

doi: 10.51639/2713-0576_2024_4_3_43

УДК 539.67+620.17+621.778.1+621.983

ГРНТИ 55.20.15

ВАК 2.4.4

Электромагнитное воздействие и деформационные процессы в металлах

Стащенко В. И., *Скворцов О. Б.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Российская Федерация, 101990, Россия, г. Москва, М. Харитоньевский пер., 4*

email: *oleg.b.skvorcov@gmail.com

Аннотация

Повышение пластичности и изменение структурных свойств металлов составляет основным приемом при обработке металлов давлением (ОМД). Такое изменение свойств может быть обеспечено как прямым механическим воздействием, так и нагреванием металла. Механическое воздействие также как и нагревание приводят к деформациям (взаимным перемещением) в структуре материал, что сопровождается деформированием, перемещением дислокаций и дефектов, изменением размеров зерна, снижением остаточных напряжений. Энергетическая эффективность внешнего воздействия на обрабатываемую область может быть существенно повышена локализацией такого воздействия во времени и в пространстве, например, применением импульсного ультразвукового воздействия. Еще проще такое локальное воздействие может быть обеспечено использованием технологии с применением электропластического эффекта. Механизмы генерации происходящих при этом процессов связаны с электродинамическими явлениями в металле при пропускании импульсных токов, которые сопровождаются ударными и волновыми деформациями в материале. Такие виброакустические воздействия в свою очередь приводят к снижению сопротивляемости деформированию и структурным изменениям в материале.

Ключевые слова: электропластический эффект, акустическое смягчение, электрическая индукция, механический удар.

Теория и методы исследования

Дополнительные электроимпульсные воздействия на металлы при их сварке, резании и обработке материалов давлением (прокатка, ковка, волочение, штамповка, плющение) является распространенным техническим приемом, который снижает сопротивление металла обработке, повышает пластичность и способствует улучшению структуры металла [1]. Длительные исследования электропластического эффекта [2-4] показывают, что связанные с ним явления наблюдаются в различных металлах и сплавах с поли- и монокристаллической структурой, а также в материалах с аморфной, нано кристаллической и композитной структурой. Величина электропластического эффекта зависит от режимов электрического воздействия, а также от геометрии образцов, свойств материала внешних условий и дополнительных внешних воздействий. Эти особенности позволяют сделать предположение о наличие общего механизма возникновения электропластического эффекта. За прошедшие годы было предложено более тридцати физических процессов в проводниках, оказывающих влияние на механизм электропластического эффекта. Среди таких процессов

можно отметить теории динамического локального теплового действия тока, а также «электронного ветра» описывающего действие электронного газа на дислокации материала. В ряде исследований [5-9] отмечено, что необходимо дальнейшее изучение механизмов электропластического эффекта. При изучении физических процессов, связанных с действием электрического импульса тока большой плотности следует отметить наблюдаемые вибрационные и акустические явления [10]. Вибрационное и акустическое воздействие на металлы оказывает воздействие аналогичное электропластическому эффекту [11-15]. Такое влияние вибрации или ультразвукового облучения получило название вибропластического эффекта или акустического смягчения. Такой эффект проявляется при исследовании различных материалов, например, материалов с памятью формы [16]. Одно из объяснений такого действия заключается в проявлении циклической усталости материала [17].

Критический анализ ряда теорий электропластического эффекта представлен в [18]. В этой работе показано, что такие теории как влияние температурных изменений или взаимодействия «электронного ветра» с дислокациями физически несостоятельны. По результатам такого анализа авторы работы указывают на доминирующий вклад электродинамических процессов в создание электропластического эффекта. В представленной ниже работе показано, что возникающие при электродинамическом действии механическое ударное возбуждение механических колебаний может приводить к проявлению в металлах вибропластических эффектов. Экспериментально исследовано формирование ударно-вибрационного отклика на действие электрического импульса.

