

УДК 669.2/8:620

В.С. Савенко¹, О.А. Троицкий², А.В. Гуненко³¹д-р техн. наук, проф., зав. каф. физики и математики

Мозырского государственного педагогического университета имени И.П. Шамякина

²д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотрудник

Института машиноведения имени А.А. Благонравова РАН

³аспирант каф. физики и математики

Мозырского государственного педагогического университета имени И.П. Шамякина

e-mail: savenko-vl@rambler.ru¹

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований электропластической деформации металлов. Рассмотрено влияние импульсов тока высокой плотности порядка 10^3 А/мм² длительностью 10^{-4} с во время пластической деформации нержавеющей стали 12Х18Н10Т с нагрузкой выше предела текучести и собственное магнитное поле внутри деформируемого образца с учетом вторичных пондеромоторных сил. Возникающие пондеромоторные явления в виде динамического пинч-эффекта создают ультразвуковую вибрацию решеточной системы, и, как следствие, изменяется кинетика пластической деформации, увеличивается амплитуда колебаний дислокаций с периодическим изменением позиции дислокационных петель, что стимулирует отрыв дислокаций от стопоров. Показано, что в научно-прикладном аспекте необходимо учитывать физические условия создания пондеромоторных эффектов применительно к конкретным технически важным материалам в условиях деформирования статическими, динамическими и знакопеременными нагрузками.

Введение

Основные направления развития современного физического материаловедения связаны с интенсификацией технологических процессов обработки металлов давлением в условиях внешних энергетических воздействий для получения технически важных материалов с высокими служебными характеристиками, обеспечивающими их применение в экстремальных физических условиях.

Электропластичность в металлах реализуется при пропускании импульсов тока высокой плотности порядка 10^3 А/мм² длительностью 10^{-4} с во время пластической деформации через электропроводящие материалы, которая получила название электропластический эффект (ЭПЭ). ЭПЭ стимулирует деформационные процессы, уменьшает усилия деформации, энергопотребление, улучшает физико-механические и служебные характеристики материала.

Возбуждение электронной подсистемы металла импульсами тока для реализации электропластичности в металлическом образце, нагруженном выше предела текучести, приводит к возникновению дополнительных деформационных процессов за счет пондеромоторных эффектов, обуславливающих виброакустические колебания кристаллической решетки в различных кристаллографических направлениях [1; 2].

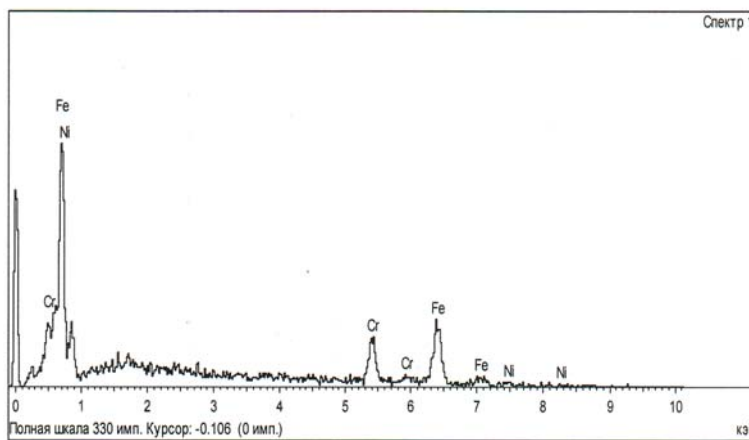
Некоторые авторы объясняют механизмы электропластической деформации электроно-дислокационным взаимодействием, давлением «электронного ветра» на скопление дислокаций, точечных дефектов, уменьшением стартовых напряжений для срыва дислокаций со стопоров, действием термических и нетермических эффективных напряжений, а также спиновым разупрочнением металлов [3–6].

