



ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ НАГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ ИЗДЕЛИЯ НА СТРУКТУРУ УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ СТАЛИ У8 ПРИ ПЛАЗМЕННО-ДЕТОНАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

Ю. С. БОРИСОВ, д-р техн. наук, О. В. КОЛИСНИЧЕНКО, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

На основе решения нестационарного уравнения теплопроводности методом конечных разностей определены температурные поля поверхностных слоев в процессе плазменно-детонационной обработки (ПДО) изделий. На базе полученных расчетных зависимостей проведен анализ кинетики фазовых преобразований в структуре стали У8 при ПДО.

Ключевые слова: плазменно-детонационная обработка, углеродистые стали, поглощающие покрытия, технологические параметры, металлография, рентгенофазовый анализ

Восстановление изнашиваемых поверхностей различных инструментов и деталей машин, изготовленных из низколегированных и углеродистых сталей, часто является наиболее экономичным средством продления срока их службы. В этой связи весьма актуальны исследования по созданию новых восстановительных и одновременно упрочняющих технологий, использующих концентрированные источники энергии — лазерные, электронные, ионные пучки, плазменные.

Применение последних, генерируемых импульсными плазменными ускорителями при разрядке емкостных накопителей энергии, является одним из наиболее перспективных способов обработки поверхности. Одним из них является плазменно-детонационная обработка поверхности (ПДО) [1, 2]. Достижимые при этом энергетические параметры потока аналогичны параметрам, получаемым при использовании лазерного источника нагрева ($1 \cdot 10^8 \dots 5 \cdot 10^{10}$ Вт/м²). Тем не менее, существуют отличия в механизме нагрева поверхности при лазерном воздействии и ПДО. Лазерное излучение при взаимодействии с поглощающей средой частично отражается от поверхности, а частично проникает вглубь материала. Для увеличения поглощательной способности поверхности при лазерной обработке применяют поглощающие покрытия (например, коллоидный раствор графита, наносимый на облучаемую поверхность в виде пленки, толщина которой не превышает 50 мкм). Известно, что поглощающая способность материала увеличивается с уменьшением его электропроводности [3]. Таким образом, эффективность лазерной обработки повышается при использовании неметаллических покрытий (Fe_2S_3 , Al_2O_3 , $Mn_3(PO_4)_2$, $Zn_3(PO_4)_2$).

Характер взаимодействия плазменной струи с поверхностью при ПДО зависит от скорости струи, формы и размеров поверхности, а также распо-

ложения последней относительно сопла плазмотрона. Если поверхность изделия устанавливается в области до первого прямого скачка уплотнения (область сверхзвукового течения), перед ней образуется ударно-сжатая область плазмы, резко отличающаяся по своим световым и физическим характеристикам от остальной области течения. Толщина ударной области зависит от скорости струи, а для заданной скорости максимальна при воздействии струи на плоскую преграду [4]. От ударно-сжатой плазмы происходит теплопередача в обрабатываемую деталь. Отличительной особенностью ПДО является возможность включения изделия в разрядный контур (его заземления). Исследование амплитудно-временных характеристик тока при ПДО описано в работе [5]. Нагрев поверхностного слоя материала происходит благодаря тепловому потоку в изделие, состоящему из энергии, приносимой электронами, ионами, нейтральными атомами, лучистой составляющей, а также объемного джоулевого тепловыделения в процессе прохождения импульсного тока. Значение каждой составляющей зависит от параметров плазменной струи и состояния поверхности, наличия или отсутствия потенциала на изделии. При включении изделия в разрядный контур важную роль играет полярность, поскольку при ПДО, помимо термообработки, возможно осуществление процессов легирования поверхностных слоев. Аналогично электроискровому легированию [6] наиболее эффективно он происходит, когда расходуемый электрод является анодом, а изделие — катодом.

Целью данной статьи является выявление роли некоторых факторов нагрева поверхности изделия при ПДО на структуру упрочненных слоев стали У8, в частности, оценка роли лучистой составляющей энергии при ПДО и значимости включения упрочняемого изделия в разрядный контур.