Полученные результаты и их обсуждение

Изучение механических колебаний в металлических образцах выполнялось с использованием трехкомпонентных высокочастотных акселерометров, которые обеспечивают контроль пространственной вибрации. Осевые статические нагрузки контролировались датчиками силы, установленными на испытательной машине. Динамика электрических процессов в проводнике определялась по изменению магнитного поля вблизи поверхности проводника (рис. 1).

Методика исследования процессов при изучении электропластического эффекта должна учитывать разнообразие происходящих при этом электрических процессов: электрических, механических, тепловых, вибрационных и акустических. Поскольку, как ранее было отмечено, ряд исследователей ориентируются на тепловой механизм электропластического эффекта, соответствующее оборудование выбирается по принципу контроля тепловых процессов [19]. Поскольку контроль температуры материала, особенно внутри его объема, трудно реализовать в условиях кратковременного действия электрического импульса, экспериментальное исследование таких процессов сложно реализовать. Как показали наши исследования действие короткого (менее 1 мс) одиночного импульса сопровождается заметным электропластическим воздействием, но не сколько-нибудь заметным динамическим изменением температуры материала. Вклад температурных процессов в электропластический эффект мало значителен также и по причине того, что электропластический эффект активно проявляется и при исследовании охлажденных образцов. Эти замечания не противоречат известным фактам влияния температуры на материал, на его пластические свойства и на изменение его структуры (отжиг). Такое температурное воздействие связано с существенным нагревом, например, постоянным током высокой плотности. В этом случае энергетическая эффективность процесса повышения пластичности оказывается намного меньше, чем при электропластическом эффекте. Дополнительно можно отметить, что локальный динамический нагрев металла при изучении электропластического эффекта, как правило, и может быть зафиксирован быстродействующим инфракрасным бесконтактным пирометром.

