

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ АВТОВОЛН ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ СТАЛЬНОЙ ПЛАСТИНЫ*

*Гагарин А.Ю.¹, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин
им. В.М. Финкеля (s.nk@mail.ru)*

*Сарычев В.Д.¹, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин
им. В.М. Финкеля (sarychev_vd@mail.ru)*

*Невский С.А.¹, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин
им. В.М. Финкеля (nevsliv.sergei@yandex.ru)*

*Потехаев А.И.², д.ф.-м.н., профессор, директор Сибирского физико-технического
института им. В.Д. Кузнецова (СФТИ ТГУ) (potekaev@spti.tsu.ru)*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)

Аннотация. Несмотря на растущий интерес к использованию токовых воздействий для интенсификации формоизменения надежные экспериментальные и теоретические представления о процессах пластической деформации весьма ограничены, а физическая природа эффекта пластификации металлов изучена явно недостаточно. Это сдерживает использование перспективного явления в технологии обработки металлов давлением. Перспективным для решения задач исследования механизмов развитой электростимулированной пластической деформации может явиться подход к пластическому течению как к волновому процессу. Методами инфракрасной термографии и двухэкспозиционной спекл-интерферометрии исследована пластическая деформация малоуглеродистой стали при воздействии импульсного электрического тока. Установлено, что внешнее электрическое воздействие приводит к увеличению скорости волн пластичности на 65 %. Анализ картин распределения скоростей показал, что распределение скорости имеет вид «ударного перехода». В начале координат скорость движения материала равна нулю (неподвижный захват), а на правой части кривой скорость материала равна скорости растяжения, задаваемой испытательной машиной. Воздействие электрического тока приводит к расщеплению скоростей смещений как на подвижных, так и на неподвижных концах образцов. Термографические исследования показали наличие градиента температуры, направленного от зажимов к центру образца, что не совпадает с картиной распределения смещений. Установлено, что при первичной обработке мощными токовыми импульсами в центральной области образца температура образца достигает 351 К, а в области, прилегающей к зажимам, 330 К, то есть температура повысилась на 53 К. Последующие обработки приводят к незначительному повышению температуры. По литературным данным такое повышение температуры для исследуемой стали приводит к снижению предела текучести на 10 %, что соответствует результатам настоящего эксперимента. Если изменение скорости движения медленной волны при пропускании тока ранее было обнаружено и подтверждается в настоящей работе, то анализ распределения скоростей по координате показал, что импульсный ток приводит к расщеплению профиля скоростей вблизи подвижного захвата.

Ключевые слова: электроимпульсная обработка, пластическая деформация, эффект электропластичности.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-148-153

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы исследования в области физического материаловедения и обработки материалов сосредоточены на использовании внешних энергетических воздействий для повышения эксплуатационных свойств получаемых материалов. Прогресс в разви-

тии современных металлообрабатывающих технологий связывается с использованием электрических токов высокой плотности [1]. Особенно это актуально для металлургической, авиационной, автомобильной и аэрокосмической отраслей промышленности. Эффекты токового воздействия при деформировании металлических изделий являются многофакторными и состоят в снижении усилий при металлообработке, напряжений течения, увеличении пластичности, ускорении старения и рекристаллизации, уменьшении размера зерен при снижении остаточных напряжений, уменьшении упругого возврата [2]. Это относится к процессамковки и прокатки [3, 4], волочения [5, 6], металлооб-

* Работа проведена при поддержке гранта РФФИ № 17-32-50012/17 от 18.10.2017 шифр «Стажер» и государственного задания Минобрнауки РФ № 3.1283.2017/4.6.

Особую благодарность за помощь в проведении опытов и расшифровки данных измерительного оборудования коллектив авторов выражает сотрудникам ИФПМ А.Г. Лунёву и В.В. Горбатенко.

работки [7, 8], соединения материалов [9, 10], спекания [11, 12], листовой штамповки [13 – 16].

