

УДК 539.374+621.77+621.9+681.883
DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-67-77

ДЕФОРМИРОВАНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В. С. САВЕНКО

*Учреждение образования «Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина»,
Республика Беларусь*

О. Б. СКВОРЦОВ, В. И. СТАШЕНКО

*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова
Российской академии наук, г. Москва*

Рассмотрены аналогии в проявлении влияния на деформацию металлов различных видов дополнительного внешнего воздействия. Частным случаем такого воздействия является пропускание через локальную область деформации импульсов электрического тока высокой плотности. На основе анализа используемых при изучении деформации металлов экспериментальных данных о быстрых динамических процессах в деформационной зоне сделан вывод о важности последовательности преобразования электрического импульсного воздействия в механический ударно-волновой процесс на кинетику пластической деформации металла с модификацией микроструктуры поверхностного слоя.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, электропластический эффект, электромеханическая обработка металлов, акустическое смягчение, вибропластический эффект, удар, вибрация, виброперегрузка, трансформация структуры, поверхностный слой.

Для цитирования. Савенко, В. С. Деформирование металла при дополнительных внешних физических воздействиях / В. С. Савенко, О. Б. Скворцов, В. И. Сташенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2026. – № 1 (104). – С. 67–77. – DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-67-77

DEFORMATION OF METAL UNDER ADDITIONAL EXTERNAL PHYSICAL INFLUENCES

V. S. SAVENKO

*Mozyr State Pedagogical University
named after I. P. Shamyakin, the Republic of Belarus*

O. B. SKVORTSOV, V. I. STASHENKO

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian
Academy of Sciences named after A. A. Blagonravov,
Moscow*

Analogies in the effects of various types of additional external influences on metal deformation are considered. A particular example of such an influence is the passage of high-density electric current pulses through a localized deformation zone. Based on an analysis of experimental data on rapid dynamic processes in the deformation zone used in studying metal deformation, a conclusion is drawn regarding the importance of the sequence of transformation of the electrical pulse effect into a mechanical shock-wave process on the kinetics of plastic deformation of the metal, modifying the microstructure of the surface layer.

Keywords: metal forming, electroplastic effect, electromechanical metal processing, acoustic softening, viroplastic effect, impact, vibration, vibration overload, structure transformation, surface layer.

For citation. Savenko V. S., Skvortsov O. B., Stashenko V. I. Deformation of metal under additional external physical influences. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2026, no. 1 (104), pp. 67–77 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2026-1-67-77

Введение

Использование при деформировании металлов и сплавов электропластического эффекта (ЭПЭ) обеспечивает изменение кинетики деформации, экономию энергии, повышение скорости обработки, а также управление и модификацию свойствами материала. Для описания механизма ЭПЭ рассмотрен ряд физических процессов [1], но их вклад в ЭПЭ вызывает противоречивые мнения и предполагает проведение дальнейших исследований в этом направлении [2]. Предлагаемый для описания ЭПЭ механизм взаимодействия электрического импульса с проводником, по которому он проходит, предполагает, что он не зависит от микроструктуры и состава материала. Одной из теорий, удовлетворяющих критерию универсальности, является модель ЭПЭ, основанная на явлении электрической индукции при воздействии электрических импульсов [3]. Именно импульсный характер в виде прямоугольных электрических импульсов малой длительности (50–100 мкс) характерен для энергоэффективного проявления ЭПЭ. Действие таких импульсов вызывает в материале проводника появление механических колебаний, которые можно рассматривать как фактор, активирующий процессы трансформации в микроструктуре металла. Наряду с таким механизмом получила распространение модель, основанная на негетерогенном распространении выделяемого в материале проводника тепла при прохождении импульсного тока высокой плотности [4]. Реализация ЭПЭ сопровождается тепловыми деформациями материала. Величина выделяемого тепла пропорциональна квадрату величины тока, однако анализ зависимостей динамических деформаций от амплитуды тока не показывает такой зависимости [1]. Кроме этого предположение о повышенном тепловыделении в области дефектов и дислокаций вызывает сомнение, поскольку в таких локальных областях удельная проводимость оказывается более низкой и плотность тока в них также оказывается более низкой. Количества тепла, выделяемого при пропускании одиночного электрического импульса малой длительности, оказывается недостаточно, чтобы вызвать сколько-нибудь заметный нагрев проводника, в то время как ЭПЭ наблюдается в очень широком диапазоне температур – от криогенных до близких к плавлению металла.

