

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2023-38-66-70>

ВЛИЯНИЕ НА МЕТАЛЛЫ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ, СОЗДАНЫХ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Сташенко В.И., Скворцов О.Б.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва, Россия*

Ключевые слова: электрический импульс, деформация металла, виброакустические колебания, ультразвук.

Аннотация. Изучено электродинамическое действие импульсов тока на металлические образцы. Установлено, что в образце возникают волновые удары в начале переднего и заднего фронтов электроимпульса. Волновые удары порождают затухающие колебания, вызывая упругие и пластические деформации, а также структурные изменения в металле, что подобно действию ультразвуковых волн.

THE EFFECT ON METALS OF MECHANICAL VIBRATIONS CREATED BY THE ELECTROIMPULSE EFFECT

Stashenko V.I., Skvortsov O.B.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

Keywords: electric pulse, metal deformation, vibroacoustic vibrations, ultrasound.

Abstract. The electrodynamic effect of current pulses on metal samples has been studied. It is established that wave shocks occur in the sample at the beginning of the front and rear fronts of the electric pulse. Wave shocks generate damping vibrations, causing elastic and plastic deformations, as well as structural changes in the metal, which is similar to the action of ultrasonic waves.

Введение. Резкое снижение сопротивления металла деформированию и повышение пластичности при пропускании импульсов тока было названо электропластическим эффектом (ЭПЭ) [1]. Действие импульса тока приводит к появлению скачка деформирующего усилия. Величина скачков зависит от амплитуды и длительности импульсов тока. Максимальное действие электрического тока проявляется на пределе текучести кристаллов [1]. ЭПЭ возникает как в монокристаллах, так и в поликристаллических материалах, в том числе содержащих выделения вторичных фаз. Исследования показывают, что действия импульсов тока приводят к изменениям внутренней структуры металлов. При высокоскоростном волочении стали 08Г2С с током наряду с изменением дислокационной структуры происходит интенсивные измельчение ферритных зерен, образуя однородную ферритно-перлитную смесь [2]. При обычном волочении такие структурные изменения не происходят. В работе [3] установлено, что внешние энергетические воздействия ведут к изменениям зернистой структуры стали 12Х18Н10Т. Микроструктура деформационной части образца становится мелкозернистой, а зерна принимают более округлую форму. В работе [4] при одноосном

растяжении и волочении с током проволоки из серого чугуна установлено существенное увеличение предельной пластической деформации заготовки, при воздействии тока больших амплитуд выявлено изменение геометрии полостей концентраторов напряжений, занятых графитом и образования полостей шарообразной формы, вершины которых сглаживаются, снижая склонность чугуна к хрупкому разрушению, и повышают его прочностные свойства. В работе [5] установлено, что за счет изменения формы и размеров микротрещин при пропускании импульсов электрического тока возрастает время усталостного разрушения образцов. Расчетным путем в [6] показано, что кратковременное действие тока большой плотности в металлических образцах сближает берега микротрещины, приводя к «залечиванию» дефектов. Таким образом, импульсы электрического тока стимулируют новые механизмы деформации. Электропластическая деформация металла включает разные физические процессы, присутствие которых требует непротиворечивого описания экспериментальных данных и возможности выбора рациональных критериев использования. Однако, не смотря на успешные технологические применения, дискуссии относительно механизмов ЭПЭ продолжаются [7]. Работа посвящена изучению механических процессов в металле при электродинамическом воздействии электроимпульса.

Методика исследований и результаты экспериментов. Исследования влияния воздействий электроимпульса на образцах из меди, серебра, титана и стали проводились при синхронном измерении магнитных полей тока и вибраций на поверхности образца. Измерения сигналов выполнялись в полосе более 50кГц. Сбор данных проводился датчиком Холла и высокочастотными датчиками вибраций. Анализ данных выполнялся модулем сбора аналоговых сигналов NI USB 4431 и программным комплексом Lab VIEW [8].