Наиболее подробно использование электрических воздействий и возможные механизмы электростимуляции рассмотрены в обзорных работах [17, 18]. Несмотря на растущий интерес к использованию токовых воздействий для интенсификации формоизменения надежные экспериментальные данные и теоретические представления о процессах пластической деформации весьма ограничены, а физическая природа эффекта пластификации металлов изучена явно недостаточно. Это снижает перспективы использования явления в технологии обработки металлов давлением. Удобным и перспективным для решения задач исследования механизмов развитой электростимулированной пластической деформации может явиться синергетический подход к пластическому течению как к волновому процессу. Впервые на это обращено внимание в работе [19].

В настоящей работе предпринята попытка использовать представления о волновом процессе пластической деформации [20] как движении волны типа ударного перехода [21]. Проведена аналогия со структурой ударной волны в газах [22], рассмотрено влияние различных физических процессов, происходящих во фронте ударной волны, на внутреннюю структуру фронта. Поэтому целью настоящей работы является экспериментальное определение влияния электрического тока на профиль волны типа «ударного перехода».

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала исследования использовали конструкционную сталь марки 08пс. Испытания на растяжение были выполнены на плоских образцах в форме двойной лопатки с размерами рабочей части $50 \times 10 \times 2$ мм, которые вырезали из полос холодной прокатки после отжига в печи при температуре 600°C в течение 60 мин. Как и в работах [20, 23], образцы растягивали на универсальной испытательной машине «Instron 1185» при температуре 25°C с постоянной скоростью перемещения подвижного захвата $0,2$ мм/мин ($\approx 3,3 \cdot 10^{-6}$ м/с). Для исследований макроскопической локализации пластического течения использовали технику двухэкспозиционной спекл-фотографии [20], которая сочетает в себе возможности наблюдения всего деформируемого образца в целом (характерный размер поля зрения примерно 100×100 мм) с разрешающей способностью приблизительно 1 мкм.

Импульсный электрический ток подавали от генератора однополярных токовых импульсов [24]. Электрический контакт с образцом обеспечивали использованием самозажимного захвата машины. Для ее защиты от воздействия токовых импульсов были разработаны специальные диэлектрические переходные втулки. Импульсы электрического тока синусоидальной формы амплитудой 3500 А (175 А/мм²), длительностью

100 мкс и частотой следования 10 Гц подавали в течение 30 с после достижения площадки текучести. Затем, спустя 90 с, токовое воздействие повторяли.

Исследования кинетики развития неоднородной пластической деформации проводили с помощью измерительных комплексов ALMEC с фотографической и ALMEC-TV с цифровой регистрацией изображения [25], которые позволяют восстанавливать поле векторов смещения. Из зависимостей координат очагов локализации X от времени t определяли пространственный λ и временной T периоды соответствующих процессов, а затем вычисляли скорость движения очагов локализованной пластичности.

Изменение характеристик тепловых процессов, происходящих в образце, изучали методом инфракрасной термографии [26].

Регистрацию спектрограмм, термограмм и осциллограмм осуществляли на площадке текучести.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена характерная кривая деформационного нагружения в координатах напряжение – деформация при воздействии электрического тока. Видно, что приложение электрического тока приводит к осцилляции деформирующего усилия, связанной со скачками пластической деформации. Это согласуется с принятыми представлениями об электропластической деформации [1, 2].

Одним из факторов, отвечающих за наблюдаемое снижение деформирующего усилия при воздействии тока, является изменение температуры материала. Термографические исследования (рис. 2, а) показали наличие градиента температуры, направленного от центра образца к зажимам. Эволюция температурных полей во времени в областях 2 и 3 (рис. 2, а) представлена на рис. 2, б: зависимость температуры имеет скачкообразный вид. Наибольшее значение температуры в области 2 составляет 351 К, а в области 3 – 330 К. Последующие обработки током приводят к незначительному повышению температуры. Такое поведение температу-

