ДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСОВ ТОКА И СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СТАЛИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ

О.А. Троицкий, М.М. Хрущов, В.И. Сташенко, И.С. Левин

Работа посвящена изучению изменения фазового состава по содержанию мартенситной и аустенитной фаз стали 12X18H10T при воздействии импульсного тока и CBЧ-излучения в условиях пластической деформации образцов. Дана оценка размеров областей когерентного рассеяния аустенитной и мартенситной фаз, образующихся при пластической деформации и интенсивном высокоэнергетическом действии тока и CBЧ-воздействии. Эта оценка свидетельствует о существенном измельчении зерна ү-фазы аустенита. Установлено, что внешние энергетические воздействия ведут к измельчению структуры зерен стали 12X18H10T. Выявлено значительное снижение нагрузок на образцах (до 30 %) в процессе релаксации напряжений при действии тока и CBЧ-излучения с продольной ориентацией вектора напряженности электрического поля относительно оси образца. Полученные результаты свидетельствуют о наличии дополнительного механизма электропластической деформации спинового происхождения в скрещенных полях собственного магнитного поля тока и CBЧ-излучения.

Ключевые слова: импульсный ток, СВЧ-излучение, сталь 12X18H10T, деформация, рентгендифрактометрия.

CURRENT PULSES AND MICROWAVES EFFECT ON THE PHASE COMPOSITION OF STEEL AT DEFORMATION

O.A. Troitsky, M.M. Khrushchov, V.I. Stashenko, I.S. Levin

The change of the phase composition on the content of the martensitic and austenitic phase of steel 12KH18N10T under the influence of pulse current and microwave radiation in the conditions of plastic deformation of samples. The estimation of the size of the ROC of the austenitic and martensitic phases formed during plastic deformation and high energy intense current and microwave exposure, which indicates a significant grain refinement of γ '-phase austenite. It is established that the external energy impacts lead to grinding grain structure of steel 12KH18N10T. Installed, a significant drop in the loads on the samples (30 %) in the process of stress relaxation under the action of current and microwave radiation from the longitudinal orientation of the vector E relative to the axis of the sample. The results indicate the presence of additional mechanisms of electroplastic deformation of spin origin in crossed fields own magnetic field current and microwave radiation.

Keywords: pulse current, microwave radiation, steel 12X18N10T, deformation, interdirectorate.

Введение

Дополнительное воздействие на металл импульсами электрического тока плотностью порядка 500–1000 А/мм² и длительностью 100–250 мкс в условиях активного пластического деформирования при механообработке приводит к существенному облегчению пластической деформации. Импульс тока выступает лишь в качестве инициатора разрядки, и наблюдаемый скачок деформации осуществляется за счет энергии внутренних напряжений, накопленных в процессе предварительной пластической деформации, хотя само энергетическое воздействие импульса тока не вызывает какой-либо значительной деформации.

Метод обработки с применением импульсов тока получил название электропластической деформации (ЭПД) [1, 2]. Метод ЭПД нашел широкое применение в различных технологиях обработки металлов и сплавов давлением [3, 4].

Электропластический эффект [1] состоит из ряда физических эффектов. Поскольку явление не имеет единого управляющего механизма, требуется рассматривать факторы, управляющие кинетикой пластической деформации

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

каждого из эффектов [5–7], что вызывает дискуссию среди теоретиков.

Однако есть ряд эффектов, которые уже не подвергаются сомнению и получили теоретическое обоснование. К ним относятся давление электронного ветра на дислокации, термические напряжения, связанные с неравномерным нагревом металла, влияние собственного магнитного поля на пластичность (пинч-эффект) [8].

