

УДК 534.8:537.8:538.951:538.956:539.21:539.376:620.178.6

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ПРОВОДНИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

*О.Б. Скворцов<sup>1,2</sup>, В.И. Сташенко<sup>1</sup>, О.А. Троицкий<sup>1</sup>*

*E-mail: oatroitsky@mail.ru*

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-технический центр «Завод балансировочных машин», Москва, Россия

**Аннотация.** Рассмотрены особенности вибрационного отклика металлических консолидированных образцов на воздействие электрических импульсов. Представлены результаты экспериментальных исследований, которые могут быть использованы при анализе физических процессов, связанных с деформацией металлических проводников в условиях воздействия электрических импульсов. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы при исследовании свойств электропроводящих конструктивных элементов электромеханического оборудования, при разработке средств неразрушающего контроля, методов обработки поверхности металлов, а также при создании разъемных и неразъемных соединений.

**Ключевые слова:** электрический импульс, вибрация, деформация, ультразвук, сварка, электропластический эффект, упрочнение, разупрочнение, скин-эффект, пинч-эффект.

## DYNAMIC EFFECTS IN CONDUCTORS EXPOSED TO PULSE CURRENTS

*O.B. Skvorcov<sup>1,2</sup>, V.I. Stashenko<sup>1</sup>, O.A. Troickij<sup>1</sup>*

*E-mail: oatroitsky@mail.ru*

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>“Zavod Balansirovochnykh mashin” STC, Moscow, Russia

**Abstract.** Features of vibrational response of metal consolidated samples to electrical impulses impact are considered. Results of experimental studies that can be used in analysis of physical processes associated with deformation of metal conductors under the influence of electrical impulses are presented. Obtained experimental data can be used in study of properties of electrically conductive structural elements of electromechanical equipment, in development of non-destructive testing methods, surface treatment of metals, as well as in creation of detachable and permanent connections.

**Keywords:** electric impulse, vibration, deformation, ultrasound, welding, electroplastic effect, hardening, softening, skin effect, pinch effect.

### **Введение**

Влияние различных энергетических колебаний, вызываемых внешними источниками, на свойства металлических проводников нашло практическое применение для обработки металлических конструктивных элементов машин, инструментов, используется в процессе обработки металлов, при создании приборов неразрушающего контроля и диагностики оборудования [1]. Одно из таких воздействий основано на действии электрических импульсов на металлы.

Такие физические процессы широко применяют на практике при электроэрозионной и электропластической обработках [2]. Воздействие импульсного электрического поля, приложенного к металлическому образцу, вызывает в таком проводнике появление направленных и вихревых токов и сопровождается проявлением пинч- и скин-эффектов. Механическое взаимодействие на отдельные части металлического проводника с током связано с действием закона Лоренца. Пропускание импульсного тока высокой плот-

ности даже через отдельный металлический проводник сопровождается процессами вибрации. Связанные с этим деформации могут носить как упругий, так и неупругий характер. При больших плотностях тока возможны большие деформации проводника или даже его разрушение. Внешнее воздействие на проводники сопровождается передачей энергии, приводящей к нагреванию. В случае прохождения тока через проводник происходит его нагрев в соответствии с законом Джоуля. Тепловое действие пропорционально времени внешнего воздействия и его интенсивности. При импульсном электрическом воздействии малой длительности и ограниченной амплитуды нагрев металла сравнительно мал и его влияние часто незначительно. При большой интенсивности и длительности внешнего воздействия влияние нагрева может стать определяющим и важным. Это происходит при выполнении электроимпульсной сварки.

Воздействие импульсных токов используется прежде всего для модификации поверхностных свойств образца путем его упрочнения или разупрочнения.

Имеются исследования, которые указывают, что электроимпульсная обработка может приводить к ухудшению основных механических характеристик испытываемых материалов [3]. В частности, при использовании электроимпульсной обработки при волочении ухудшается пластичность обрабатываемого материала.

