

ДЕЙСТВИЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ*

О.А. Троицкий, В.И. Сташенко, В.С. Савенко

Установлено влияние СВЧ-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 в продольном и поперечном направлениях деформируемого образца. При продольной ориентации вектора СВЧ-излучения и действии тока эффект разупрочнения металла возрастал с 22% до 30%. Анализ микроструктуры образцов показал существенное влияние внешних энергетических воздействий на деформацию зерен стали.

Ключевые слова: деформация, разупрочнение, нержавеющая сталь, импульсы тока, СВЧ-излучение, микроструктура.

THE EFFECT OF MICROWAVE RADIATION ON THE PLASTIC DEFORMATION OF STAINLESS STEEL

O.A. Troitskiy, V.I. Stashenko, V.S. Savenko

The article demonstrated the influence of microwave radiation on the processes of active deformation and relaxation of mechanical stresses in loaded samples of stainless steel under the action of current pulses and the orientations of the electric field vector of microwave radiation longitudinally and transversely to the axis of the deformable model. The longitudinal orientation of the electric field vector of microwave radiation and the electrical current have led to the increase in metal softening effect from 22% to 30%. The analysis of the samples microstructure has shown significant influence of external energy impacts on the deformation of steel grains.

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

Введение

При прохождении коротких импульсов тока высокой плотности порядка $\sim 10^3$ А/мм² и длительности $\sim 10^{-4}$ с происходит снижение деформирующего напряжения в металлах на десятки процентов [1, 2], а по данным [3], полученных методом двойного травления, увеличивается подвижность дислокаций при токовом воздействии. Механизмы электропластического эффекта (ЭПЭ) [1] ещё вызывают дискуссию, тем не менее, результаты, показывающие облегчение пластической деформации и улучшение

механических свойств металлов, с успехом используются в различных технологиях обработки металлов и сплавов давлением. Очевидно, что ЭПЭ имеет комбинированный характер.

К механизмам ЭПЭ можно отнести:

- давление и увлечение «электронным востром» зон пластической деформации, одиночных и скоплений дислокаций [1, 2, 4];
- появление сил увлечения точечных дефектов и дислокаций потоками тепла, формирующихся в процессе электропластической деформации металла [5, 6];

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-00918а).

– возникновение термических напряжений из-за неравномерного распределения джоулева нагрева [6, 7];

– действие нетермического пинч-эффекта [8–10];

– возможное спиновое разупрочнение металла (СРМ) за счет влияния на механические свойства металла электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) [11, 12].

Для реализации СРМ необходимо чтобы магнитное поле импульсного тока и внешнее магнитное поле СВЧ-излучения были скрещены. Образцы должны находиться в условиях активной деформации растяжением с постоянной скоростью или релаксации напряжений без снятия нагрузки для того, чтобы в них генерировали и по возможности накапливались новые дислокации. Экспериментально доказательство наличия резонансного изменения пластических свойств у кристаллов во взаимно перпендикулярных электромагнитных и СВЧ-полях в условиях действия ЭПР впервые было получено Головиным и Моргуновым [13].

Целью данной работы являлось изучение влияния СВЧ-излучения на электропластическую деформацию металла (ЭПДМ).

Материалы и методика эксперимента

Для изучения влияния СВЧ-излучения на механические свойства металлов была выбрана нержавеющая сталь 12Х18Н10Т как благоприятный объект для исследований ЭПЭ. В своей основе сталь имеет ферро-магнитные железо и никель, а также парамагнитные примеси, обладающие собственным магнитным моментом и под воздействием внешних полей (под влиянием магнитного поля тока) ориентирующиеся по полю, создавая результирующее поле, превышающее внешние. Сталь 12Х18Н10Т содержит титан, который является парамагнитным металлом, причем его парамагнитные свойства возрастают с ростом температуры, что частично реализуется при ЭПДМ.