В работах [8, 9] теоретически предсказано, что облегчение пластической деформации при действии импульсов тока в скрещенных полях магнитного поля тока и СВЧ-излучения возможно как дополнение к электропластической деформации металла [1] за счет спинового разупрочнения. В работе [10] экспериментально установлено наличие резонансного изменения пластических свойств у кристаллов в условиях электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Для реализации спинового разупрочнения металла (СРМ) за счет влияния ЭПР на механические свойства требуется выполнение следующих условий:

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

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

Целью данной работы является изучение влияния скрещенных полей импульсного тока и СВЧ-излучения в условиях пластической деформации металла на фазовый состав материала по содержанию мартенситной и аустенитной фаз в образцах.

Материал и методика эксперимента

Для изучения влияния СВЧ-излучения на механические свойства металлов была выбрана аустенитная нержавеющая сталь марки 12X18H10T, как подходящий объект исследований. Она в своей основе имеет ферромагнитные железо и никель, а также парамагнитные примеси, обладающие собственным магнитным моментом, которые под воздействием внешних полей (магнитного поля тока) ориентируются по полю, создавая результирующее поле, превышающее внешнее. Сталь 12Х18Н10Т содержит титан, который является парамагнитным металлом. Его парамагнитные свойства возрастают с ростом температуры, что частично реализуется в условиях действия тока.

Образцы из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм и длиной рабочей части 28 мм размещались внутри волновода. К концам образца через изолированные зажимы подводился ток. Испытания проводились в горизонтальной разрывной машине ИР 5047-50-10 [11].

Для изучения влияния СВЧ-излучения на механические свойства металлов в условиях пластической деформации растяжением при одновременном действии импульсным током выбрана частота 2,45 ГГц, применяемая в микроволновых СВЧ-печах [12]. Передача электромагнитного (ЭМ) излучения от источника СВЧ-излучения (магнетрона) к деформируемому образцу осуществлялась с помощью волновода прямоугольного сечения. Ориентацию вектора напряженности Е электрического поля СВЧ-излучения меняли поворотом короба волновода относительно деформируемого образца на 90°.

Температура образцов измерялась термопарой во время действия СВЧ-излучения и одиночных импульсов тока. Она не превышала 60-80 °С. Поскольку СВЧ-излучение в принципе может воздействовать на спай термопары, то эти измерения были дополнены дилатометрическими измерениями температуры. Для этого нагружение образца останавливалось, и следовала трехминутная пауза релаксации механических напряжений без снятия нагрузки, но с продолжением периодического действия СВЧ-излучения. В ходе паузы релаксации устанавливалось дно релаксационной кривой (примерная горизонталь записи самописцем действующих механических нагрузок с течением времени). На этом этапе, т.е. по истечении трех минут с момента остановки нагружения, каждое включение СВЧ-излучения сопровождалось скачком записи самописца вниз за счет небольшого дилатометрического эффекта (удлинения образца при нагреве). При известных жесткости машины и коэффициента температурного расширения материала легко определить нагрев образца под влиянием СВЧ-излучения. Точность таких измерений температуры невелика – порядка 5 °C, но они хорошо дополняют измерения с помощью припаянных к образцу термопар.

Результаты механических испытаний

Влияние импульсного тока и СВЧ-излучения на пластическую деформацию металла изучалось для двух видов экспериментальных исследований: при активной деформации с разной постоянной скоростью и при релаксации напряжений. Условия механических испытаний представлены в табл. 1.

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

Затем, после увеличения нагрузки на 50 H, подавались импульс тока вышеуказанной величины и СВЧ-излучение. На диаграмме деформирования образца наблюдалось резкое снижение напряжения (скачки напряжений, вызванные импульсами тока, в сторону разупрочнения металла). Скачки напряжений в условиях активной деформации при действии импульсов тока составляли 14,0-14,3 МПа, тока и СВЧ-излучения – 14,8–15,0 МПа. Ориентация поля Е СВЧ-излучения была поперечной.

Электропластическое действие импульсного тока на пластическую деформацию нержавеющей стали усиливалось при наличии СВЧ-излучения, особенно при продольной ориентация поля Е. Увеличение скачков снижения напряжения указывает на дополнительное воздействие СВЧ-излучения на активную деформацию металла. Небольшое тепловое действие тока и СВЧ-излучения не приводило к заметным скачкам напряжений.