Материалы и методы исследования. Исследования проводили на образцах, изготовленных в виде цилиндров высотой 5 и диаметром 20 мм из эвтектоидной стали У8. Предварительно образцы подвергали объемной закалке от 820 °С в воду



Таблица 1. Материалы поглощающих покрытий и их характеристики

Материал покрытия	Толщина, мкм	Электропроводимость	Коэффициент поглощения [3, 7]
Сажа	< 5	Электропроводное	0,4...0,8
Типографская краска	30...40	»»	< 0,96
Zn ₃ (PO ₄) ₂	6...10	Изолятор	0,55...0,90

и последующему отпуску при температуре 200 °С в течение 40 мин. Микротвердость поверхностных слоев образцов после термической обработки составляла HV 4500... 5000 МПа. Для исследования влияния материала покрытий при ПДО, усиливающих лучистый перенос энергии, использовали материалы, применяемые в практике лазерной обработки (табл. 1). ПДО проводили на установке «Импульс» при следующем режиме обработки: напряжение на обкладках конденсаторной батареи — 3,2 кВ; индуктивность цепи разряда — 20 мкГн; частота следования импульсов — 2 Гц; расход пропана C₃H₈ — 0,35 м³/ч; расход кислорода — 1,4 м³/ч; расход воздуха — 1,3 м³/ч; емкость конденсаторной батареи — 800 мкФ; расстояние от среза сопла до изделия — 40 мм; расстояние от торца центрального электрода до среза сопла — 20 мм; материал расходуемого электрода — молибден. Состояние поверхности и изменяемые технологические параметры обработки образцов приведены в табл. 2.

Структурно-фазовый анализ слоя, формирующегося в результате ПДО, проводили с помощью методов металлографического и рентгенофазового анализов на оптическом микроскопе «Неофот-32» и дифрактометре «Дрон-3» с кобальтовым источником K_α-излучения. Глубина проникновения рентгеновского излучения составляла 10...15 мкм. Изучение общего характера распределения хими-

Таблица 2. Состояние поверхности и изменяемые технологические параметры обработки образцов

№ образца	Наличие потенциала	Состояние поверхности	Состав покрытия	Количество импульсов
1		Образец без обработки		
2	Изолирован	Полированная	—	1
3	»»	С покрытием	Сажа	1
4	Заземлен	Полированная	—	1
5	»»	С покрытием	Сажа	1
6	»»	Полированная	—	3
7	»»	С покрытием	Сажа	3
8	»»	»»	Zn ₃ (PO ₄) ₂	1
9	»»	»»	»»	3
10	»»	»»	Типографская краска	1
11	»»	»»	То же	3

ческих элементов на поверхности в зоне плазменно-детонационного воздействия проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-840 фирмы «Джеол». Для выявления микроструктуры поверхностных слоев шлифы подвергали электролитическому травлению в 10%-м растворе хромового ангидрида. Упрочнение поверхностного слоя характеризовали микротвердостью, измеренной на металлографических шлифах. Измерения проводили на твердомере М-400 фирмы «Леко» с нагрузкой 50 г. По междуплетному расстоянию линий α-фазы определяли степень тетрагональности мартенсита [8]. Для определения количества остаточного аустенита использовали метод гомологических пар [9].

Результаты и их обсуждение. При включении образца в разрядный контур (образец № 6, рис. 1, а) наблюдается ярко выраженная зона привязки токового канала, диаметр которого составляет приблизительно 6... 8 мм. При включении образца в разрядный контур и наличии покрытия из сажи (образец № 7, рис. 1, б) в периферийной зоне наблюдаются зоны термического влияния, что свидетельствует об уменьшении контрагированности импульсной дуги у поверхности изделия. Исключение изделия из разрядного контура (образцы № 2, 3), как показывают металлографические исследования, значительно снижает тепловые потоки в обрабатываемую поверхность. При этом в результате амбиполярной диффузии частиц из объема плазмы поверхность имеет плавающий отрицательный потенциал относительно потенциала прилегающего слоя плазмы [10]. Разность потенциалов составляет Δφ = 4...6 В. В результате значительно уменьшается нагрев поверхности за счет сокращения доли теплового потока, связанного с энергией, переносимой электронами, и отсутствия объемного джоулевого тепловыделения. Фосфатные покрытия, имеющие низкую электропроводность, изолируют поверх-

