

ИННОВАЦИОННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ: КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ



Цих С. Г.,
зав. лабораторией «Средства нагрева,
технологии термической и химико-
термической обработки» отдела № 23»
ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»



Мартынов В. Н.,
генеральный директор
ЗАО «ЗЭМ»

С авторами статьи можно связаться
по адресу: info@termohim.com

Современное машиностроительное производство в России, в основном, базируется на мощностях, которые были созданы в период 50-80-х годов XX века. Основной отличительной особенностью таких предприятий была и остается максимальная концентрация всех промышленных переделов (от заготовки до сборки) в рамках одной производственной площадки. При мощной государственной поддержке, предприятия, например, выпускающие оборонную и космическую продукцию, могли конкурировать с ведущими западными фирмами, а выпускающие гражданскую продукцию, особенно товары народного потребления, не отвечали современным требованиям. Отсутствие средств на постоянное техническое перевооружение промышленных предприятий в настоящих условиях привело к тому, что качество производимой продукции еще сильнее упало, соответственно снизился и спрос на нее. Опыт ведущих западных стран, например Германии, показывает, что каждое предприятие не в силах реализовать на собственных мощностях все технологическую цепочку. Как правило, фирмы, выпускающие определенную продукцию, имеют мощное конструкторское бюро и осуществляют отдельные переделы (допустим, механическую обработку и окончательную сборку). Все остальные технологические переделы (изготовление заготовки, штамповка, финишная термическая обработка, покрытия и др.) делаются по кооперации в специализированных фирмах.

В Россию понемногу приходит понимание эффективности разделения труда, в результате чего создаются специализированные предприятия, например, по нанесению покрытий, качественной высокоточной механической обработке, изготовлению заготовок, и др. Однако передел термической и химико-термической обработки в этот процесс оказался не вовлечен, хотя все окончательные свойства формируются именно там.

В последние годы, как у нас в России, так и за рубежом, появился ряд новых технологий термической и химико-термической обработки, которые позволяют получать качественно новые характеристики выпускаемых изделий. ООО «Термохим» при участии ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» и ЗАО «ЗЭМ», разработана концепция создания инновационных технологических центров упрочнения материалов, суть которой заключается в том, что координатор проекта (например, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» или ООО «Термохим») осуществляет поиск инвестора и базового машиностроительного предприятия, на котором будет создан технологический центр. Базовому предприятию достаточно отвечать следующим требованиям:

- выпускать машиностроительную продукцию;
- обладать свободными производственными площадями, электрическими мощностями и соответствующей инфраструктурой.

Вопрос, на каких условиях и с какими рисками привлекать инвестора, является

определяющим и зависит, прежде всего, от желания и возможности владельцев машиностроительного предприятия передать весь передел термической и химико-термической обработки создаваемому центру и пакет акций внешнему инвестору.

Инвестор осуществляет финансирование проекта создания технологического центра, включая закупку и монтаж оборудования, технологий, обучение персонала и др. Причем финансирование может быть разбито по этапам. На первом этапе необходимо приобрести и запустить современное стандартное оборудование, необхо-

димое для выполнения заказов базового машиностроительного предприятия. В этом случае технологический центр начнет функционировать с момента запуска под заводскую программу производства. Цена услуг по обработке для базового предприятия должна находиться на уровне себестоимости или с прибылью, не превышающей 1-3%.

На втором этапе инвестор финансирует приобретение инновационного оборудования и технологий термической и химико-термической обработки, не имеющих аналогов как минимум в России, а некоторых



Рис. 1. Технологический центр упрочнения материалов «Термохим» - «ЗЭМ».

технологий – и в мировой практике. Максимальный коммерческий успех технологического центра будет зависеть, прежде всего, от того, как менеджер компании сможет продвигать инновационный продукт (услуги по новейшим технологиям термической и химико-термической обработки) в своем регионе.

Такая схема реализации проекта позволит инвестору значительно сократить риски, связанные с отсутствием заказов, т.к. на первоначальном этапе технологический центр будет выполнять заказы базового предприятия, и точка безубыточности может быть пройдена в течение нескольких месяцев после его запуска.