При постановке опытов второго вида (при релаксации механических напряжений во время кратковременных остановок растяжения образцов с паузами по 3 мин без разгрузок) оценивалась величина релаксации напряжений при различных вариантах внешнего и внутреннего энергетического воздействия. Растяжение образца перед каждой новой серией измерений начиналось с более высокой нагрузки (на 50–100 Н больше предыдущей), и так вплоть до разрушения образца.

Каждая серия измерений состояла из четырех пауз:

а) без какого-либо воздействия;

б) с воздействием СВЧ-излучения при разной ориентации вектора Е;

в) с воздействием импульсами тока;

г) с совместным действием СВЧ-излучения и импульсов тока.

На одном образце удавалось проводить по 12–16 измерений. При достижении нагрузки 1400–1500 Н образец, как правило, разрушался в шейке. Снижение нагрузки за первые 2–3 секунды происходило с увеличением уровня напряжений. Относительное снижение нагрузки при остановках привода машины за полную паузу релаксации напряжения в течение 3 минут при различных видах испытаний в диапазоне измерений усилия F от 1 кH до 1,45 кH составило: без какого-либо энергетического

Таблица 1

Образец	Режим обработки	Скорость деформации, v, мм/мин	Примечания				
Структура и рентгенофазовый анализ							
исх. измерение	fer of pototicu	_	12X18H10T				
	оез обработки		(в состоянии поставки)				
3	без тока	0,5					
13	без тока	0,3					
2	с током	0,1–0,2	слабо магнитная				
12	с током	0,3	слабо магнитная				
15	ток + СВЧ	6,15	слабо магнитная				
19	ток + СВЧ	6,2	слабо магнитная				
18	ток + СВЧ	0,2	слабо магнитная				
			Режим нагружения при релаксации:				
20	ток +		(1) без тока;				
	СВЧ-излучение		(2) с током (подгружение);				
	+ релаксация		(3) с током + СВЧ-излучение				
			(подгружение)				

Режимы обработки образцов

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

действия 8,6-8,8 %; при действии импульсов тока 16,8-17,5 %.

При поперечном действии поля Е СВЧ-излучения 11,2–11,4 %. При совместном действии тока и СВЧ-излучения (поле Е поперечно) 21,9–22,5 %.

При продольном поле E (относительно оси образца) только СВЧ-излучение давало скачок нагрузки 11,9–12,3 %. При совместного действия тока и СВЧ-излучения (поле E продольно) эффект снижения нагрузки составил 29,8–30 %.

Из приведенных данных следует, что электропластическое действие импульсного тока на пластическую деформацию нержавеющей стали усиливалось при наличии СВЧ-излучения. Снижение нагрузки (из диаграммы растяжения со скачками уменьшения напряжений) за счет нагрева образца вычиталось из эффекта воздействия.

В опытах также установлено исчезновение магнитных свойств у стали 12Х18Н10Т в результате электропластической деформации. Наиболее вероятной причиной является подавление аустенитно-мартенситного превращения, что наблюдалось ранее в опытах другого вида [8].

Результаты рентгеноструктурных исследований

В проведенных исследованиях снижение доли мартенситной фазы в материале подтверждается результатами фазового анализа образцов в исходном состоянии и после проведения механических испытаний.

Исследования проводили на медном Кα-излучении, используя рентгеновский дифрактометр, оснащенный вертикальным гониометром и энергодисперсионным детектором Пельтье. При обработке экспериментальных дифрактограмм и проведении фазового анализа образцов использовали программное обеспечение дифрактометра и программу *Match! 1.10*.

Дифрактограммы ряда образцов, подвергавшихся соответствующей обработке, приведены на рис. 1. Кривая 1 демонстрирует исходное состояние образца – аустенит (ү-фаза) с ГЦК-решеткой, в которой присутствует интенсивная кристаллографическая текстура. Параметр решетки аустенита значительно меньше табличного значения для ү-Fe, что объясняется вхождением в его решетку значительного числа атомов никеля, присутствующих в исходном составе исследуемой стали.



