

Д.А. Игнатков

К ОБРАЗОВАНИЮ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академическая, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. Бровки, 6, г. Минск, 220027, Республика Беларусь*

Образование остаточных напряжений (ОН) при электроискровом легировании (ЭИЛ) обусловлено протеканием процессов упругопластического деформирования и фазовых переходов в локальных объемах материала катода-детали, которые порождаются действием на поверхность концентрированных потоков ионов при прохождении электрических импульсных разрядов тока и одновременно с этим высокоскоростных ударов выброшенного вещества с поверхности анода. Импульсные электрические разряды милли- и микросекундной длительности с плотностью мощности 10^5 – 10^{12} Вт/см² приводят к сверхвысоким скоростям разогрева с градиентами температуры в пространстве $\sim 10^6$ К/см и во времени $\sim 10^7$ – 10^{11} К/с, а последующее быстрое охлаждение локальных объемов расплавленного материала происходит со скоростями, близкими к критическим. Следствием такого внешнего воздействия является возбуждение в материале катода мощных тепловых и термомеханических полей. Поэтому при рассмотрении механизма образования ОН при ЭИЛ необходим учет связи между внешними и внутренними воздействиями, изменением исходного состояния материала и возникающим вследствие этого остаточным напряженным состоянием. Однако на ряд эффектов при электроискровой обработке металлов, связанных с температурными и механическими возбуждениями, существуют различные точки зрения [1–3]. Так, в работах [1, 2] предложена модель выброса частиц металла при ЭИЛ, основанная на чисто тепловом действии импульсных разрядов. Такой подход получил возражение в [3], где Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко выдвинули иную концепцию, согласно которой выброс металла не является следствием только тепловых процессов, а обусловлен ударным воздействием потока заряженных частиц на поверхность электродов, которое приводит к созданию громадных давлений. Поэтому остановимся на этом подробнее.

Поскольку время тепловой релаксации существенно меньше длительности импульсного электрического разряда, то практически мгновенный нагрев материала катода вызывает в приповерхностной области образование импульса сжатия и генерирование напряжений (термический удар), а затем плавление, испарение и выброс материала. В начальные моменты расширение нагреваемого материала под действием высокого градиента температуры приводит к возникновению давления на его соседние холодные слои. Оценим приближенно величину развиваемого давления в импульсе сжатия при действии на поверхность катода-детали, например из железа, импульсного теплового потока с невысокой плотностью мощности 10^5 Вт/см² и длительностью нагрева 10^{-3} с по известной формуле

$$p = \frac{\beta E G_T \tau}{1 - 2\nu},$$

в которой $\beta=3\alpha$ и α – соответственно коэффициенты объемного и линейного температурного расширения; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; $G_T = I a / k t$ – градиент температуры; I – плотность мощности теплового потока; k – коэффициент теплопроводности; a – коэффициент температу-

ропроводности; t – толщина слоя; $\tau = Tkt/La$ и T соответственно время и температура нагрева. Для Fe упругие и теплофизические характеристики имеют следующие значения [4]: $E=223$ ГПа; $\nu=0,26$; $\alpha=16,7 \cdot 10^{-6}$ К $^{-1}$; $k=0,74$ Вт/см 0 С; $a=0,228$ см 2 /с. Вычисления показывают, что нагрев слоя толщиной 10 мкм до температуры 750 К происходит за время $1,6 \cdot 10^{-5}$ с, которое почти на полтора порядка меньше, чем длительность всего периода нагрева. При этом скорость изменения температуры составляет $3,1 \cdot 10^7$ К/с, а величина развиваемого давления в импульсе сжатия достигает 11,1 ГПа. При нагреве до температуры 1023 К в течении $2,4 \cdot 10^{-5}$ с давление возрастает до 17,4 ГПа. Хотя такая оценка является приближенной, однако она все же дает представление о том, что при ЭИЛ в моменты прохождения электрического импульса локальный объем материала катода подвергается в короткие промежутки времени действию высокого давления, достаточного для образования в диапазоне температур от 296 до 750 К и изменении давления от $\sim 13,8$ (296 К) до $\sim 9,8$ (750 К) гексогональной ϵ – модификации (ГПУ) Fe [5–7]. Отметим, что возникновение другой β -Fe модификации и целой гаммы ее превращений происходит в интервале температур 1200–2500 К при давлениях 38 и более ГПа [6, 7]. В системе Fe – С при высоком давлении также образуется ϵ – модификация твердого раствора [8].