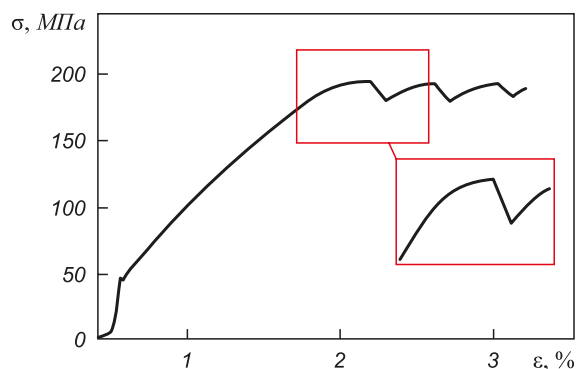


Рис. 1. Диаграмма нагружения

Fig. 1. Loading diagram

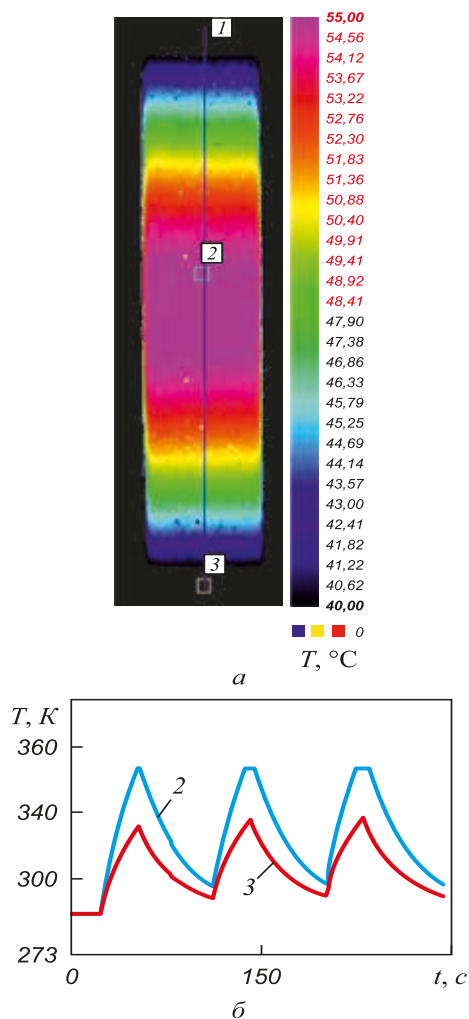


Рис. 2. Термограмма – распределение температуры в образце (а) и величина средней температуры в секторах 2 и 3 (l – ось образца на поз. а)

Fig. 2. Thermogram – temperature distribution in a sample (a) and average temperature value in sectors 2 and 3 (l indicates the sample axis at a)

ры может быть объяснено тем, что тепло не успевает рассеиваться при частоте следования импульсов 10 Гц. При достижении температурой максимального значения наблюдается снижение деформирующего усилия на 7 % при первой обработке токовыми импульсами и на 4 % при последующих обработках.

Изменение температуры вследствие джоулева нагрева может быть вычислено по формуле, предложенной в работе [27]:

$$\Delta T = \frac{t_1 f}{cm} R \int_0^{\tau} i(t)^2 dt, \quad (1)$$

где $i(t) = \begin{cases} I_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right), & 0,1n < t < 10^{-4} + 0,1n; \\ 0, & 10^{-4} + 0,1n < t < 0,1(n+1) \end{cases}$; $R = \frac{\rho l}{S}$; t_1 – время воздействия тока (1 имп.); I_m – амплитудное зна-

чение тока; $n = 0, 1, 2, \dots$; ρ – удельное электрическое сопротивление; l – длина рабочей части образца; S – площадь поперечного сечения; t – время; C – удельная теплоемкость; T – период импульса; f – частота следования импульсов; m – масса образца.