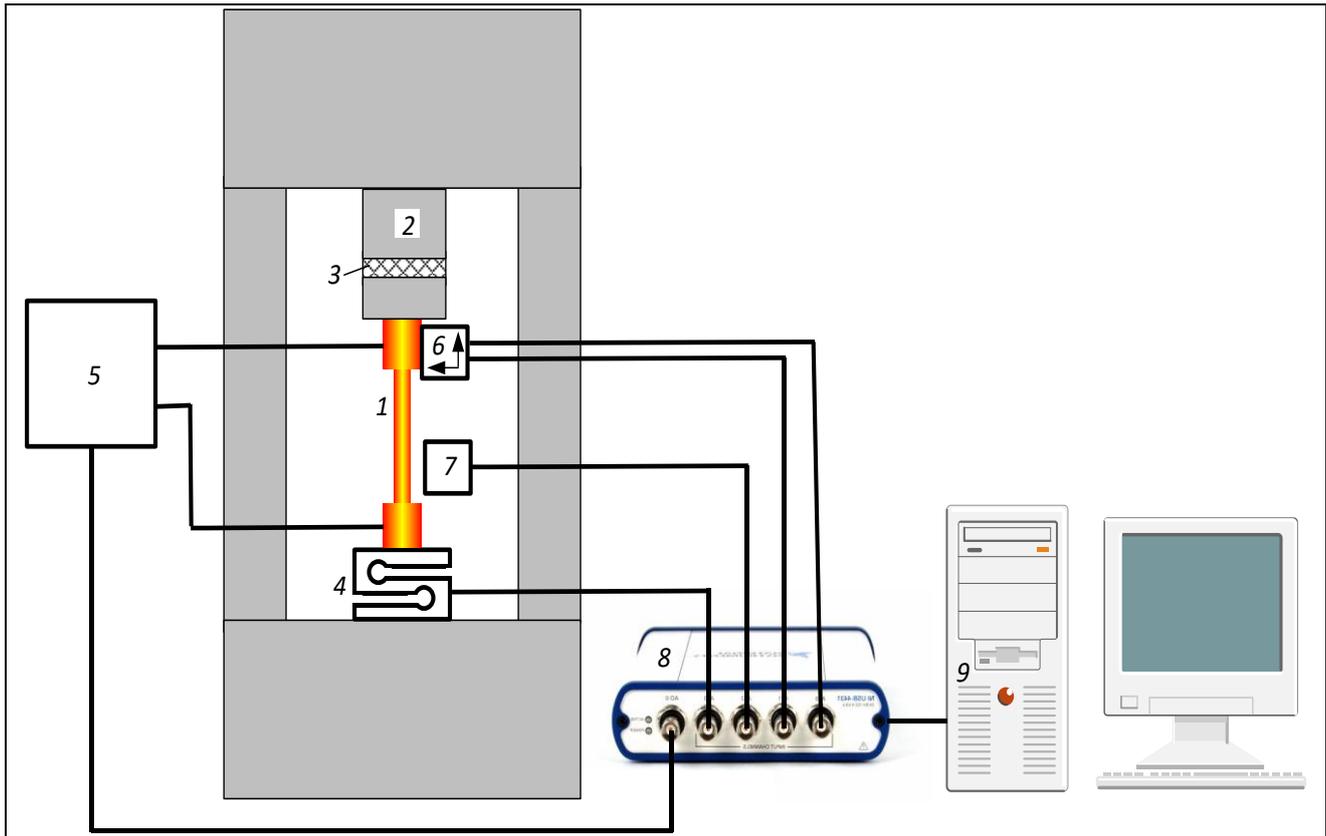


Рис. 1. Стенд для исследования статического и динамического воздействия на исследуемый образец

1. Статическое нагружение задается испытательной машиной 2, передаваемое через электрический изолятор 3. Контроль осевого усилия датчиком 4. На образец подают одиночные электрические импульсы от генератора 5. Контроль вибрации датчиком 6.

Контроль магнитного поля датчиком 7. Прием сигналов от датчиков и управление генератором через модуль 8 связи с компьютером 9

Частота колебаний образца в условиях статического нагружения с напряжением близким к порогу разрушения, оцениваемая по длительности 10 периодов от момента t_1 до t_2 , равна 18,62 КГц. Пример сигналов ускорения от трехкомпонентного акселерометра представлен на рис. 2. Такие высокочастотные колебания большой амплитуды в образце из стали с относительной магнитной проницаемостью около 100, вызывает виброперегрузки с амплитудой более 1000 g. При этом амплитуда вибрационных деформаций на такой частоте не превышает одного микрона.

Статические деформации задаются испытательной машиной и соответствующие зависимости осевой нагрузки представлены на рис. 3. Тензометрический датчик осевого нагружения в моменты действия электрических импульсов фиксирует снижение такого нагружения, но низкое быстродействие данного датчика и недостаточное разрешение по времени не позволяют определить сущность механических процессов при воздействии единичного импульса.

Для получения детальной информации о таких процессах был использован датчик динамической силы повышенного быстродействия. Использование такого датчика позволило проследить изменение в состоянии материала во время действия одиночного электрического импульса с разрешением в 1-10 мкс.