Для эффективного использования электроимпульсной обработки металлов необходимо понимание закономерностей действия импульсного электрического тока на металлы. В работе [4] был сделан вывод о множественном характере таких процессов и о различном характере доминирующего вклада в такие деформации разных физических явлений для областей упругой и пластической деформации. В работе [5] представлен перечень и критика возможных механизмов электропластического эффекта от действия импульсного электрического тока на проводники. В этой работе отмечается, что отсутствует непротиворечивое описание происходящих при этом физических процессов. Новые публикации в рассматриваемой области [6, 7] показывают, что вопросы неоднозначного понимания физики происходящих процессов и согласования предлагаемых механизмов еще далеки от решения. В источнике [7] отмечено, что деформационные процессы связаны с проявлением изменений фазового состава и поляризации поверхности из-за наличия на нем покрытий. Деформации наблюдаются и в условиях отсутствия таких покрытий на материале образца, а происхождение деформаций вблизи ниж-

ней границы области пластической деформации остается неясным.

### **Механизмы электроимпульсного воздействия на металлы**

При внешних воздействиях на металлические образцы имеется вклад в деформационные процессы температурных изменений. Величина этого вклада может быть различной в зависимости от количества внешней энергии, преобразуемой при этом в тепло. Связанный с этим нагрев может не быть прямой и первичной причиной деформации, но может оказывать влияние на механические свойства материала образца и соответствующим образом изменять получаемые при экспериментах результаты. Поэтому влияние нагрева при анализе результатов необходимо учитывать. Динамический нагрев поверхности образца сам по себе является известным и эффективным средством для изменения механических характеристик таких образцов при закаливании или отжиге. Таким образом, эффекты от воздействия температуры могут скрывать проявление прямого взаимодействия внешнего воздействия на образцы. При анализе механизмов происходящих процессов для снижения влияния температуры желательно снизить интенсивность и длительность внешних воздействий на образец. При воздействии электрических импульсов на образцы можно ограничиться исследованием отклика на отдельные импульсы или несколько импульсов, что исключает заметный нагрев образца при эксперименте.

При исследовании электроимпульсного эффекта часто используют тестовое оборудование для испытания образцов с представлением результатов в виде зависимости приложенного напряжения от задаваемой статической деформации. Внешнее электроимпульсное воздействие приводит к появлению всплесков в виде увеличения или уменьшения на получаемой зависимости. По величине таких всплесков анализируют влияние электроимпульсного воздействия на механические свойства материала.

Использование испытательных машин обеспечивает получение диаграмм деформация – нагружение, но достоверность получаемых данных снижается из-за низкого быстродействия имеющихся в таком оборудовании измерительных приборов [8].

Получаемые по этой методике данные характеризуют результат воздействия суммы заданного квазистатического нагружения и динамического воздействия деформаций, вызываемых колебаний, создаваемых импульсов электричества [9], ультразвука и др. Представленные в работе [9] результаты испытаний показывают,

что при действии электрических импульсов длительностью 100 мкс и периодом в 3 с на образце наблюдаются скачки температуры на величину порядка 40 °С, а также скачкообразные увеличения деформации. При изменении величины тока наблюдается разнонаправленное изменение такой зависимости. При этом изменения носят не случайный характер, так как полученные результаты характеризуются хорошей повторяемостью. Дополнительное действие импульсов тока приводит к снижению величины механических напряжений и увеличению значения деформации разрушения. Воздействие последовательности импульсов тока на материал проводника может вызывать нагрев образца. Повышение температуры образца в процессе испытаний может исказить получаемые зависимости изменения механических характеристик металла при исследовании нетеплового действия электрических импульсов. В этом случае можно стабилизировать температуру металла путем использования системы охлаждения [10]. Получаемые результаты показывают, что нагрев образца неравномерен по его длине, а изменения в зависимостях, полученных во время электрического импульса для разных значений величины тока, более четко выражены.