Следует отметить, что при возбуждении импульсов тока в образцах выделяется значительное количество Джоулева тепла, однако при длительности импульсов тока 100 мкс и плотности тока от 100 до нескольких тысяч А/мм² нагрев образца не превышает нескольких градусов, если импульсы разделены интервалами в десятки секунд.

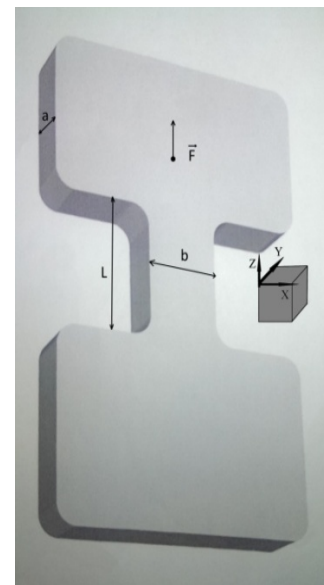
Методика проведения экспериментальных исследований

Образцы специальной формы и размеров из нержавеющей стали 12Х18Н10Т со спектром, полученным на растровом электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором Tescan, содержали никель, железо и хром (рисунок 1а) и деформировались статической силой F на испытательной машине ИР5047-50-10. К образцу по специальной методике монтировался датчик – трехкомпонентный пьезометрический акселерометр АП20 весом 5 г (рисунок 1б).

Выбор материала обуславливался содержанием в стали ферро-магнитного железа и никеля, а также парамагнитных примесей, обладающих большими собственными магнитными моментами, которые при реализации пинч-эффекта в условиях электропластичности ориентируются по направлению возникающего собственного магнитного поля тока, тем самым усиливают его, что стимулирует электронно-пластическую деформацию электропроводящего материала.



| Название спек... | Cr | Fe | Ni | Итого |
|--|-------|-------|-------|--------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Спектр 1 | 19.29 | 70.57 | 10.14 | 100.00 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Спектр 2 | 17.13 | 71.33 | 11.54 | 100.00 |
| <input checked="" type="checkbox"/> Спектр 3 | 18.10 | 67.63 | 14.27 | 100.00 |



а)

б)

Рисунок 1. – Рентгенограмма образца нержавеющей стали 12Х18Н10Т на растровом электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором (а).

Испытательный образец с размерами L (длина), b (ширина шейки) и датчиком трехкомпонентного пьезометрического акселерометра (б)

Во время деформации с нагрузкой выше предела текучести через образцы пропускались импульсы тока плотностью $10^2 - 10^4$ А/мм² и длительностью 100 мкс. При действии тока в образце происходит возбуждение электронной подсистемы металла и реализуется электропластический эффект в виде осцилляций деформирующих усилий, без существенного теплового эффекта и тепловой дилатации.

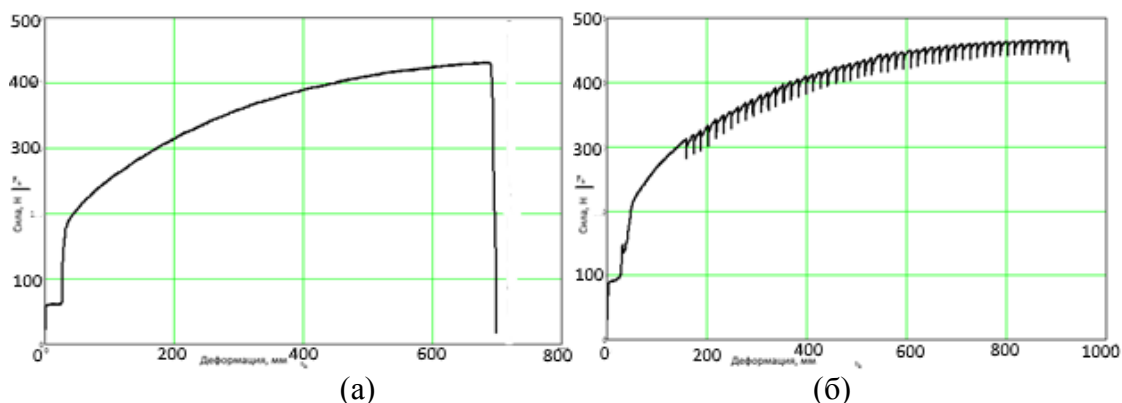


Рисунок 2. – Зависимость приложенной к образцу статической силы от величины деформации до момента его разрушения:
(а) – нержавеющая сталь без воздействия тока;
(б) – нержавеющая сталь под действием импульсов тока