Рис. 1. Зависимость интенсивности рассеяния рентгеновских лучей *I* от угла отражения θ: 1 – исходное состояние (обр. № 1); 2 – деформация без тока (обр. № 3); 3 – деформация с током (обр. № 2); 4 – деформация с током и СВЧ-излучением (совместное воздействие) (обр. № 15); 5 – после совместного воздействия и релаксации напряжений (обр. № 20)

Оказалось, что для ГЦК-структуры γ -фазы положение линий на дифрактограммах соответствующих образцов наиболее точно описывается приведенными в базе данных *ICDD PDF-2* дифракционными спектрами следующих железо-никелевых сплавов: Fe₃Ni (01-071-8325), Fe_{0.612}Ni_{0.388} (01-074-5839) и Fe_{0.64}Ni_{0.36} (00-047-1405). Таким образом, можно говорить о вхождении никеля в решетку γ -фазы.

В отличие от у-фазы, дифракционная картина от α-фазы, возникающая в образцах при электромагнитной обработке, практически неотличимы от α-Fe, что указывает на низкое содержание в ней легирующих добавок даже после соответствующих ЭМ-обработок. Кривая 2 на рис. 1 соответствует образцу, деформированному без тока, в котором сформировалась мартенситная α-фаза, кривая 3 – образцу, деформированному с током, под действием которого подавляется формирование мартенсита. Общее количество мартенсита при этом составляет ~23-26 об. % и ~14-17 об. %, соответственно. Деформация с током и СВЧ-излучением (кривая 4) ведет, как показывают результаты в табл. 2, к дальнейшему снижению содержания мартенсита до ~9-13 об. %, а дополнительная релаксационная обработка (кривая 5) до уровня менее 5 об. % мартенсита.

Данные исследования тонкой атомной структуры [13] подвергшихся ЭМ-обработке образцов приведены на рис. 2. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР), характерный размер субзерен образцов, исследованных в исходном состоянии, составляет ~500 нм, что

Образец, N	Период решетки, нм		Содержание фазы, об. %		Структура	D
	γ-фаза	α-фаза	γ-фаза	α-фаза	ү-фазы	K _p
исх.	0,35887	_	100	_	Fe _{0,64} Ni _{0,36}	0,85
3	0,358347	0,287076	76,6	23,4	Fe ₃ Ni	0,68
13	0,35836	0,287222	73,5	26,5	Fe ₃ Ni	0,73
2	0,358373	0,286535	86,4	13,6	Fe ₃ Ni	0,61
12	0,358362	0,286574	83,4	16,6	Fe ₃ Ni	0,73
15	0,35849	0,286558	91,0	9,0	Fe ₃ Ni	0,67
18	0,358447	0,286634	86,6	13,4	Fe ₃ Ni	0,72
19	0,358352	0,28642	90,6	9,4	Fe ₃ Ni	0,72
20	0,358394	0,283227	96,1	3,9	Fe ₃ Ni	0,71
ICDD	γ-Fe	α-Fe				
<i>PDF-2</i>	0,366	0,2866				

Данные периода решетки и содержания фазы

Примечание: R_p – фактор достоверности.

в сочетании с малой величиной микроискажений (< 0,1 %) на дифрактограммах образцов, исследованных в исходном состоянии, проявляется в обостренной форме дифракционных пиков, при которой дублет К α_1 - – К α_2 - разрешался уже на относительно малых углах у линии 111_γ. В случае образцов, подвергшихся механическому и ЭМ-воздействию, размеры ОКР были, как правило, существенно ниже, и, коме того, присутствовали значительные микродеформации.

