

3. *Plotnikov N.I., Gabriel Gomes de Oliveira, Yuzo Iano: Regulatory Decision of Dependability Terminology / In: Proceedings of the 7th Brazilian Technology Symposium (BTSym'21). Smart Innovation, Systems and Technologies. – Vol. 234. – P. 609-614. – DOI: 10.1007/978-3-031-04435-9_65.*

DOI: 10.25728/iccss.2023.89.81.062

Сташенко В.И., Скворцов О.Б.

Механические деформации электропроводящих материалов и электромагнитные воздействия

Аннотация: Рассмотрены вопросы унификации технологических решений в области обработки металлов и сплавов с использованием электропластического эффекта, а также с применением вибрационного и ультразвукового локального воздействия. Такие решения могут быть использованы для упрочнения и разупрочнения поверхностного слоя, снятия остаточных напряжений и снижения сопротивления пластической деформации при обработке металлов давлением: прокатке, волочении, прессовании, плющении, а также сверлении, сварке и резании металла.

Ключевые слова: электропластический эффект, деформация, металлообработка, металл, вибрация, электрический импульс

Электропластический эффект в металлах определяется как снижение сопротивляемости материала при его пластической деформации в случае воздействия на область деформации электрических импульсов. Этот эффект может быть использован при различных видах обработки металлов давлением [1]. При использовании электропластического эффекта на металл воздействуют электрическими импульсами тока с плотностью от 3 до 5000 А/мм² м длительностью 50-200 мкс. Кроме снижения сопротивляемости деформации при электропластическом эффекте происходит релаксация имеющихся остаточных напряжений и изменение структуры поверхностного слоя металла за счет

изменения зернистости и более равномерного распределения дислокаций. Кроме электропластического эффекта при обработке металлов находит применение метод воздействия ультразвуком [3], применение которого позволяет обеспечить похожие результаты. Изучение физики процессов, происходящих во времени при электропластическом эффекте, возможно путем контроля за магнитными полями и виброакустическими колебаниями материала проводника [3].

В настоящее время нет общепризнанной теории процессов, происходящих в металле при электропластическом эффекте. В последние годы получили распространение теории о действии электрических и магнитных сил на дислокации непосредственно или посредством «электронного ветра», а также теории локального нагрева областей вблизи дефектов и дислокаций при тепловом выделении от проходящего тока [4, 5]. Тепловыделение при этом от действия одиночного импульса крайне мало и не позволяет получить плавление и переход в парообразное состояние металла в областях микродефектов, что предлагается в некоторых публикациях.

Критический анализ таких теорий, указывающий на их физическую несостоятельность, представлен в [6]. В этой работе также предложена теория электропластичности на основе предположения о существовании пульсаций тока и происходящих электромагнитных процессов. Такая теория не объясняет процесс формирования виброакустического отклика в металле и его особенности. Тем более ее невозможно применить к процессам обработки с применением ультразвука, при которых электромагнитное воздействие отсутствует.

Динамику процессов формирования виброакустического отклика в обрабатываемом образце можно исследовать на установке, схема которой показана на рисунке 1. В наших экспериментах в качестве датчиков вибрации были использованы миниатюрные высокочастотные трехкомпонентные акселерометры, что обеспечивает контроль высокочастотных колебаний металла вплоть до ультразвуковых частот. Быстродействующий бесконтактный датчик магнитной индукции, который позволяет контролировать изменения магнитного поля тока синхронно с сигналами виброперегрузки (по ускорению поверхностных слоев

образца а). Наблюдаемый виброакустический отклик не имеет существенных отличий для случаев наличия или отсутствия статического нагружения.

