

ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И НАПЛАВКИ

© 2012 А.А. Гусев

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Поступила в редакцию 20.07.2012

Экспериментально исследован процесс легирования с использованием импульсного лазерного излучения. Установлено, что импульсное лазерное легирование является эффективным методом модификации поверхности как для тонких слоёв (до 100 мкм), так и для слоёв с большой глубиной залегания примеси (до 5 мм). Описаны практические примеры восстановления методом импульсной лазерной наплавки изношенных, дефектных, разрушенных в ходе эксплуатации поверхностей изделий. Предлагается перспективный комбинированный способ модификации поверхностей деталей методом импульсной лазерной наплавки с последующим легированием.

Ключевые слова: импульсное лазерное излучение, глубокое легирование, наплавка, модификация поверхности, восстановление дефектов поверхности деталей, гидродинамика расплава.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими характеристиками эксплуатационных свойств оборудования, применяемого в машиностроительной, нефтяной, газовой, химической и других отраслях экономики являются: надёжность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность. Работоспособность оборудования в значительной степени определяется износом базовых деталей. Именно эти детали ограничивают ресурс работы оборудования. Проблема износа решается разнообразными методами модификации поверхности деталей с целью получения высокой твёрдости. Одними из способов повышения эксплуатационных характеристик изделий является поверхностное легирование и наплавка импульсным лазерным излучением [1].

Модификация поверхности с целью увеличения износостойкости деталей методом легирования и наплавки импульсным лазерным излучением решается по трём основным направлениям:

1. Импульсное лазерное легирование.
2. Импульсная лазерная наплавка.
3. Импульсная лазерная наплавка с последующим легированием.

Целью настоящей работы является анализ перспектив практического применения импульсного лазерного легирования и наплавки.

ИМПУЛЬСНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ

Режимы легирования, представляющие наибольший практический интерес, можно разделить на две группы:

1. Создание тонких (до 100 мкм) поверхностных слоёв с износостойкими, высокотвёрдыми,

температуростойкими свойствами путём введения в ванну расплава модификаторов.

На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты численного моделирования процесса импульсного лазерного легирования для двух способов введения примеси в расплав: из предварительно нанесённого покрытия хрома толщиной 5 мкм; из газовой фазы азота [1], в различные моменты времени.

Цифрами указаны относительные значения концентрации легирующей примеси, штриховой линией – положение границы фронта плавления. Из рис. 1 и рис. 2 видно, что для импульсного лазерного легирования характерна “мелкая” ванна. Расплав движется в тонком слое вдоль поверхности от более нагретого центра к менее нагретой периферии, а затем вдоль дна обратно к центру, образуя тем самым замкнутые торои-

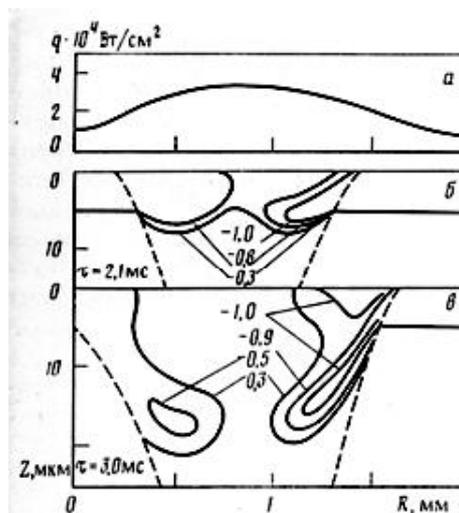


Рис. 1. Поле концентрации примеси при легировании железа хромом из предварительно нанесенного покрытия толщиной 5 мкм; зависимость $q(r)$ имеет один локальный максимум и один локальный минимум