Кроме прямого подключения металлической заготовки к источнику электричества проводили исследования по влиянию вихревых токов, формируемых установленной вблизи исследуемого проводника индуктивностью, на которую подаются высокочастотные электрические импульсы [11, 12]. Действие вихревых токов при этом проявляется в виде сбросов механического напряжения в моменты подачи импульсов. Величина таких сбросов пропорциональна амплитуде электрических импульсов.

Обработка вихретоковым воздействием обеспечивает улучшение усталостной стойкости алюминиевых сплавов, но чрезмерная длительность такой обработки приводит уже не к увеличению, а к снижению усталостной прочности. Такую особенность можно рассматривать как следствие общих закономерностей циклической усталости: при кратковременном воздействии проявляются эффекты упрочнения и заживления поверхностных трещин, а при длительном воздействии циклических нагрузжений проявляются эффекты сверхмногоциклового (гигациклового) усталости, которую обычно связывают с активизацией внутренних (заглубленных) дефектов материала.

Еще более сложный характер происходящих процессов на испытываемых образцах проявляется в случае одновременного воздействия нескольких внешних влияющих факторов, напри-

мер, электрических импульсов и высокочастотного облучения [1, 13] или электрических импульсов и ультразвука [14]. Воздействие ультразвуковых импульсов оказывает на нагружаемый образец действие, сходное с действием электрических импульсов [15].

Среди важных результатов работы [14] следует отметить, что действие электрических импульсов проявляется сходным образом как в области пластических, так и в области упругих деформаций. Это показывает, что при исследовании физических процессов в проводнике при действии импульсного тока можно проводить испытания в условиях отсутствия статического нагружения и при относительно малых амплитудах электрических импульсов.

Низкое быстродействие измерительной системы не позволяет получить информацию о быстрых механических процессах в образце. Для исследования динамики происхождения деформационных процессов следует максимально упростить условие эксперимента. При этом можно исключить влияние статического нагружения и использовать измерительную аппаратуру, обеспечивающую анализ быстротекущих механических и электрических процессов в отдельном металлическом образце. Такие упрощенные эксперименты показывают наличие деформационного отклика на воздействие электрических импульсов, приложенных к образцам из различных металлов и сплавов.

Для объяснения процессов деформации проводника в условиях воздействия электрического импульса было предложено много различных физических механизмов. Приложенное электрическое поле может преобразовываться в механические перемещения (деформации) проводника на основе перечисленных ниже физических явлений.

Рассмотрим предлагаемые механизмы электроимпульсной деформации. В работе [16] электропластический эффект рассматривается как частный случай анизотропного межзернового перемещения (AGM) материала образца. Эффект AGM является следствием постоянного тока, вызванного эффектом увлечения электронов поверхностными плазмонными поляритонами в поверхностном слое металла. Электроны передают свой импульс границе зерна и облегчают перемещение этой границы. Этот процесс является объяснением эффективности применения электрического воздействия при волочении металлической проволоки. В работе [16] отмечено, что кроме электропластического эффекта при волочении заметное влияние оказывает и пондеромоторный эффект. На улучшение структуры материала при этом оказывает влияние также эффект Стюарта-Толмана. Последнее утверждение вызывает сомнения, поскольку

ку внешние приложенные электрические воздействия несопоставимо больше возможных электрических напряжений, генерируемых в материале образца при торможении последнего. Отметим указание автора на линейный характер зависимости величины электропластического эффекта от величины тока и отсутствие этого эффекта при воздействии переменным током.

Как показывают эксперименты, сравнительно плавные изменения напряжения при воздействии переменного тока отличаются от действия электрических импульсов, когда динамические механические напряжения генерируются именно в моменты начала переднего и заднего фронтов электрического импульса.

