

ЛАЗЕРНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ЛЕГИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ПОКРЫТИЙ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Современные электрофизические, термические и другие методы наращивания изношенных поверхностей деталей различными материалами с целью восстановления геометрических форм и размеров, а также упрочнения не всегда гарантируют высокое качество и соответствие техническим условиям. Однако они применяются для восстановления широкой номенклатуры деталей машин и ввиду острой необходимости для восстановления ответственных деталей двигателей внутреннего сгорания: коленчатых валов, распределительных валов и др.

Анализом известных способов восстановления деталей гальванопокрытиями установлено, что перспективным для ремонтного производства может быть применение легированных покрытий на основе железа.

В сравнении с обычными железными покрытиями следует отметить значительные преимущества легированных железных покрытий, получаемых в стабильных электролитах. Они обладают высокими физико-механическими свойствами, износостойки и в определенной мере удовлетворяют условиям работы в различных сопряжениях.

Важным резервом повышения качества восстановления и упрочнения деталей гальванопокрытиями может быть их специальная химико-термическая обработка. В таких случаях к покрытиям предъявляются особые требования: высокая прочность сцепления, значительная толщина покрытия, термическая стойкость, наличие в них легирующих элементов и др. [1, 4].

В связи с этим целесообразно было решить задачу получения прочносцепленных железных покрытий, легированных специальными элементами, повышающими их свойства и способность к упрочнению различными методами (рис. 1 и 2). Как установлено исследованиями [4, 6, 7], лазерная обработка потоками плотности энергии до 10^9 Вт/см² дает возможность осуществить широкий спектр структурно-фазовых превращений в легированных гальванических покрытиях и получать свойства, приемлемые для различных условий их эксплуатации.

Методика исследований и материалы

Объект исследований – процесс электролиза в многокомпонентном метилсульфатно-хлористом электролите, свойства прочносцепленных железных легированных покрытий, нанесенных на образцы и детали, изготовленные из конструкционных сталей, серых, специальных и высокопрочных чугунов. Процесс лазерной обработки железных легированных покрытий и восстановленных деталей.

Структуру и твердость материалов и покрытий изучали металлографическими методами, используя микроскопы МИМ-8, МБИ6, ПМТ-3М и электронный микроскоп РЭМ-200.

Механическую обработку шлифов, образцов и деталей выполняли общепринятыми методами и согласно техническим требованиям. Лазерную обработку СО₂-лазером в непрерывном режиме осуществляли потоком энергии 0,5–0,6 кВт с длиной волны излучения $\lambda = 10$ мкм. Интервалы изменения технологических режимов при исследовании лазерной обработки железных легированных покрытий определяли согласно рекомендациям для обработки сталей и чугунов [5] с учетом теплофизических свойств материалов и энергетических характеристик потока излучения. Обработанные материалы оценивали по характеристикам и свойствам поверхности насыщения и диффузионного слоя по ГОСТу 20495-75.

В литературе отсутствуют данные о процессах обработки железных легированных гальванических покрытий интенсивными потоками энергии, полученной квантовыми генераторами. В связи с этим для определения режимов, обеспечивающих различные варианты обработки железных леги-

ванных покрытий, были проанализированы факторы, влияющие на их свойства и структурно-фазовые превращения. Полученные расчетом режимы использовали в экспериментальных исследованиях для обработки образцов, восстановления и упрочнения деталей. Оценку лазерного воздействия производили изучением внешних зон диффузионного слоя, общей и эффективной толщины диффузионного слоя конфигурационных эффектов шероховатой поверхности.