Поскольку при тепловом ударе нагреваемый локальный объем материала быстро расширяется и оказывает давление на соседние холодные слои, то появляется ударная волна сжатия, которая распространяется в материале. Формирование ударной волны происходит при выполнении условия [9]

$$\frac{IS}{\tau} > C_e^4 \rho R,$$

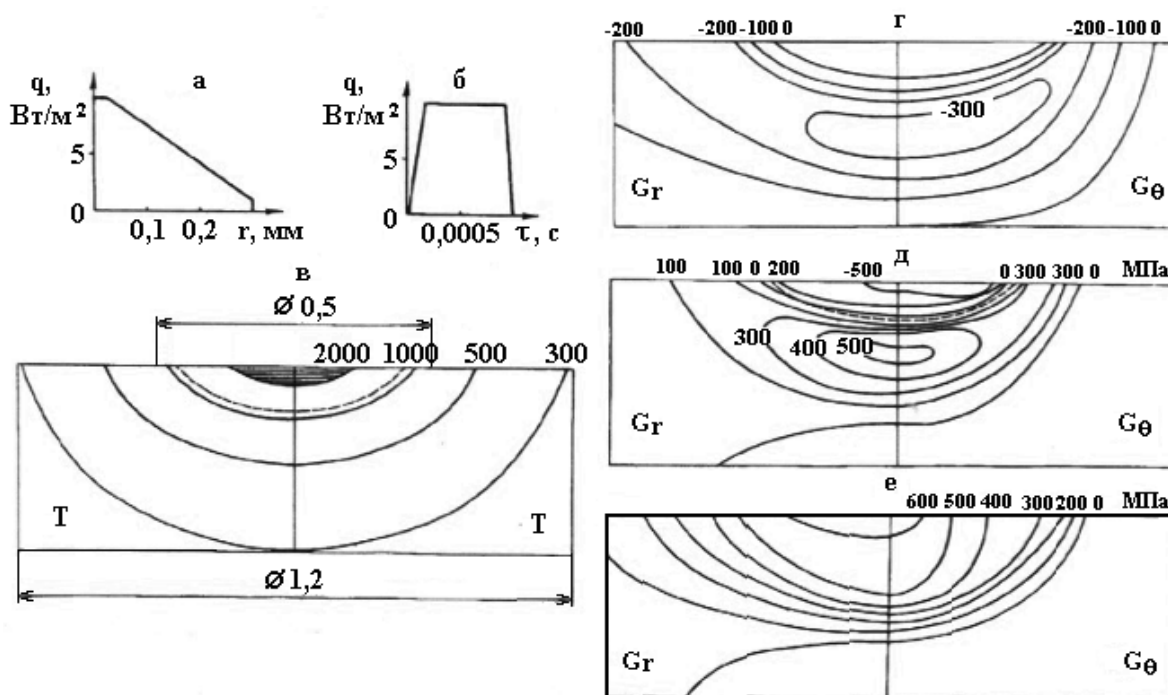
где I и τ – соответственно плотность мощности и длительность действия потока ионов; S – площадь облучения; C_e – скорость звука в облучаемом материале; ρ – плотность материала; R – длина пробега ионов в материале. Согласно расчетам [9], в случае облучения Fe потоков ионов при значениях $IS/\tau \approx 10^{15}$ и $C_e^4 \rho R \approx 10^{12}$ ($I=10^8$ Вт/см 2 ; $\tau=10^{-7}$ с; $C_e=5 \cdot 10^5$ см/с; $\rho=7,9$ г/см 3 ; $R=10^{-4}$ см) начальное давление во фронте ударной волны составляет от 2 до 10 ГПа. Возникающие импульсы отдачи вследствие испарения и выброса материала из зоны прохождения импульсного электрического разряда создают дополнительное сжатие материала в твердой фазе. Расчеты авторов работы [10] свидетельствуют о том, что при импульсном облучении поверхности электронными и ионными пучками нано- и микросекундной длительности с плотностями мощности 10^7 – 10^{12} Вт/см 2 происходит разогрев приповерхностной области с градиентом температуры 10^{10} – 10^{12} К/с, влекущий за собой возникновение высоких давлений и мощных волн термомеханических напряжений, переходящих в ударные волны мега- и гигабарного диапазона давлений. После прекращения ионного облучения скорости охлаждения составляют 10^9 – 10^{10} К/с.