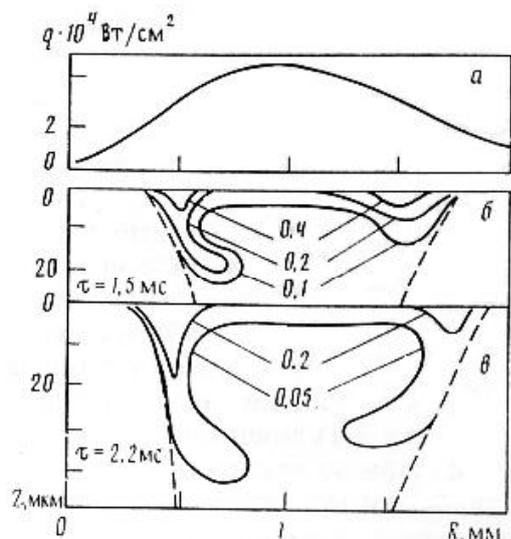


Рис. 2. Поле концентрации примеси при легировании титана азотом из газовой фазы в различные моменты времени

дальние потоки в осевом сечении (термокапиллярная конвекция Марангони). За время импульса порядка $1 \div 5$ мс расплав успевает сделать не более $1 \div 2$ оборотов (рис. 3) [2].

В результате после затвердевания в расплавленной зоне образуются области с повышенным содержанием (периферия и центр расплава) и области с пониженным содержанием или полным отсутствием (сердцевина тора) легирующих

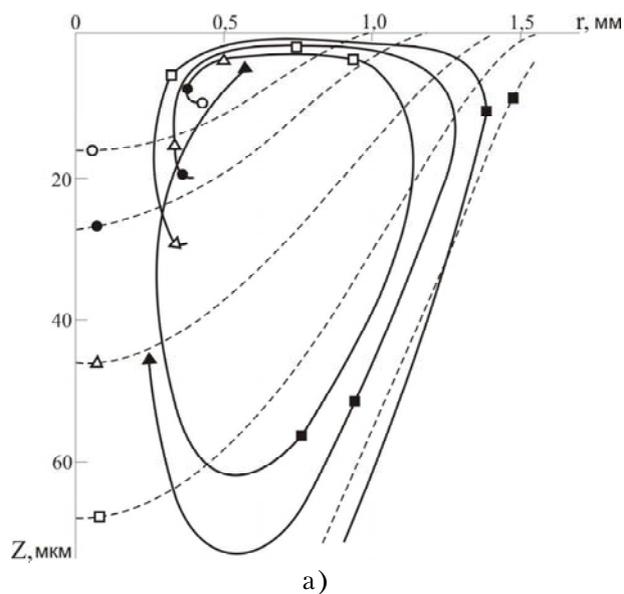


а)

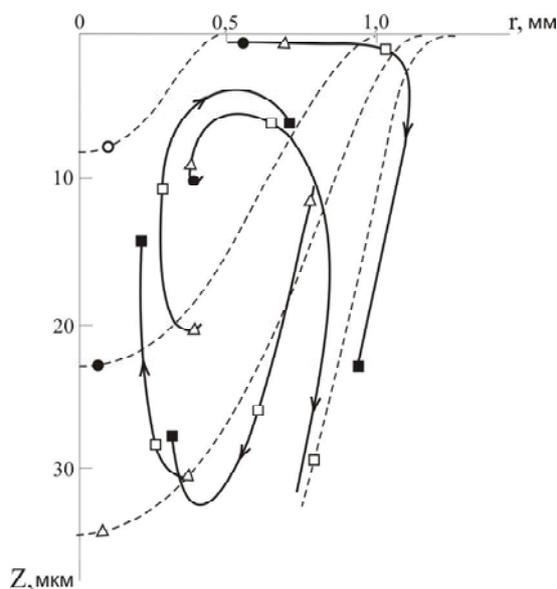


б)