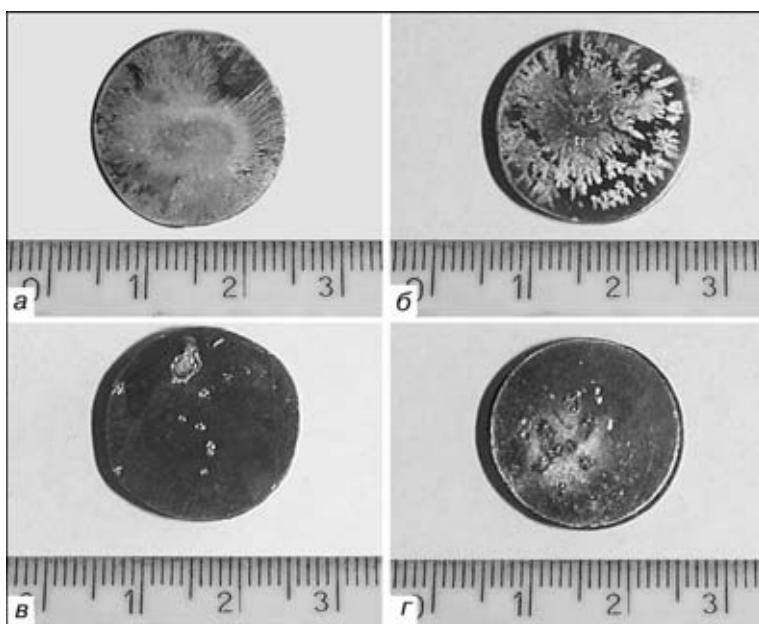


Рис. 1. Внешний вид образцов № 6 (а), 7 (б), 10 (в) и 11 (з) после ПДО (параметры обработки приведены в табл. 2)