При ЭИЛ следствием воздействия на поверхность анода концентрированного импульсного потока электронов с большой плотностью мощности является тепловой взрыв, сопровождающийся выбросом в межэлектродное пространство струи ионизированного вещества, пара и мелкодисперсных капель материала анода. Образование анодной струи связано с развитием высокого давления в зоне микровзрыва, достигающего 1–10 ГПа [11]. Согласно данным в [12], последующий удар одной струи о поверхность катода происходит со скоростями не ниже ~ 1 – 10 км/с. Известно, что величина давления, возникающего при ударе кумулятивной струи в преграду со скоростью 5 км/с, составляет ~ 100 ГПа [13]. Итак, изложенные данные подтверждают точку зрения Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко и позволяют сделать вывод, что в процессе ЭИЛ при прохождении электрического разряда тока интенсивный тепловой нагрев локальной зоны катода с высоким градиентом температуры и одновременное ее импульсное нагружение высоким давлением при высокоскоростном ударе анодной струи приводят к образованию в локальном объеме материала катода неравновесного температурного поля, а также возбуждению волнового поля механических напряжений с высокими значениями амплитуд в ударной волне сжатия и создающихся волнах разгрузки и отражения. Поскольку закономерности протекания тепловых и термомеханических процессов при импульсных воздействиях потоков ионов и электронов на поверхность определяются плотностью мощности, длительностью импульса и пространственно-временной формой функции энерговыделения [10], то в зависимости от условий и технологических режимов ЭИЛ в материале возбуждаются термомеханические возмущения, которым соответствуют волны напряжений различной степени интенсивности, включая ударные волны, приводящие к появлению пластических течений и деформаций, фазово-структурных переходов и возникновению ударно-волновых явлений.

Примечательно, то что ряд явлений при ЭИЛ [1, 3, 12, 14–17] имеет сходство с ударно-волновыми эффектами, которые наблюдаются в экспериментах по ударному нагружению материалов [18] и происходят при воздействиях на поверхность концентрированных потоков энергии, например, лазерного излучения [19–21], облучения электронным [22] и ионным [9] пучками. Об этом свидетельствует характер разрушения материала поверхностного слоя при ЭИЛ в виде отрыва частиц от поверхности и расслоения с продольным расположением трещин к границе поверхности, выброс частиц в окружающую среду не во время действия электрического импульса тока, а после его завершения, формирование ультрадисперсной и мелкокристаллической структуры с большой степенью деформированности кристаллитов и высокой плотностью дислокаций, появление максимума микротвердости в глубине легированного поверхностного слоя и др. Так, откольное разрушение при ударно-волновом нагружении определяется как плоское отделение материала параллельно волновому фронту вследствие разрушения от действия растягивающих напряжений в направлении, перпендикулярном этому фронту [18]. При взаимодействии ультракоротких мощных лазерных импульсов с твердой поверхностью формирование ударной волны в гигабарном диапазоне давлений происходит, как правило, после окончания действия импульса сжатия [19]. Очевидно, что при ЭИЛ выброс расплавленного материала из зоны нагрева связан с прохождением волн разгрузки после окончания импульсного электрического разряда. Резонансное взаимодействие волн сжатия, первичных и вторичных волн разрежения около свободной поверхности или в толще формируемого белого слоя во время действия электрического разряда и его окончания может приводить как к откольному разрушению, так и к множественному отколу частиц с выбросом их из очага разрушения. Установлено [23], что при наличии фазового перехода $\alpha - \text{Fe} \rightarrow \epsilon - \text{Fe}$ гладкий откол наблюдается при взаимодействии двух встречных ударных волн разрежения, а явление множественного откола связано с многоволновой структурой волн разгрузки. Поскольку при ударном воздействии на кристаллическую среду в ней наряду с известными типами волн (упругий предвестник, волна объемного упругого сжатия и др.) и вязким течением возникает сильнодиссипативная волна пластических поворотов, то это вызывает образование вблизи поверхности удара слоя с сильными кристаллографическими разориентировками и высокой плотностью дислокаций [24]. Формирование сильно фрагментированной структуры и появление в глубине поверхностного слоя закаленных сталей со структурой мартенсита двух максимумов микротвердости при облучении электронными пучками с умеренной плотностью мощности ($10^7 - 10^9 \text{ Вт/см}^2$) связывают [22] с осуществлением деформационного упрочнения биполярными волнами напряжений, возбуждаемых вследствие проявления эффекта термоупругости. При этом наибольшая степень упрочнения достигается при воздействии на мартенсит волны, у которой амплитуды импульсов сжатия и разрежения близки по величине и незначительно превышают динамический предел текучести облучаемого материала. Показано [9], что на образование максимумов плотности дислокаций и микротвердости при облучении $\alpha\text{-Fe}$ ионным пучком сказывается влияние градиента давления ударной волны и месторасположение формирования фронта ударной волны.

