УДК 537.39:669.15.002

ВЛИЯНИЕ РАЗНОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ПОЛЕЙ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ И ТОКА НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ МЕТАЛЛА

О.А. Троицкий, В.И. Сташенко

E-mail: oatroitsky@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

- Аннотация. Установлено влияние сверхвысокочастотного излучения на процессы активной деформации и релаксации механических напряжений в нагруженных образцах нержавеющей стали при действии импульсов тока и ориентациях вектора напряженности электрического поля СВЧ-излучения продольно и поперечно оси деформируемого образца. При продольной ориентации вектора СВЧ-излучения и действии тока эффект разупрочнения металла возрастает с 22 до 30 %. Анализ микроструктуры образцов показал существенное влияние внешних энергетических воздействий на деформацию зерен.
- *Ключевые слова:* деформация, разупрочнение, нержавеющая сталь, импульсы тока, СВЧ-излучение, микроструктура.

INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION AND CURRENT FIELDS OF DIFFERENT DIRECTIONS ON PLASTIC DEFORMATION OF METAL

O.A. Troitskii, V.I. Stashenko

E-mail: oatroitsky@mail.ru

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

Abstract. Effect of ultra - high-frequency (microwave) radiation on the processes of active deformation and relaxation of mechanical stresses in loaded stainless steel samples under the action of current pulses and orientations of vector of microwave radiation electric field stress longitudinally and transversely directed to the axis of the deformed sample is established. With longitudinal orientation of microwave radiation vector and current impact, metal softening effect increases from 22 to 30 %. Analysis of microstructure of samples has shown a significant impact of external energy on grain deformation.

Keywords: deformation, softening, stainless steel, current pulses, microwave radiation, microstructure.

Теоретически предсказано [1, 2], что облегчение пластической деформации при действии импульсов тока в скрещенных полях магнитного поля тока и сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения возможно как дополнение к электропластическому эффекту (ЭПЭ) [3 – 7] за счет спинового разупрочнения. Экспериментально установлено наличие резонансного изменения пластических свойств у кристаллов в условиях электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [8]. Для реализации спинового разупрочнения металла (СРМ) за счет влияния ЭПР на механические свойства необходимо, чтобы:

l – магнитное поле импульсного тока при его прохождении по металлическому образцу и магнитное поле СВЧ-излучения, охватывающее образец, были скрещены;

2 – было обеспечено наличие в образцах термодинамически неравновесных процессов, в частности, генерации свежих дислокаций, что обеспечивается активной деформацией образцов при их растяжении с постоянной скоростью или в прерывистом режиме с чередованием растяжения с паузами релаксации напряжений без снятия нагрузки.

Целью настоящей работы является изучение влияния разной направленности векторов электромагнитного СВЧ-излучения и индукции магнитного поля тока на величину дополнительной пластической деформации металла, его структуру и свойства.



Рис. 1. Структура силовых линий векторов поля волны *H*₁₀ (*a*), поведение силовых линий векторов (*E* и *H*) в фиксированный момент времени (б)

Результаты эксперимента

Влияние СВЧ-излучения на пластическую деформацию металла изучалось в двух постановках опыта:

 при активной деформации с разной постоянной скоростью;

- при релаксации напряжений.

Во время активной деформации образца сначала подавались одиночные импульсы тока плотностью порядка 1000 А/мм², длительностью 250 мкс.

Изучение влияния СВЧ-излучения на свойства стали при деформации растяжением и одновременном действии импульсов тока проводилось при частоте 2,45 ГГц [9]. Передача электромагнитного (ЭМ) излучения от источника СВЧ-излучения – магнетрона к деформируемому образцу осуществлялась с помощью волновода прямоугольного сечения. Электромагнитная энергия излучалась антенной магнетрона в виде электрического штыря. Штырь входил в волновод и располагался на расстоянии примерно в четверть длины волны (λ). Прямоугольный волновод с одной стороны был закорочен металлической стенкой. По длине волны выбирались размеры сторон волновода а и b. Для стандартных волноводов необходимо выполнение соотношения b/a < 0,5. При выполнении этого условия $\lambda/a < 2$, в волноводе распространяется один вид волн типа H_{10} [10 – 12]. Расстояние от штыря до оси деформируемого образца было кратным k длине волны λ . В этом случае значение напряженности электрического поля на образце максимально [11]. За образцом на расстоянии λ/4 волновод ограничивается глухой стенкой. Длина волновода от одной глухой стенки до другой составляет $k(\lambda + \lambda/2)$. Короб волновода изготовлен из нержавеющей стали с окнами во

взаимно перпендикулярных плоскостях для размещения испытуемого образца.