Взаимодействие электронного ветра с дислокациями описывает механическое взаимодействие электронов с атомами и дефектами кристаллической решетки, оно является основной причиной деформационных процессов в образцах при действии электрических импульсов [17]. По мнению авторов эффективность воздействия электрических импульсов при холодном волочении, залечивании трещин и дефектов, а также уменьшение размеров зерен материалов связаны с действием электропластичности, электромиграции, перекристаллизации, фазовыми превращениями и механическим взаимодействием электронов с атомами и дислокациями.

Для объяснения механизмов механического действия электрических импульсов также было предложено использовать динамический пинч-эффект, последствия скин-эффекта, магнитогидродинамические процессы, которые связаны с эффектом Холла [18, 19].

Предлагаемые гипотезы не позволяют непротиворечиво описать механическое действие электрического импульса с учетом линейности,

зависимости от полярности и активным проявлением действующих сил в условиях малой величины протекающего тока.

### Экспериментальные результаты

Для упрощения анализа динамических деформаций в образце при пропускании импульсного тока рассмотрим результаты испытаний в условиях отсутствия статического нагружения образца и при относительно малых амплитудах приложенного к образцу электрического импульса. Пониженный уровень электрического воздействия позволяет исключить влияние пластической деформации. Для контроля динамических сил на поверхности образца можно использовать высокочастотный акселерометр, закрепленный на поверхности образца.

Использование трехкомпонентного акселерометра позволяет следить за осевой  $a_A$  и радиальной  $a_R$  компонентами ускорения. Динамику изменения ускорения на поверхности образца можно синхронизировать с одновременными изменениями тока через образец. Значение тока контролируется по измерениям индукции магнитного поля около образца. Контроль магнитной индукции  $B$  выполняется бесконтактным датчиком Холла с высокой скоростью отклика. Измерения выполняются с использованием многоканального синхронного модуля сбора данных с частотой дискретизации более 100 кГц.

На рис. 1 представлена типичная зависимость изменения магнитной индукции. Отметим наличие скачкообразных изменений магнитной индукции в моменты, соответствующие началу переднего и заднего фронтов приложенного электрического импульса. Амплитуда таких скачков для переднего и заднего фронтов оказывается одинаковой, а знак изменения противоположным.

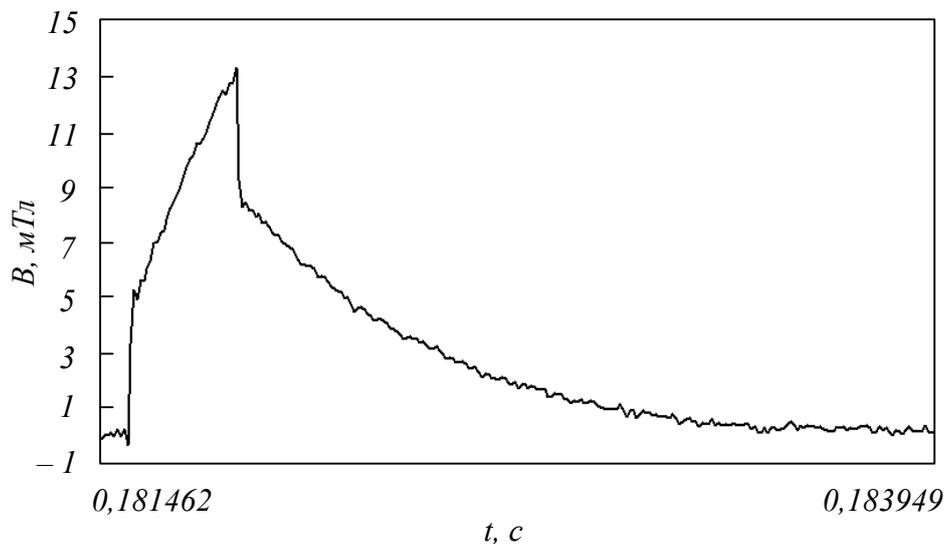


Рис. 1. Зависимость изменения магнитной индукции около медного образца (диам. 3 мм)