Анализ совокупности приведенных данных свидетельствует, что возникновение ОН при ЭИЛ обусловлено протеканием в моменты действия импульсных электрических разрядов взаимосвязанных процессов генерации и эволюции тепловых и термомеханических полей, которые порождают в локальных объемах материала катода-детали упругопластическое и неравновесное фазово-структурное состояния, переход из которых после прекращения импульсного разряда в стабильное состояние в условиях сверхбыстрого охлаждения приводит к появлению при разгрузке остаточных упругих деформаций и соответственно ОН. Механизм образования ОН при однократном воздействии на поверхность тела из стали 45 однократного электроискрового разряда иллюстрирует картина (см. рисунок) изменения теплового и напряженного состояния, полученная в работе [25] при решении несвязанной квазистатической задачи термоупругопластичности. Как видно, в центре нагреваемой зоны температура достигает 3000 К, а на глубине 0,5 мм она составляет всего 293 К. Поэтому мгновенный импульсный нагрев локального объема материала с высоким градиентом температуры вызывает его резкое расширение. Увеличению объема препятствуют холодные слои, окружающие локальную область нагрева, что приводит к большим временным сжимающим напряжениям и соответствующему градиенту пластических деформаций сжатия, зависящего от разности температур, коэффициента расширения материала и условий нагружения. Максимум величины напряжений находится в глубине приповерхностной области $\sim 0,15$ мм, а по мере приближения к поверхности они уменьшаются из-за высокотемпературного пластического течения материала, и в зоне расплава, естественно, отсутствуют (рисунок, з). По окончании импульсного нагрева происходит мгновенное

охлаждение локального объема материала, сопровождающееся его сжатием. Этому препятствуют нижележащие холодные слои материала, результатом чего является развитие временных напряжений растяжения. Возникшая при нагреве пластическая деформация сжатия после установления нормальной температуры вызывает появление растягивающих ОН, максимальная величина которых порядка 600 МПа (рисунок, *е*) и не происходит предельного значения $1,15 \sigma_T$ [26] (σ_T – предел текучести). В случае если при охлаждении в материале происходит фазовый переход с увеличением объема кристаллической фазы, то он приводит к появлению сжимающих ОН. Так, когда при температуре ниже 610 К протекает превращение аустенита в мартенсит, то это ведет к резкому увеличению удельного объема, результатом чего является образование сжимающих ОН порядка – 500 МПа (рисунок, *д*). Наоборот, если происходит формирование структур, сопровождающееся уменьшением удельного объема, то это приводит к повышению уровня ОН растяжения. Таким образом, итоговый знак и величина ОН зависят от того, какой вид напряжений, термомеханических и от фазовых превращений, играет преимущественную роль при формировании остаточного напряженного состояния после прекращения действия импульсного электрического разряда. Поскольку после ЭИЛ практически всегда наблюдается высокий уровень растягивающих ОН в наружном слое белой зоны, нередко превосходящий предел текучести материала до обработки, то очевидно, что доминирующим фактором в их образовании является термомеханический фактор, а превращения при формировании белого слоя с высокими механическими свойствами с твердостью до ~10 и более ГПа [15, 27–29], по-видимому, происходят с уменьшением удельного объема фазовых структур.



Зависимость интенсивности теплового потока от радиуса (*а*) и времени (*б*); температурное поле в момент окончания нагрева (*в*). Поля радиальных σ_r и окружных σ_θ напряжений: (*з*) – в момент окончания нагрева; (*д*) – с учетом мартенситного превращения в стали; (*е*) – без учета фазовых превращений.