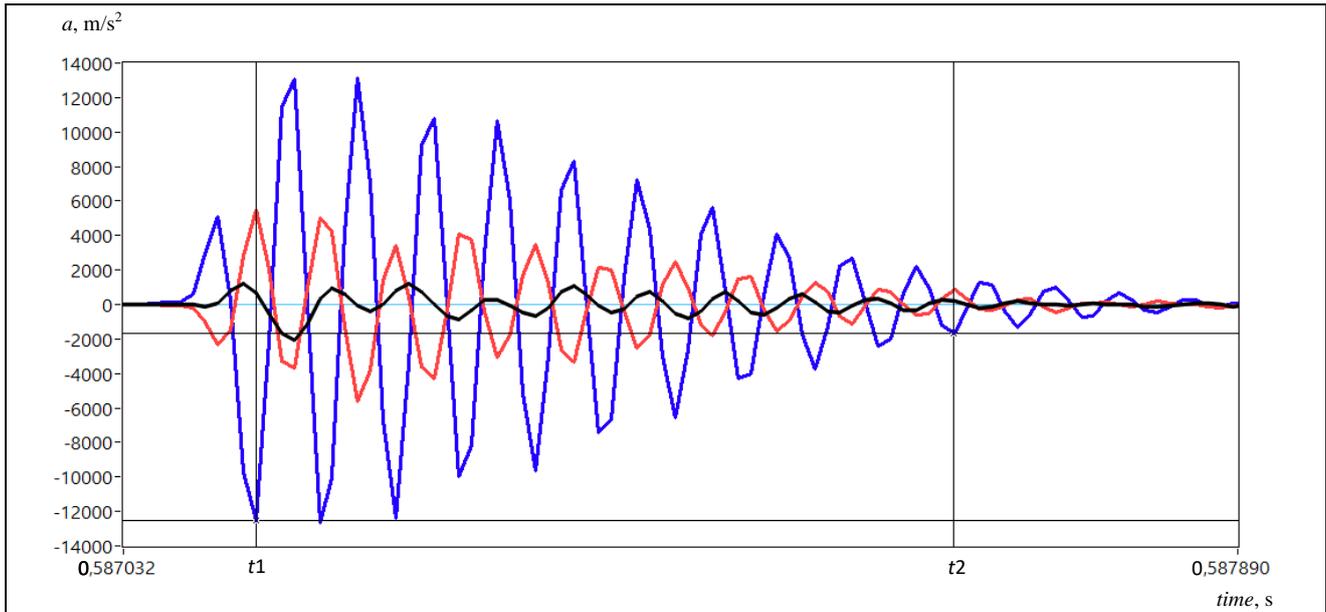


Рис. 2. Три ортогональных компонента пространственной вибрации для образца из стали во время действия одиночного электрического импульса длительностью 1000 мкс

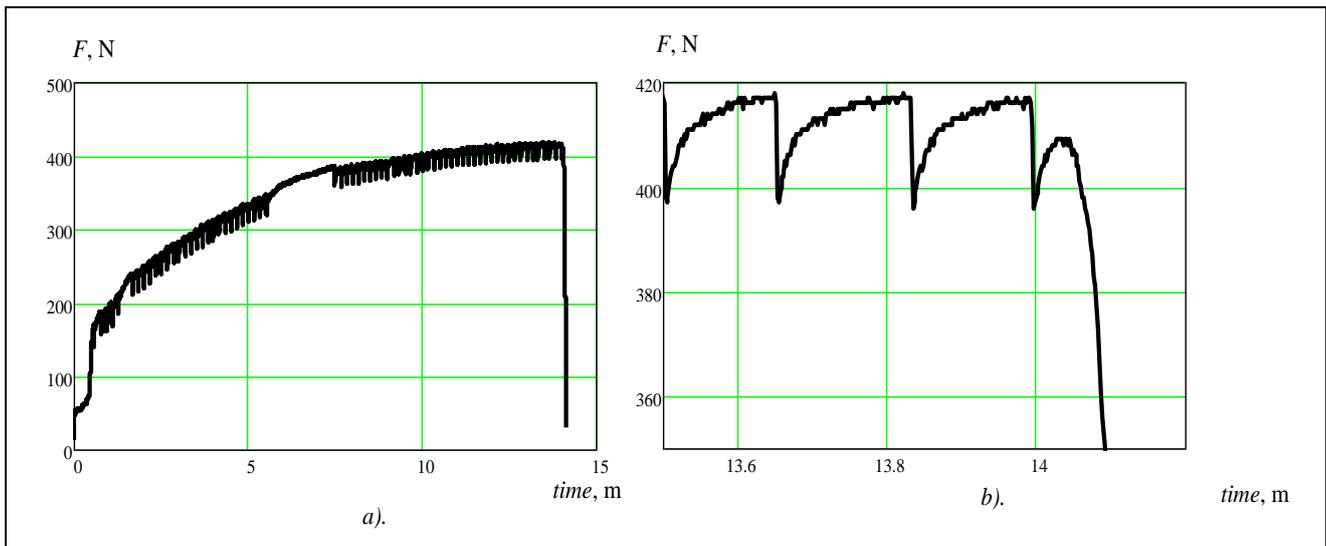


Рис. 3. Зависимость растягивающей силы от продольной деформации, линейно зависящей от времени при воздействии электрических импульсов для проводника в виде фольги из стали ($50 \times 3 \times 0,5$ мм) – а, и вблизи момента разрушения\ образца укрупненно -б