Возникающие деформационные напряжения в образце за счет электронно-дислокационного взаимодействия и пондеромоторных факторов обуславливают виброакустические колебания кристаллической решетки в различных направлениях. Следует отметить, что деформационная аппаратура, регистрирующая осцилляции деформирующих усилий в осевом направлении, при действии статической силы F имеет недостаточное разрешение по быстродействию для определения вибрационного спектра ультразвуковых затухающих колебаний и их характеристик. В связи с этим возникающие при реализации электропластичности ультразвуковые колебания регистрировались специальными трехкомпонентными датчиками АП20, выполненными на основе пьезоэлектрических аксельрометров с диапазоном резонансной частоты, превышающей 55 КГц, которые анализировались специальным модулем сбора данных NIUSB4431 с помощью компьютерной программы LabVIEW (рисунок 3) [7].

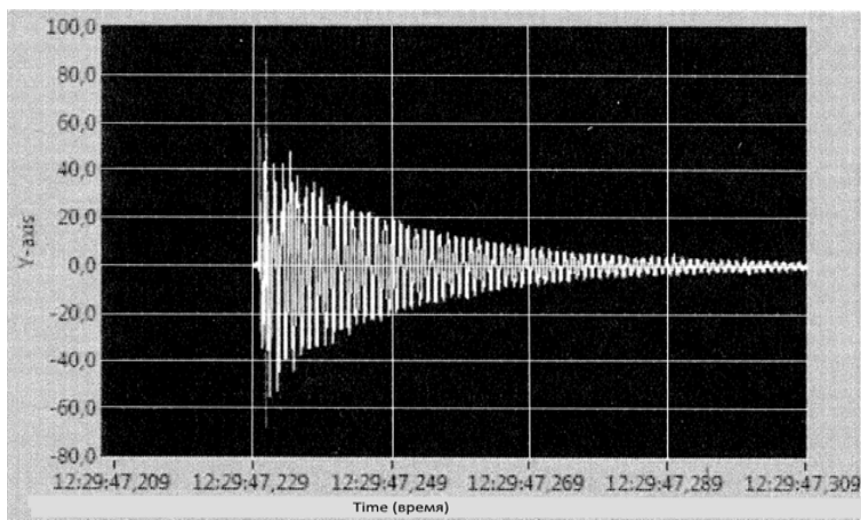


Рисунок 3. – Переходные процессы ультразвуковой акустической вибрации от действия импульсов тока в условиях деформации выше предела текучести

Исследование микроструктуры образцов проведено с использованием растрового электронного микроскопа LEO 1455VP (CarlZeiss). Наблюдение осуществлялось регистрацией отраженных электронов, ускоряющее напряжение составляло 20 кВ.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Возбуждение импульсов тока большой плотности во время пластической деформации выше предела текучести в металле приводит к возникновению дополнительных механических напряжений за счет пондеромоторных факторов, которые обуславливают виброакустические ультразвуковые колебания кристаллической решетки на фронте нарастания импульса. При малой осевой нагрузке образца F колебания происходят в достаточно большом интервале времени. С ростом силы статической нагрузки F затухающие процессы происходят интенсивнее. С увеличением нагрузки увеличивается не только амплитуда импульсов ускорения, но и скорость затухания колебаний после прохождения импульса тока, причем в поперечных к плоскости образца направлениях эффект заметней.