Оценки величины ΔT показали, что для стали ($\rho = 1,78 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; $C = 482$ Дж/(кг·К); $\gamma = 7843$ кг/м³ – плотность вещества) $\Delta T = 21$ К за время одного импульса, что не противоречит данным эксперимента $\Delta T_{\text{exp}} = 30$ К (где ΔT_{exp} – изменение температуры, полученное из анализа термограмм). Расчет по формуле $\frac{C\gamma\Delta E_{\text{exp}}}{N}$ (где N – число атомов в образце) показал, что энергия, которая приходится на один атом, составляет приблизительно 10^{-3} эВ, что соответствует оценкам, сделанным в работе [28]. С другой стороны, упругая энергия на один атом составляет 10^{-6} эВ [28], что позволяет сделать вывод о том, что структурные преобразования в деформируемой системе являются более быстрым каналом превращения электрической энергии по сравнению с теплопроводностью [28].

Одним из проявлений структурной перестройки деформируемой системы являются волны локализованного пластического течения, которые проявляются в виде неоднородности распределения смещений по образцу. Скорость очагов локализации, определенная из хронограмм съемки спеклов, находится в пределах от 0,0925 до 0,1044 мм/с без воздействия тока и от 0,1369 до 0,1722 мм/с при воздействии тока. Таким образом, импульсный электрический ток увеличивает скорость волн пластичности на 65 %.

Зависимости скорости точек пластины от продольной координаты получены из зависимости смещений от координаты за определенное время ($\tau = 10$ с), построенной по экспериментальным данным спекл-интерферограмм. Зависимости скоростей получаются делением перемещений на время τ (рис. 3). Эти зависимости имеют вид «ударного перехода». При $x = 0$ скорость движения материала равна нулю, что соответствует области с неподвижным захватом, а на правой стороне графика после ударного перехода скорость материала равна скорости растяжения, задаваемой испытательной машиной (рис. 3, а).

При отсутствии тока (рис. 3, а) значение скорости растяжения для всех моментов времени остается одинаковым. Пропускание тока приводит к тому, что скорости деформации становятся различными: происходит расщепление (рис. 3, б). Кривая 5 (рис. 3, а) и кривая 2 (рис. 3, б) относятся к одному моменту времени – началу включения тока. Если изменение скорости движения медленной автоволны при пропускании тока ранее было обнаружено в работе [2] и подтверждается в настоящей работе, то расщепление скорости смещений на подвижном захвате выявлено впервые в настоящей работе.

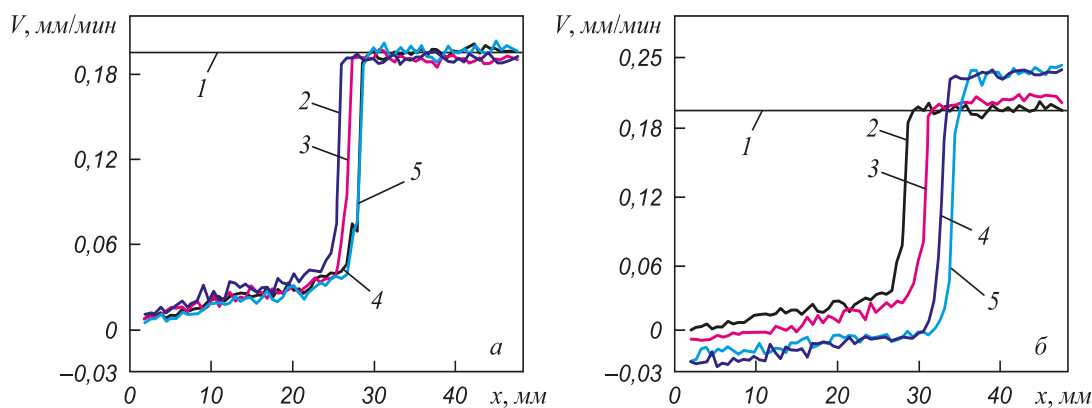


Рис. 3. Зависимость продольной скорости от продольной координаты в различные моменты времени: а – без тока (2 – 380 с; 3 – 390 с; 4 – 400 с; 5 – 402 с); б – с током (2 – 402 с; 3 – 425 с; 4 – 440 с; 5 – 450 с)