Синхронная запись вибрационных сигналов ускорения в продольном и поперечных направлениях, а также сигнала от датчика магнитной индукции позволяет проследить динамику происходящих механических и электрических процессов при взаимодействии электрического импульса с материалом проводника.

Пример таких сигналов представлен на рис. 4. Анализ таких зависимостей показывает важные особенности происходящих процессов. В материале проводника в моменты начала переднего и заднего фронтов электрического импульса наблюдаются кратковременные

ударные механические нагружения, которые затем вызывают затухающие колебания в материале проводника. Направление таких ударных воздействий зависят от направления внешнего ступенчатого изменения электрического напряжения. Одновременно с ударным механическим процессом наблюдается скачкообразное изменение магнитной индукции, которое затем переходит в плавное изменение, определяемое проявлением самоиндукции и скин-эффекта. Такие плавные изменения совпадают по времени с затухающими механическими колебаниями. Таким образом, основное ударное динамическое механическое воздействие связано с начальными моментами фронтов электрического импульса, когда ток через проводник еще далек от своего максимального значения. Момент достижения максимального тока, как видно из рис. 4, соответствует уже сильно ослабленным механическим колебаниям.

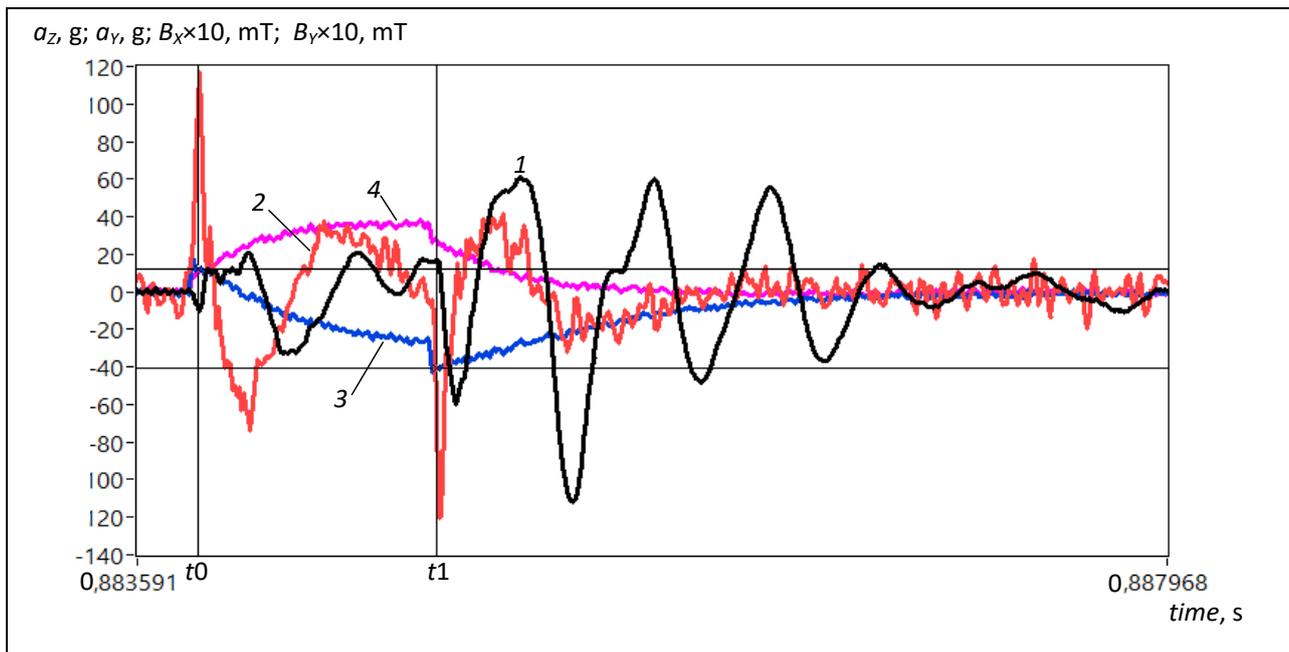


Рис. 4. Изменения магнитного поля, вибрации и динамической силы для проводника из нержавеющей стали диаметром 3 мм и длиной 160 мм. Длительность импульса 1000 мкс, амплитуда плотности тока 1000 А/мм^2 . Поперечная виброперегрузка a_y 1, осевая динамическая сила F_z – 2, две ортогональные компоненты в поперечном сечении для магнитной индукции B_x и B_y 3 и 4

Сильное механическое воздействие на материал проводника в моменты динамического изменения электрического воздействия является свидетельством в пользу электроиндукционной модели, доминирующей при проявлении электропластического эффекта [18].

Происходящие при этом изменения пластических свойств и сопротивляемости деформации, а также структурные изменения в, идентичны наблюдаемым при вибрационном и ультразвуковом внешних воздействиях, а также при механическом внешнем ударном воздействии.

При этом следует отметить, что использование электроимпульсного воздействия существенно более просто и энергетически выгодно при обработке металлов давлением с использованием дополнительных энергетических воздействий для повышения управляемости и эффективности технологического процесса.

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. Скворцов О. Б., Сташенко В. И. Механический отклик проводника на электрический импульс // Вопросы электротехнологии. № 2(39), 2023. С.5–10.
2. Sprecher A. F., Mannan S. L., Conrad H. On the mechanisms for the electroplastic effect in metals // *Acta Metallurgica*, Vol. 34, Issue 7, July 1986. P. 1145–1162.