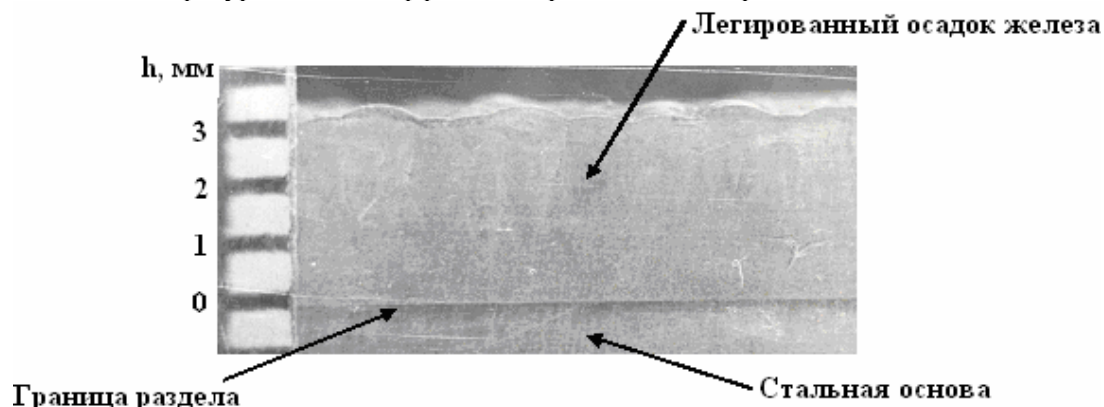


Рис. 1. Толстослойные железные легированные покрытия, полученные в многокомпонентном метилсульфатно-хлористом электролите, нанесенные на цементированную и закаленную сталь (HRC 54–56)

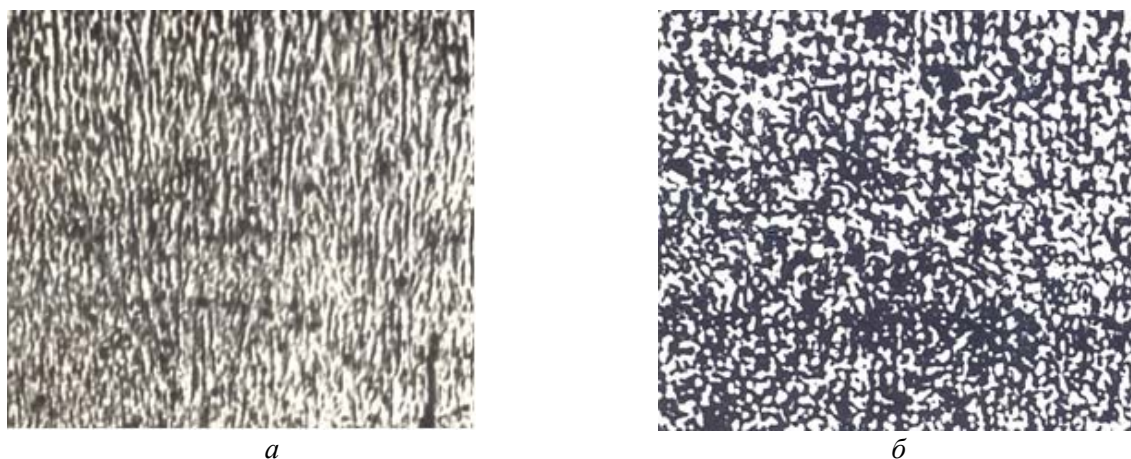


Рис. 2. Структура железного легированного покрытия: а – волокнистое строение; б – зернистое строение (800×4)

Результаты исследований

Наиболее рациональной и эффективной для упрочнения легированных железных покрытий может быть их обработка потоками энергии высокой интенсивности, обеспечивающая протекание процессов структурных превращений со значительно более высокими скоростями, чем обработка традиционными методами.

Для процесса обработки материала покрытия потоками энергии, характеризующимися плотностью P_u , скоростью перемещения или временем воздействия t_0 , условия качественной обработки в общем виде можно представить выражением

$$AP_{кmin}t_0 < A(P_u \pm \Delta P_u)t_0 < AP_{кmax} \cdot t_0, \quad (1)$$

где P_k – критические значения плотности энергии; ΔP_u – изменение плотности потока в процессе обработки; A – комплексный параметр, характеризующий влияние различных факторов на процесс обработки.

Изменяя режимы обработки (плотность потока, время воздействия, другие факторы), можно варьировать уровнем воздействия излучения на обрабатываемое покрытие, изменять физико-механические свойства и геометрические характеристики поверхности и диффузионного слоя.

Время воздействия непрерывного излучения на обрабатываемую поверхность t_0 в любой точке при перемещении луча диаметром d_l описывается известным уравнением:

$$t_o = \frac{2t_d \sqrt{r_l^2 - a^2}}{\sqrt{b^2 + (\pi \cdot d_\partial)^2}}, \quad (2)$$

где r_l – радиус луча потока излучения, мм; a – расстояние точки от диаметральной оси направления движения, мм; b – подача, шаг обработки, мм/об; d_∂ – диаметр детали, мм; t_∂ – период вращения детали, с.