Fig. 3. Dependence of longitudinal velocity on longitudinal coordinate at different points in time: а – without current (2 – 380 s; 3 – 390 s; 4 – 400 s; 5 – 402 s); б – with current (2 – 402 s; 3 – 425 s; 4 – 440 s; 5 – 450 s)

ВЫВОДЫ

Установлено, что воздействие импульсного электрического тока приводит к увеличению скорости распространения автоволны пластичности на 65 %. Использование распределения скоростей по координате для интерпретации экспериментальных данных позволило определить влияние импульсного тока на вид (профиль) скорости. Выявлено, что импульсный ток приводит к расщеплению профиля скоростей вблизи подвижного захвата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ruszkiewicz B.J., Grimm T., Ragai I., Mears L., Roth J.T. A Review of Electrically-Assisted Manufacturing With Emphasis on Modeling and Understanding of the Electroplastic Effect // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017. Vol. 139. No. 11. P. 110801 (1-15).
- Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермаер. – М.: Наука, 1996. – 293 с.
- Jones J.J., Mears L. Constant Current Density Compression Behavior of 304 Stainless Steel and Ti-6Al-4V During Electrically-Assisted Forming // *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2011. Paper No. MSEC2011-50287. P. 629 – 637.
- Hong S., Jeong Y., Chowdhury M.N., Chun D., Kim M., Han H.N. Feasibility of Electrically Assisted Progressive Forging of Aluminum 6061-T6 Alloy // *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2015. Vol. 64. No. 1. P. 277 – 280.
- Tang G., Zhang J., Yan Y., Zhou H., Fang W. // The Engineering Application of the Electroplastic Effect in the Cold-Drawing of Stainless Steel Wire // *J. Mater. Process. Technol.* 2003. Vol. 137. No. 1. P. 96 – 99.
- Egea A.J.S., Rojas H.A.G., Celentano D.J., Peiro J.J. Mechanical and Metallurgical Changes on 308L Wires Drawn by Electropulses // *Mater. Des.* 2016. Vol. 90. P. 1159 – 1169.
- Zhang D., To S., Zhu Y.H., Wang H., Tang G.Y. Static Electropulsing-Induced Microstructural Changes and Their Effect on the Ultra-Precision Machining of Cold-Rolled AZ91 Alloy // *Metall. Mater. Trans. A*. 2012. Vol. 43. No. 4. P. 1341 – 1346.
- Hameed S., Rojas H.A.G., Egea A.J.S., Alberro A.N. Electroplastic Cutting Influence on Power Consumption During Drilling Process // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 87. No. 5-8. P. 1835 – 1841.
- Liu X., Lan S., Ni J. Electrically Assisted Friction Stir Welding for Joining Al 6061 to TRIP 780 Steel // *J. Mater. Process. Technol.* 2015. Vol. 219. P. 112 – 123.
- Santos T.G., Lopes N., Machado M., Vilaca P., Miranda R. Surface Reinforcement of AA5083-H111 by Friction Stir Processing Assisted by Electrical Current // *J. Mater. Process. Technol.* 2015. Vol. 216. P. 375 – 380.
- Grasso S., Sakka Y., Maizza G. Electric Current Activated/ Assisted Sintering (ECAS): A Review of Patents 1906–2008 // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2009. Vol. 10. No. 5. P. 053001.
- Langer J., Hoffmann M.J. Direct Comparison Between Hot Pressing and Electric Field-Assisted Sintering of Submicron Alumina // *Acta Mater.* 2009. Vol. 57. No. 18. P. 5454 – 5465.
- Xu D., Lu B., Cao T., Zhang H., Chen J., Long H., Cao J. Enhancement of Process Capabilities in Electrically-Assisted Double Sided Incremental Forming // *Mater. Des.* 2016. Vol. 92. P. 268 – 280.
- Valoppi B., Egea A.J.S., Zhang Z., Rojas H.A.G., Ghiotti A., Bruschini S., Cao J. A Hybrid Mixed Double-Sided Incremental Forming Method for Forming Ti₆Al₄V Alloy // *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 65. No. 1. P. 309 – 312.
- Xie H., Dong X., Peng F., Wang Q., Liu K., Wang X., Chen F. Investigation on the Electrically-Assisted Stress Relaxation of AZ31B Magnesium Alloy Sheet // *J. Mater. Process. Technol.* 2016. Vol. 227. P. 88 – 95.
- Liu R., Lu B., Xu D., Chen J., Chen F., Ou H., Long H. Development of Novel Tools for Electricity-Assisted Incremental Sheet Forming of Titanium Alloy // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016. Vol. 85. No. 5. P. 1137 – 1144.
- Nguyen-Tran H., Oh H., Hong S., Han H.N., Cao J., Ahn S., Chun D. A Review of Electrically-Assisted Manufacturing // *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.* 2015. Vol. 2. No. 4. P. 365 – 376.
- Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent Advances and Challenges in Electroplastic Manufacturing Processing of Metals // *J. Mater. Res.* 2010. Vol. 25. No. 7. P. 1215 – 1224.
- Зуев Л.Б., Громов В.Е., Пеккер Н.В. Электростимулирование волны пластичности при распространении полос Людерса // *Металлофизика*. 1992. № 11. С. 88.
- Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. – Новосибирск: Наука, 2008. – 328 с.
- Сарычев В.Д., Петрунин В.А. Фильтрационная модель пластической деформации // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1993. № 2. С. 29 – 33.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Ударные волны большой амплитуды в газах // *Успехи физических наук*. 1957. Т. 63. № 11. С. 613 – 641.