Применение дополнительных физических воздействий возможно при разработке технологий обработки металлов давлением (прессование, ковка, штамповка, прокатка, волочение), при выполнении операций, связанных с удалением части материала (резка, сверление, фрезерование и т. п.), при реализации операций с неразъемного и разъемного соединения конструктивных элементов.

Цель использования дополнительного воздействия – локальная интенсификация физических процессов, деформируемая область, поверхностный слой. В значительной части такое воздействие основано на локальном внесении дополнительной энергии в обрабатываемую область, чтобы повлиять на свойства обрабатываемого материала. С другой стороны, обеспечение энергетической эффективности предполагает необходимость минимизации такого дополнительного расходования энергии и минимизацию затрат на необходимое дополнительное оборудование.

Повышение энергоэкономичности и сокращение тепловых потерь в оборудовании может быть обеспечено за счет использования импульсного принципа внешнего дополнительного воздействия.

Особенностью ЭПЭ является его универсальный характер, что позволяет применять его при различных видах обработки металлов давлением [5] и при технологических операциях с конструктивными элементами из металлов и сплавов [6]. Такие процессы деформирования обычно сопровождаются возникновением механических колебаний в области деформации [7, 8], которые часто рассматривают как побочный эффект и влияние которых недооценивают.

На рис. 1 показаны примеры обработки металлов давлением и при выполнении неразъемного соединения, когда ЭПЭ обеспечивает более легкую деформируемость соответственно металлической заготовки или заклепки.

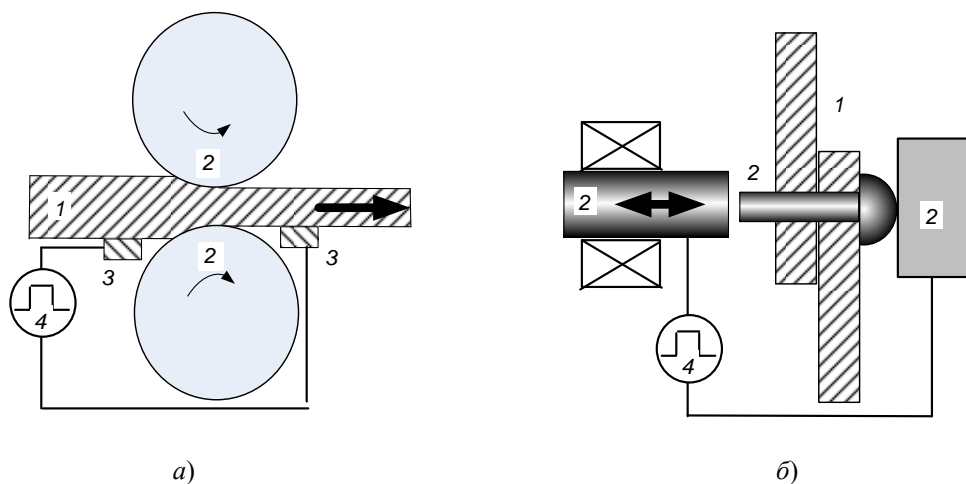


Рис. 1. Применение электроимпульсного воздействия при обработке металлов, повышающего его деформируемость:
 а – применение ЭПЭ при обработке металла давлением (прокатка, волочение и т. п.);
 б – применение ЭПЭ при выполнении неразъемного соединения (клепка):
 1 – заготовка; 2 – рабочий инструмент; 3 – контактные элементы;
 4 – генератор прямоугольных импульсов

Электропластический эффект также нашел применение в технологических операциях, связанных с удалением части металла заготовки внешним инструментом при фрезеровании, сверлении, проточке, резке и т. п. [9].

Примеры применения ЭПЭ при операциях, связанных с удалением части металла и при выполнении разъемного соединения, приведены на рис. 2.

При выполнении соединения с использованием металлических элементов, имеющих резьбу, актуальным является выполнение требуемой силы затягивания при сборке и ударного воздействия на соединительный элемент при разборке. Такое воздействие может быть реализовано с использованием дополнительного возбуждения в используемом инструменте высокочастотных колебаний [10]. Применение ЭПЭ при выполнении соединений с винтовыми элементами основано на необходимости меньших усилий в случае воздействия на элементы с винтовым креплением локальных вибраций. Такое локальное вибрационное воздействие может быть обеспечено за счет ЭПЭ и сопутствующей вибрации вместо использования специальных механических вибровозбудительных узлов.

Важным преимуществом технологий, связанных с ЭПЭ, является их применимость не только к различным металлическим материалам, но и комбинациям таких материалов. Примером может быть неразъемное соединение материалов из металлов и сплавов с деформированием краевых частей и с применением дополнительного электроимпульсного воздействия [11].