На рис. 1 представлена структура силовых линий СВЧ-излучения волны Н₁₀. Из рис. 1, а видно, что в поперечном сечении волновода вектор Е направлен перпендикулярно широкой стенке волновода «а» (направлению X), вектор H – параллельно. При этом амплитуда вектора Е меняется по закону синуса. Она максимальна в точках вдоль широкой стенки и убывает до нуля при приближении к узким стенкам. Поперечные составляющие векторов Е и Н имеют одинаковые фазы, а продольная составляющая вектора Н опережает их на 90°. На рис. 1, б показано поведение силовых линий векторов Е и Н в фиксированный момент времени. При этом штриховыми линиями обозначены силовые линии вектора напряженности магнитного поля, а точками – вектора напряженности электрического поля. Показана структура силовых линий векторов Е и Н в поперечном сечении волновода. Как видно, на стороне волновода «а» (в направлении Х) укладывается один полупериод (одна полуволна) изменения поля, а от координаты У поле не зависит – на стороне «b» укладывается ноль полупериодов. Вектор *Е* имеет одну составляющую E_{ν_2} вектор H две – H_x и H_z , то есть магнитные линии – замкнутые кривые, лежащие в плоскости, параллельной плоскости XZ. Эта совокупность линий перемещается со скоростью V₀ в направлении Z вдоль волновода.

В опытах применяют дистанционное управление магнетроном. Ориентацию вектора напряженности E(H) поля СВЧ-излучения меняют поворотом короба волновода относительно деформируемого образца на 90°. Температуру образцов измеряют термопарой во время действия СВЧ-излучения и одиночных импульсов тока. Она не превышает 60 – 80 °C.



Рис. 2. Внешний вид разрывной машины ИР 5047-50-10 и испытуемый образец внутри волновода (*a*) и фрагмент диаграммы (*б*) деформирования образца со скачками напряжений при действии импульсов тока (*1*, *3*), тока и СВЧ-излучения (*2*, *4*) в условиях активной деформации при величине скачков напряжений: *1* – 14,0 МПа; *2* – 14,8 МПа; *3* – 14,3 МПа; *4* – 15,0 МПа

Образец из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 0,2 мм с длиной рабочей части 28 мм в изолированных зажимах с подводами тока находится в поле СВЧ, вектор напряженности *E* направлен поперек оси образца. Испытания проводят в горизонтальной разрывной машине ИР 5047-50-10 (рис. 2, *a*). После увеличения нагрузки на 50 Н подают импульс тока такой же величины и включают СВЧ-излучение.

На рис. 2, δ приведен фрагмент машинной диаграммы деформирования образца $\sigma - l$ (где σ – условные напряжения; l – перемещение захватов машины). На диаграмме резкое снижение деформирующего напряжения (скачки напряжений, вызванные импульсами тока в сторону разупрочнения металла) чередовалось со скачками тока и СВЧизлучения. Ориентация поля *E* СВЧ-излучения была поперечная. Электропластическое действие импульсного тока на пластическую деформацию нержавеющей стали усиливается в присутствии СВЧ-излучения. Увеличение скачка снижения напряжения при СВЧ-излучении указывает на дополнительное воздействие излучения на активную деформацию металла. Небольшое тепловое действие тока и СВЧ не вызывало скачков напряжений.

На рис. 3 приведены данные измерений пиков разупрочнения, полученные от пяти образцов при действии импульсов тока плотностью 1000 А/мм² (область I в границах пунктирных линий и область 2 для тех же образцов при одновременном воздействии импульсов тока и СВЧ-излучения). Ориентация электрического поля E продольная.



Рис. 3. Зависимость величины скачков напряжений (Δσ) от приложенного напряжения (σ)

Вид воздействия	<i>F</i> , кН	$\Delta F/F$, %
Без какого-либо воздействия	1,00 - 1,45	8,6 - 8,8
Импульсы тока	1,00 - 1,45	16,8 - 17,5
Поле (Е) поперечное		
СВЧ-излучение	1,00 - 1,45	11,2 – 11,4
Ток и СВЧ-излучение	1,00 - 1,45	21,9 - 22,5
Поле (Е) продольное		
СВЧ-излучение	1,00 - 1,45	11,9 – 12,3
Ток и СВЧ-излучение	1,00 - 1,45	29,8-30,0
Примечание: F – усилие, кН; $\Delta F/F$ – скачки нагрузки, %.		