23. Баранникова С.А., Косинов Д.А., Зуев Л.Б., Громов В.Е., Коновалов С.В. Влияние водорода на макролокализацию пластической деформации низкоуглеродистой стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 12. С. 891 – 895.
24. Кузнецов В.А., Громов В.Е., Кузнецова Е.С., Гагарин А.Ю., Косинов Д.А. Аппаратурное обеспечение электростимулированной обработки металлов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 2. С. 157 – 163.
25. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses // Measur. Sci. Technol. 2010. Vol. 21. No. 5. P. 054014 – 054019.
26. Федорова А.Ю., Банников М.В., Плехов О.А. Применения метода инфракрасной термографии для определения параметров линейной механики трещин // Вестник ПНИПУ. Механика. 2012. № 2. С. 215 – 225.
27. Pengchao Song, Xifeng Li, Wei Ding, Jun Chen. Electroplastic Tensile Behavior of 5A90 Al–Li Alloys // Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.). 2014. Vol. 27. No. 4. P. 642 – 648.
28. Каминский П.П. Необратимая деформация кристаллов как структурное превращение, инициируемое изменением межатомного взаимодействия. Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2015. – 39 с.

Поступила в редакцию 26 марта 2018 г.

После доработки 18 мая 2018 г.

Принята к публикации 6 июня 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2019. VOL. 62. No. 2, pp. 148–153.

INFLUENCE OF PULSED ELECTRIC CURRENT ON THE WAVES MOTION CHARACTER OF PLASTIC DEFORMATION AT TENSION OF A STEEL PLATE

A.Yu. Gagarin¹, V.D. Sarychev¹, S.A. Nevskii¹, A.I. Potekaev²

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

²National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract. Infrared thermography and two-exposure speckle interferometry have been used to study the plastic deformation of low-carbon steel under the action of pulsed electric current. It was established that external electric effect leads to an increase in velocity of plastic waves by 65 %. Analysis of the velocity distribution patterns showed that they have the profile of “shock transition”. At the origin, velocity of the material is zero (motionless gripping), and at the right end of the curve material velocity is equal to stretching speed specified by testing machine. The effect of electric current leads to splitting of the displacements velocities, both at moving and stationary ends of the samples. It is assumed that the observed splitting is related to the Stark splitting of energy levels of the deformed system. This splitting leads to a decrease in the potential barrier for the motion of defects in crystal lattice. Thermographic studies have shown presence of a temperature gradient directed from clamps to center of the sample, which does not coincide with pattern of displacement distribution. It was determined that during the primary treatment with high power current pulses in the central area of the sample, sample temperature reaches 351 K, and 330 K in the area adjacent to clamps. Subsequent treatments result in a slight increase in temperature. This behavior of temperature can be explained by the fact that heat does not dissipate at a repetition rate of 10 Hz. On an average, sample temperature increases by 30 K. Theoretical calculation has shown that the Joule effect leads to an increase in temperature of the sample by 21 K per pulse, which is practically in agreement with experimental results. Estimates of thermal energy and energy of elastic deformation have shown that the fastest channel for converting the energy of electric pulse is structural changes in deformable system, which lead to the observed decrease in deforming force.