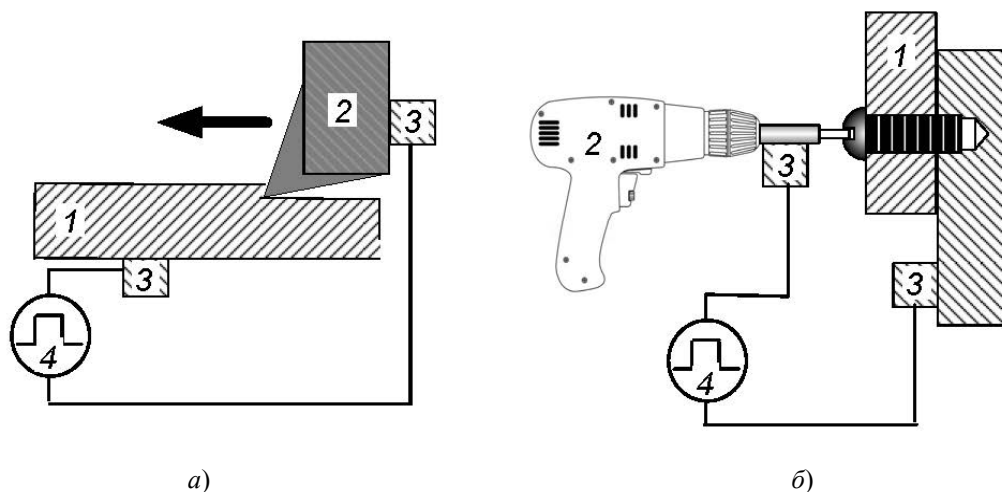


Рис. 2. Технологии электроимпульсного воздействия для снижения прилагаемых усилий, основанных на формировании вибрационного отклика в металле:
 а – применение ЭПЭ при обработке металла с удалением части этого металла в виде стружки (проточка, фрезерование, сверление и т. п.); б – применение ЭПЭ при выполнении разъемного соединения: 1 – заготовка; 2 – рабочий инструмент; 3 – контактные элементы; 4 – генератор прямоугольных импульсов

Еще одним примером использования ЭПЭ при создании неразъемных соединений является сварка с использованием импульсного режима подачи тока [12]. Управление длительностью, частотой и скважностью импульсов обеспечивает возможность управления температурным режимом и переходом от режима сварки к плавному остыванию и релаксации остаточных напряжений в области сварочного шва. Действие сопутствующей высокочастотной вибрации при таком импульсном режиме также способствует лучшей взаимной диффузии материала в локальной области соединения. Пример такого применения представлен на рис. 3, а.

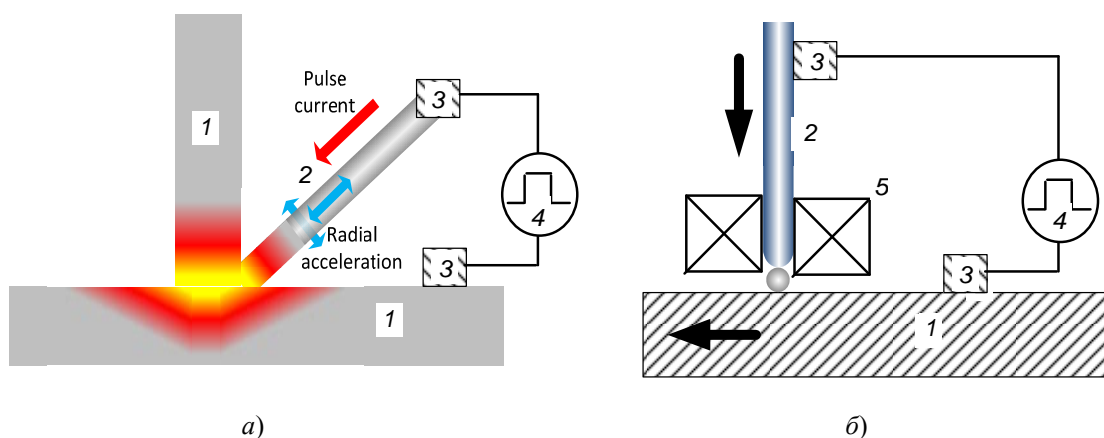


Рис. 3. Создание неразъемных соединений и нанесение металлического материала с использованием ЭПЭ:
 а – сварка заготовок: 1 – заготовка; 2 – электрод; 3 – контакты; 4 – генератор импульсного тока; б – аддитивное нанесение металлического материала: 1 – основание заготовки; 2 – электрод; 3 – контакты; 4 – генератор импульсного тока; 5 – катушка индукции

При разработке современных аддитивных технологий изготовления изделий из металлов электроимпульсная обработка заготовок используется при дезинтеграции и при получении порошковых материалов, а также в процессе спекания из порошков [1]. Также имеются примеры применения ЭПЭ непосредственно при печати на 3D-принтере с металлом в качестве рабочего материала [13]. Электрическое воздействие на металл проволоки используется для вихретокового нагрева, дефрагментации и перемещения за счет сил Ампера и Лоренца частиц металла к локальной области печати.