Величина снижения нагрузки при остановках привода машины за полную паузу релаксации напряжений в течение 3 мин. при различных видах испытаний

Во второй постановке опыта при релаксации механических напряжений во время кратковременных остановок растяжения образцов с паузами по 3 мин. без разгрузок оценивалась величина релаксации напряжений при разных вариантах внешнего и внутреннего энергетического воздействия. Растяжения перед каждой новой серией измерений начинались с более высокой нагрузки и так вплоть до разрушения образца. Каждая серия измерений состояла из четырех пауз:

- без какого либо воздействия;

- при действии импульсов тока;

 с воздействием СВЧ-излучения разной ориентации;

 при совместном действии тока и СВЧизлучения (с вычетом теплового эффекта). Результаты измерений представлены в таблице.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии дополнительного механизма пластической деформации в скрещенных полях СВЧизлучения и собственного магнитного поля тока.

Тепловые эффекты действия тока и СВЧизлучения корректно вычитали из величин общего снижения деформирующих усилий и релаксации напряжений. Пинч-действие импульсного тока на плоских образцах было слабо выражено [13].

Предварительный анализ показал, что микроструктура образцов существенно зависит от внешних энергетических воздействий на сталь марки 12Х18Н10Т. Под действием электрического тока и СВЧ-излучения происходит уменьшение площади и периметра зерен, то есть происходит дробление зерен и микроструктура деформированной части образца становится мелкозернистой, зерна принимают более округлую форму с уменьшением удлинения зерна, с преимущественной ориентацией аксиальной структуры; существенно уменьшается длина, ширина и удлинение зерен, вертикальная и горизонтальная проекции зерен. Эквивалентный диаметр и средний размер зерен, а также диаметр Мартина уменьшаются под влиянием внешних энергетических воздействий.

Пластическая деформация в условиях высокоэнергетических воздействий и значительных деформаций образцов является сложным, многостадийным процессом [14]. Данные по микроструктуре стали свидетельствуют о проявлении обратной зависимости Холла-Петча. Закон Холла-Петча дает количественное описание роста предела текучести поликристаллического материала с уменьшением размера зерна [15]. В основе этой зависимости лежат дислокационные механизмы пластической деформации: границы зерен тормозят движение дислокаций.

Выводы

Установлено значительное снижение (до 30 %) нагрузок на образцах в процессе релаксации напряжений при действии тока и СВЧ-поля с продольной ориентацией относительно оси образца вектора напряженности электрического поля. Показано, что высокоэнергетические воздействия тока и СВЧ-излучения в процессе пластической деформации влияют на количество образующегося в шейке образца мартенсита деформации. Образование мартенсита практически полностью подавляется в условиях воздействия тока и СВЧ-излучения при релаксации напряжений. Зафиксировано явление исчезновения магнитных свойств у нержавеющей стали. Внешние энергетические воздействия ведут к измельчению зернистой структуры стали марки 12X18H10T. По-видимому, при деформации под воздействием импульсного тока и СВЧизлучения меняется доминирующий механизм деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals // Physical Review B. 1991. Vol. 52. No. 22. P. 311 – 317.
- Молоцкий М.И. Возможный механизм магнитопластического эффекта // Физика твердого тела. 1991. Т. 33. № 10. С. 3112 3114.
- **3.** Кравченко В.Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. № 5. С. 1676 1681.
- Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 10. № 7. С. 18 – 22.
- 5. Зуев Л.Б., Громов В.Е, Курилова И.Ф. и др. Подвижность дислокаций в монокристаллах цинка под действием импульсного тока // Доклады АН СССР. 1978. Т. 239. № 1. С. 84 – 87.
- Электростимулированная пластичность металлов и сплавов / В.Е. Громов, Л.Б. Зуев, Э.В. Козлов, В.Я. Целлермайер. – М.: Недра, 1996. – 290 с.
- 7. Батаронов И.Л. Механизмы электропластичности // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 10. С. 93 – 99.
- 8. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Магниторезонансное разупрочнение кристаллов // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 2. С. 605 – 624.
- Уотсон Г. СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение / Пер. с англ. М.: Мир, 1972. – 660 с.

- Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989. – 543 с.
- **11.** Сапунов Г.С. Ремонт микроволновых печей. М.: Изд-во Салон-пресс, 2003. 272 с.
- Бобков Ю.Ю., Гололобов Д.В., Кирильчук В.Б. и др. Исследование прямоугольного волновода и элементов на его основе: метод. указ. к лабораторной работе № 1. – Минск: Изд-во БГУИР, 2012. – 46 с.
- Троицкий О.А., Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Измерение вибраций, созданных импульсами тока в элементах электротехнических конструкций // Электротехника. 2018. № 3. С. 8 – 12.
- 14. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы (монография). – М.: изд. МГИУ, 2001. – 843 с.
- Carlton C.E., Ferreira P.J. What is behind the inverse Hall-Petch effect in nanocrystalline materials // Acta Materialia. 2007. Vol. 55. P. 3749 – 3756.
 - © 2020 г. О.А. Троицкий, В.И. Сташенко Поступила 30 января 2020 г.