После скачкообразного изменения наблюдается плавное увеличение магнитной индукции, связанное с наличием собственной индуктивности проводника и влиянием скин-эффекта. Такие плавные изменения по величине хорошо согласуются с оценками, получаемыми для рассматриваемой цепи при использовании моделей с учетом индуктивности и скин-эффекта. Величина скачкообразных изменений в начальные моменты переднего и заднего фронта электрического импульса зависит не только от амплитуды приложенного импульса, но и от материала металлического образца и его геометрических размеров. Значительное изменение амплитуды таких скачкообразных изменений от выбора материала образца (сталь, алюминий, медь, серебро, золото, титан) при равенстве остальных условий эксперимента позволяет исключить возможность прямой наводки от приложенного электрического импульса на цепи измерительных датчиков.

На рис. 2 приведены синхронные зависимости изменения магнитной индукции и радиальной компоненты ускорения для образца из стали. В этом случае амплитуда скачкообразных изменений сравнительно мала. Приведенная зависимость показывает, что формируемые силовые воздействия привязаны к начальным моментам  $t_1$  и  $t_2$  соответственно переднего и заднего фронтов приложенного импульса. После этих моментов в материале образца формируются затухающие колебания.

Такие колебания при большой длительности электрического импульса близки по форме, но имеют противоположный знак. Если длительность импульса менее нескольких миллисекунд, колебания от начальных моментов переднего и заднего фронтов складываются. В этом случае в

зависимости от соотношения фаз возможно получение большой амплитуды при малой длительности электрического импульса [20].

Увеличение амплитуды при сложении колебаний от переднего и заднего фронтов наблюдается при длительности порядка 100 – 200 мкс. Этот результат можно рассматривать как обоснование оптимальности выбора такой длительности при выполнении обработки металла с использованием электропластического эффекта. Наблюдаемые колебательные процессы, привязанные к моментам времени  $t_1$  и  $t_2$  по своему характеру близки к результату воздействия в эти моменты механических ударных процессов малой длительности, причем такие ударные процессы имеют близкие амплитуды и противоположны по знаку. В некоторых случаях такие ударные импульсы заметны в записываемых сигналах ускорения. Длительность таких ударных воздействий не превышает 10 – 20 мкс, что близко к пределу разрешения по частоте дискретизации использованной измерительной системы.

Большинство предположений, касающихся механизмов возникновения деформаций при действии электрического импульса на образец, в качестве следствия описывают неполярный характер отклика на электрическое воздействие. Другими словами, формируемые динамические деформации не должны зависеть от знака приложенного напряжения. Для экспериментальной проверки этого вывода к металлическому образцу были приложены электрические импульсы с чередующейся полярностью и одинаковой амплитудой. Сигналы магнитной индукции показывают действие электрических импульсов в противоположных направлениях. Последова-