При реализации пинч-эффекта в условиях электропластичности создающееся собственное магнитное поле импульсного тока диффундирует к оси образца, при этом скорость диффузии зависит как от проводимости, так и от частоты тока [1]:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\rho c^2}{4\pi\Delta H}, \quad (1)$$

где ρ – удельное сопротивление, c – скорость света, ΔH – оператор Лапласа.

$$H = H_m e^{-qx} \cos(\omega t - qx), \quad (2)$$

где H_m – амплитудные значения напряженности поля; $q = \left(\frac{2\pi\omega}{\rho c^2}\right)$, ω – круговая частота,

равная $(LC)^{\frac{1}{2}}$; t – время; L и C – индуктивность и емкость цепи.

Направление скорости распространения упругих волн будет иметь как радиальную (3), так и продольную (4) составляющие:

$$V_r = \left(\frac{1}{\rho d\sigma / d\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$$V_r = \left(\frac{\sigma}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

где σ – приложенное механическое напряжение, ε – относительная деформация, $\rho = \frac{\gamma}{g}$, γ – удельный вес металла и g – ускорение силы тяжести.

Под влиянием собственного магнитного поля тока, которое кольцевыми линиями охватывает деформируемый образец, возникает поляризация электронной подсистемы металла, вследствие чего появляется поперечное электрическое поле Холла, препятствующее дальнейшему сжатию электронной плазмы. В результате перераспределение напряженности магнитного поля H в приповерхностных слоях металла будет:

$$H_z(x,t) = H_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \cos\left(\omega t - \frac{x}{\delta}\right),$$

где δ – толщина скин-слоя.

Возникающий от высокочастотного тока скин-эффект индуцирует вихревые токи, препятствующие равномерному распределению плотности по поперечному сечению проводника, при этом возникает скин-слой с меньшей плотностью тока на оси, чем у поверхности. Возникающие пондеромоторные явления в виде динамического пинч-эффекта создают дополнительные напряжения за счет ультразвуковой вибрации решеточной системы, и, как следствие, увеличивается амплитуда колебаний дислокаций с периодическим изменением позиции дислокационных петель, что стимулирует отрыв дислокаций от стопоров и изменяет кинетику пластической деформации. Из графиков (рисунок 2) видно, что в условиях электропластичности существенно увеличиваются (20 %) пределы текучести и прочности материала.

Таким образом, в научно-прикладном аспекте имеет смысл учитывать физические условия создания пондеромоторных эффектов, применительно к конкретным технически важным материалам при деформировании статическими, динамическими и знакопеременными нагрузками. Важными с практической точки зрения представляются исследования виброакустических явлений, обуславливающих механические напряжения ионного остова кристаллической решетки металла для условий эксплуатации ответственных конструкций, деталей машин и механизмов. Ультразвуковые виброакустические колебания могут являться комплексным средством неразрушающего контроля высокотехнологичных устройств и механизмов, а также для определения физико-механических и служебных характеристик материалов, сложных конструкционных систем и особенностей их эксплуатации на опасных производственных объектах.

При воздействии импульсов электрического тока на образец, нагруженный выше предела текучести, изменяется не только пластичность нержавеющей стали, но и ее прочностные характеристики: микроструктура становится более мелкозернистой, размер зерен уменьшается, изменяется морфология, внутри материала появляются зоны рекристаллизации с размером зерна 1–3 мкм (рисунок 4).