При использовании таких технологий дополнительное электроимпульсное воздействие может с успехом применяться для релаксации остаточных напряжений или для заливания микротрещин в формируемом образце. Применение электроимпульсного воздействия позволяет контролировать температуру материала и оптимизировать процесс спекания или аддитивной консолидации материала. Снижение пористости получаемого материала при электроимпульсном воздействии связано также с проявлением вибрационного уплотнения, а сам процесс электроимпульсного воздействия легко синхронизируется с другими воздействиями при таких технологиях. Высокочастотный характер связанных с этим вибраций поверхностных слоев снижает возможное проявление волнообразной шероховатости поверхностного слоя материала.

Электроимпульсное воздействие используется и в аддитивных технологиях для нагрева основания и формирования наносимого металлического материала за счет индукционных токов и воздействия на них силой Лоренца [14].

При такой обширной области возможных применений вопросы методики применения и понимания физических процессов, связанных с использованием ЭПЭ при обработке металла в простой или более сложной комбинации с другими внешними воздействиями, являются актуальной проблемой.

Цель работы – экспериментальное и теоретическое исследование влияния ударно-волновых механических колебаний на модификацию структуры и пластических свойств материалов в условиях электропластичности.

Основная часть

При исследовании деформации с использованием ЭПЭ в качестве основного оборудования применяется аппаратура для испытания металлического образца на статическую деформацию с дополнительными средствами формирования электроимпульсного воздействия на локальную область концентратора механического напряжения, структура которого представлена на рис. 4. Испытательная машина с линейным во времени заданием статического деформирующего растяжения (сжатия) позволяет получить диаграмму деформации. Проявление ЭПЭ при пропускании тока отображается на диаграмме деформации в виде кратковременных скачков в величине приложенного механического напряжения. По изменениям амплитуды скачков и по изменениям хода графика нагружения дается оценка влияния ЭПЭ. Добавление датчиков параметров процессов с малым временем отклика позволяет уточнить детали процесса взаимодействия внешнего электрического импульса с материалов проводника в процессе формирования импульса тока через него. Для получения информации о пространственном распределении динамических процессов целесообразно использовать двух- или трехкомпонентные датчики со временем отклика около десятков микросекунд.

Так, датчики ускорения (акселерометры) с измерительными осями, направленными параллельно и перпендикулярно к оси проводника, позволяют оценить продольную и поперечную виброперегрузку, действующую на проводник.

Быстродействующие бесконтактные датчики магнитной индукции, расположенные вблизи поверхности проводника, были использованы для контроля за динамическими изменениями тока через проводки. Синхронный сбор сигналов от датчиков ускорения и магнитного поля с использованием системы сбора данных DAQ позволяет сопоставить время проявления различных физических процессов в проводнике.

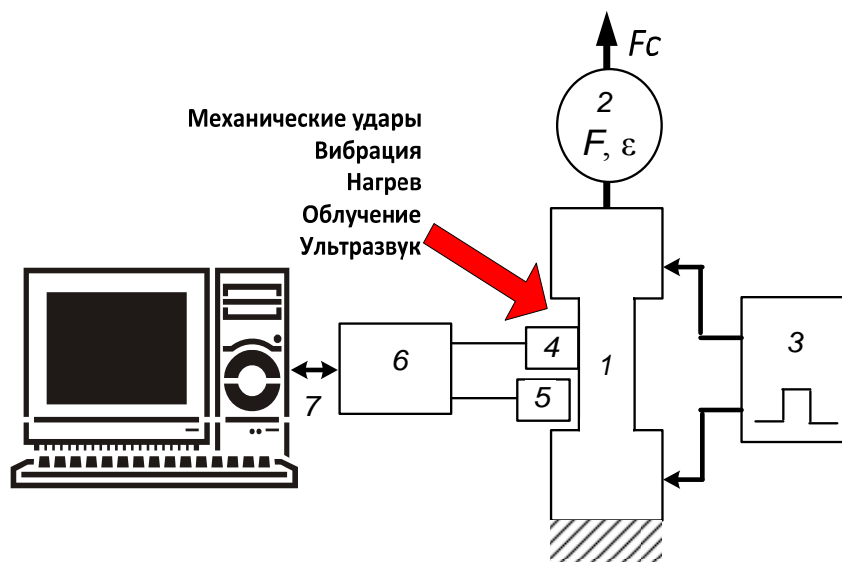


Рис. 4. Структура стенда для исследования деформации образцов из металла при дополнительных внешних воздействиях:

- 1 – образец; 2 – испытательная машина для задания деформаций ε и измерения механических усилий F ; 3 – генератор прямоугольных электрических импульсов; 4 – датчик вибрации (высокочастотный многокомпонентный малогабаритный пьезоэлектрический акселерометр); 5 – бесконтактный датчик магнитной индукции на основе эффекта Холла; 6 – модуль сбора данных NI USB 4431; 7 – компьютер для сбора и обработки результатов

Использование генератора прямоугольных одиночных импульсов одной или чередующихся полярностей, а также управление длительностью и частотой импульсов позволяет оценить влияние на динамические процессы таких параметров. Поскольку проявления ЭПЭ наиболее энергетически эффективно при малой длительности [1], при экспериментах средняя мощность используемого электроимпульсного воздействия сравнительно невелика, особенно при воздействии одиночных импульсов, и определяется диапазоном в десятки ватт. При этом во время протекания тока его плотность может достигать сотен и даже тысяч А/мм^2 . Такие режимы не связаны с заметным нагреванием проводника как по теоретическим, так и по экспериментальным оценкам контроля его температуры на поверхности.

Такие параметры, как ускорение, динамическая сила, действующая вдоль оси проводника, и величина магнитной индукции у его поверхности, позволяют провести анализ происходящих физических процессов на основе результатов эксперимента. Пример такой зависимости приведен на рис. 5. Магнитная индукция вокруг проводника сравнительно медленно увеличивается, начиная от момента начала t_0 электрического импульса, и спадает после его окончания в момент t_1 . Медленное изменение магнитной индукции пропорционально изменению тока через проводник и определяется его индуктивностью и влиянием скин-эффекта. В моменты t_0 и t_1 формируются ударные механические перегрузки с амплитудой в десятки g , знак которых определяется полярностью ступенчатого изменения электрического напряжения на фронте

электрического импульса. Такие виброперегрузки наблюдаются несмотря на то, что ток в проводнике в эти моменты времени еще слабо изменяется. Затем ударные перегрузки вызывают распространение в материале проводника затухающих виброакустических колебаний. Действие электрического импульса на каждом из фронтов вызывает формирование импульса силы в продольном направлении, знак которого также определяется знаком ступенчатого изменения напряжения на каждом из фронтов. Характер таких динамических изменений сохраняется для различных материалов, геометрических размеров, формы, микроструктуры металла проводников, хотя амплитудные и временные характеристики зависимостей могут варьироваться.

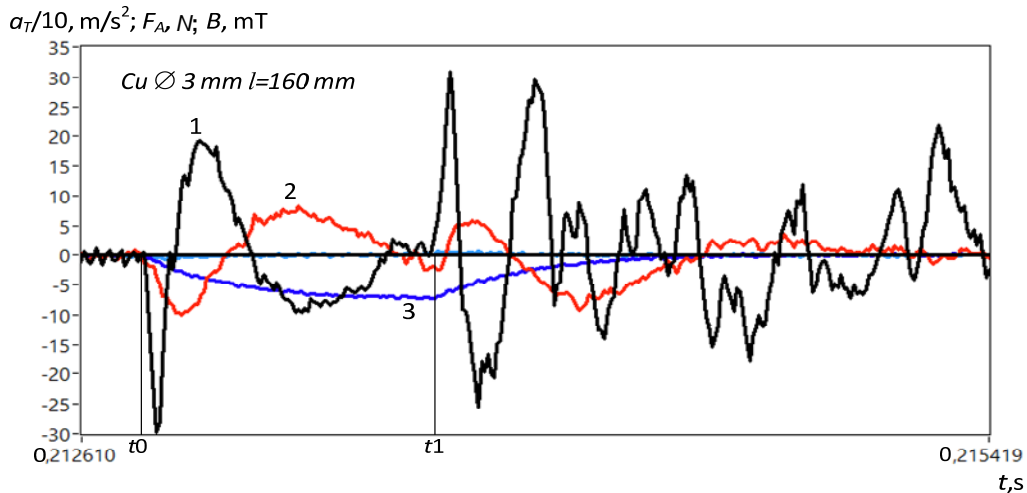


Рис. 5. Запись сигналов с датчиков:

1 – поперечное ускорение a_r ; 2 – осевая динамическая сила F_A ;
3 – кольцевая компонента магнитной индукции B у поверхности образца

Кроме электроимпульсного воздействия на исследуемый металлический образец возможно исследование и других внешних энергетических воздействий для оценки их влияния на пластические и структурные особенности металла и сравнения их действия с процессами, наблюдаемыми при ЭПЭ, что необходимо для выявления сходства и различия в их влиянии.