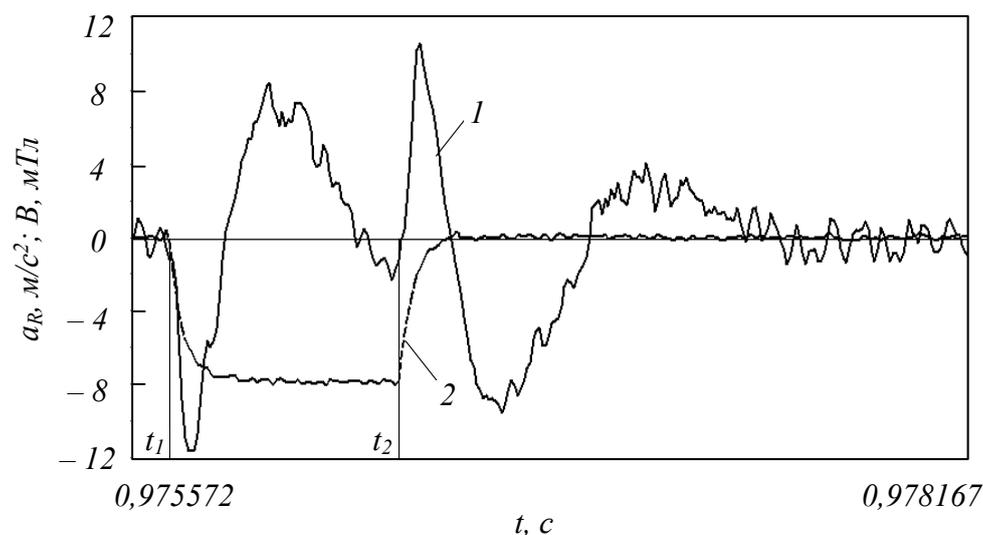


Рис. 2. Сигналы ускорения (1) и магнитной индукции (2) при воздействии электрического импульса на образец из нержавеющей стали (диам. 3 мм)

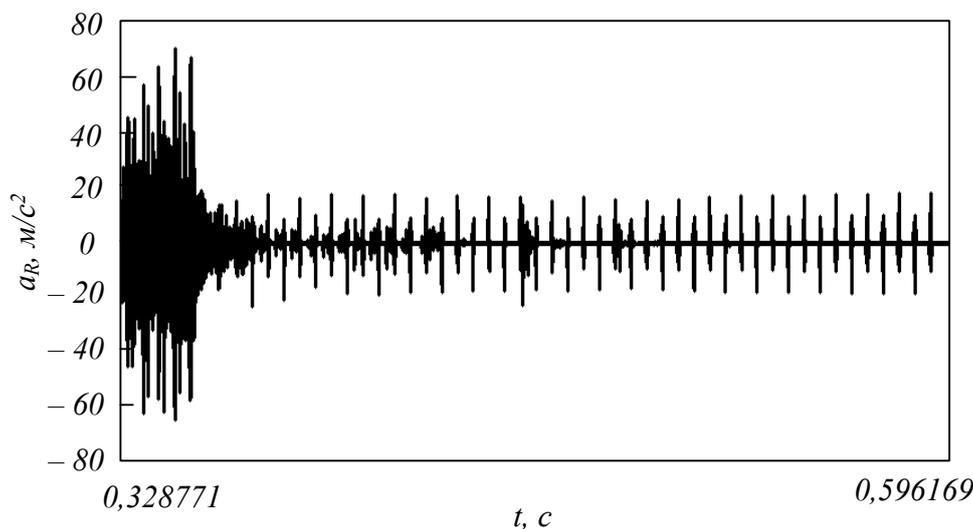


Рис. 3. Радиальное ускорение (золото, диам. 1 мм) для импульсов чередующейся полярности

тельные импульсы вызывают нагревание образца (не более чем до 80 – 100 °С), что сопровождается некоторым увеличением сопротивления образца и соответствующим снижением тока и магнитной индукции.

Для представленного пакета импульсов была выполнена запись сигналов ускорения радиальной и осевой составляющих. Зависимость радиальных ускорений представлена на рис. 3. Отклик по осевым ускорениям незначительно увеличивается, что можно объяснить нагревом проводника, а отклик радиальных ускорений сначала увеличивается, а затем снижается. Изменения радиальной и осевой вибрации в процессе воздействия пакета импульсов показывает сложный характер процесса деформации проводника. Различия в характере зависимостей показывают, что получаемые результаты не являются следствием прямых помех от приложенного электрического импульса цепи подключения датчиков.

В условиях воздействия сравнительно малых токов (средняя плотность тока порядка 300 А/мм<sup>2</sup>) наблюдаются значительные динамические силы, соответствующие перегрузкам до 10g, и перемещения с амплитудой в десятки микрометров.

Проведенные эксперименты показали похожие по характеру результаты для различных материалов образца (медь, сталь, серебро, золото). Получаемые при этом отличия носят количественный, а не качественный характер. Это свидетельствует об общей природе происходящих при этом процессов преобразования действия электрического импульса в деформации металлического образца.