3. Kopanев А.А. The nature of the electroplastic effect in metals. *Strength Mater* 23, 55–59 (1991).<https://doi.org/10.1007/BF00769953>
4. Jiahao Lui, Dongzhou Jia, Fu Ying, Xiangqing Kong, Zhenlin Lv, Erjun Zeng, Qi Gao, Electroplasticity effects: from mechanism to application // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol - 131 № 5-6, 2023 P. 1–20. DOI 10.1007/s00170-023-12072-y
5. Liu Y.Z., Meng B., Du M., Wan M. Electroplastic effect and microstructural mechanism in electrically assisted deformation of nickel-based superalloys // *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 840, 18 April 2022. 142975
6. Claudio Gennari Enhancement of alloys formability by electroplastic effect // *Corso di dottorato di ricerca in ingegneria industriale curricolo: materiali*, Università degli Studi di Padova, 2020. 284 p.
7. Pakhomov M., Pigato M., Calliari I. and Stolyarov V. Electroplastic Effect during Tension and Bending in Duplex Stainless Steel // *Materials (Basel)*. 2023. Jun; 16(11): 4119. doi: 10.3390/ma16114119
8. Shuai Xu, Xinwei Xiao, Haiming Zhang * and Zhenshan Cui Electroplastic Effects on the Mechanical Responses and Deformation Mechanisms of AZ31 Mg Foils // *Materials* 2022, 15(4), 1339; <https://doi.org/10.3390/ma15041339>
9. Demler E., Diedrich A., Dalinger A., Gerstein G., Herbst S., Zaefferer S., Maier H. J., Changes in Mechanical and Microstructural Properties of Magnesium Alloys Resulting from Superimposed High Current Density Pulses // *MSF*. 2021. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1016.385>
10. Skvortsov O.B., Stashenko V.I., Troitsky O.A. Electroplastic effect and interaction of an electrical impulse with a conductor. *Lett.Mater.*, 2021, 11(4), P. 473–478. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-473-478>.
11. Kozlov A. V., Mordyuk B. N., Chernyashevsky A. V. On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects // *Mater. Sci.&Eng.A*, 190, 1995. – 75–79.
12. Siu K.W., Liu H., Ngan A. H. W. A universal law for metallurgical effects on acoustoplasticity // *Materialia*, Volume 5, March 2019, 100214.
13. Huijie Liu, Yanying Hu, Shuaishuai Du, Huihui Zhao Microstructure characterization and mechanism of acoustoplastic effect in friction stir welding assisted by ultrasonic vibrations on the bottom surface of workpieces // *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 42, June 2019, P. 159–166
14. Randy Cheng Investigation of Acoustic Softening and its Application in Ultrasonic Assisted Incremental Sheet Forming // dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, University of Michigan 2023, 128 p.
15. Wenju Yang, Zhichao Xu, Feng Xiong, Haolun Yang, Xuefeng Guo and Hongshan San Effect of Ultrasonic Vibration on Tensile Mechanical Properties of Mg-Zn-Y Alloy // *Crystals* 2024, 14, 39. <https://doi.org/10.3390/cryst14010039> <https://www.mdpi.com/journal/crystals>