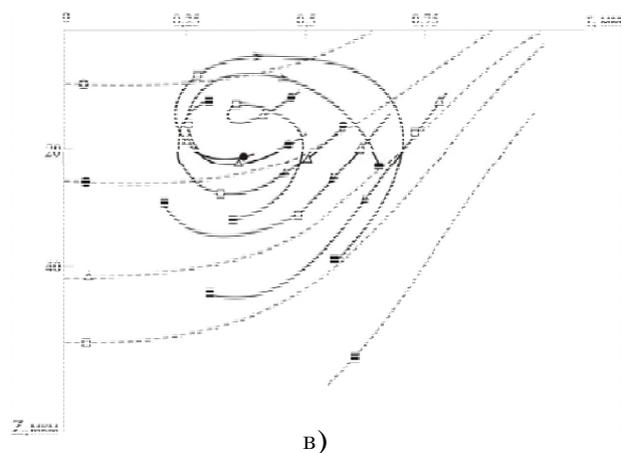
Рис. 4. Конвективные потоки в ванне расплава: а – радиальные, б – продольные



а)



б)



в)

Рис. 3. Расчётные траектории движения частиц расплава при плавлении титана.
 а – $q_0 = 5 \cdot 10^4$ Вт/см², $\kappa = 50$ см²;
 б – $q_0 = 5 \cdot 10^5$ Вт/см², $\kappa = 100$ см²;
 в – $q_0 = 5 \cdot 10^5$ Вт/см², $\kappa = 150$ см²

компонентов. На рис. 4 показаны поперечный (на глубине 50 мкм) и продольный шлифы зоны расплава титана в атмосфере азота.

Отчётливо видны два характерных вихря, представляющие собой меридиональное сечение замкнутых потоков Марангони в спокойной ванне [3]. Поэтому поверхности изделий, легированных с использованием импульсного лазерного излучения, характеризуются значительным разбросом по микротвёрдости и, как следствие, незначительным улучшением износостойкости деталей.

Таким образом, для улучшения эксплуатационных свойств деталей необходимо увеличивать глубину проникновения легирующих элементов в расплав. Важными параметрами также являются однородность состава, и средняя концентрация легирующей примеси. Достигнуть поставленной цели возможно, повышая интенсивность тепло- и массопереноса легирующей примеси в микрообъёмах расплава, путём формирования, в совокупности с потоками Марангони, вертикальных потоков, направленных от поверхности в глубь материала.

2. Легирование с большой глубиной залегания примеси (более 1 мм). Для большой глубины проплавления ($4 \div 5$ мм) характерны плотности мощности излучения порядка $10^6 \div 10^7$ Вт/см², что неизбежно приводит к перегреву жидкости и, как следствие, выплеску расплава. Обеспечить большую глубину продвижения фронта плавления без нарушения устойчивости объёма жидкого металла при импульсном лазерном воздействии можно только за счёт формирования в расплаве парогазового канала (ПГК) и транспортировки излучения на его дно. Основными механизмами теплопередачи при глубоком плавлении металла лазерным излучением миллисекундной длительности являются: теплопроводность, перенос конвективными потоками Марангони, формирование ПКГ и перемещение эффективного теплового источника вглубь ванны расплава. Превалирующим становится последовательно первый, второй и третий из перечисленных механизмов. При этом зарождение ПГК становится возможным после образования лунки критической кривизны [4]. На рис. 5 представлено фото продольного осевого сечения расплава металла под действием профилированного импульса излучения со следующими параметрами: $E_{\text{имп.}} = 20$ Дж; $\tau_{\text{имп.}} = 15$ мс; $h_p = 6,5$ мм; $d_{\text{ср.р.}} = 0,65$ мм; $h_p/d_{\text{ср.р.}} = 10$, где $E_{\text{имп.}}$ – энергия импульса, $\tau_{\text{имп.}}$ – длительность импульса, h_p – глубина расплава, $d_{\text{ср.р.}}$ – средний диаметр расплава, $h_p/d_{\text{ср.р.}}$ – аспектное отношение.