Максимальную энергию, поглощенную элементарным участком гальванопокрытия, который пересекает поток излучения в диаметральной плоскости, совпадающей с направлением движения, можно определить по уравнению

$$W = \frac{P_u \cdot A \cdot d_l \cdot t_\partial}{\sqrt{b^2 + (\pi \cdot d_\partial)^2}}. \quad (3)$$

Комплексный параметр A может учитывать коэффициент поглощения энергии излучения, зависящий от температуры и характера спектров лазерного излучения, спектров поглощения, излучения, компонентов обрабатываемой среды; шероховатость поверхности, ее отражательную или излучательную способность; выделение или поглощение энергии в процессе фазовых превращений. В зависимости от вида обработки и теплофизических свойств материала гальванопокрытия в комплексный параметр можно вводить другие факторы, оказывающие влияние на процесс.

Для участков, расположенных на расстоянии a от оси направления перемещения, энергию, поглощенную элементарным участком поверхности, можно определить по формуле

$$W = \frac{2P_u \sqrt{r_l^2 - a^2} \cdot t_d}{\sqrt{b^2 + (\pi d_\partial)^2}}. \quad (4)$$

По данным работы [5], для процессов фазовых превращений при упрочнении многокомпонентной системы определяющую роль играют скорости нагрева, охлаждения и соотношения температур электронного газа (T_e) и кристаллической решетки (T_i). На наш взгляд, приближенное определение этого соотношения может служить критерием обоснования технологических режимов или вероятности достижения условий фазовых превращений в легированных гальванических покрытиях. Для их определения можно воспользоваться известным уравнением [5]:

$$(T_o - T_i)_{\max} = \frac{2q}{\alpha \sqrt{\pi a \tau}}, \quad (5)$$

где q – плотность потока излучения; α – коэффициент теплообмена между электронами и решеткой; a – коэффициент температуропроводности электронного газа; τ – время воздействия лазерного излучения.

Представленное уравнение наиболее вероятно характеризует процесс воздействия лазерного излучения на чистые металлы с более совершенным кристаллическим строением. Для гальванического железного покрытия его можно применить только для приближенных расчетов. Подставив в него значения плотности потока и время воздействия из уравнений (1)–(4), для процессов обработки непрерывным излучением при перемещении материала получим

$$(T_e - T_i)_{\max} = \frac{2(P_u + \Delta P_u)A}{\alpha \cdot \sqrt{\pi a \cdot \frac{d_l \cdot t_\partial}{\sqrt{b^2 + (\pi d)^2}}}}. \quad (6)$$

Учитывая сложность расчетов в многокомпонентных материалах и эффекты передачи энергии между фазами с различной теплоемкостью, целесообразно рассчитывать температуру по средней теплоемкости материала. Для технологических расчетов температуру поверхностного слоя покрытия можно определить из выражения

$$T_n = \frac{K_1 W}{K_2 (c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots + c_n \cdot m_n)}, \quad (7)$$

где c и m – теплоемкости и массы компонентов или определенных фаз структуры материала покрытия; K_1 – коэффициент, учитывающий поглощение энергии; K_2 – коэффициент, учитывающий взаимодействие тепловых потоков между фазами материала покрытия.

Используя представленные уравнения и зависимости, теплофизические характеристики веществ, можно рассчитать требуемые технологические режимы или провести проверочные расчеты по обработке материалов, деталей.

Для повышения качества или получения особых свойств целесообразно определить критические параметры режимов (плотность потока, время воздействия, температуру поверхностного слоя), обеспечивающие, например, полиморфные фазовые превращения, протекание химических процессов формирования аморфных фаз, интерметаллических соединений. Такие фазовые превращения, как испарение и оплавление поверхностного слоя, вызывающие изменение геометрических характеристик поверхности вследствие конфигурационных эффектов, допустимы в пределах требований к изделию.

Представленные уравнения (1)–(6) с лучшей достоверностью могут описывать явления процесса при условиях высокой однородности плотности потока энергии по нормальному сечению луча. В действительности, например у CO_2 -лазеров непрерывного действия, плотность потока энергии по диаметральному сечению луча имеет явно выраженные максимумы в центральных зонах. Проявление этого фактора обнаруживается экспериментально при варьировании режимами обработки железных легированных покрытий. Так, при плотности потока энергии, вызывающей в центральной зоне (воздействия луча) испарение, оплавление материала, при определенных временных циклах формируется семь кольцевых макрозон 1–7 (см. рис. 3) с характерными уровнями преобразования исходного поверхностного и глубинного состояний и формированием различных структур вследствие фазовых превращений, достигнутых при соответствующих температурах (рис. 3). При изменении плотности потока энергии луча и времени воздействия на железное легированное покрытие в пределах условий достижения температуры испарения и плавления до температур ниже критических значений, вызывающих определенное преобразование структуры поверхностного и глубинного слоев, была выявлена возможность получения широкого спектра различных состояний материала.