Как правило, при таких исследованиях применяют оборудование, аналогичное показанному на рис. 4. Отличие такого оборудования, представленного на рис. 6, состоит в использовании мощного усилителя формирователя электрического импульсного сигнала 10, который управляется от генератора импульсов 3, и запитанного от сети трехфазного переменного тока 11. Сигнал усилителя формирователя 10 преобразуется конвертором 9 в импульсное внешнее воздействие. В качестве такого воздействия на проводник может быть использован нагрев, вибрация или механические удары от пьезоэлектрического возбудителя колебаний. Ультразвуковое облучение, воздействие электрического или магнитного поля, СВЧ или лазерное облучение и т. п., воздействие холодной плазмы или потоков заряженных частиц.

Использование импульсного режима позволяет более полно оценить влияние динамики протекающих физических процессов, связанных прежде всего с воздействием на поверхностный слой металлического образца. Хотя при электроимпульсном воздействии электрический импульс приложен ко всему образцу, токи в нем протекают в основном в поверхностном слое из-за проявления скин-эффекта [15].

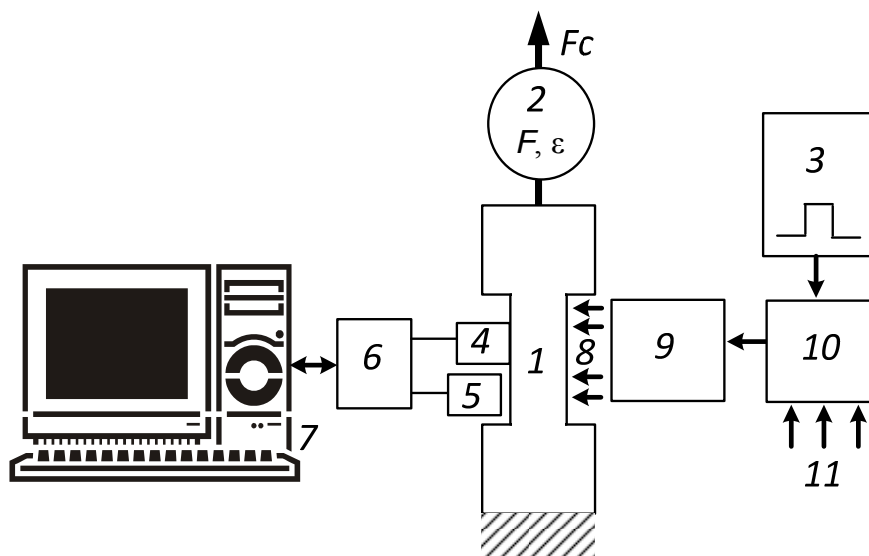


Рис. 6. Структура стенда для исследования деформации образцов из металла при дополнительных внешних импульсных воздействиях: 1 – образец; 2 – испытательная машина для задания деформации ε и измерения механического усилия F ; 3 – генератор прямоугольных электрических импульсов; 4 – датчик вибрации (высокочастотный многокомпонентный малогабаритный пьезоэлектрический акселерометр); 5 – бесконтактный датчик магнитной индукции на основе эффекта Холла; 6 – модуль сбора данных NI USB 4431; 7 – компьютер для сбора и обработки результатов; 8 – локальная область поверхности образца; 9 – преобразователь, создает внешнее импульсное воздействие (СВЧ, лазерное или магнитное облучение, виброакустическое воздействие, инфракрасный нагрев, кондиционирование или криогенное охлаждение); 10 – источник питания преобразователя; 11 – трехфазная сеть переменного тока

В отличие от схемы на рис. 4, где дополнительное воздействие электрическим импульсом непосредственно приложено к испытываемому образцу, в схеме на рис. 6 внешнее энергетическое воздействие должно быть преобразовано конвертором 9 в физический процесс другого вида, а затем передано к образцу через одну или несколько поверхностей раздела (интерфейсы), что влияет на количество передаваемой энергии и на формирование временных задержек в получаемом деформационном отклике.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Действие дополнительных воздействий для повышения деформируемости металла в локальной зоне показывает энергетическую эффективность при импульсном характере воздействия с высокой пиковой мощностью действующего фактора.
2. В большинстве случаев импульсное внешнее дополнительное энергетическое воздействие сопровождается скачкообразными изменениями на диаграмме деформации.
3. Влияние внешних дополнительных воздействий на структурные изменения в материале исследуемого образца сказывается на внешних слоях материала, что связано с воздействием внешних факторов непосредственно на поверхность и с влиянием таких физических явлений, как скин-эффект, при которых основные динамические процессы протекают в сравнительно тонком внешнем слое металла.