Размер ОКР γ -фазы в образцах, подвергшихся пластической деформации, не зависел от того, применялась или нет при этом ЭМ-обработка, и составлял $D_{\gamma} \sim 100-200$ нм. Наблюдаемые в γ -фазе микродеформации ε_{γ} также были слабо подвержены изменениям и составляли ~0,4 %. Для мартенсита α -Fe размер ОКР был менее 70 нм (типичные значения 30–70 нм) за исключением образца № 20, подвергшегося совместному воздействию тока и СВЧ-излучения с последующей релаксацией, в котором размер α -фазы D_{α} неожиданно вырос до 500 нм.

Действие пластической деформации, также как и деформации с током, приводило к значительным микроискажениям, достигавшим 0,3 %. В результате СВЧ-воздействия величина ε_{α} повышалась еще больше и достигала 0,5 % (рис. 2, δ), причем как в случае обработки, сочетавшей воздействия тока и СВЧ-излучения, так и при обработке с последующей релаксацией напряжений. Наряду с анализом параметров тонкой атомной структуры было также проанализировано влияние различных режимов ЭМ-обработки на кристаллографическую текстуру α - и γ -фазы в образцах. Для этого использовали метод Харриса [14], применяемый для оценок преимущественных ориентировок с направлением осей, нормальных отражающим плоскостям (*hkl*). Значение текстурной функции Харриса *T*(*hkl*) > 1 подтверждает сам факт наличия текстуры, а ее величина – степень ее «обостренности»:

$$T(hkl) = \frac{I(hkl) / I_{\text{mk}}(hkl)}{(1 / n \cdot \sum_{n} [I(hkl) / I_{\text{mk}}(hkl)]},$$

где $I_i(hkl)$ – интегральные интенсивности рассеяния исследуемым образцом с текстурой и поликристаллическим (ПК) эталонным образцом с T(hkl) = 1, соответственно; n – число линий на дифрактограмме.

Анализ показал, что уже в исходном стальном образце отражающие плоскости γ -фазы были ориентированы по нормали к направлению (220) – функция Харриса в исходном состоянии составляла $T_{\gamma}(220) \approx 3,0$, причем при последующей обработке степень «остроты» текстуры сохранялась примерно на том же уровне.

В случае α -фазы, стимулированной в шейке образца его пластической деформацией, имела место преимущественная ориентация с $T_{\alpha}(211)$ ~1,5–2,0. Изменения $T_{\alpha}(211)$ носили несистема-



а – размер ОКР; *б* – величина микроискажений для γ– и α–фазы в исходном состоянии

и после обработки (номера образцов N соответствуют номерам, приведенным в табл. 1 и 2)

тический характер, поэтому сделать какие-либо выводы о влиянии условий ЭМ-обработки на текстуру α-фазы не представляется возможным. Можно лишь предположить вероятное наличие ориентационного соответствия между структурами аустенита и мартенситной фазы, образующейся в процессе пластической деформации. Это соответствие сохраняется, несмотря на подавление мартенситообразования при ЭМ-обработке.

Заключение

Установлено, что при обычной пластической деформации шейка образцов становится магнитной из-за выпадения α-фазы мартенсита при деформации ввиду высоких механических напряжений в металле [2].

Зафиксировано значительное снижение нагрузок на образцах (до 30 %) 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.

Установлено, что в исходном образце после отжига параметр решетки γ-фазы аустенита существенно ниже соответствующего значения для γ-фазы железа, что связано с вхождением никеля в ГЦК-решетку аустенита. В то же время, параметр решетки мартенсита деформации (α-фазы) оказался близок параметру α-Fe, что свидетельствует о низком уровне примесей в ОЦК-структуре α-фазы и косвенно может указывать на возможную роль энергетического воздействия на диффузионные процессы при формировании мартенсита деформации.