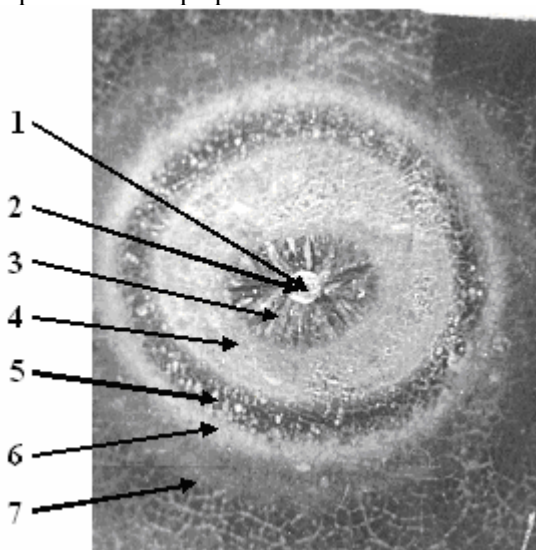


Рис. 3. Макрозоны структурных превращений железных легированных покрытий, обработанных непрерывным CO_2 -лазером (пояснения в тексте)

Металлографическими и методами электронной микроскопии было обнаружено, что на границах перехода и в пределах каждой макрозоны имеются различные микроструктуры и фазовые составляющие и в поверхностных, и в глубинных слоях покрытия. Их образование связано с уровнем энергетического воздействия при лазерной обработке, теплофизическими и химическими свойствами компонентов (рис. 4). Расчеты процессов, протекающих в обрабатываемом легированном покрытии в стадиях нагрева и охлаждения, представляют сложную задачу. Поэтому вывод о применении тех или иных режимов обработки можно сделать только при сопоставлении теоретических расчетов с экспериментальными данными.

Анализируя уровни лазерного воздействия, состояние поверхностных и глубинных структурных составляющих и сопоставляя фазовые переходы с теплофизическими характеристиками компонентов легированного покрытия, можно определить достигнутые температуры в характерных зонах и критические значения энергетических и временных режимов для получения тех или иных свойств и выявить приемлемые условия обработки.

Так, например, макрозона 4 характеризуется более толстым поверхностным слоем материала, подвергнутого аморфизации, состоящим из компонентов железного легированного покрытия и компонентов веществ, нанесенных на поверхность покрытия с целью повышения способности поглощения излучения и придания особых, специфических свойств (коррозионной стойкости, износостойкости и др.). Глубинные слои железного легированного покрытия, подвергнутые лазерному воздействию, характеризуются изменениями, проявляющимися в формировании новых составляющих структуры, границы которых ограничены условием теплового воздействия и значениями достигаемых температур нагрева и скорости охлаждения. Режимы лазерной обработки, обеспечивающие формирование аморфного состояния во внешней зоне поверхностного слоя, были использованы для упрочнения деталей восстановленных железными легированными покрытиями, полученными в многокомпонентном метилсульфатно-хлористом электролите. При этом для поверхностей, работающих в условиях трения при высокой и малой скорости скольжения, режим обработки соответствовал формированию аморфизированного поверхностного слоя с испарением и плавлением вершин микрорельефа при сохранении геометрических размеров в поле допуска (рис. 5).

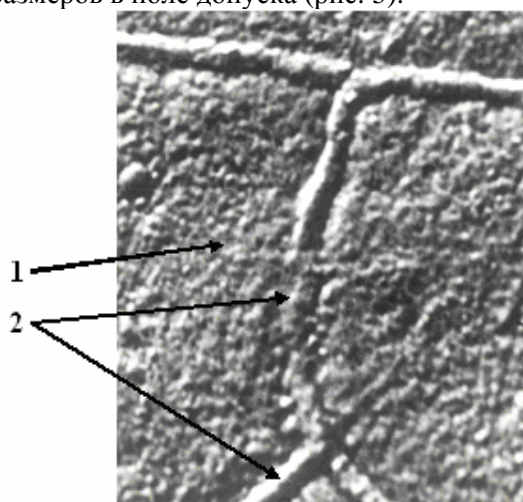


Рис. 4. Поверхность аморфизированного слоя железного легированного покрытия, обработанного CO_2 -лазером (ув. 3000×2): 1 – аморфизированный поверхностный слой; 2 – аморфизированный слой в зонах микротрещин