В стальных образцах при растяжении с одновременным действием импульсами тока возникала пластическая деформация. СВЧ-излучение было частотой 2,45 ГГц и мощностью 700 Вт [14]. Для передачи электромагнитного излучения от источника СВЧ-излучения магнетрона к деформируемому образцу был применен волновод прямоугольного сечения, который ограничивался металлическими стенками. Антенна магнетрона СВЧ-излучения в виде электрического штыря располагалась на

расстоянии примерно в четверть длины волны λ от одной металлической стенки, а образец – на расстоянии $\lambda/4$ от второй глухой стенки. Расстояние от штыря до оси деформируемого образца было k -кратным длине волны λ . Длина волновода от одной глухой стенки до другой составила $k\lambda + \lambda/2$. Штырь магнетрона [15] излучал электромагнитные волны во всех направлениях: прямые – в направлении нагрузки (оси деформируемого образца), а обратные – в противоположном направлении к глухой стенке волновода, которые после отражения складывались (рис. 1, а). Согласно [15], желательно использовать для волноводов прямоугольного сечения условия: $b/a < 0,5$; $\lambda/a < 2$. В этом случае в нем распространяются волны типа H_{10} , а значение напряженности электрического поля на образце максимально (рис. 1, б). На основе этого были определены размеры сторон волновода a и b , а также его длина. Волновод в виде короба был изготовлен из нержавеющей стали с окнами во взаимно перпендикулярных плоскостях, для размещения испытуемого образца.

При испытаниях применялось дистанционное управление магнетроном. Ориентацию вектора напряженности E электрического поля СВЧ-излучения меняли поворотом короба волновода относительно оси деформируемого образца на 90° . Из стали 12Х18Н10Т вырезались образцы толщиной 0,2 мм и длиной рабочей части 28 мм в соответствии с требованиями к образцам для испытательной машины ИР 5047-50-10. Температуру образцов измеряли термопарой во время действия СВЧ-излучения и одиночных импульсов тока. Она не превышала $60^\circ\text{--}80^\circ\text{C}$.

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

– при активной деформации с разной постоянной скоростью;

– при релаксации напряжений.

На рисунке 2 показано расположение образца в горизонтальной испытательной машине ИР 5047-50-10. Образцы крепились с помощью электрически изолированных зажимов. К ним подводился импульсный ток. Внутри машины устанавливается короб волновода с магнетроном СВЧ-излучения, электромагнитное поле напряженностью E направлено поперек оси образца.

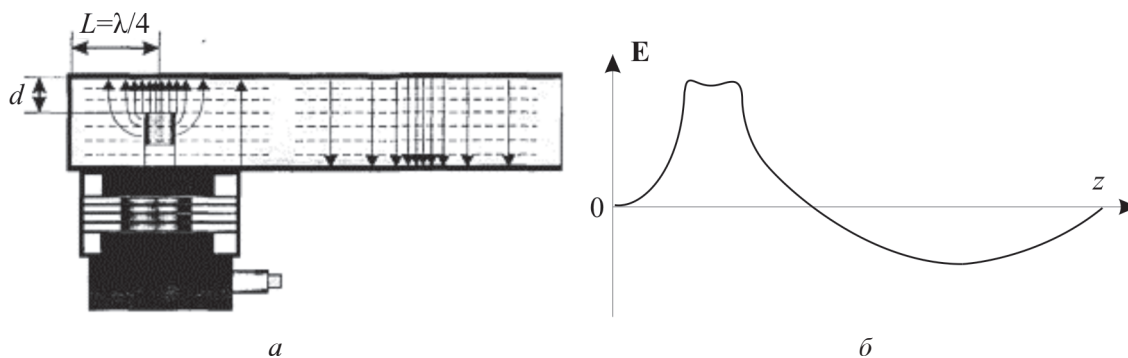


Рис. 1. Подключение магнетрона к волноводу (а) и распределение напряженности электрического поля по длине z волновода (б)