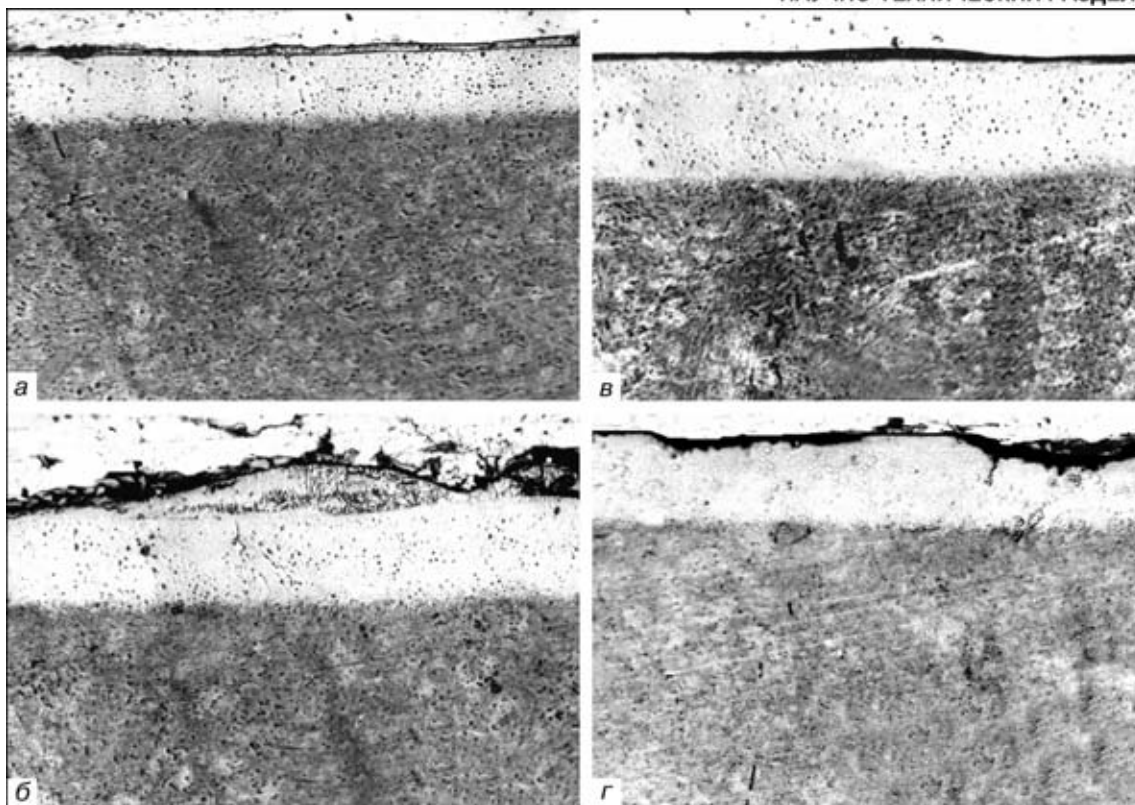


Рис. 2. Микроструктура образцов № 4, 5 (а, б), 6, 7 (в, з) (сталь У8) после ПДО. Травление электролитическое в 10 %-м растворе хромового ангидрида: а, б, з — $\times 500$; в — $\times 800$

ность от прохождения электрического тока, а усиление лучистой составляющей не компенсирует потери теплового потока. Уменьшение тепловых потоков при использовании фосфатных покрытий объясняется теми же причинами, что и при отключении изделия от разрядного контура. Применение в качестве покрытий типографской краски (образцы № 10, 11, рис. 1 в, з) приводит к образованию на поверхности образцов кратеров. Они образуются в месте, где покрытие наиболее тонкое, и, следовательно, омическое сопротивление наиболее низкое. Плотность тока в данных участках высока.

Таким образом, использование в качестве покрытий, поглощающих лучистую энергию, материала с низкой электропроводностью (фосфат цинка) и покрытий на углеродной основе (типографская краска) большой толщины (> 30 мкм) не приводит суммарно к усилению нагрева поверхностного слоя обрабатываемого материала. Для усиления лучистой составляющей теплового потока в условиях ПДО наиболее подходящими являются покрытия из сажи, имеющие высокую электропроводность и способствующие созданию среды с повышенным содержанием углерода на поверхности изделия.

Как и после других видов поверхностной закалки концентрированными источниками энергии на поверхности, подвергнутой ПДО, травление выявляет у обработанной поверхности слаботравящийся белый слой (рис. 2). Наличие этого слоя на микрошлифах обнаружить не удалось тогда, когда образцы обрабатывали без подведения электрического потенциала. Это свидетельствует о том, что в этом случае плотность энергии в

пятне обработки ниже уровня $2 \cdot 10^8$ Вт/м² [11]. При включении его в разрядный контур после обработки одним импульсом (образцы № 4, 5) образовавшийся слой имеет неравномерную толщину. В некоторых местах зоны обработки он практически незаметен, а в некоторых его толщина достигает 40 мкм (рис. 2, а, б). Микротвердость белого слоя составляет приблизительно 6500...8000, в то время как основы — 4500...5000 МПа. После трехкратной обработки слой становится более равномерным по всей области термического влияния (рис. 2, в, з), его толщина — 40 мкм, микротвердость — 8600 МПа. С использованием растровой электронной микроскопии на поверхности также обнаружено осаждение материала эродируемого электрода-анода (Мо). Эти данные свидетельствуют, что в результате осаждения пароконденсатной фазы из материала электрода существует возможность при ПДО проводить процессы легирования.