16. Рубаник В.В., Царенко Ю.В., Рубаник В.В.мл., Ворошилов И.В., Самолетов В.Г. Деформация сплавов с памятью формы с воздействием ультразвука и импульсного тока // Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии», 22–26 мая 2017 года, Витебск, Беларусь: материалы симпозиума: в 2 ч. / Витебск: УО «ВГТУ», 2017. Ч.2. – С.256–258.
17. Yoshiyuki Furuya. Gigacycle Fatigue Properties of High-strength Steel // ISIJ International, Vol. 61 No. 1, 2021. – P. 396–400
18. Sutton A. P., Todorov T. N, Theory of electroplasticity based on electromagnetic induction // *Physical review materials*, 2021, Vol: 5, № 11, 113605-1–113605-19, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.113605>
19. Wang Y. *et al.*, Design of Power Supply System Applied for Electroplastic Effect Research of BMGs with Temperature Control Function, 2020 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Dubrovnik, Croatia, 2020, p. 1-6, doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129625.

Electromagnetic influence and deformation processes in metals

Stashenko V. I., *Skvortsov O. B.

*Institute of Mechanical Engineering named after. A.A. Blagonravov RAS, Russian Federation,
101990, Russia, Moscow, M. Kharitonyevsky lane, 4*

email: *oleg.b.skvorcov@gmail.com

Abstract

Increasing ductility and changing the structural properties of metals is the main technique in metal forming (MD). Such a change in properties can be achieved both by direct mechanical action and by heating the metal. Mechanical impact as well as heating leads to deformations (mutual movement) in the structure of the material, which is accompanied by deformation, movement of dislocations and defects, changes in grain sizes, and a decrease in residual stresses. The energy efficiency of external influence on the treated area can be significantly increased by localizing such influence in time and space, for example, by using pulsed ultrasonic influence. Even more simply, such a local effect can be achieved using technology using the electroplastic effect. The generation mechanisms of the processes occurring in this case are associated with electrodynamic phenomena in the metal when pulsed currents are passed through, which are accompanied by shock and wave deformations in the material. Such vibroacoustic effects, in turn, lead to a decrease in resistance to deformation and structural changes in the material.

Key words: electroplastic effect, acoustic softening, electrical induction, mechanical shock.

References

1. Skvortsov O. B., Stashenko V.I. Mechanical response of the conductor to an electric impulse // *Issues of electrical technology*. № 2(39), 2023.С.5–10.
2. Sprecher A. F., Mannan S. L., Conrad H. On the mechanisms for the electroplastic effect in metals // *Acta Metallurgica*, Vol. 34, Issue 7, July 1986. P. 1145–1162.
3. Kopanev A.A. The nature of the electroplastic effect in metals. *Strength Mater* 23, 55–59 (1991).<https://doi.org/10.1007/BF00769953>