Проведенная оценка размеров областей когерентного рассеяния аустенитной и мартенситной фаз, образующихся при пластической деформации и интенсивном высокоэнергетическом воздействии тока и СВЧ-излучения, свидетельствуют о значительном, в несколько раз, измельчении зерна у-фазы аустенита. Размер областей α-мартенсита, возникшего в результате пластической деформации, составляет менее 100 нм и не меняется в условиях высокоэнергетического воздействия, за исключением случая обработки, допускающей структурную релаксацию, когда он может значительно (до 500 нм) увеличиваться. Установлено, что внешние энергетические воздействия ведут к измельчению зернистой структуры стали 12Х18Н10Т.

Список литературы

- 1. *Троицкий О.А.* Электромеханический эффект в металлах // Письма в ЖЭТ. 1969. Т. 10. С. 18–22.
- Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы (монография) / Ю.В. Баранов, О.А. Троицкий, Ю.С. Аврамов, А.Д. Шляпин. М.: Изд-во МГИУ, 2001. – 843 с.
- 3. Сташенко В.И., Троицкий О.А., Новикова Н.Н. Электропластическое волочение среднеуглеродистой стали // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 4. С. 69–73.

- 4. Сташенко В.И. Получение проволоки из чугуна волочением с применением тока высокой плотности // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 2. С. 140–143.
- Подвижность дислокаций в монокристаллах цинка под действием импульсного тока / Л.Б. Зуев, В.Е. Громов, И.Ф. Курилова и др. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 239. № 1. С. 84–87.
- 6. 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.
- Molotskii M., Fleurov V. Plasticity of ferromagnets near the curie point // Philosophical Magazine. 2003. Vol. 83. No. 12. P. 1421–1430.

- 9. Молоцкий М.И. Возможный механизм магнитопластического эффекта // Физика твердого тела. 1991. Т. 33. № 10. С. 3112–3114.
- 10. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Магниторезонансное разупрочнение кристаллов // ЖЭТФ. 1999. Т. 115. № 2. С. 605–624.
- Троицкий О.А., Сташенко В.И., Савенко В.С. Действие СВЧ-излучения на пластическую деформацию нержавеющей стали // Машиностроение и инженерное образование. 2015. № 2. С. 27–33.
- 12. *Уотсон Г.* СВЧ-полупроводниковые приборы и их применение: пер. с англ. М.: Мир, 1972. 660 с.
- 13. Иверонова В.И., Ревкевич Г.П. Теория рассеяния рентгеновских лучей, М.: Изд. МГУ. 1978. – 278 с.
- 14. Баррет Ч.С., Масальский Т.Б. Структура металлов. Ч. 1–2. М.: Металлургия. 1984. 686 с.

Материал поступил в редакцию 16.03.2017

ТРОИЦКИЙ Олег Александрович E-mail: oatroitsky@rambler.ru Тел.: (499) 135-30-72	Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Институ- та машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: материаловедение и физика твердого тела; действие электрического тока и внешних энергетических воздействий, включая СВЧ-излучение и радиоак- тивное излучение, на физико-механические свойства материалов, особенно металлов. Автор более 350 научных работ, 9 монографий, 13 патентов и ав- торских свидетельств.
ХРУЩОВ Михаил Михайлович E-mail: michel_x@mail.ru Тел.: (499) 135-43-29	Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Инсти- тута машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: материаловедение; пленки и покрытия, наноструктурированные материалы и нанокомпозиты, рентгеноструктурный анализ материалов, физика проч- ности, трибологическое материаловедение. Автор более 80 научных работ.
СТАШЕНКО Владимир Иванович E-mail: vis20-11@rambler.ru Тел.: (499) 135-55-18	Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Инсти- тута 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 физи- ко-механические свойства металлов. Автор более 150 научных работ, 3 мо- нографий, 13 патентов и авторских свидетельств.
ЛЕВИН Иван Сергеевич E-mail: is.levin@physics.msu.ru Тел.: (495) 939-46-10	Кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Физиче- ского факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Сфера научных интересов: физика конденсированного состояния; пленки, покрытия и наноматериалы, рентгено- структурный анализ материалов. Автор более 20 научных публикаций.