Базовое предприятие несет еще меньшие риски по сравнению с инвестором, т.к. вкладывает в проект уже существующие и часто излишние площади и мощности, взамен получая самые современные услуги по термической и химико-термической обработке. И, тем самым, значительно улучшая качество своей продукции по ценам, сопоставимым с себестоимостью этой услуги.

После выхода технологического центра на проектную мощность уже с инновационными технологиями, базовое предприятие будет получать и часть прибыли в соответствии с долями, вложенными вместе с инвестором в проект.

Пилотный вариант такого центра сейчас реализуется на базе Московского завода экспериментальных машин (ЗАО «ЗЭМ») (рис. 1).

Отличительной особенностью центра является применение инновационных технологий упрочнения, которые практически не представлены на отечественном рынке. Среди них выделяются расплавные технологии, мировым лидером в разработке которых является фирма «Durferrit» (Германия). В термической обработке (закалка, отпуск, цементация, карбонитрация) данные технологии намного эффективней, чем традиционные (в газовых средах, в вакууме, тлеющем разряде и др.). Например, для обработки в газовой атмосфере обязательным условием является постоянная принудительная депассивация насыщаемой поверхности. При любой,

даже самой тщательной, предварительной очистке поверхность сталей, особенно нержавеющих, находится в пассивированном состоянии из-за присутствия тонкой пленки окислов и других пассивирующих слоев. Стадия депассивации удлиняет цикл обработки, и при недостаточно строгом ее контроле может отрицательно сказываться на качестве обрабатываемой детали (разнотолщинность, отсутствие или прерывистость диффузионного слоя по периметру).

Недостатки, описанные выше, отсутствуют в расплавных технологиях. При погружении металла в расплав солей на границе металл-расплав непрерывно начинают протекать естественные обменные реакции и пассивирующие пленки уже не могут существовать (идет непрерывное растворение мономолекулярного слоя на поверхности металла). Это приводит к тому, что процесс насыщения в жидкой среде протекает с максимально возможной скоростью, причем насыщение начинается непосредственно с момента погружения детали в расплав. Кроме того, скорость нагрева в расплавах в 2-5 раз выше, чем при традиционных видах обработки (электронагрев, газовый нагрев, нагрев плазмой тлеющего разряда), а открытое зеркало ванны дает возможность в широких пределах регулировать скорость охлаждения после насыщения и при необходимости производить обработку детали частичным погружением в расплав. Также, в отличие от газов, жидкости не обязательно использовать в герметичных системах.

Для качественного проведения термообработки важно, чтобы используемая среда и режимы обработки не вызвали изменения химического состава материала, из которого состоит обрабатываемая деталь, предотвращали окисление поверхности (образование окалины) и обезуглероживание стали и обеспечивали минимальные поковки.

Расплав соли, как рабочая среда для нагрева под закалку, в ограниченном объеме применяется и в России, например, для закалки быстрорежущих сталей. Но широкого применения у нас в стране такие технологии не получили в первую

очередь из-за нерешенных экологических проблем, связанных с выбросами вредных примесей в атмосферу и утилизацией промышленных стоков.

В нашем центре, впервые в России, представлены экологически чистые линии для термической и химико-термической обработки в расплавах солей, как собственного производства, так и производства фирмы «Durferrit» (рис. 2).

Отличительной чертой такого оборудования является то, что оно снабжено фильтром влажной очистки отходящих газов и испарителем промстоков. Таким образом, современные расплавные технологии не имеют жидких отходов, не требуют промышленной канализации, и такое оборудование может быть размещено даже в цехах механической обработки.

Кроме того, процесс закалки в расплавах отличается от обычной способами охлаждения. Известно, что при закалке конструкционных сталей быстрое охлаждение необходимо вести только в интервале температур 700-250°C, чтобы не произошел распад аустенита, а далее – как можно медленнее, где происходят структурные мартенситные превращения. При этом в стали минимизируются термические напряжения, резко уменьшаются коробление, закалочные трещины и др.

Расплавные технологии легко позволяют осуществлять почти любые скорости охлаждения. Например, на рисунке 3 представлена одна из таких схем охлаждения. Деталь после нагрева под закалку переносится в ванну с температурой 200°C (это чуть выше точки начала мартенситного превращения), где она выдерживается при этой температуре, чтобы температура поверхности и сердцевины сравнялись, и не возникало термических напряжений по сечению металла. Далее деталь охлаждается либо на воздухе, либо в масле, в зависимости от структуры, которую необходимо получить.