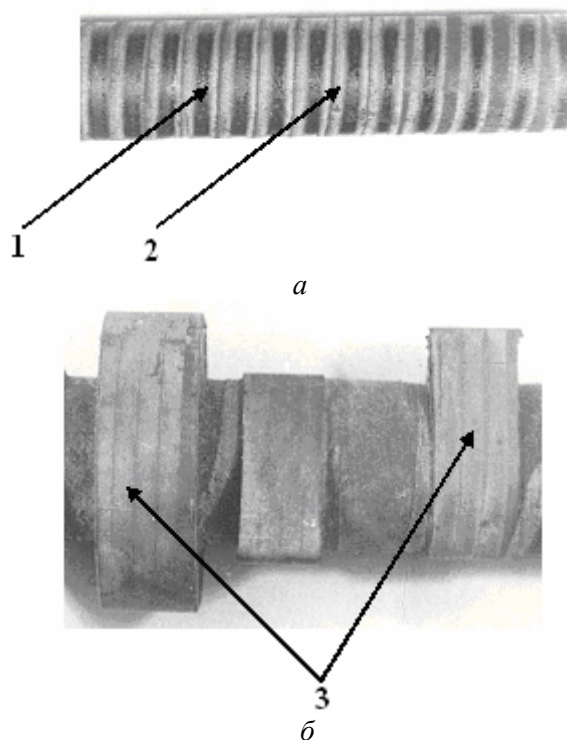


Рис. 5. Поверхность деталей ДВС, восстановленных железными легированными покрытиями и обработанных непрерывным CO_2 -лазером: а – палец поршневой; б – вал распределительный (пояснения в тексте)

Стандовыми и эксплуатационными испытаниями опытных партий распределительных и коленчатых валов, восстановленных железными легированными покрытиями, установлено преимущество лазерной обработки при режимах, обеспечивающих формирование на поверхности аморфизированного слоя. Так, опорные шейки (ОП) распределительных валов, обработанных лазером (ЖЛГ ОЛ) и испытанных на стенде с применением абразива (см. рис. 6,а), имели износ на 30–35% меньше, чем необработанные (ЖЛГ). Так изнашивались диаметры кулачков (К ВП Д – впускные; К ВыП Д – выпускные). Наибольший эффект повышения износостойкости проявился у обработанных лазером впускных (К ВП К) и выпускных (К ВыП К) кулачков. Износ их высоты был в 2–2,2 раза меньше, чем у необработанных (см. рис. 6,б). При эксплуатационных испытаниях автомобилей были получены аналогичные результаты по износу для коленчатых валов двигателей, восстановленных железными легированными покрытиями (Ж) и обработанных лазером (ОЛ). Износ восстановленных и упрочненных лазером коренных шеек (КШ) и вкладышей (ВК) оказался в 2,5–2,8 раза меньше, чем у неупрочненных (см. рис. 7).

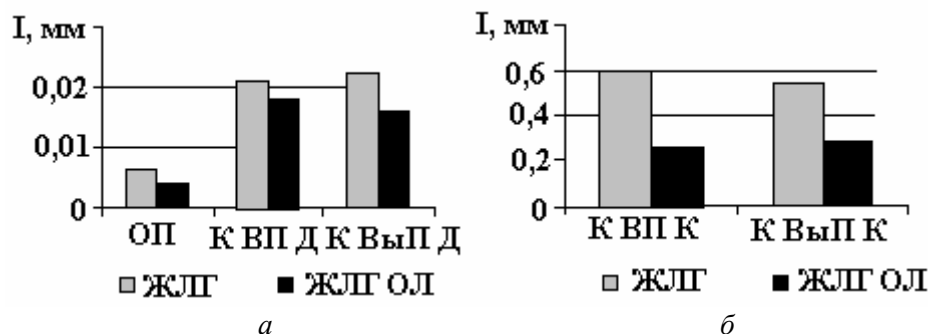


Рис. 6. Износ I распределительных валов двигателя ДВС, восстановленных железными легированными покрытиями (ЖЛГ) и обработанных лазером (ЖЛГ ОЛ): а – износ опорных шеек; б – износ кулачков (пояснения в тексте)