Keywords: electropulse treatment, plastic deformation, electroplasticity effect.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-2-148-153

REFERENCES

1. Ruskiewicz B.J., Grimm T., Ragai I., Mears L., Roth J.T. A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017, vol. 139, no. 11, pp. 110801 (1-15).
2. Gromov V.E., Zuev L.B., Kozlov E.V., Tsellemmaer V.Ya. *Elektrostimulirovannaya plastichnost' metallov i splavov* [Electrostimulated plasticity of metals and alloys]. Moscow: Nauka, 1996, 293 p. (In Russ.).
3. Jones J.J., Mears L. Constant current density compression behavior of 304 stainless steel and Ti-6Al-4V during electrically-assisted forming. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2011, Paper no. MSE2011-50287, pp. 629–637.
4. Hong S., Jeong Y., Chowdhury M.N., Chun D., Kim M., Han H.N. Feasibility of electrically assisted progressive forging of aluminum 6061-T6 alloy. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2015, vol. 64, no. 1, pp. 277–280.
5. Tang G., Zhang J., Yan Y., Zhou H., Fang W. The engineering application of the electroplastic effect in the cold-drawing of stainless steel wire. *J. Mater. Process. Technol.* 2003, vol. 137, no. 1, pp. 96–99.
6. Egea A.J.S., Rojas H.A.G., Celentano D.J., Peiro J.J. Mechanical and metallurgical changes on 308L wires drawn by electropulses. *Mater. Des.* 2016, vol. 90, pp. 1159–1169.
7. Zhang D., To S., Zhu Y.H., Wang H., Tang G.Y. Static electro-pulsing-induced microstructural changes and their effect on the ultra-precision machining of cold-rolled AZ91 alloy. *Metall. Mater. Trans.* A 2012, vol. 43, no. 4, pp. 1341–1346.
8. Hameed S., Rojas H.A.G., Egea A.J.S., Alberro A.N. Electroplastic cutting influence on power consumption during drilling process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, vol. 87, no. 5-8, pp. 1835–1841.
9. Liu X., Lan S., Ni J. Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel. *J. Mater. Process. Technol.* 2015, vol. 219, pp. 112–123.
10. Santos T.G., Lopes N., Machado M., Vilaca P., Miranda R. Surface reinforcement of AA5083-H111 by friction stir processing assisted by electrical current. *J. Mater. Process. Technol.* 2015, vol. 216, pp. 375–380.
11. Grasso S., Sakka Y., Maizza G. Electric current activated/ assisted sintering (ECAS): A review of Patents 1906–2008. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2009, vol. 10, no. 5, pp. 053001.
12. Langer J., Hoffmann M.J. Direct comparison between hot pressing and electric field-assisted sintering of submicron alumina. *Acta Mater.* 2009, vol. 57, no. 18, pp. 5454–5465.
13. Xu D., Lu B., Cao T., Zhang H., Chen J., Long H., Cao J. Enhancement of process capabilities in electrically-assisted double sided incremental forming. *Mater. Des.* 2016, vol. 92, pp. 268–280.
14. Valoppi B., Egea A.J.S., Zhang Z., Rojas H.A.G., Ghiotti A., Bruschi S., Cao J. A hybrid mixed double-sided incremental forming method for forming Ti6Al4V alloy. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 2016, vol. 65, no. 1, pp. 309–312.
15. Xie H., Dong X., Peng F., Wang Q., Liu K., Wang X., Chen F. Investigation on the electrically-assisted stress relaxation of AZ31B