Расплавные технологии в термообработке позволяют проводить, кроме закалки, и другие виды обработки: нормализацию, отжиг, отпуск, для чего технологическая линия комплектуется охлаждающим

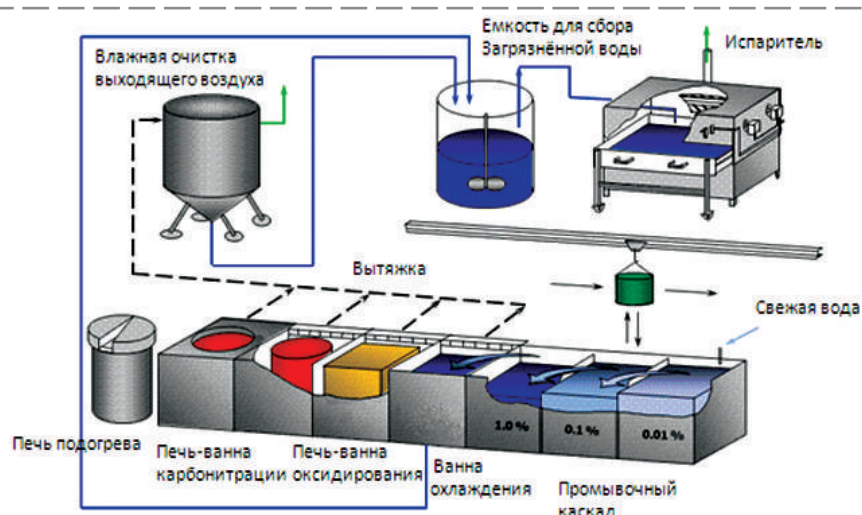


Рис. 2. Экологически чистая технологическая линия термической и химико-термической обработки.

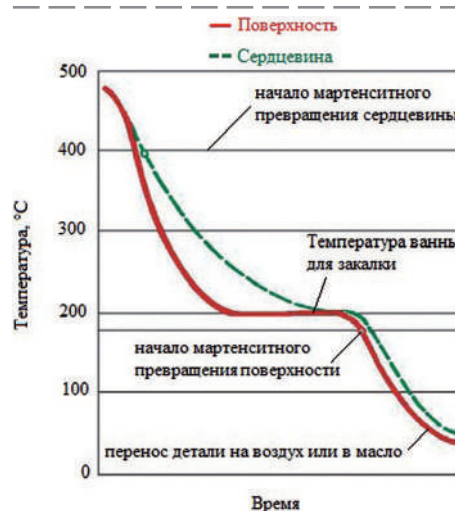


Рис. 3. Кривые охлаждения [1].

колотцем. Особенностью реализации таких технологий является то, что используемые соли могут быть разного состава: нейтральные, с различным углеродным потенциалом и др. Это позволяет предотвратить химические изменения поверхности металла – образование окалины и обезуглероживание, и, что особенно важно, при охлаждении на воздухе деталь покрыта тонким слоем расплава, который защищает поверхность стали.

Практически не известны у нас в стране технологии цементации и нитроцементации в расплавах солей. Это связано с тем, что рабочие расплавы, являющиеся поставщиками активных атомов углерода и азота, содержат до 10-12% цианидов. Но созданный комплекс оборудования, расходные материалы и технологии ведения процессов предусматривают практически полное отсутствие цианидов в исходных солях и в твердых отходах после испарения промстоков. В самой же ванне цементации цианиды присутствуют, но там постоянно протекают окислительно-восстановительные реакции:



Активатор (например, BaCl_2), добавляемый в ванну, действует как катализатор и ускоряет окисление цианида. Образование углерода происходит аналогично, как и при процессах цементации в других средах:



Скорость насыщения углеродом по расплавной технологии почти в 2 раза выше, чем при газовой цементации (рис. 4).