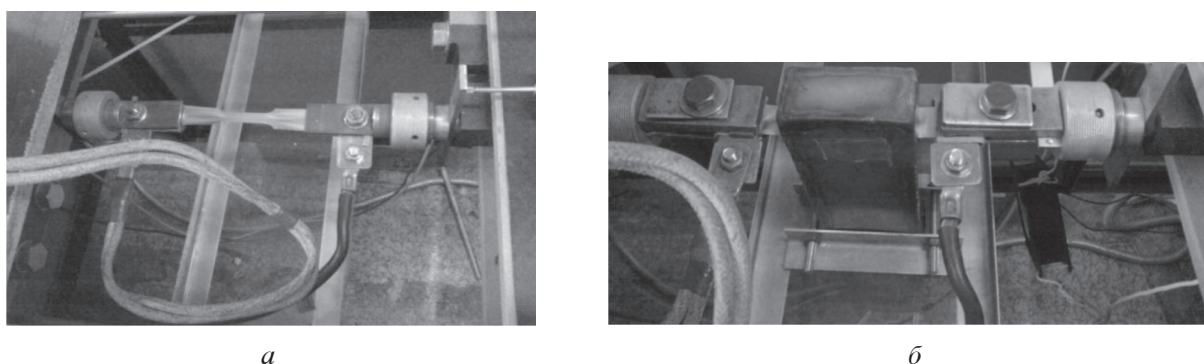


Рис. 2. Блок деформации образцов:
а – при действии импульсами тока на последней стадии растяжения;
б – при действии СВЧ-излучения и импульсов тока

Результаты эксперимента

Во время активной деформации образца сначала подавались одиночные импульсы тока плотностью порядка 1000 А/мм^2 , длительностью 250 мкс. Затем, после увеличения нагрузки на 50 Н, подавался импульс тока такой же величины и СВЧ-излучение. На рисунке 3 приведен фрагмент машинной диаграммы деформирования образца $\sigma-u$, где σ – условные напряжения, u – перемещение захватов машины. На диаграмме резкое снижение деформирующего напряжения (скачки напряжений, вызванные импульсами тока в сторону разупрочнения металла) чередовалось со скачками тока и СВЧ-излучения. Ориентация поля E СВЧ-излучения была поперечная.

Электропластическое действие импульсного тока на пластическую деформацию нержавеющей стали усиливалось в присутствии СВЧ-излучения. Увеличение скачка снижения напряжения при СВЧ-излучении указывает на дополнительное воздействие излучения на ак-

тивную деформацию металла. Небольшое тепловое действие тока и СВЧ не вызывало скачков напряжений.

На рисунке 4 приведены данные измерений скачков снижения напряжений, полученные на пяти образцах при действии импульсов тока высокой плотности порядка 1000 А/мм^2 и длительностью 250 мкс. Верхние данные (в границах пунктирных линий) относятся к тем же образцам при одновременном действии импульсов тока и СВЧ-излучения. Ориентация электрического поля E СВЧ-излучения продольная.

Во второй постановке испытаний, при исследовании релаксации механических напряжений во время кратковременных остановок нагружения образцов с паузами по 3 минуты без разгрузок, оценивалась величина релаксации напряжений при разных вариантах внешнего и внутреннего энергетического воздействия. Растяжение образца перед каждой новой серией измерений начиналось с более высокой нагрузки, и так вплоть до разрушения образца.

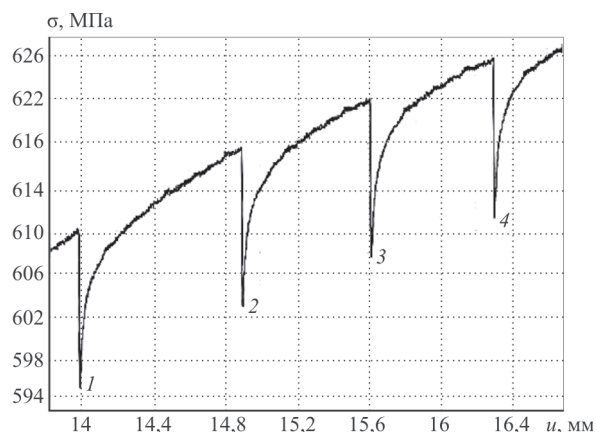


Рис. 3. Диаграмма деформирования образца со скачками напряжений при действии импульсов тока (1, 3), тока и СВЧ-излучения (2, 4) в условиях активной деформации. Величина скачков напряжений: 1 – 14,0 МПа; 2 – 14,8 МПа; 3 – 14,3 МПа; 4 – 15,0 МПа.

Каждая новая серия измерений начиналась при достижении уровня нагрузки на 50–100 Н больше прежнего и состояла из четырех пауз:

- без какого-либо воздействия;
- с воздействием СВЧ-излучения при разной ориентации вектора **Е**;
- с воздействием импульсами тока;
- с совместным действием СВЧ-излучения и импульсов тока.