4. Jiahao Lui, Dongzhou Jia, Fu Ying, Xiangqing Kong, Zhenlin Lv, Erjun Zeng, Qi Gao, Electroplasticity effects: from mechanism to application // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol - 131 № 5-6, 2023 P.1–20. DOI 10.1007/s00170-023-12072-y
5. Liu Y.Z., Meng B., Du M., Wan M. Electroplastic effect and microstructural mechanism in electrically assisted deformation of nickel-based superalloys // *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 840, 18 April 2022. 142975
6. Claudio Gennari Enhancement of alloys formability by electroplastic effect // *Corso di dottorato di ricerca in ingegneria industriale curricolo: materiali*, Università degli Studi di Padova, 2020. 284 p.
7. Pakhomov M., Pigato M., Calliari I. and Stolyarov V. Electroplastic Effect during Tension and Bending in Duplex Stainless Steel // *Materials (Basel)*. 2023. Jun; 16(11): 4119. doi: 10.3390/ma16114119
8. Shuai Xu, Xinwei Xiao, Haiming Zhang * and Zhenshan Cui Electroplastic Effects on the Mechanical Responses and Deformation Mechanisms of AZ31 Mg Foils // *Materials* 2022, 15(4), 1339; <https://doi.org/10.3390/ma15041339>
9. Demler E., Diedrich A., Dalinger A., Gerstein G., Herbst S., Zaefferer S., Maier H. J., Changes in Mechanical and Microstructural Properties of Magnesium Alloys Resulting from Superimposed High Current Density Pulses // *MSF*. 2021. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1016.385>
10. Skvortsov O.B., Stashenko V.I., Troitsky O.A. Electroplastic effect and interaction of an electrical impulse with a conductor. *Lett.Mater.*, 2021, 11(4), P. 473–478. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2021-4-473-478>.
11. Kozlov A. V., Mordyuk B. N., Chernyashevsky A. V. On the additivity of acoustoplastic and electroplastic effects // *Mater. Sci.&Eng.A*, 190, 1995. – 75–79.
12. Siu K.W., Liu H., Ngan A.H.W. A universal law for metallurgical effects on acoustoplasticity // *Materialia*, Volume 5, March 2019, 100214
13. Huijie Liu, Yanying Hu, Shuaishuai Du, Huihui Zhao Microstructure characterization and mechanism of acoustoplastic effect in friction stir welding assisted by ultrasonic vibrations on the bottom surface of workpieces // *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 42, June 2019, P. 159–166
14. Randy Cheng Investigation of Acoustic Softening and its Application in Ultrasonic Assisted Incremental Sheet Forming // dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, University of Michigan 2023, 128 p.
15. Wenju Yang, Zhichao Xu, Feng Xiong, Haolun Yang, Xuefeng Guo and Hongshan San Effect of Ultrasonic Vibration on Tensile Mechanical Properties of Mg-Zn-Y Alloy // *Crystals* 2024, 14, 39. <https://doi.org/10.3390/cryst14010039> <https://www.mdpi.com/journal/crystals>
16. Rubanik V.V., Tsarenko Yu.V., Rubanik V.V. Ml., Voroshilov I.V., Airplanes V.G. Deformation of alloys with form memory with the effects of ultrasound and pulsed current // *International Symposium “Promising Materials and Technologies”*, May 22–26, 2017, Vitebsk, Belarus: *Symposium Materials: in 2 hours / Vitebsk: UO “VSTU”*, 2017. Vol.2. – P. 256–258.
17. Yoshiyuki Furuya. Gigacycle Fatigue Properties of High-strength Steel // *ISIJ International*, Vol. 61 No. 1, 2021. – P. 396–400.
18. Sutton A. P., Todorov T. N, Theory of electroplasticity based on electromagnetic induction // *Physical review materials*, 2021, Vol: 5, № 11, 113605-1–113605-19, DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.113605>
19. Wang Y. *et al.*, Design of Power Supply System Applied for Electroplastic Effect Research of BMGs with Temperature Control Function, 2020 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Dubrovnik, Croatia, 2020, p. 1–6, doi: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129625.