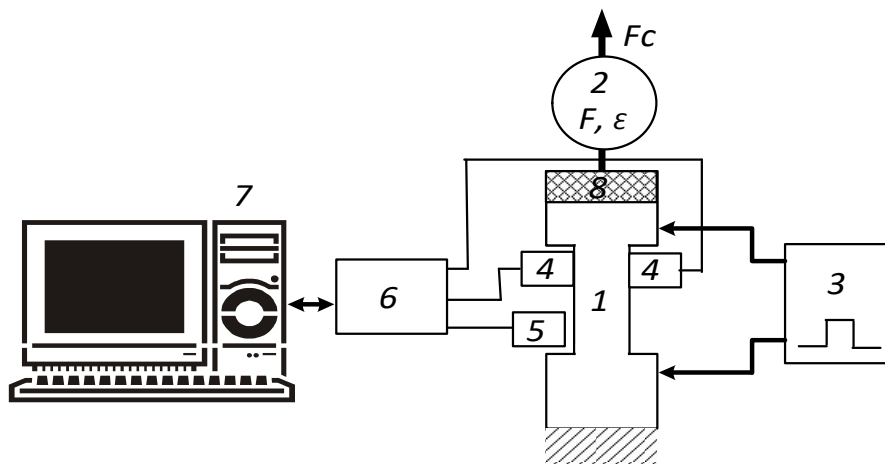


Рисунок 1 – Структурная схема эксперимента по исследованию деформации проводника 1 с электропластическим эффектом по виброакустическому отклику. Измеритель механического напряжения F и деформации, генератор электрических импульсов 3, датчики вибрации 4, датчик магнитного поля 5, модуль сбора данных – 6, компьютер – 7, изолятор – 8

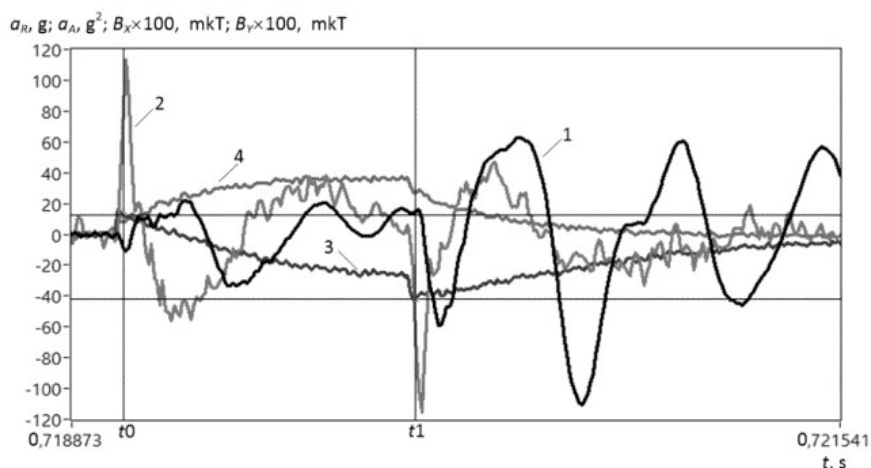


Рисунок 2 – Вибрационный отклик поперечной виброперегрузке aR 1 и осевой виброперегрузке aA – 2, при изменениях величины магнитной индукции в поперечной Bx и в осевой By плоскостях сечения проводника из нержавеющей стали диаметром 3 мм

На рисунке 2 приведен типовой пример фиксации виброакустического отклика на действие электрического импульса. Следует обратить внимание на ударные виброперегрузки в осевом направлении в моменты начала переднего t_0 и заднего t_1 фронтов. В эти моменты также наблюдаются скачки магнитного поля, причем как изменения магнитного поля, так и вибрационного отклика противоположны для различных фронтов и различной полярности электрического импульса. Затухающие вибрационные колебания практически не зависят от изменений токов после начальных моментов фронтов, хотя величина тока и тепловыделение при этом могут быть большими.

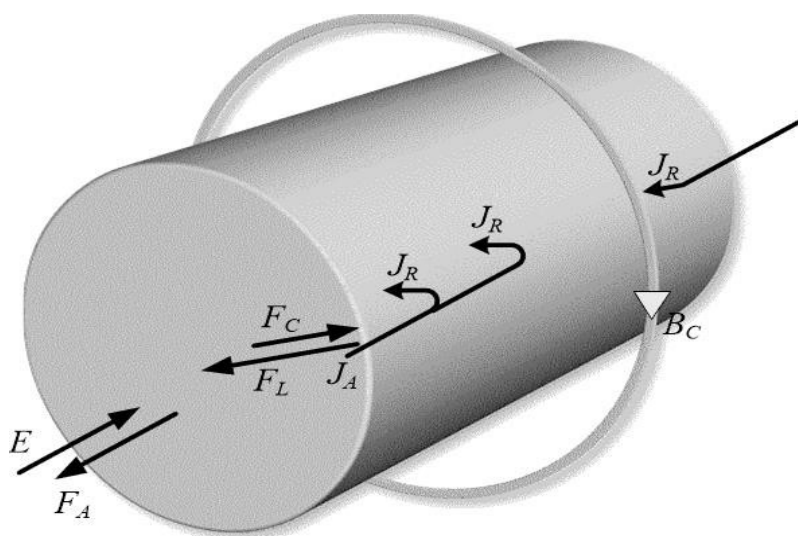


Рисунок 3 – Процессы в проводнике при подаче электрического импульса, формирующие продольный удар