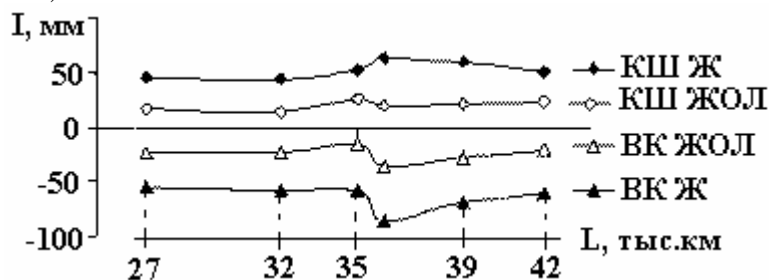


Рис. 7. Износ I коренных шеек и вкладышей коленчатых валов двигателя ДВС в зависимости от пробега автомобиля L , восстановленных железными легированными покрытиями (ЖЛГ) и обработанных лазером (ЖЛГ ОЛ)

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования процесса получения и обработки железных легированных покрытий интенсивными потоками энергии лазерного излучения дают основание охарактеризовать основные преимущества указанного метода обработки: его высокую скорость; возможность изменения структуры и фазового состояния легированных покрытий и их свойств в широких пределах; возможность местной обработки без нарушения исходной структуры и свойств материала деталей. Применение метода лазерной обработки в ремонтном производстве раскрывает широкие перспективы повышения качества и эффективности процесса восстановления деталей.

Выводы

Теоретическими расчетами критических значений плотности потока энергии обработки, кинематических и временных характеристик процесса, выполненными на основе современных теорий взаимодействия потока энергии с обрабатываемым материалом, определены приемлемые для технологических целей режимы, при которых достигается изменение свойств поверхностного и глубинного слоя железных легированных покрытий.

Экспериментальными результатами подтверждены теоретические положения о взаимодействии потока энергии с материалом железных обычных, железных легированных гальванопокрытий.

Экспериментами установлено, что изменением режима обработки железных легированных гальванических покрытий возможно получение различных структур в поверхностном и глубинном слоях покрытия.

Предложен метод определения критических энергетических состояний обрабатываемых покрытий, при которых достигаются фазовые и структурные превращения.

Железные легированные покрытия, упрочненные CO₂-лазером при режимах, обеспечивающих формирование аморфизированного слоя, существенно повышают износостойкость поверхности деталей подвижных сопряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петров Ю.Н.* Гальванические покрытия при восстановлении деталей. М.: Колос, 1965. 136 с.
2. *Вячеславов П.М.* Электролитическое формование. Л.: Машиностроение, 1979. 198 с.
3. *Гологан В.Ф.* Влияние условий электролиза на износостойкость электролитических железных покрытий применительно к ремонту деталей автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин. Автореферат. дис.канд. техн. наук, 1968. 22 с.
4. *Плешка Е.Д.* Восстановление деталей легированными гальванопокрытиями // Simpozionul de Comunicări științifice cu participare internațională în domeniul reparațiilor de mașini. Rezumate. Chișinău, 1996. P. 27–28.
5. *Рыкалин И.И., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н.* Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. М: Машиностроение, 1985. 496 с.
6. *Плешка Е.Д.* Восстановление стальных и чугунных коленчатых валов двигателей легированными железными покрытиями // Теория и практика противокоррозионной защиты в отраслях народного хозяйства Молдавской ССР: Тезисы докладов научно-техн. конференции. 1984.
7. *Плешка Е.Д.* Лазерное упрочнение деталей восстанавливаемых железными покрытиями. Тезисы докладов IX Всесоюзной научно-техн. конференции по электрохимической технологии // Гальванотехника 87. Казань, 1987.
8. Рекомендации по ускоренным испытаниям восстановленных деталей. ГОСТНИТИ. М., 1979.
9. ГОСТ 17510-72. Надежность изделий. Машиностроение. 20 с.

Поступила 28.02.07

Summary

In work results of researches of process of laser processing, iron alloyed coverings, structures and are submitted to wear resistance of the surfaces received in metilsulphate-chloride electrolyte. It is established, that in poly componential electrolyte it is possible to receive coverings thickness not less 3 mm with a fibrous, granular and layered structure of structure. At laser processing CO₂ of alloyed iron coverings, formation of the numerous macro zones described by various structural - phase transformations is possible. Restored surfaces of details of engines DVS, at modes providing formation of an amorphous layer, possess wear resistance in some times higher, than the raw galvanic alloyed coverings.