На рис. 6а по контрасту окраски различных фаз видно, что материал примеси по объёму

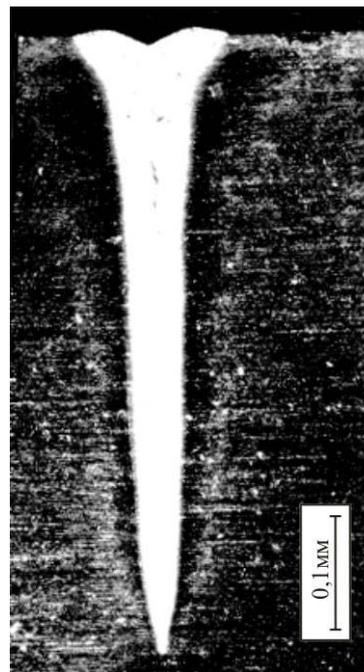


Рис. 5. Фото продольного осевого сечения расплава металла в условиях “кинжального” проплавления

ванны расплава распределён неравномерно. Имеется выраженная неоднородность по глубине. В верхней части ванны расплава концентрация примеси выше, имеется неоднородность в радиальном направлении на любой фиксированной глубине. Эта неравномерность связана с турбулентным характером течения жидкого металла. В настоящей работе исследовалась однородность распределения примеси от кратности лазерной обработки. Однородность примеси определялась в относительных единицах по тоновому контрасту продольных шлифов на основе фотометрирования чёрно-белого изображения шлифов вдоль заданного контура. Фотометрирование проводилось вдоль отрезка прямой, расположенной параллельно облучаемой поверхности (рис. 6). На рис. 7 приведены результаты измерения плотности почернения для однократного (рис. 6а) и четырёхкратного (рис. 6б) облучения, полученные для глубины 250 мкм.

Установлено, что значение среднеквадратичного отклонения плотности почернения для однократного облучения составляет – 13,6, для четырёхкратного – 7,5. Полученные данные свидетельствуют о том, что увеличение кратности облучения существенно увеличивает равномерность распределения легирующей примеси. Аналогичные данные получены на различных глубинах от облучаемой поверхности. Среднеквадратичное отклонение для четырёхкратного облучения в среднем в 1,8 x 2,0 раза меньше, чем для однократного.