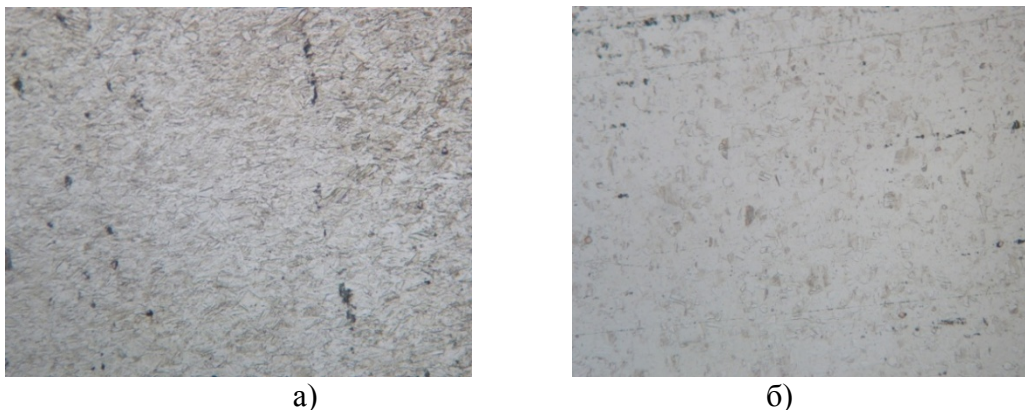


Рисунок 4. – Микроструктура образца под действием тока (а) и без воздействия тока (б)

Изучение деформационных характеристик образцов с током и без тока по различным параметрам показало существенное влияние внешних энергетических воздействий на микроструктуру образцов нержавеющей стали. Морфологический анализ изображения определялся прибором «Пост микроконтроля МК-3» с помощью компьютерной программы Autoscan Objects, с выделением гистограмм по классам и определением контроля физико-механических свойств материала (рисунок 5 а, б).

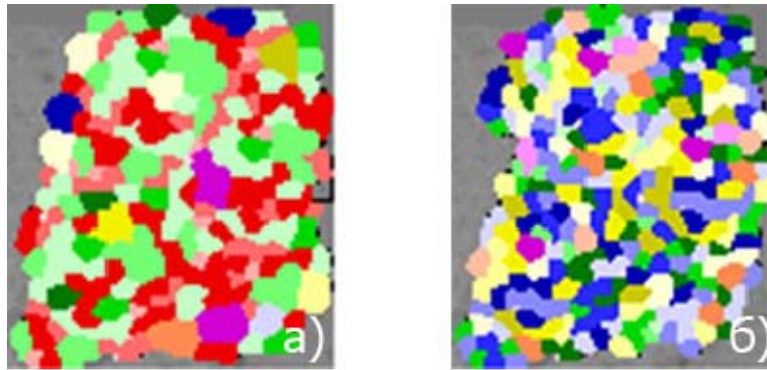


Рисунок 5. – Морфология образцов без тока (а) и с током (б) (100х)

Анализ расчетов классов зерен в доли по количеству и массе, по параметрам площади зерен (рисунок 6) и периметр зерен (рисунок 7) показал существующее влияние импульсов тока на микроструктуру и деформационные процессы нержавеющей стали в условиях электропластичности.



Рисунок 6. – Сравнительный график по параметру площади

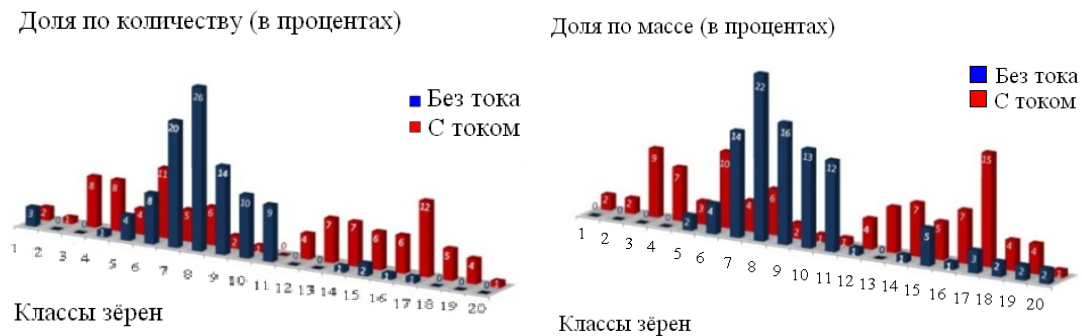


Рисунок 7. – Сравнительный график по параметру периметр

При воздействии импульсов электрического тока на образец нержавеющей стали, нагруженный выше предела текучести статической силой с вектором F продольной ориентации относительно оси образца, происходит перестройка ОЦК-структуры с изменением α -фазы, мартенсита и аустенита деформации.