#### **Обсуждение механической реакции проводника на пропускание тока**

Проведенные эксперименты позволили снизить возможное влияние дополнительных внеш-

них воздействий на результаты измерений. Примером таких внешних воздействий является дополнительное статическое или квазистатическое нагружение в виде сжатия или растяжения, ведущее к появлению пластической деформации. Исключение такого влияния упрощает условия исследования процесса, но и в таких условиях поведение металла при пропускании электрических импульсов остается достаточно сложным. Такое поведение не удастся описать не только количественно, но и качественно существующими теориями формирования динамических деформаций в результате воздействия электрических импульсов. Некоторые особенности могут получить удовлетворительное объяснение. Примером служат особенности наблюдаемых процессов нелинейной зависимости от длительности импульса.

В других случаях еще предстоит описать физические процессы, происходящие при действии электрического импульса. Примером может быть генерация механического «удара в моменты начала и окончания» приложенного электрического импульса.

Следует отметить, что генерация механического ударного процесса в начальный момент электрического импульса ограничивает возможность использования гипотез, основанных на действии электрического тока и создаваемого при этом магнитного поля, поскольку в этот момент величина тока близка к нулевому значению.

Наблюдаемые скачкообразные изменения магнитного поля могут быть получены дополнением эквивалентной схемы объекта, включающей индуктивности, собственные сопротивления, паразитные емкости и эквивалентные схемы, моделирующие скин-эффект, дополнительным дифференцирующим элементом. Физический смысл такого дифференцирующего элемента остается пока неопределенным.

Линейная зависимость динамического механического отклика от амплитуды приложенного электрического импульса независимо от полярности также показывает, что такие процессы как динамический нагрев или пинч-эффект не являются определяющими. Зависимость от полярности электрического импульса ограничивает возможность объяснения на основе влияния скин-эффекта или поверхностной поляризации металла.

Наблюдаемые процессы проявляются в широком диапазоне амплитуд электрического воздействия, в том числе и при малых уровнях, недостаточных для заметной пластической деформации. В связи с этим возникает вопрос о наличии синергизма механизма возбуждения механических деформаций и процессов, связанных с пластической деформацией, или синергизма действия динамических сил, генерируемых в виде затухающих вибрационных колебаний и статического нагружения материала. Дальнейшее исследование этих вопросов необходимо для понимания и оптимизации применяемых режимов электроимпульсной обработки, используемой при выполнении упрочнения, металлообработки и разработке методов неразрушающего контроля металлических материалов и конструктивных элементов различного оборудования.