Рентгенограмма (рис. 3) отпущенной стали без ПДО (образец № 1) показывает, что в процессе отпуска закалочной структуры произошло выделение углерода из мартенсита и значительный распад аустенита. Таким образом, фазовый состав стали перед ПДО состоит из отпущенного низкоуглеродистого ($\approx 0,13$ % С) мартенсита с решеткой, близкой к кубической. Кроме того, на рентгенограмме зафиксированы пики Fe_3C — цемента, слабые пики остаточного аустенита и низкотемпературного ϵ - Fe_3C карбида. Рентгенограмма образца № 2 аналогична рентгенограмме образца № 1. Зафиксированы пики α -Fe и Fe_3C . Это подтверждает незначительное термическое воздействие на поверхность при изолировании изделия. Кроме

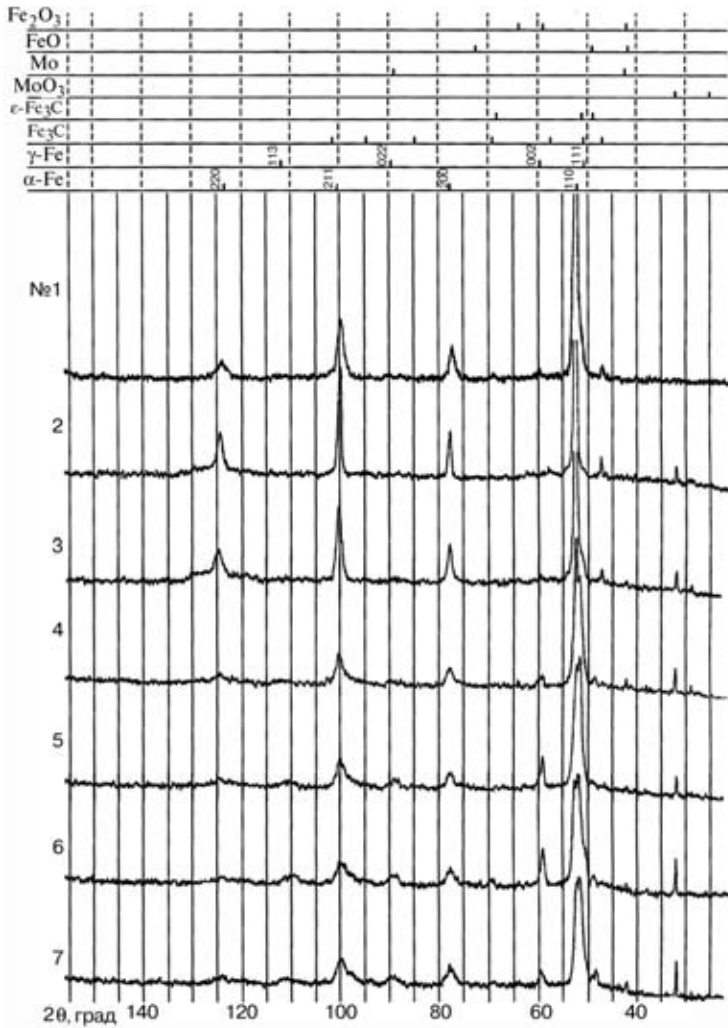


Рис. 3. Рентгенограммы поверхности исходного образца и образцов после ПДО (параметры обработки указаны в табл. 2)

того, появился отчетливый пик, соответствующий MoO_3 , а также слабые пики молибдена, что свидетельствует о переносе материала электрода на поверхность обрабатываемого изделия. Использование сажи в качестве покрытия для увеличения степени черноты поверхности не приводит к заметному изменению вида рентгенограммы. Рентгенограмма образца № 3 идентична рентгенограмме, полученной на образце № 2. Включение образца в разрядный контур при прочих равных условиях обработки значительно изменяет вид рентгенограммы образца № 4, на котором значительно умень-

Таблица 3. Содержание углерода в мартенсите и остаточного аустенита в поверхностных слоях стали У8 после ПДО (условия обработки образцов приведены в табл. 1)

№ образца	Содержание углерода в мартенсите, %	Содержание аустенита, %
1	0,13	<5
2	0,13	<5
3	0,13	<5
4	0,44	13
5	0,54	21
6	0,64	30
7	0,68	18