Улучшение микроструктуры поверхностного слоя нержавеющей стали в условиях электропластичности реализуется созданием мелкозернистого строения с частичной аморфизацией за счет увеличения изотропности кристаллической решетки с изменением прочности. Таким образом, электропластическая деформация позволяет реализовать интенсификацию технологического процесса обработки металлов давлением с возможностью сочетания достаточной прочности материала с повышенной пластичностью и улучшенными физико-механическими свойствами и служебными характеристиками.

Заклучение

1. Внешние энергетические воздействия импульсами тока большой плотности, пропущенными через металл, нагруженный выше предела текучести, во время пластической деформации приводят к возникновению дополнительных механических напряжений за счет пондеромоторных факторов, которые обуславливают виброакустические ультразвуковые колебания кристаллической решетки на фронте нарастания импульса.

2. Пондеромоторные явления в виде динамического пинч-эффекта создают ультразвуковую вибрацию решеточной системы материала, увеличивая амплитуду колебаний дислокаций с периодическим изменением позиции дислокационных петель, что приводит к росту вероятности отрыва дислокаций от стопоров, и, как следствие, изменяется кинетика пластической деформации, стимулируется пластичность без заметного изменения прочности.

3. Физические условия создания пондеромоторных факторов электропластичности необходимо учитывать при деформации конкретных технически важных материалов знакопеременными, статическими и динамическими нагрузками для эксплуатации ответственных конструкций, деталей машин и механизмов и применять как комплексное средство неразрушающего контроля для определения физико-механических, служебных характеристик и эксплуатационных свойств в сложных технологических системах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савенко, В. С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В. С. Савенко, О. А. Троицкий, А. Г. Силивонец // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.
2. Савенко, В. С. Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов / О. А. Троицкий, В. С. Савенко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2013. – 375 с.
3. Савенко, В. С. Физические и технологические основы электропластической деформации металлов / В. С. Савенко, О. А. Троицкий. – Мозырь : МГПУ им. И. П. Шамякина, 2016. – 208 с.
4. Bennett, W. H. Magnetically self-focussing streams / W. H. Bennett // Phys. Rev. – 1934. – № 45. – P. 890.
5. Батаронов, И. Л. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах / И. Л. Батаронов А. М. Рошупкин // Физика твердого тела. – 1988. – Т. 30, № 11. – С. 3311–3318.
6. Савенко, В. С. Механическое двойникование и электропластичность металлов в условиях внешних энергетических воздействий : монография / В. С. Савенко. – 2-е изд., доп. и перераб. – Минск : БГАФК, 2003. – 203 с.

7. Новые исследования вибрации металлов с помощью пьезометрических преобразователей под влиянием импульсов тока в статических и динамических условиях / В. И. Сташенко [и др.] // Фундаментальные исследования инновационных технологий в машиностроении. – М. : ИМАШ РАН, 2015. – С. 242–245.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 31.10.2017

Savenko V.S., Troitsky O.A., Gunenko A.V. Physical Aspects of Electroplastic Deformation of Metals

The article presents the results of theoretical and experimental studies of electroplastic deformation of metals. The effect of high density current pulses of the order of 10^3 A/mm² for a duration of 10^{-4} s during the plastic deformation of stainless steel 12X18H10T above the yield point and the intrinsic magnetic field inside the deformable sample are considered, taking into account the secondary ponderomotive forces. The emerging ponderomotive phenomena in the form of a dynamic pinch effect are created ultrasonic vibration of the lattice system, and as a result the kinetics of plastic deformation changes, the amplitude of dislocation oscillations increases with a periodic change in position Dislocation loops, which stimulates the detachment of dislocations from the stoppers.