Дилатометрический эффект удлинения образца при его нагревании под действием тока и СВЧ-излучения учитывался измерением снижения деформирующего усилия в ходе релаксации механических напряжений. Соответствующее этому удлинению дополнительное снижение деформирующего напряжения на «дне» релаксационных кривых фиксировалось и вычиталось из общего эффекта воздействий.

Испытательная машина в силу конструктивного исполнения и оперативного управления не позволяла вести автоматическую запись графиков релаксации напряжений. Поэтому использовалось цифровое устройство испытательной машины, и записывалась лишь величина снижения деформирующего усилия. На одном образце удавалось проводить по 12–16 измерений. По достижении нагрузки в 1400–1500 Н образец, как правило, разрушался в шейке. Полученные измерения с учетом тепловых эффектов представлены в табл. 1.

В таблице приведены значения относительного скачкообразного снижения нагрузки $\Delta F/F$ (в %) за трехминутную паузу релаксации, которая

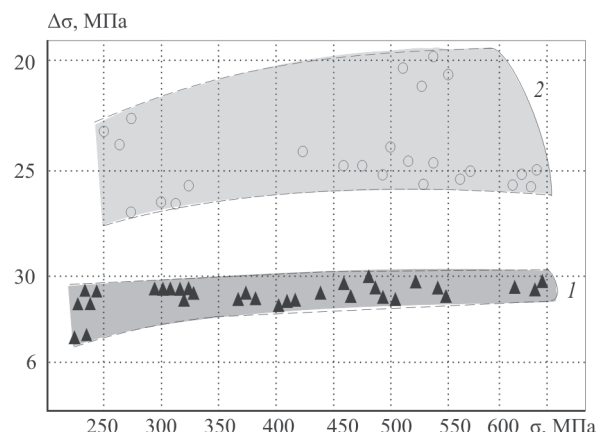


Рис. 4. Зависимость величины скачков напряжений $\Delta\sigma$ от приложенного напряжения σ при действии импульсов тока (область 1 в границах пунктирных линий), а также тока и СВЧ-излучения (область 2 в границах пунктирных линий)

составила 8%. Под действием СВЧ-излучения, а также тока эта величина составила 7,5–12,3% и 10–13% соответственно. Во всех случаях рост скачков нагрузки происходил с увеличением уровня приложенных напряжений по номерам серий измерений. Совместное действие тока и СВЧ-излучения при *поперечном* поле **Е** дало релаксацию напряжений в пределах 14,6–22,5%.

Кроме того, приведены результаты измерений снижения напряжений, когда на образец в процессе релаксации напряжений действовало поле вектора **Е** СВЧ-излучения *продольно* относительно оси испытуемого образца. Как видно из таблицы, эффект совместного действия достигает 30%.

Из сопоставления результатов измерений следует, что действие импульсного тока на электропластическую деформацию нержавеющей стали усиливалось при действии СВЧ-излучения. Экспериментально установлено, что ориентация поля **Е** существенно влияет на величину снижения напряжения. При продольном поле **Е** (при поперечном направлении компоненты СВЧ-излучения и вектора напряженности магнитного поля **Н**) эффект усиливается.

В результате испытания было установлено ранее наблюдавшееся явление исчезновения магнитных свойств у нержавеющей стали при электропластической деформации [2] за счет подавления γ - α превращения. В результате обычной деформации шейка образцов становится магнитной из-за высоких механических

Таблица 1

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

Виды действий	Диапазоны измерений усилий F и скачки нагрузки $\Delta F/F$	
	F , кН	$\Delta F/F$, %
Без какого-либо действия	1–1,45	8,6–8,8
Импульсы тока	1–1,45	16,8–17,5
Поле E поперечно: – СВЧ-излучение – действие тока и СВЧ-излучения	1–1,45	11,2–11,4
	1–1,45	21,9–22,5
Поле E продольно – СВЧ-излучение – действие тока и СВЧ-излучения	1–1,45	11,9–12,3
	1–1,45	29,8–30,0

напряжений, так как образуется мартенсит деформации, обладающий магнитными свойствами. При энергетическом воздействии во время растяжения образцов из нержавеющей стали магнитные свойства материала в зоне шейки практически исчезают. Этот результат впервые установлен при действии СВЧ-излучения на деформируемый металл.