Из фазовой диаграммы Т – Р для Fe [5–7] следует, что в области тройной точки (750 К, ~9,8 ГПа) существуют переходы $\alpha - \text{Fe}$ (ОЦК) \rightleftharpoons $\varepsilon - \text{Fe}$ (ГПУ), $\varepsilon - \text{Fe}$ (ГПУ) \rightleftharpoons $\gamma - \text{Fe}$ (ГЦК) и $\alpha - \text{Fe}$ (ОЦК) \rightleftharpoons $\gamma - \text{Fe}$ (ГЦК). Согласно данным в [30], изменение удельного объема кристаллических решеток при этих фазовых превращениях составляет:

$$\begin{aligned} \Delta V (\text{ОЦК} \rightarrow \text{ГПУ}) &= \mp 0,34 \text{ см}^3/\text{моль}; \\ \Delta V (\text{ГПУ} \rightarrow \text{ГЦК}) &= \mp 0,13 \text{ см}^3/\text{моль}; \\ \Delta V (\text{ГЦК} \rightarrow \text{ОЦК}) &= \mp 0,21 \text{ см}^3/\text{моль}. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что повышению уровня ОН растяжения может способствовать превращение $\alpha\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe}$ в случае отсутствия или незавершенности обратного перехода, которое сопровождается уменьшением удельного объема на величину $-0,21 \text{ см}^3/\text{моль}$. Подтверждением тому служат наши данные [31], свидетельствующие о присутствии на дифрактограммах слабых линий $\gamma\text{-Fe}$ после ЭИЛ стальной поверхности электродом из Fe. Поскольку переходы $\varepsilon\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ и $\varepsilon\text{-Fe} \rightarrow \gamma\text{-Fe} \rightarrow \alpha\text{-Fe}$ после снятия давления сопровождаются увеличением удельного объема, то в случае их протекания по таким схемам при ЭИЛ должен был бы наблюдаться или низкий уровень ОН растяжения, либо появление даже сжимающих ОН. Однако экспериментальные данные говорят об обратном. Вполне очевидно, что трансформация ε -фазы высокого давления и, не исключено, β -фазы при формировании белой зоны происходит в условиях ударно-волнового нагружения при ЭИЛ по более сложному механизму, обусловленному многоволновой структурой волн нагрузки и разгрузки. Об этом свидетельствуют упомянутые выше результаты исследований [9, 22, 23], а также физическая модель [32] образования вторичных структур типа белой зоны. Согласно мнению Л.С. Палатника [32], в результате импульсных механических и баротермических воздействий в эвтектоидных и доэвтектоидных углеродистых и легированных сталях в ничтожные доли секунды возникает восемь каскадов мгновенных ступенчатых фазовых и структурных превращений, приводящих к образованию белой зоны со структурой, названной, эксмартенситом. Принимая к сведению, что при определенных условиях прохождения биполярной волны напряжений в локальных областях мартенсита возникает сильное поле временных растягивающих напряжений [22], то можно предположить о существовании на каких-то стадиях многоступенчатых фазово-структурных переходов при образовании белой зоны объемных изменений, приводящих к созданию при ЭИЛ значительных по величине растягивающих ОН. Поскольку развитие объемных изменений промежуточных кристаллических структур в течение столь короткого времени возникновения белого слоя весьма затруднительно исследовать имеющимися экспериментальными средствами, то численное моделирование может дать более полную картину механизма образования ОН с учетом ударно-волновых явлений при электроискровой обработке материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Золотых Б.Н.* Основные вопросы качественной теории электроискровой обработки в жидкой диэлектрической среде // Проблемы электрической обработки материалов. М., 1962. С. 5–43.
2. *DiBitonto D.D., Eubank P.T., Patel M.R., Barrufet M.A.* Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model // J. Appl. Phys. 1989. V. 66. N 9. P. 4095–4103.
3. *Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И.* Электродинамическая теория искровой электрической эрозии металлов // Проблемы электрической обработки материалов. М., 1962. С. 44–51.
4. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства. М., 1976.
5. *Тонков Е.Ю.* Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. М., 1979.
6. *Saxena S.K., Dubrovinsky L.S., Haggkvist P., Cerenius Y., Shen G., Mao H.K.* Synchrotron X-ray Study of Iron at High Pressure and Temperature // Science. 1995. V. 269. P. 1703–1704.
7. *Yoo C.S., Akella J., Campbell A.J., Mao H.K., Hemley R.J.* Phase Diagram of Iron by in Situ X-ray Diffraction: Implications for Earth's Core // Science. 1995. V. 270. P. 1473–1474.
8. *Григорович В.К.* Периодический закон Менделеева и электронное строение атомов. М., 1966.
9. *Валяев А.Н., Погребняк А.Д., Лаврентьев В.И. и др.* Влияние градиента давления ударной волны в $\alpha\text{-Fe}$, облученном мощным ионным пучком, на появление максимума микротвердости на больших глубинах // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 3. С. 47–53.
10. *Блейхер Г.А., Кривобоков В.П., Пащенко О.В.* Диссипация энергии мощных импульсных пучков заряженных в твердом теле. Тепловые процессы // Изв. вузов. Физика. 1997. № 2. С. 67–89.
11. *Месяц Г.А.* Эктоны в вакуумной дуге // Письма в ЖЭТФ. Т.60. В.7. С. 514–517.
12. *Намитоков К.К.* Электроэрозионные явления. М., 1978.
13. *Кожушко А.А., Изотов А.Л., Лазарев В.Б., Баланкин А.С.* Гидродинамические модельные представления о проблеме динамической прочности материалов различной физико-химической природы // Неорганические материалы. 1993. Т. 29. В. 9. С. 1171–1209.
14. *Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И.* Современный уровень развития электроискровой обработки металлов и некоторые научные проблемы этой области // Электроискровая обработка металлов. 1957. В. 1. С. 9–37.

15. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я. и др. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев, 1985.
16. Палатник Л.С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий // Докл. АН СССР. 1953. Т. 89. № 3. С. 455–457.
17. Палатник Л.С. Рентгенографические исследования превращений в поверхностном слое металлов, подвергшихся действию электрических разрядов // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1951. Т. 15. № 1. С. 80–86.
18. Канель Г.И., Фортон В.Е. Механические свойства конденсированных средств при интенсивных импульсных воздействиях // Успехи механики (Adv.mech.). 1987. Т. 10. № 3. С. 3–82.
19. Костин В.В., Красюк И.К. Разрушение металлических мишеней лазерным импульсом // Изв. АН. Сер. физическая. 1997. Т. 61. № 7. С. 1359–1366.
20. Андреев Н.Е., Вейсман М.Е., Костин В.В., Фортон В.Е. Влияние различных механизмов перераспределения энергии при действии лазерных импульсов на формирование ударных волн // Изв. АН. Сер. физическая. 1997. Т. 61. № 8. С. 1486–1490.
21. Бугров Н.В., Захаров Н.С. Ударные волны, генерируемые в твердых телах короткоимпульсным лазерным излучением // Изв. АН Сер. физическая. 1997. Т. 61. № 8. С. 1519–1525.
22. Иванов Ю.Ф., Итин В.И., Лыков С.В., Месяц Г.А. и др. Диссипация энергии волны напряжений и структурные изменения в сталях, облученных импульсным электронным пучком // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 6. С. 1192–1196.
23. Ноткина Е.А., Чижов А.В., Шмидт А.А. Моделирование разрушения упруго-пластических материалов, допускающих фазовый переход // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 18. С. 91–95.
24. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, П.В. Макаров и др. Новосибирск, 1995. Т. 1, Т. 2.
25. Морганюк В.С., Кобаско Н.И., Алексанян В.Д. Расчет теплового и напряженно-деформированного состояния стальных изделий при поверхностной обработке сосредоточенным источником энергии // Международный симпозиум по электрическим методам обработки. М., 1986. С. 149–152.
26. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М., 1963.
27. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головкин Л.Ф. и др. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. М., 1986.
28. Научно-технический прогресс в машиностроении. Современные методы упрочнения поверхностей деталей машин. В. 9. / Под ред. К.В. Фролова. М., 1989. С. 103–204.
29. Технологические основы обеспечения качества машин / Под общ. ред. К.С. Колесникова. М., 1990.
30. Mao H.K., Bassett W.A., Takahashi T. Effect of Pressure on Crystal Structure and Lattice Parameters of Iron up to 300 kbar // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. N 1. P. 272–276.
31. Михайлов В.В., Игнатков Д.А., Пасинковский Е.А. и др. Структурно-фазовые превращения и остаточные напряжения после комбинированного упрочнения стальных деталей электроискровым легированием и электролитной химико-термической обработкой // Электронная обработка материалов. 1999. № 3. С. 4–9.
32. Палатник Л.С. “Эксмартенсит” в эвтектоидных сталях // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. № 2. С. 358–360.

Поступила 16.10.2000

Summary

A mechanism of residual stresses formation at the surface electrosparking alloying is discussed.