Магнитное поле импульса тока, оказывая электродинамическое действие на образец, вызывала в нем механические колебания [8]. Вначале возникала ударная волна на фронтах электроимпульса, которая затем порождала затухающие виброакустические колебания в материале образца (рис. 1). При небольшой длительности электрического импульса, возникающие колебания суммируются. Следует особо отметить, что скачки ускорения в ударной волне за время 10-20 мкс достигали величин 1000 м/с^2 и совпадали с начальными моментами переднего и заднего фронтов электроимпульса. Измерение ускорений позволяло оценить быстропротекающие механические процессы (рис. 1). Отметим, что малая величина тока на переднем фронте, в начале электроимпульса, не позволяет объяснить большие ускорения в радиальном и в осевом направлениях образца результатами как теплового действия, так и пинч-эффектом, а также влиянием «электронного ветер» на скопления дислокаций.

Установлена линейная зависимость величины вибрационного отклика от амплитуды электрического воздействия, изгибные формы колебаний образца, а также полярность отклика от полярности электрического импульса.

Возникающие в процессе воздействия вибрации не связаны с плавным нарастанием электрического тока через проводник, а также с постоянным уровнем тока во время действия электрического импульса. Броски вибраций на начальных участках фронтов импульса, по-видимому, являются следствиями магнитогидродинамических эффектов и вносят основной вклад в силовое действие электрического импульса на металл. На переднем фронте величина тока через образец из-за влияния индуктивности цепи и скин-эффекта очень мала. Незначительны и тепловые эффекты. Установленные закономерности не могут быть объяснены ранее предложенными механизмами ЭПЭ [7], а являются результатом иных процессов электроимпульсного действия тока на проводник.

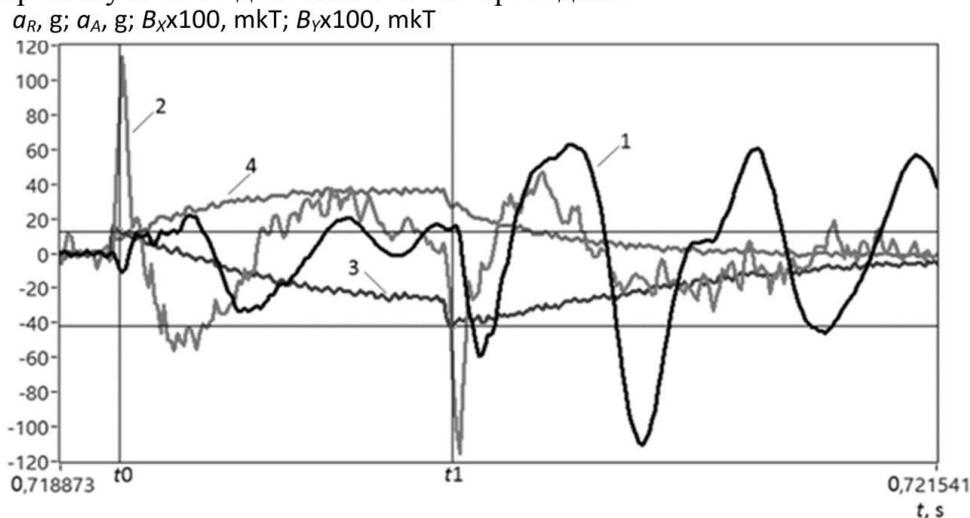


Рис. 1. Величина виброперегрузок (в единицах g) в поперечном (R – радиальном) направлении a_R – 1 и осевом a_A – 2, а также изменения величины магнитной индукции, созданной электроимпульсом в поперечной B_x и в осевой B_y плоскостях сечения образца из нержавеющей стали диаметром 3 мм

Обсуждение результатов. Виброакустические колебания, распространяясь по всей длине металлического образца, вызывают в нем упругие или пластические деформации. Видимо, механические колебания в металле, созданные электроимпульсным воздействием в основном стимулирует, и формируют электропластический эффект. Наряду с этим, так как большая часть энергии импульса рассеивается в металле, то создаются возможности прохождению процессов перемещения линейных дефектов за счет преодоления потенциальных барьеров, диффузии атомов, «залечивания» микротрещин. При пластической деформации наблюдается дробление кристаллов металла, приводя к уменьшению размера его зерен, что подтверждено экспериментально.