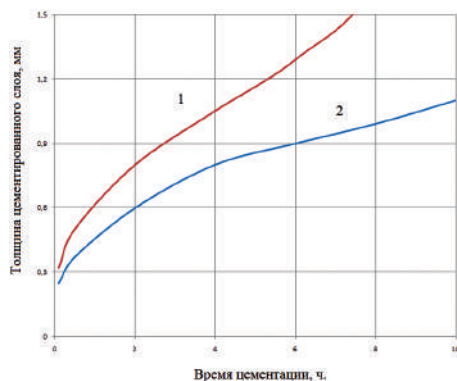


Рис. 4. Кинетика процесса цементации при 950°C в расплаве (1) и в газовой атмосфере (2).

Окончательные свойства цементированной детали придает последующая термообработка. Существует несколько ее способов (рис. 5).

Неответственные детали простой формы можно подвергать так называемой непосредственной закалке, с предварительным подстуживанием в другой ванне ($t = 780-850^\circ\text{C}$), с последующим перемещением в расплав ($t = 180-200^\circ\text{C}$), выдержкой в нем для выравнивания температуры по сечению и охлаждением на воздухе, где протекают мартенситные превращения (способ А).

Более ответственные детали, как правило, подвергают повторному нагреву в ванне с температурой 780-850°C с последующей закалкой (способ В).

Легированные стали после цементации лучше всего подвергать изотермической закалке (способ С), заключающейся в том, что детали перемещают в ванну с температурой 580-680°C, где избыточный углерод в стали выделяется в виде мелких карбидов железа. При последующей закалке по такой схеме удастся избежать образования остаточного аустенита.

Для особо ответственных тяжело нагруженных деталей делается двойная закалка (способ D): первый нагрев при более высоких температурах для закалки сердцевины, второй – при более низких, для закалки поверхностного слоя.

Отпуск после закалки можно проводить в ванне с температурой 200°C, которая используется в качестве охлаждающей перед закалкой.

Широкое применение в последнее время находят низкотемпературные процессы поверхностного упрочнения в расплавах солей, такие как карбонитрация (Россия) и Tenifer-процесс (Германия). Эти технологии часто используются вместо азотирования, а в сочетании с двойным окислением – и вместо гальванического хромирования.

Главной особенностью российской технологии жидкостной карбонитрации является отсутствие цианистых соединений в рабочем расплаве. В немецких же расплавах цианистые соединения могут присут-

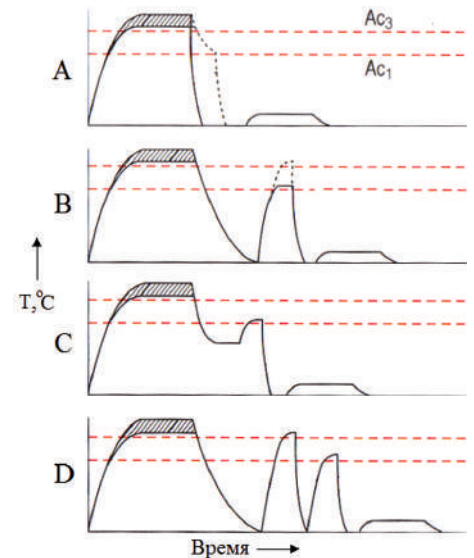


Рис. 5. Способы термической обработки деталей после цементации в расплавах солей.

ствовать в размере 3-5% по массе [1]. Но в результате окисливания цианистые соединения полностью уничтожаются, и на выходе в отходах они не обнаруживаются.

Карбонитрация стали и чугуна приводит к образованию на поверхности упрочненного слоя толщиной до 0.5 мм, состоящего из двух зон (рис. 6) [2]: верхняя зона толщиной до 15 мкм представлена в основном ϵ -фазой (Fe_3N), под которой располагается диффузионная зона, состоящая из твердого раствора азота и углерода с включениями карбонитридных фаз (рис. 7).

Проведенный комплекс исследований эксплуатационных свойств карбонитрированного слоя показывает, что каждая его зона отвечает за определенное свойство (рис. 6).

Процесс карбонитрации является финишной обработкой, после которой допустимы только доводочные операции (полировка, протирка) на глубину не более 3 мкм, шлифовка на глубину более 10 мкм недопустима, так как удаляется ϵ -фаза, которая является ответственной за основные свойства деталей (рис. 6).