Исследование микроструктуры

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

Морфологический анализ изображения определялся с помощью прибора «Пост микроконтроль МК-3» и использовании компьютерной программы Autoscan Objects.

Сравнительный анализ микроструктуры образцов с током и без тока по различным параметрам показал существенное влияние внешних энергетических воздействий на деформацию зерен стали.

Под действием электрического тока и СВЧ-излучения происходит уменьшение площади и периметра зерен. Дробление зерен приводит к тому, что микроструктура материала деформированного образца становится мелкозернистой (рис. 5). Зерна принимают более округлую форму с уменьшением удлинения зерна, с преимущественно аксиальной текстурой.

Микротвердость материала образцов определялась на цифровом микротвердометре MicroMet 5114 с сенсорным LCD пультом управления и с автоматическим расчетом значений твердости и накоплением статистики. Микротвердость HV по Виккерсу определялась при помощи алмазной пирамидки.

В таблице 2 цифрами обозначены номера испытанных образцов, v – скорость деформирования образца.

Результаты исследований (см. табл. 2) показывают, что под влиянием внешних энергетических воздействий, импульсов тока и СВЧ-излучений, микротвердость материала в наиболее деформированной рабочей части образца (шейки) уменьшается, а в области захватов – практически остается неизменной.

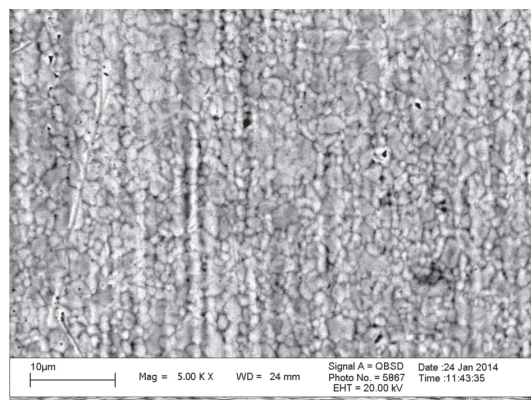


Рис. 5. Микроструктура образца после деформации

Таблица 2

Микротвердость материала образцов после деформации, действий СВЧ-излучения и тока

Микротвердость материала	Номера испытанных образцов				
	5	6	7	8	9
	СВЧ и ток, $v = 0,5$ мм/мин	СВЧ и ток, $v = 1,1$ мм/мин	без тока, $v = 1,1$ мм/мин	без тока, $v = 2,5$ мм/мин	с током, $v = 2,5$ мм/мин
HV в зоне шейки	491,0	513,7	636,6	585,7	571,7
HV в зоне захвата	313,4	313,9	313,1	316,1	315,0

Электропластическая деформация является сложным, многостадийным процессом [2]. Данные по микроструктуре нержавеющей стали, полученные после энергетических воздействий и достижения значительных деформаций образцов, свидетельствуют о проявлении обратной зависимости Холла-Петча. Закон Холла-Петча дает количественное описание роста предела текучести поликристаллического материала с уменьшением размера зерна. В основе этой зависимости лежат дислокационные механизмы пластической деформации: границы зерен тормозят движение дислокаций. По-видимому, с увеличением степени деформации, под действием импульсного тока и СВЧ-излучения изменяется доминирующий механизм деформации. Механизмы обратного закона Холла-Петча в настоящее время недостаточно изучены [16].

Заключение

В работе впервые экспериментально установлено влияние СВЧ-излучения на процесс пластической деформации металла: при активной деформации образцов растяжением и при релаксации механических напряжений, при ориентациях вектора напряженности электрического поля **E** СВЧ-излучения вдоль оси образца или поперек. При продольной ориентации вектора **E** СВЧ-излучения и действии импульсов тока эффект разупрочнения металла возрастал примерно на 8% (с 22% до 30%). Дилатометрический эффект удлинения образца при его нагревании под действием тока и СВЧ-излучении учитывался измерением снижения деформирующего усилия в ходе релаксации механических напряжений.