шается интенсивность линий α -Fe и появляются линии остаточного аустенита. Линия (110) α -Fe расщепляется на пару близко расположенных друг к другу линий мартенсита (110) и [(011) (101)]. Увеличивается тетрагональность решетки вследствие насыщения мартенсита углеродом. На пиках (200) и (211) также заметно уширение междуплетного расстояния, что подтверждает увеличение тетрагональности решетки мартенсита. Повышение содержания углерода в мартенсите происходит, во-первых, вследствие распада карбидных фаз (пики Fe_3C и α - Fe_3C на рентгенограмме практически исчезли), во-вторых, возможно насыщение углеродом из плазмообразующей среды. Обработку проводили в восстановительной среде с избытком C_3H_8 . На рентгенограмме появился пик вюстита FeO . Возможно также существование карбида MoC . Точно определить его наличие достаточно сложно из-за близости значений межплоскостных расстояний в кристаллической решетке MoC и FeO . Наличие поглощающего покрытия в виде сажи на поверхности обрабатываемого изделия (образец № 5) приводит к уменьшению содержания оксидов. Кроме того, заметно усиление термического влияния за счет лучистого потока. Это приводит к увеличению содержания аустенита (пик (002) γ -Fe, образец № 5, рис. 3). Междуплетное расстояние γ -Fe (002)–[(020) (200)] на рентгенограмме образца № 5 больше по сравнению с соответствующим расстоянием на рентгенограмме образца № 4, что свидетельствует об увеличении тетрагональности мартенсита. Возрастание количества импульсов до трех (образец № 6 рис. 3) способствует дальнейшему усилению относительной интенсивности пиков остаточного аустенита. Значительно усиливается интенсивность пика MoO_3 . Максимальное содержание углерода в мартенсите зафиксировано на рентгенограмме образца № 7. Линия (112) γ -Fe расщепляется на пару линий высокоуглеродистого мартенсита (112) и [(121)(211)].

Размытие линий на рентгенограммах образцов после ПДО свидетельствует о напряженном состоянии обработанной поверхности в результате фазового наклепа, что несколько усложняет идентификацию рентгенограмм. Уширение рентгеновских линий сильнее при более интенсивном энергетическом воздействии на поверхность, что зафиксировано на рентгенограммах образцов № 6 и 7. Несмотря на довольно высокое содержание аустенита, твердость в поверхностных слоях увеличится за счет фазового наклепа в результате обратимых α - γ -превращений. В табл. 3 приведены результаты определения содержания углерода в мартенсите и остаточного аустенита в поверхностных слоях образцов из стали У8 после различных вариантов ПДО.

Известно, что при 0,7 % С в мартенсите твердость достигает максимального значения HRC 64



и при дальнейшем повышении содержания углерода она существенно не увеличивается [12]. Повышение содержания углерода в мартенсите при увеличении количества импульсов связано с насыщением обрабатываемой поверхности углеродом из плазмообразующей среды. Максимальное содержание углерода в мартенсите зафиксировано в образце № 7. Это связано с тем, что, помимо насыщения поверхности углеродом из плазмообразующей среды, часть его диффундирует в поверхностные слои при ПДО непосредственно из предварительно нанесенного покрытия (сажи). Количество остаточного аустенита возрастает при увеличении количества плазменных импульсов. После ПДО его содержание в поверхностном слое может достигать 30 %, что существенно выше, чем после печной закалки. Это может быть обусловлено более высокой температурой нагрева при ПДО, а также большой скоростью охлаждения, препятствующей процессу распада аустенита. Аналогичные результаты имеют место при обработке поверхности и другими концентрированными источниками энергии [13, 14].

Выводы

1. Нанесение поглощающих покрытий на обрабатываемую поверхность неоднозначно сказывается на процессе ПДО изделий. Положительный эффект зафиксирован при применении тонких (< 5 мкм) покрытий на основе углерода, например, сажи. При этом происходит незначительное усиление теплового потока за счет лучистой составляющей, а также увеличение тетрагональности мартенсита за счет диффузии углерода в поверхностные слои.