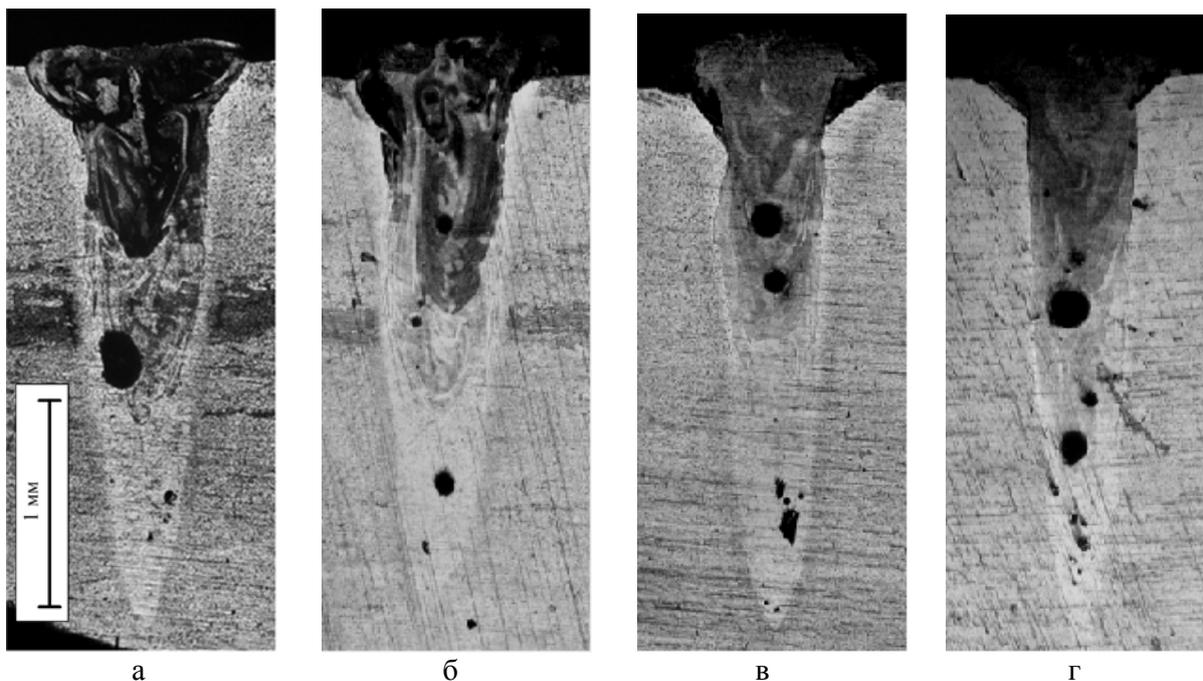


Рис. 6. Вид продольных шлифов на образцах Ti-TiN₂ облучённых в среде азота с энергией в импульсе излучения 15 Дж:
а – однократное; б – двухкратное; в – трёхкратное; г – четырёхкратное облучение

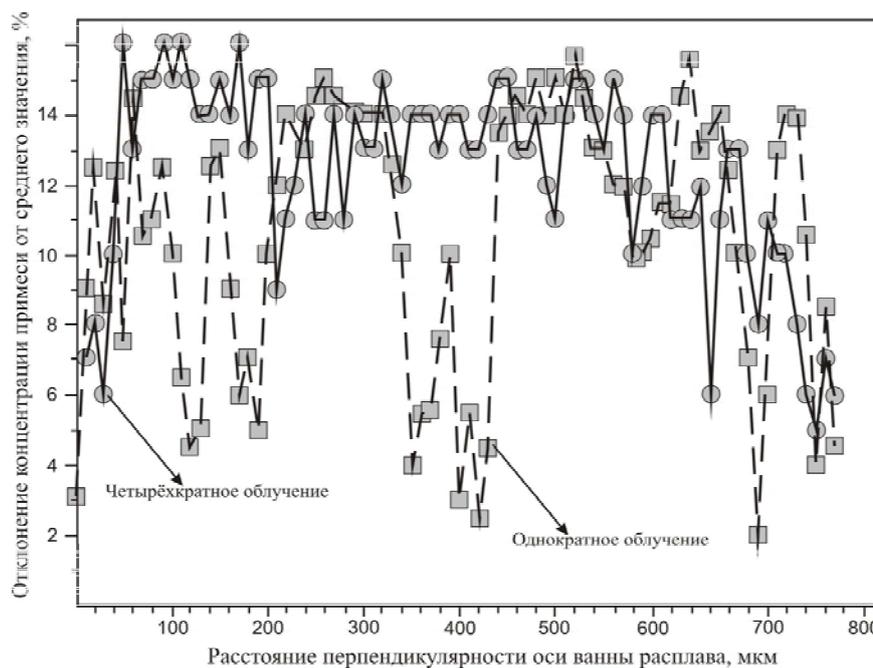


Рис. 7. Распределение плотности почернения на шлифах вдоль линии, перпендикулярной оси ванны расплава на глубине 250 мкм

ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА

Импульсное лазерное излучение позволяет:
а) наплавлять поверхность деталей защитным слоем (до 100 мкм) интерметаллидов (FeMo; TiCo; FeTi и т.д.), обладающих высокой твёрдостью; б) восстанавливать изношенные и дефектные поверхности (режущий инструмент, штампы, литейные формы, пресс-формы и т.д.); в) за-

лечивать трещины (поверхностные, разгарные, труднодоступные и т. д.).

На рис. 8 и рис. 9 представлены образцы деталей, восстановленных методом импульсной лазерной наплавки. Наплавочный материал идентичен по составу материалу детали. На рис. 8а – вставка литейной пресс-формы остекления передней блок – фары автомобиля со следами механических дефектов. Рис. 8б – та же деталь