- magnesium alloy sheet. *J. Mater. Process. Technol.* 2016. vol. 227, pp. 88–95.
16. Liu R., Lu B., Xu D., Chen J., Chen F., Ou H., Long H. Development of novel tools for electricity-assisted incremental sheet forming of titanium alloy. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, vol. 85, no. 5, pp. 1137–1144.
 17. Nguyen-Tran H., Oh H., Hong S., Han H.N., Cao J., Ahn S., Chun D. A Review of electrically-assisted manufacturing. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Green Technol.* 2015, vol. 2, no. 4, pp. 365–376.
 18. Guan L., Tang G., Chu P.K. Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals. *J. Mater. Res.* 2010, vol. 25, no. 7, pp. 1215–1224.
 19. Zuev L.B., Gromov V.E., Pekker N.V. Electrostimulation of plasticity wave during the propagation of Lueders lines. *Metallofizika*. 1992, no. 11, pp. 88. (In Russ.).
 20. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. *Fizika makrolokalisatsii plasticheskogo techeniya* [Physics of macrolocalization of plastic flow]. Novosibirsk: Nauka, 2008, 328 p. (In Russ.).
 21. Sarychev V.D., Petrunin V.A. Filtration model of plastic deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1993, no. 2, pp. 29–33. (In Russ.).
 22. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. Large amplitude shock waves in gases. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 1957, vol. 63, no. 11, pp. 613–641. (In Russ.).
 23. Barannikova S.A., Kosinov D.A., Zuev L.B., Gromov V.E., Konovalov S.V. Hydrogen effect on macrolocalization of plastic deformation of low carbon steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 12, pp. 891–895. (In Russ.).
 24. Kuznetsov V.A., Gromov V.E., Kuznetsova E.S., Gagarin A.Yu., Kosinov D.A. Equipment provision of electrostimulated metal processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 2, pp. 157–163. (In Russ.).
 25. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses. *Measur. Sci. Technol.* 2010, vol. 21, no. 5, pp. 054014–054019.
 26. Fedorova A.Yu., Bannikov M.V., Plekhov O.A. Application of infrared thermography method in determining the parameters of li-
near fracture mechanics. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*. 2012, no. 2, pp. 215–225. (In Russ.).
 27. Pengchao Song, Xifeng Li, Wei Ding, Jun Chen. Electroplastic tensile behavior of 5A90 Al–Li alloys. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*. 2014, vol. 27, no. 4, pp. 642–648.
 28. Kaminskii P.P. *Neobratimaya deformatsiya kristallov kak strukturnoe prevrashchenie, initsiirovannoe izmeneniem mezhatomnogo vzaimodeistviya: Avtoref. diss... d-ra fiz.-mat. nauk* [Irreversible deformation of crystals as a structural transformation initiated by change in interatomic interaction: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Tomsk: IFPM SO RAN, 2015, 39 p. (In Russ.).
- Funding.** The work was financially supported by Russian Foundation for Basic Research grant no. 17-32-50012/17 of October 18, 2017 “Stazher” code and the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation no. 3.1283.2017/4.6.
- Acknowledgements.** The authors express the special thanks for the assistance in conducting experiments and decoding data obtained to A.G. Luneva and V.V. Gorbatenko, Institute of Strength Physics and Materials Science of SB RAS.
- Information about the authors:**
- A.Yu. Gagarin*, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel (s.nk@mail.ru)
- V.D. Sarychev*, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (sarychev_vd@mail.ru)
- S.A. Nevskii*, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (nevskiy.sergei@yandex.ru)
- A.I. Potekaev*, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Director of the Siberian Physics and Technics Institute (SPTI TSU) (potekaev@spti.tsu.ru)

Received March 26, 2018

Revised May 18, 2018

Accepted June 6, 2018