На рисунке 3 показано действие внешнего электрического поля E , которое создает ток J_A через проводник и кольцевое магнитное поле B_C вокруг него. На свободные электроны проводимости, образующие ток J_A , возникающая сила Лоренца F_L вызывает радиальный ток J_R , который приводит к поляризации боковой поверхности проводника и к появлению противодействующей радиальной силы Кулона F_C . Радиальные токи J_R также взаимодействуют с кольцевым магнитным полем B_C , создавая осевую силу Ампера F_A .

Действующая в осевом направлении сила Ампера вызывает формирование продольного ударного импульса, который деформирует проводник, создавая и поперечные деформации,

которые для закрепленного на концах проводника носят изгибный характер. Полярность вибрационного отклика при этом зависит от полярности приложенного электрического импульса, как это и наблюдается в экспериментах.

Действие электропластического эффекта проявляется как:

- снижение сопротивляемости деформированию;
- снятие остаточных механических напряжений;
- равномерное распределение дефектов, примесей и дислокаций;
- изменение зернистости;
- устранение микродефектов;
- упрочнение и разупрочнение;
- дезинтеграция при большой амплитуде воздействия.

Такие же особенности связаны с использованием в технологии обработки металла локального воздействия ультразвука и высокочастотной вибрации. Сходство результатов использования таких технологий может быть признаком сходства механизмов их влияния на поведение обрабатываемого металла. Это может свидетельствовать не только о похожих результатах, но и похожих процессах. Изучение виброакустического отклика на действие электрического импульса показывает, что в моменты начала фронтов электрического импульса в материале проводника наблюдаются механические ударные процессы, которые переходят в затухающие механические колебания, что и производит действие на структуру металла аналогичное действию ультразвука. Особенностью использования электропластического эффекта при этом сводится к особенностям преобразования энергии электрического импульса в виброакустический процесс. Такое преобразование технически существенно проще, чем использование внешних систем для формирования ультразвуковых колебаний. При этом существенно проще и обеспечить управление технологическими режимами.

Представленный механизм формирования вибрационного воздействия на металл при действии электрического импульса позволяет применить к процессам с использованием электропластического эффекта результаты анализа воздействия на металл ультразвука, вызывающие его деформирование, движение дислокаций и т.п. [7]. Такой подход позволяет использовать с

большой эффективностью и целенаправлено обе технологии или совмещать их для получения лучших результатов. Благодаря рассмотренному общему механизму влияния вибрационного воздействия на проводящие материалы можно не только управлять их свойствами в процессе изготовления, но и контролировать их возможные изменения в процессе эксплуатации, что повышает безопасность их применения.

Литература:

1. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах. – М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2021. – 467 с.

2. Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.

3. Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Электропластический эффект и взаимодействие электрического импульса с проводником // Письма о материалах. – 2021. – Т.11. № 4. – С. 473-478. – DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-473-478.

4. Friha M., Пионкин Д.Е., Скворцов П.А., Николаев В.К., Скворцов А.А. Влияние внешних воздействий на ползучесть алюминиевых сплавов с микроскопическими включениями при комнатных температурах // Физика твердого тела. – Т. 65. № 4. – 2023. – С. 525-530.

5. Dimitrov N., Liu Y. Electroplasticity: A review of mechanisms in electro-mechanical coupling of ductile metals // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2020. – 12 p. – DOI: 10.1080/15376494.2020.1789925.

6. Sutton A.P., Todorov T.N. Theory of electroplasticity based on electromagnetic induction // Physical review materials. – 2021. – Vol. 5. № 11. – DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.5.113605.

7. Дудников И.А., Беловод А.И., Дудник В.В., Иванкова Е.В. Влияние дислокаций в упрочнении обрабатываемого материала // Вібрації в техніці та технологіях. – 2016. – № 3 (83). – С. 94-97.