### **Выводы**

Полученные экспериментальные данные о формировании динамических вибрационных процессов в металлических образцах при пропускании импульсного электрического тока показывают наличие несоответствия имеющихся гипотез механизмов электродеформации и электропластичности. Предложенная методика проведения экспериментов позволяет снизить влияние на результаты множества различных процессов, происходящих в различных материалах и различных внешних условиях, и показывает наличие общего механизма формирования механического действия импульсного тока. Такое действие характеризуется линейной зависимостью от амплитуды электрического импульса и зависит от его полярности. Данный механизм должен включать затухающие колебательные или аperiodические динамические процессы, учитывающие быстрые изменения динамических сил, которые затруднительно анализировать по результатам низкочастотного контроля перемещений (деформаций) поверхностного слоя металлического образца.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Воздействия импульсами тока и СВЧ-излучением на конструкционные материалы. Электродинамические и электрохимические эффекты в проводниках / О.А. Троицкий, В.И. Стащенко, В.С. Савенко, О.Б. Скворцов, С.Д. Самуйлов, Е.А. Правоторова, В.С. Терещук. – М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2019. – 278 с.
2. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 9. С. 65 – 76.
3. Osamudiamen O., Arunansu H., Rongshan Q. Macroscopic characterization of mechanical properties in electric current treated dry drawn high strength wires // MRS Advances. 2017. Vol. 17. No. 2 (17). P. 963 – 974.
4. Okazaki K., Kagawa M., Conrad H. Additional results on the electroplastic effect in metals // Scripta metallurgica. 1979. Vol. 13. P. 277 – 280.
5. Батаронов И.Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 93 – 99.
6. Lahiri A., Shanthraj P., Roters F. Understanding the mechanisms of electroplasticity from a crystal plasticity perspective. Modelling Simul // Mater. Sci. Eng. 2019. No. 27. P. 28.
7. Yu-chen Liu, Shih-kang Lin. A critical review on the electromigration effect, the electroplastic effect, and perspectives on effect of electric current upon alloy phase stability // JOM. 2019. Vol. 71. P. 45.
8. Sprecher A.F., Mannan S.L., Conrad H. Overview no. 49: On the mechanisms for the electroplastic effect in metals // Acta Metallurgica. 1986. Vol. 34. No. 7. P. 1145 – 1162.
9. Andre D., Burlet T., Körkemeyer F., Gerstein G., Sandlöbes-Haut S., Korte-Kerzel S. Investigation of the electroplastic effect using nanoindentation // Materials & Design. 2019. Vol. 183. P. 1 – 10.
10. Gennari C., Pezzato L., Simonetto E., Gobbo R., Forzan M., Calliari I. Investigation of electroplastic effect on four grades of duplex stainless steels // Materials. 2019. No. 12. P. 18.
11. Unger J., Stierner M., Walden L., Bach F., Blum H., Svendsen B. On the effect of current pulses on the material behavior during electromagnetic metal forming. – In book: 2nd International Conference on High Speed Forming. 2006. P. 23 – 32.
12. Mohin M.A., Toofanny H., Babutskyi A., Lewis A., Xu Y.G., Effect of electromagnetic treatment on fatigue resistance of 2011 aluminum alloy // Journal of modeling. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 1 – 6.
13. Troitskiy O.A., Stashenko V.I. Combined effect of the electric current magnetic field and microwave radiation during the deformation of the stainless steel. Consolidation 2016. – In book: IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. No. art. 218.

14. Chen Ye. The effect of ultrasonic waves on tensile behavior of metal. – University of Windsor, 2016. – 121 p.
15. Sedaghat H., Xu W., Zhang L. Ultrasonic vibration-assisted metal forming: Constitutive modeling of acoustoplasticity and applications // Journal of Materials Processing Tech. 2019. Vol. 265. P. 122 – 129.
16. Makin V.S. Control the metal grain boundary recrystallization evolution by the laser radiation electric field strength direction under cyclic thermal loading. – In book: Materials Science. 2017. P. 161 – 174.
17. Zhu Y., To S., Lee W., Liu X., Jiang Y., Tang G. Electropulsing-induced phase transformations in a Zn–Al-based alloy // J. Mater. Res. 2009. Vol. 24. No. 8. P. 2661 – 2669.
18. Суркаев А.Л. Возникновение магнитогидродинамических возмущений в металлических проводниках при протекании импульса прямого тока // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 7. С. 37 – 44.
19. Skal A.S. The full Lorentz force formula responsible for turbulence in solids and fluids and explained Faraday’s paradox // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2013. Vol. 4. No. 2. P. 10 – 16.
20. Troickij O.A., Skvorcov O.B., Pravotorova E.A., Stashenko V.I. Analysis of the Relationships for the Vibrational Response to the Excitation of Vibro-Acoustic Processes in Conductors from the Action of a Pulsed Current. – In book: 15th International School-Conference “New materials – Materials of innovative energy: development, characterization methods and application“. – KnE Materials Science. 2018. P. 611 – 620.

© 2020 г. *О.Б. Скворцов, В.И. Сташенко, О.А. Троицкий*  
Поступила 3 февраля 2020 г.