4. Физическое внешнее импульсное воздействие вызывает в металле формирование ударно-волновых механических колебаний, которые являются вторичной самостоятельной причиной изменения пластических свойств и трансформации структурных особенностей металла, например, за счет активации движения дислокаций.

5. Металлические заготовки, даже если они имеют простую симметричную форму (например, в виде одиночного прямого цилиндрического стержня), характеризуются значительным набором форм различных колебательных процессов. Воздействие на такую заготовку импульсными внешними энергетическими воздействиями может активировать появление и распространение колебаний, начиная от простых механических типа растяжения-сжатия, сдвиговых или крутильных. Возможны также колебания, связанные с электрическими или магнитными процессами, или колебания на уровне микроструктуры (например, при резонансном вибропластическом эффекте). Такие кинематические колебания, в свою очередь, влияют на трансформацию микроструктуры материала, активны такие процессы в поверхностных слоях. Если колебания находятся в области высоких частот, их регистрация измерительными приборами, реагирующими на деформацию (перемещение), может быть затруднена их малой амплитудой, но при малой амплитуде перемещений соответствующие им вибрационные перегрузки могут быть значительными и достаточными для активации указанных трансформаций.

Литература

1. Троицкий, О. А. Электропластический эффект в металлах / О. А. Троицкий. – М. : Ким Л.А., 2021. – 467 с.
2. Electroplasticity effects: from mechanism to application / Jiahao Liu, Dongzhou Jia, Ying Fu [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2003. – Vol. 131. – P. 3267–3286. – DOI 10.1007/s00170-023-12072-y
3. Sutton, A. P. Theory of electroplasticity based on electromagnetic induction / A. P. Sutton, T. N. Todorov // Physical review materials. – 2021. – Vol. 5, N 11. – DOI 10.1103/PhysRevMaterials.5.113605
4. Интенсивные токовые и иные энергетические воздействия на металл. Новые данные и закономерности (экспериментальные исследования, возможности практических приложений) / О. А. Троицкий, В. И. Сташенко, О. Б. Скворцов [и др.]. – М. : Ким Л.А., 2020. – 407 с.
5. Theory and application research progress of acoustic effect in ultrasonic vibration assisted plastic forming / S. Xu, Y. Feng, C. Wang [et al.] // Journal of Plasticity Engineering. – 2023. – N 30 (6). – P. 67–87. – DOI 10.3969/j.issn.1007-2012.2023.06.006
6. Monitoring of Processing Conditions of an Ultrasonic Vibration-Assisted Ball-Burnishing Process / A. Estevez-Urra, J. Lluma, R. Jerez-Mesa, J. Travieso-Rodriguez // Sensors. – 2020. – N 20. – P. 2562. – DOI 10.3390/s20092562 www.mdpi.com/journal/sensors
7. Investigation on interfacial friction characteristics of ultrasonic vibration-assisted micro-extrusion forming / Han Guang-chao, Lü Pei, Wan Wei-qiang [et al.] // Journal of Plasticity Engineering. – 2023. – N 30 (6). – P. 133–141. – DOI 10.3969/j.issn.1007-2012.2023.06.011
8. Ерилова, Т. В. Влияние импульсов электрического тока на свойства и структуру малоуглеродистых и низколегированных сталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01 / Ерилова Татьяна Васильевна ; Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк, 1998. – 22 с.
9. Шадский, В. Г. Точение деталей из труднообрабатываемых материалов при воздействии импульсов электрического тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Шадский Владимир Геннадиевич ; Тул. гос. ун-т. – Тула, 2009. – 20 с.