Технология жидкостной карбонитрации и ее зарубежный аналог Tenifer-процесс применяются для упрочнения деталей за-

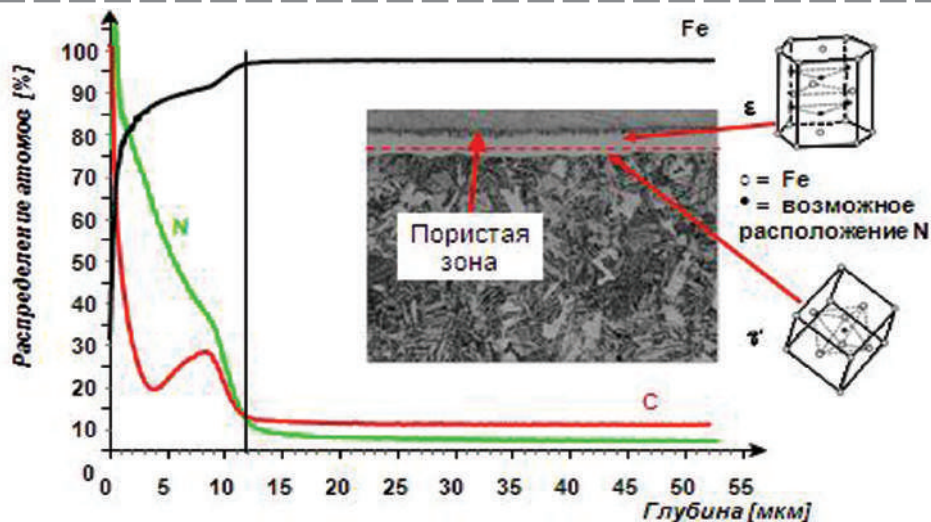


Рис. 6. Структура и свойства карбонитридного слоя.

Свойства детали	Влияние	
	VS	DS
Износостойкость	X	
Коррозионная стойкость	X	
Эрозионная стойкость	X	
Задиростойкость	X	
Усталостная прочность	X	X
Жаропрочность	X	X
Предел выносливости	X	X
Предел прочности		X
Контактная прочность		X

VS-карбонитридный слой
DS-диффузионный слой

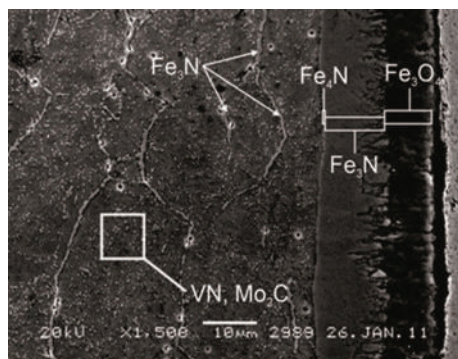


Рис. 7. Тонкая структура стали 25X2M1Ф после оксикарбонитрирования. Режим обработки: карбонитрирование при $t = 580^\circ\text{C}$, $\tau = 1.5 \text{ ч}$ + оксидирование при $t = 370^\circ\text{C}$, $\tau = 0.25 \text{ ч}$.

порно-регулирующей арматуры энергетических установок, трущихся деталей автомобильного двигателя, трансмиссии, деталей гидравлических машин, штампов, режущего инструмента и др. (рис. 8).

В теплоэнергетике существуют большие проблемы применения аустенитных сталей для трущихся поверхностей деталей органов парораспределения (штоки, втулки и др.), паровпуска (втулки, поршневые кольца и др.), работающих при длительном воздействии высоких температур (до 650°C) и контактных давлений. Существующие методы поверхностного упрочнения, например, азотирование, значительно (до 100 раз) снижают коррозионную стойкость и не обладают термической стабильностью упрочненного слоя при указанных температурах.

Разработанная нами не имеющая аналогов технология хромонитридного упрочнения аустенитных сталей, представляющая собой комплексное диффузионное насыщение поверхности стали вначале хромом, а затем азотом приводит к образованию упрочненного слоя, состоящего из аустенитной матрицы (γ -твёрдый раствор) с включениями нитрида Cr_2N (рис. 9).