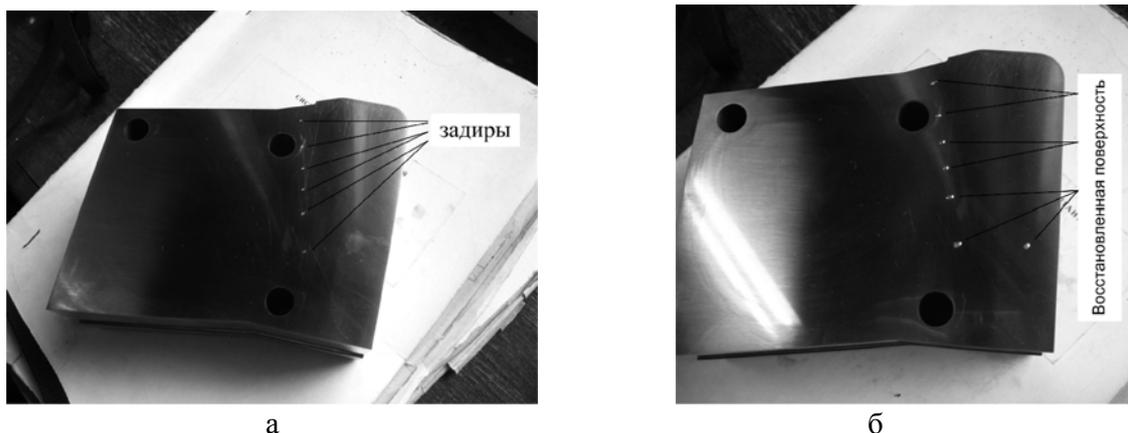


Рис. 8. Вставка литевой пресс-формы остекления передней блок-фары автомобиля
а – со следами механических дефектов; б – после лазерной наплавки

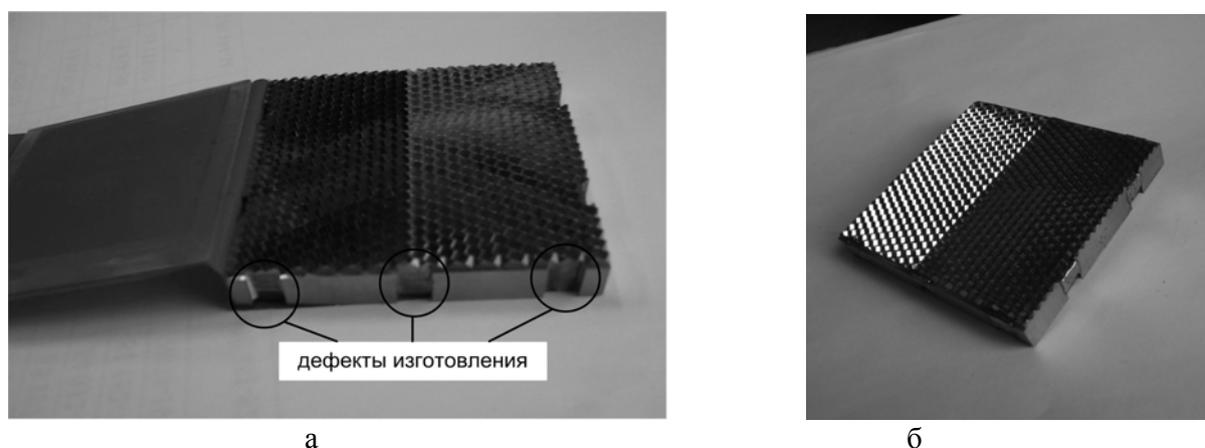


Рис. 9. Сегментная вставка отражателя литевой пресс-формы задней блок-фары автомобиля
а – со следами механических дефектов; б – после лазерной наплавки

после импульсной лазерной наплавки. На рис. 9а – сегментная вставка отражателя литевой пресс-формы задней блок – фары автомобиля, изготовленной с конструктивными отклонениями от требований чертежа. На рис. 9б – та же деталь после исправления дефектов конструкции методом импульсной лазерной наплавки. Материал наплавки – никель.

ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ НАПЛАВКА С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Эта технология позволяет создавать многослойные покрытия для специальных условий эксплуатации деталей и механизмов (абразивный износ, адгезионный износ, химическая среда и т. д.). На рис. 10а представлен корпус измерителя расхода нефти. С целью увеличения срока эксплуатации прибора в условиях высокоскоростного абразивного износа в химически активной среде (сырая нефть, сжиженный газ и т. д.) корпус прибора покрывают специальной защитной резиновой оболочкой для уменьшения ударного воздействия частиц абразива. На рис. 10б представлено фото

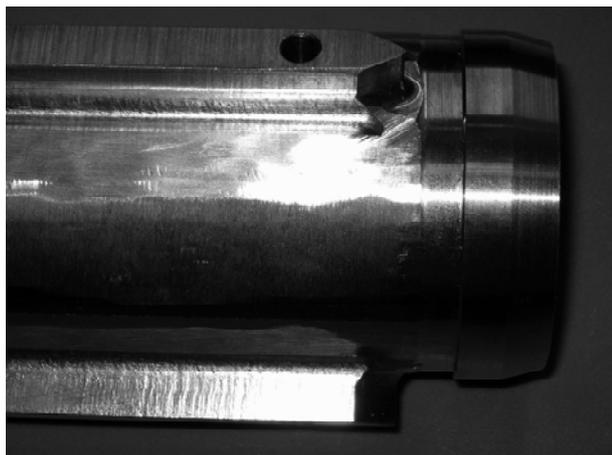
корпуса измерителя после 49 часов эксплуатации в нефтепроводе высокого давления, на котором отчетливо видны необратимые конструктивные изменения в результате абразивного износа.

Для успешной борьбы с абразивным износом необходимо увеличивать твердость и толщину упроченного слоя. Поэтому на поверхность корпуса измерителя из стали 95Х18Н10 с микротвердостью $35 \div 40$ НРС импульсным лазерным излучением наплавляли титан толщиной $250 \div 300$ мкм с последующим легированием наплавленного слоя в атмосфере азота. На рис. 11 представлен корпус измерителя после окончательной обработки.

На рис. 12 представлен микрошлиф поперечного сечения наплавленного слоя титана нитридным покрытием.

На рис. 13 представлен график зависимости микротвердости наплавленного слоя от глубины плавления.

Из графика видно, что наплавленный слой обладает высокой микротвердостью $50 \div 60$ НРС, что свидетельствует о наличии в переплавленной зоне карбидов титана (TiC) и интерметаллидов (TiCr, TiNi). Максимальной микротвердо-



Следы абразивного износа кромки

Рис. 10. Корпус измерителя расхода нефти:
а – новый корпус; б – корпус после 49 часов эксплуатации

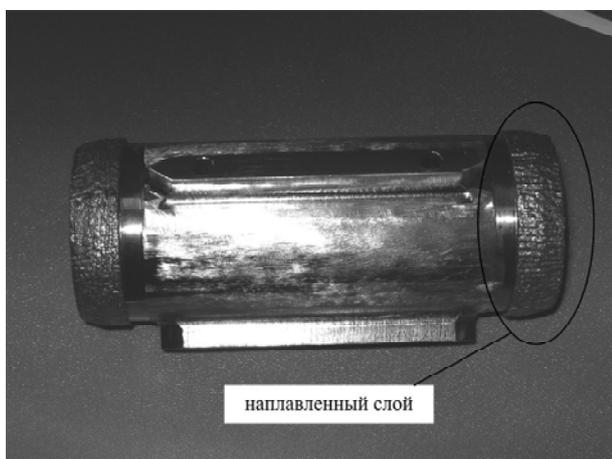


Рис. 11. Корпус измерителя после наплавки с последующим легированием

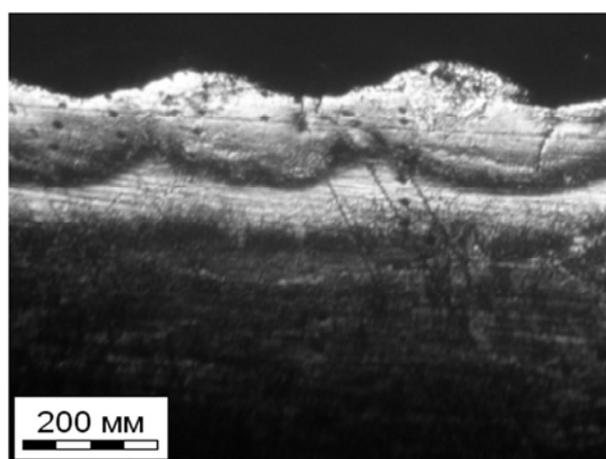


Рис. 12. Микрошлиф поперечного сечения наплавленного слоя титана с легированным нитридным покрытием

