks by electromagnetic acoustic emission / International Journal of Distributed Sensor Networks. V. 15(4). 2019. P. 11.
5. Demler E., Gerstein G., Dalinger A., Epishin A., Heidenblut T., Nürnberger F., Maier H. J. Influence of high current-density impulses on the stress-strain response and microstructural evolution of the single crystal superalloy CMSX-4 / Materials Research. V. 21. № 6. 2018. P. 1–9.

Axial mechanical vibrations in single conductors under electrical impulse action

Skvortsov O. B., Stashenko V. I.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN)
101000, Russia, Moscow, 4, M. Kharitonyevskiy Pereulok*

The electroplastic effect appears as a decrease in the resistance of solid electrically conductive materials during their mechanical processing. This effect is observed in various metals, alloys, crystalline and powder materials. At present, there is no satisfactory description of the mechanism of this effect, despite the large amount of experimental studies carried out in different countries. The study of the dynamics of the vibrational response in a conductor to the action of an electric impulse makes it possible to reveal important features of the physical processes occurring in this case and to propose a model for the interaction of an electric impulse with the conductor material. Such a model explains the dependence of the response on the polarity of the electrical action, the stability of the response range for a variety of materials, the phased development of the response process in the form of shock processes at the moments of the arrival of the electric pulse fronts, and the subsequent formation of a damped oscillation process that is not associated with changes in current through the conductor. The model is based on the hypothesis of excitation of a shock response to a stepped electric action. The vibratory waves that then arise from the pulse fronts are superimposed and create a vibroplastic effect in the conductor material during its processing by pressure. The formation of the shock effect is associated with the manifestation of Lorentz forces during the polarization of the conductor surface during the onset of the skin effect.

Keywords: electroplastic effect, pulsed current, pinch effect, skin effect, polarization.