Такая структура упрочненного слоя позволяет улучшить ряд характеристик аустенитных сталей:

- твердость повышается до 950HV;
- износостойкость в перегретом паре при 650°C повышается более чем в 20 раз, в жидком натрии – более чем в 4 раза;
- коэффициент трения снижается, особенно при температурах $> 500^\circ\text{C}$, до 4 раз;
- окислительная стойкость при температурах до 800°C повышается более чем в 5 раз;
- термическая стабильность (теплостойкость) слоя сохраняется до температуры 800°C ;
- коррозионная стойкость сохраняется или даже превосходит уровень высокохромистых сталей;
- эрозийная стойкость хромонитридного слоя в 1.7 раза выше, чем у стали 08X18H10T, являющейся эталоном по этому показателю.

Технология хромонитридации прошла успешную проверку в энергетике, прежде всего на деталях арматуры, сопел форсунок, всевозможных парах трения (рис. 10).

Перспективы применения этой технологии в других отраслях промышленности,



Рис. 8. Примеры применения карбонитрирования в машиностроении.

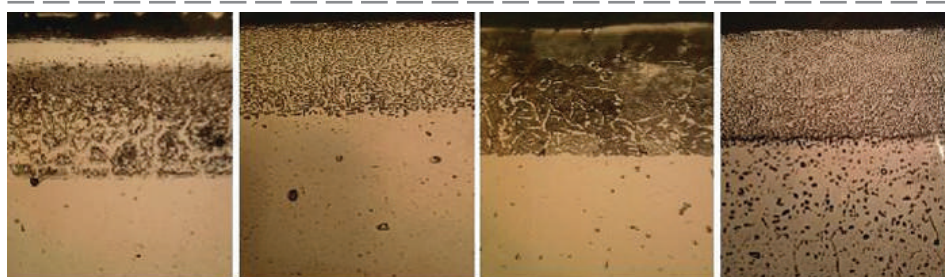


Рис. 9. Микроструктура после диффузионного хромирования (а, в) и последующей нитридации (б, г) сталей; а, б - 08X18H10T; в, г - ЭН-612 (ХН35ВТ).

например в химической, огромны и связаны с упрочнением деталей, применяемых при производстве удобрений, кислот и других агрессивных продуктов.

Технология хромонитридного упрочнения является единственной для аустенитных сталей, которая позволяет значительно повысить такие характеристики, как износостойкость, износостойкость, жаростойкость при сохранении тех важных свойств (прежде всего коррозионной и эрозийной стойкости), которые заложены в этих материалах.

Одним из недостатков почти всех диффузионных покрытий является то, что они не обладают высокой стойкостью к абразивному изнашиванию. Исключение составляют разработанная нами технология диффузионного борирования в расплавах солей и немецкие технологии в порошках, пастах.



Рис. 10. Примеры применения хромонитридного упрочнения.

Борированию могут подвергаться стали любых классов и чугуны. В результате борирования на поверхности могут формироваться как однофазные (только Fe_2B), так и двухфазные (сначала FeB , а далее Fe_2B) слои (рис. 11). Твердость упрочненного слоя составляет более 1200 HV.

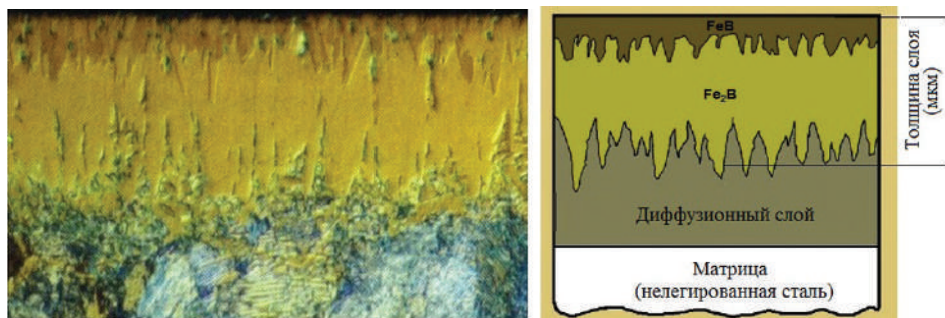


Рис. 11. Структура стали 20X после борирования при 900°C в течение 12 часов.