10. Обучающая брошюра по технологиям затяжки резьбовых соединений. – Химки : Атлас Копко. – 28 с.
11. Failure behavior in electrically-assisted mechanical clinching joints / Abozar Barimani-Varandi, Abdolhossein Jalali Aghchai, Francesco Lambiase // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 68, Part A. – P. 1683–1693.
12. Troickij, O. A. Ultrasonic Vibroacoustic Processes, Excited by Heating by Impulse Currents of Metals / O. A. Troickij, O. B. Skvortcov, V. I. Stashenko // 15th International School-Conference “New materials – Materials of innovative energy: development, characterization methods and application”. – *KnE Life Sciences*, 2017. – P. 549–555.
13. Медведев, Ю. Ю. Формирование порошкового материала при электропластическом уплотнении : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.06 / Медведев Юрий Юрьевич ; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск, 2003. – 148 с.
14. Чубарова, В. О. Аддитивная технология с использованием индукционного нагрева и оплавления металлической проволоки / В. О. Чубарова // *Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. XXX Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Москва, 29 февр. 2024 г.* – М. : Центр полиграф. услуг «РАДУГА», 2024. – С. 526.
15. Тихомиров, А. А. Скин-эффект в цилиндрическом проводе круглого сечения при прямоугольной форме импульса тока / А. А. Тихомиров // *Международный научно-исследовательский журнал*. – 2021. – № 6 (108). – С. 29–35.

References

1. Troitskii O. A. *Electroplastic effect in metals*. Moscow, Kim L.A. Publ., 2021. 467 p. (in Russian).
2. Jiahao Liu, Dongzhou Jia, Ying Fu, Xiangqing Kong, Zhenlin Lv, Erjun Zeng, Qi Gao. Electroplasticity effects: from mechanism to application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, vol. 131, pp. 3267–3286. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12072-y>
3. Sutton A. P., Todorov A. P. Theory of electroplasticity based on electromagnetic. *Physical review materials*, 2021, vol. 5, no. 11. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.113605>
4. Troitskii O. A., Stashenko V. I., Skvortsov O. B., Savenko V. S., Samuilov S. D., Tereshchuk V. S., Zaitsev S. V., Ivanov A. M. *Intense current and other energy effects on metal. New data and patterns (experimental research, possibilities for practical applications)*. Moscow, Kim L.A. Publ., 2020. 407 p. (in Russian).
5. Xu S., Feng Y., Wang C., Qian L., Sun C., Feng S. Theory and application research progress of acoustic effect in ultrasonic vibration assisted plastic forming. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, no. 30 (6), pp. 67–87. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2012.2023.06.006>
6. Estevez-Urra A., Lluma J., Jerez-Mesa R., J. Travieso-Rodriguez. Monitoring of Processing Conditions of an Ultrasonic Vibration-Assisted Ball-Burnishing Process. *Sensors*, 2020, no. 20, p. 2562. <https://doi.org/10.3390/s20092562> www.mdpi.com/journal/sensors
7. Han Guang-chao, Lü Pei, Wan Wei-qiang, Bai Wei, Xu Lin-hong, Liu Fu-chu. Investigation on interfacial friction characteristics of ultrasonic vibration-assisted micro-extrusion forming. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, no. 30 (6), pp. 133–141. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2012.2023.06.011>
8. Erilova T. V. *The influence of electric current pulses on the properties and structure of low-carbon and low-alloy steels*. Novokuznetsk, 1998. 22 p. (in Russian).
9. Shadskii V. G. *Turning of parts made of difficult-to-cut materials under the influence of electric current pulses*. Tula, 2009. 20 p. (in Russian).
10. *Training brochure on tightening technologies*. Khimki, JSC Atlas Copco Publ., 2015. 28 p. (in Russian).

11. Abozar Barimani-Varandi, Abdolhossein Jalali Aghchai, Francesco Lambiase. Failure behavior in electrically-assisted mechanical clinching joints. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 68, part A, pp. 1683–1693.
12. Troickij O. A., Skvortcov O. B., Stashenko V. I. Ultrasonic Vibroacoustic Processes, Excited by Heating by Impulse Currents of Metals. *15th International School-Conference “New materials – Materials of innovative energy: development, characterization methods and application”*. KnE Life Sciences, 2017. pp. 549–555.
13. Medvedev Yu. Yu. *Formation of powder material during electroplastic compaction*. Novocherkassk, 2003. 148 p. (in Russian).
14. Chubarova V. O. Additive technology using induction heating and melting of metal wire. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tez. dokl. XXX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. studentov i aspirantov, Moskva, 29 fevr. 2024 g.* [Radioelectronics, electrical engineering, and power engineering: abstracts of the XXX International scientific and technical conference for undergraduate and postgraduate students, Moscow, February 29, 2024]. Moscow, Tsentr poligraficheskikh uslug “RADUGA” Publ., 2024, 526 p. (in Russian).
15. Tikhomirov A. A. Skin effect in a cylindrical wire of round cross-section with a rectangular current pulse shape. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International Research Journal*, 2021, no. 6 (108), pp. 29–35 (in Russian).

Поступила 27.02.2026 г.