2. Толстые (≈ 40 мкм) покрытия на основе типографской краски и покрытия из фосфата цинка (≈ 8 мкм) с большим электросопротивлением играют роль барьера для потока энергии, приносимой электронами, нейтральными атомами и ионами. Увеличение лучистой составляющей не компенсирует эти потери, что приводит в целом к снижению интенсивности нагрева поверхности.

3. При ПДО изолированного изделия поверхность его находится под отрицательным плавающим потенциалом относительно потенциала прилегающего слоя плазмы. Это приводит к заметному уменьшению теплового потока, приносимого элект-

ронной составляющей и исключению объемного джоулевого тепловыделения, что в результате снижает плотность энергии в пятне обработки ниже уровня, необходимого для эффективного модифицирования структуры поверхности.

4. Исследования подтвердили, что при ПДО можно осуществить легирование поверхности за счет переноса материала эродируемого электрода. Для эффективной реализации этого процесса ПДО необходимо проводить в режиме, когда эродируемый электрод является анодом по отношению к поверхности изделия.

1. *Борисов Ю. С., Тюрин Ю. Н.* Упрочняющая обработка деталей машин высокоэнергетической плазмой. — Киев, 1991. — 36 с. — (Препр. / АН Украины. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона; ИЭС-92.-1).
2. *Тюрин Ю. Н., Колесниченко О. В., Цыганков Н. Г.* Импульсно-плазменное упрочнение инструмента // Автомат. сварка. — 2001. — № 1. — С. 38–44.
3. *Коваленко В. С., Головки Л. Ф., Черненко В. С.* Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. — Киев: Техніка, 1990. — 192 с.
4. *Кисилевский Л. И., Морозов В. А., Снопко В. Н.* Свойства и применение импульсных высокоэнтальпийных сверхзвуковых плазменных струй // Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А. И. Морозова. — Минск: Наука и техника, 1974. — 400 с.
5. *Борисов Ю. С., Колесниченко О. В.* Исследование амплитудно-временных характеристик импульса тока при плазменно-детонационной обработке изделий // Автомат. сварка. — 2000. — № 12. — С. 56–60.
6. *Электроискровое легирование металлических поверхностей* / Г. В. Самсонов, А. Д. Верхотуров, Г. А. Бовкун, В. С. Сычев. — Киев: Наук. думка, 1976. — 219 с.
7. *Соловьев В. А.* Определение коэффициента поглощения системы покрытие–металл в условиях действия излучения CO_2 -лазера // Физика и химия обраб. материалов. — 1988. — № 3. — С. 102–106.
8. *Миркин Л. И.* Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов: Справочник. — М.: Машиностроение, 1979. — 134 с.
9. *Бекренев А. Н., Константинов М. П.* Рентгеновское определение количества остаточного аустенита в сталях // Зав. лаб. — 1995. — № 2. — С. 42–43.
10. *Райзер Ю. П.* Физика газового разряда. — М.: Наука, 1992. — 536 с.
11. *Справочник по технологии лазерной обработки* / Под ред. В. С. Коваленко. — Киев: Техніка, 1985. — 167 с.
12. *Гуляев А. П.* Металловедение: Учеб. для вузов. 6-е изд. — М.: Металлургия, 1986. — 544 с.
13. *Гуреев Д. М.* Влияние лазерного воздействия на перераспределение углерода в поверхностных слоях инструментальных сталей // Физика и химия обраб. материалов. — 1994. — №1. — С. 27–39.
14. *Особенности упрочнения стали У8 с помощью импульсно-плазменной обработки* / М. Н. Волошин, Д. А. Гасин, И. Р. Кораблева, Н. Н. Скляренко // Там же. — 1994. — № 1. — С. 16–20.

Solving a nonstationary equation of heat conductivity by the finite difference method enabled determination of the temperature fields of surface layers during plasma-detonation processing (PDP) of items. Obtained theoretical dependencies were the basis for conducting analysis of the kinetics of phase transformations in the structure of U8 steel at PDP.

Поступила в редакцию 19.07.2002