Величина действия пинч-эффекта импульсов тока на плоских тонких образцах слабо выражена, поскольку величина пинч-эффекта пропорциональна площади поперечного сече-

ния образца [8]. Полученные результаты позволяют предположить о наличии дополнительного механизма деформации при действии импульсного тока и СВЧ-излучения, свидетельствуя о возможном влиянии электронного парамагнитного резонанса в структурных дефектах деформируемого металла, приводя к изменению его пластических свойств по механизму СРМ. Результаты исследований могут быть использованы при любом виде обработки металлов давлением для интенсификации пластической деформации металла.

Список литературы

1. Троицкий О.А. Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТ. 1969. Т. 10. С. 18–22.
2. Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработки и новые материалы (монография). М.: Изд-во МГИУ, 2001. – 843 с.
3. Зуев Л.Б., Громов В.Е., Курилова И.Ф. и др. Подвижность дислокаций в монокристаллах цинка под действием импульсного тока // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239. № 1. С. 84–87.
4. Кравченко В.Я. Воздействие направленного потока электронов на движущиеся дислокации // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. № 5. С. 1676–1681.
5. Фикс В.Б. О взаимодействии электронов проводимости с одиночными дислокациями в металлах // ЖЭТФ. 1981. Т. 80. № 6. С. 2313–2316.
6. Рошупкин А.М., Батаронов И.Л. Об эффекте электрон-фононного увлечения дефектов в кристаллах // Изв. РАН. Серия Физическая. 2004. Т. 68. № 7. С. 998–1007.
7. Батаронов И.Л., Горлов С.К., Рошупкин А.М. Формирование термоупругих напряжений импульсным электрическим током и их

- роль в электропластической деформации металлов // Изв. вузов. Черная металлургия. 1992. № 6. С. 105–108.
8. Троицкий О.А. Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом // Изв. АН СССР. Серия Физическая. 1977. № 6. С. 118–122.
 9. Спицын В.И., Троицкий О.А. Моделирование теплового и пинч-эффекта импульсного тока на пластическую деформацию металла // Док. АН СССР. 1975. № 5. С. 1070–1073.
 10. Батаронов И.Л., Рощупкин А.М. Электропластическая деформация металлов и динамический пинч-эффект // Изв. вузов. Черная металлургия. 1993. № 8. С. 57–61.
 11. Molotskii M., Fleurov V. Magnetic effects in electroplasticity of metals // Physical Review B. 1991. Vol. 52. No. 22. P. 311–317.
 12. Молоцкий М. Возможный механизм магнитопластического эффекта // ФТТ. 1991. Т. 33. № 10. С. 3112–3114.
 13. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. // ЖЭТФ. Магниторезонансное разупрочнение кристаллов. 1999 Т. 115. № 2. С. 605–621.
 14. Уотсон Г. СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение: пер. с англ. М.: Мир, 1972. – 660 с.
 15. Сапунов Г.С. Ремонт микроволновых печей. М.: Изд-во Салон-пресс, 2003. – 272 с.
 16. 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.

Материал поступил в редакцию 23.03.15

ТРОИЦКИЙ Олег Александрович E-mail: ootroitsky@rambler.ru Тел.: 8 (499) 1353072	Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН Россия. Сфера научных интересов: материаловедение и физика твердого тела: действие электрического тока и внешних энергетических воздействий, включая СВЧ-излучение и радиактивное излучение, на физико-механические свойства материалов, особенно металлов. Автор более 350 работ и докладов, 9 монографий, 12 патентов и авторских свидетельств.
СТАШЕНКО Владимир Иванович E-mail: vis20-11@rambler.ru Тел.: 8 (499) 1355518	Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: материаловедение и физика твердого тела: действие электрического тока и внешних энергетических воздействий, включая СВЧ-излучение на физико-механические свойства металлов. Автор более 150 работ, 3 монографий, 10 патентов и авторских свидетельств.
САВЕНКО Владимир Семенович E-mail: savenko-vl@rambler.ru Тел.: (029) 6539156	Доктор технических наук, профессор Мозырского государственного педагогического университета, Беларусь. Сфера научных интересов: общая физика, материаловедение и физика твердого тела: действие электрического тока и внешних энергетических воздействий, включая СВЧ-излучение, на физико-механические свойства материалов, особенно металлов. Автор более 250 работ и докладов, 6 монографий, 8 патентов и авторских свидетельств.