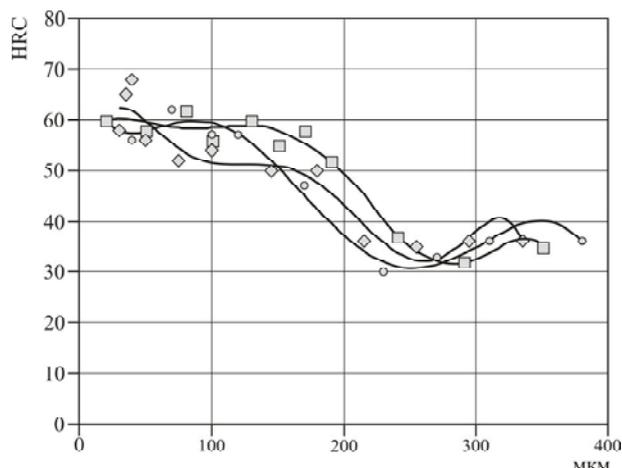


Рис. 13. График зависимости микротвёрдости наплавленного слоя от глубины нитридного слоя

стью 70 HRC обладает слой TiN_2 толщиной до 100 мкм.

Упрочнение поверхности измерителя расхода нефти комбинированным методом импульсной лазерной наплавки Ti с последующим леги-

рованием в среде азота позволило увеличить срок эксплуатации прибора более чем в 2 раза, что свидетельствует об эффективности применённого метода обработки поверхности детали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Импульсное лазерное легирование позволяет эффективно модифицировать поверхность деталей как в тонком приповерхностном слое (до 100 мкм), так и в слоях с большой глубиной залегания примеси (до 5 мм).

2. Импульсная лазерная наплавка является эффективным способом восстановления изношенных, дефектных, разрушенных в ходе эксплуатации дорогостоящих деталей и механизмов (штампы, литейные формы, пресс-формы и т.д.).

3. Комбинированный способ импульсной лазерной наплавки с последующим легированием открывает новые возможности упрочнения поверхности деталей (до 70 HRC), работающих в тяжёлых условиях эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Узлов А.А., Смуров И.Ю., Тагиров К.И., Гуськов А.Г. Массоперенос легирующих примесей при облучении металлов лазерным импульсом с немонотонным распределением энергии в луче // *Металлы*. 1991. № 2. С. 187 – 193.
2. Узлов А.А., Смуров И.Ю., Гуськов А.Г., Тагиров К.М. Особенности термокапиллярного движения расплава в зоне воздействия концентрированных потоков энергии на металлы // *Теплофизика высоких температур*. 1988. Т.26. №5. С.953-959.
3. Каюков С.В., Гусев А.А., Гусева Г.В., Зайчиков Е.Г., Нестеров И.Г. Структура конвективных потоков в условиях глубокого плавления металлов импульсным лазерным излучением миллисекундной длительности // *ФХОМ*. 2009. №6. С.5-11.
4. Каюков С.В., Гусев А.А. Устойчивость расплава в парогазовом канале при плавлении металлов импульсным лазерным излучением // *Квантовая электроника*. 1996. Т.23. №11. С. 5-8.

OUTLOOKS FOR PULSE-LASER ALLOYING AND PAD WELDING

© 2012 A.A. Gusev

Samara Branch of the P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences

Pulse-laser-aided experiments have been fulfilled for the alloying process study. The study confirmed that the pulse laser alloying is an affective technique for the surface modification of both thin layers (below 100µm) and layers with a larger alloy bedding depth (up to 5 mm). Practical examples of restoration of surfaces of worn-out, defective or wrecked during operation devices by means of the pulse-laser pad welding are described in the paper. An advanced combined method for the surface modification of devices is offered based on the pulse-laser pad welding followed by the alloying.

Key words: alloying, pad welding, pulse laser radiation, restoration of surfaces, strength.