Однофазные слои (Fe_2B) характеризуются более благоприятными свойствами. Fe_2B менее хрупок, чем более богатый бором FeB . Возможности порошковой технологии таковы, что, варьируя параметрами процесса (состав порошка, температура, время), можно управлять структурой, и, следовательно, и свойствами. Общая толщина слоя сильно зависит от состава стали, но в среднем составляет 100-200 мкм.

Особо следует отметить, что после борирования для формирования окончательных свойств сердцевины детали могут быть подвергнуты закалке с отпуском.

Применение технологии борирования особенно эффективно при изготовлении деталей насосов, компрессоров, прессформ для производства кирпича и т.д. То есть там, где составляющая абразивного износа превышает все остальные.

ООО «Термохим», совместно с ООО «ПК «Борец» и ЗАО «ЗЭМ», разработана технология жидкостного борирования деталей ступеней электроцентробежных погружных насосов (ЭЦН), изготовленных из чугуна «корезист» (рис. 12). Указанные детали прошли полный цикл испытаний на износостойкость и коррозионную стойкость. Все испытания проводили в сравнении с чугуном «нерезист», используемым для изготовления ступеней ЭЦН в серийном производстве.

Износостойкость борированного чугуна при трении «металл по металлу» в присутствии абразива повышается от 4 до 7 раз. Опробованные другие методы упрочне-



Рис. 12. Детали ступеней электроцентробежных погружных насосов, подвергнутых жидкостному борированию.

ния, такие как азотирование, карбонитрация, покрытие «Oerlikor», изотермическая закалка и др. давали прирост износостойкости не более чем в 1,7 раза.

Особо следует отметить, что коррозионная стойкость борированного слоя и в специальных средах: в имитирующей пластовую жидкость и в используемой для промывки насосов (водный раствор 5% NaCl + 3% HCl и 10% раствор HCl) — повышается в 4 и 10 раз соответственно.

Такое сочетание эксплуатационных характеристик открывает принципиально новые возможности применения этой химикотермической обработки для целого ряда деталей работающих в условиях коррозионно-абразивного изнашивания, что недоступно другими методами упрочнения.

Рассмотренные технологии, наряду с традиционными (газовая цементация, термообработка в защитных атмосферах, хромирование и др.), широко представлены в новом инновационном технологическом центре и позволяют выполнить задачи любой сложности по повышению как поверхностных, так и объемных свойств деталей.

Проведенная экспертная оценка прибыльности проекта «Инновационный технологический центр упрочнения» (ИТЦУ) (рис. 13) показывает, что точка безубыточности достигается в течение нескольких месяцев с момента пуска центра в эксплуатацию. Срок окупаемости проекта не превысит 4 лет. Такие показатели коммерциализации проекта «ИТЦУ», несомненно, могут послужить отправной точкой для создания сети аналогичных центров по всей стране, как это принято в индустриально развитых странах.

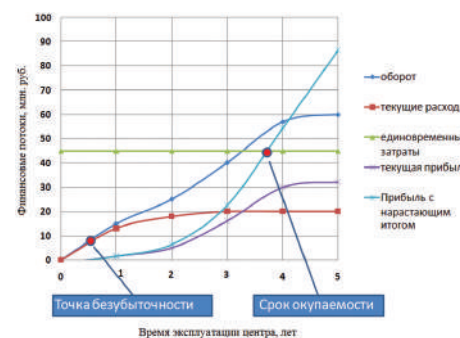


Рис. 13. Прибыльность проекта «Инновационный технологический центр упрочнения».

Литература:

1. Ulrich Baudis, Michael Kreutz. Technologie der Salzschnmelzen. М.: verlag modern industrie, 2001.
2. Прокошкин Д.А. Теория и практика цианирования быстрорежущих сталей. М.: ВНИИТОМ, 1940.



ЗАО «Завод экспериментальных машин»

Проектирование и производство инновационного технологического и нестандартного оборудования для нефтяной промышленности, транспорта и коммунального хозяйства

316109, Москва, Остаповский проезд, д. 13

тел./факс: (495) 676-96-91

E-mail: ranko@co.ru

www.ranko.ru