Подобные действия на металлы оказывают ультразвуковые волны. Их действие происходит с поверхности металла наложением знакопеременных нагрузок, что снижает статическое напряжение, необходимое для

пластической деформации [9]. Ультразвуковые волны создают колебания в металлической структуре, вызывая межатомные и дислокационные перемещения, приводя к усилению диффузии атомов, изменению кристаллической структуры, уменьшению размера зерен металла. Ультразвук активизирует процессы диффузии в металлах за счет локального поглощения ультразвуковой энергии.

Список литературы

1. Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах. – М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2021. – 467 с.
2. Целлермаер В.Я. Особенности структуры сталей ферритно-перлитного и аустенитного классов после электростимулированной деформации: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Томск, 1993. – 16 с.
3. Савенко В.С., Троицкий О.А., Хрущов М.М., Сташенко В.И., Зерница Д.А. Влияние высокоэнергетических воздействий на модификацию физико-механических характеристик стали // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2020. – № 3. – С. 65-75.
4. Сташенко В.И., Троицкий О.А., Новикова Н.Н. Электропластическое волочение чугуновой проволоки // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – № 2. – С. 85-88.
5. Кукуджанов К.В., Левитин А.Л. Процессы деформирования упругопластического материала с дефектами при электродинамическом нагружении // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 1. – С. 106-120.
6. Иванов Ю.Ф., Лычагин Д.В., Громов В.Е., Целлермаер В.Я., Соснин О.В., Коваленко В.В., Коновалов С.В. Мезоскопическая субструктура и электроимпульсное подавление усталостного разрушения // Физ. мезомех. – 2000. – Т. 3, № 1. – С. 103-108.
7. Батаронов И.Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 10. – С. 93.
8. Троицкий О.А., Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Измерение вибраций, созданных импульсами тока в элементах электротехнических конструкций // Электротехника. – 2018. – № 3. – С. 8-12.
9. Смелянский В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

References

1. Troitsky O.A. Electroplastic effect in metals. – M.: Publ. house "Kim L.A.", 2021. – 467 p.
2. Zellermaer V.Ya. Structural features of ferritic-pearlite and austenitic steels after electrostimulated deformation: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – Tomsk, 1993. – 16 p.
3. Savenko V.S., Troitsky O.A., Khrushchev M.M., Stashenko V.I., Zernitsa D.A. The influence of high-energy impacts on the modification of physical and mechanical characteristics of steel // Journal of the Belarusian State University. Physics. 2020, no. 3, pp. 65-75.
4. Stashenko V.I., Troitsky O.A., Novikova N.N. Electroplastic drawing of cast iron wire // Problems of mechanical engineering and machine reliability. 2009, no. 2, pp. 85-88.

5. Kukudzhanov K.V., Levitin A.L. Processes of deformation of elastic-plastic material with defects under electrodynamic loading // Bulletin of PNRPU. Mechanics. 2015, no. 1, pp. 106-120.
6. Ivanov Yu.F., Lychagin D.V., Gromov V.E., Tselermayer V.Ya., Sosnin O.V., Kovalenko V.V., Konovalov S.V. Mesoscopic substructure and electropulse suppression of fatigue failure // Phys. mesomech. 2000, vol. 3, no. 1, pp. 103-108.
7. Bataronov I.L. Mechanisms of electroplasticity // Soros Educational Journal. 1999, no. 10, p. 93.
8. Troitsky O.A., Skvortsov O.B., Stashenko V.I. Measurement of vibrations created by current pulses in elements of electrical structures // Electrical engineering. 2018, no. 3, pp. 8-12.
9. Smelyansky V. M. Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation. – M.: Mechanical Engineering, 2002. – 300 p.

Сташенко Владимир Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник	Stashenko Vladimir Ivanovich – candidate of physical and mathematical sciences, leading researcher
Скворцов Олег Борисович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	Skvortsov Oleg Borisovich – candidate of technical sciences, senior researcher
vis20-11@rambler.ru	

Received 31.10.2023