

# О проблемах развития отечественных технологий цементации конструкционных сталей



**Павел Гринчук,**  
заведующий  
отделением  
теплофизики Института  
тепло- и массообмена  
имени А.В. Лыкова  
НАН Беларусь,  
член-корреспондент



**Валерий  
Константинов,**  
заведующий кафедрой  
«Материаловедение  
в машиностроении»  
механико-  
технологического  
факультета БНТУ,  
доктор технических наук

Независимость и безопасность государства во многом определяется способностью и степенью контроля над критически важными сферами – обороной, энергетикой, продовольствием, медициной, финансами и т.д. На этом фоне зачастую забываются другие элементы, на фундаменте из которых стоят указанные столпы. С этой точки зрения крайне важна технологическая и инженерная безопасность, наличие собственных технологий полного цикла и соответствующих компе-

тенций инженерного корпуса. Классическим примером сегодняшнего дня является микроэлектроника. Но хотелось бы обратить внимание на другой аспект, не менее актуальный для Республики Беларусь – машиностроение и станкостроение. Основным конструкционным материалом в вышеназванных отраслях была и остается сталь. Для создания долговечных и надежных машин и механизмов современных высоко нагруженных агрегатов требуется упрочнение поверхности большинства ресурсоопределяющих деталей. Характерными примерами таких изделий являются шлицевые валы, зубчатые колеса, крупногабаритные кольца подшипников и многие другие. Базовая технология повышения их долговечности – химико-термическая обработка (ХТО), ее основные методы – цементация, азотирование, нитроцементация.

Среди наиболее распространенных целей ХТО – повышение поверхностной твердости деталей, износостойкости, сопротивления усталости, кавитации

онной и коррозионной стойкости, задиростойкости. При этом в сердцевине изделия сохраняются высокие прочность и вязкость. Отметим, что ХТО – поверхностная технология, при которой глубина упрочненного слоя, как правило, не превышает 2 мм. Наибольшее распространение в машиностроении получила цементация – насыщение поверхностных слоев стальных деталей углеродом. Для достижения достаточной растворимости углерода и глубины проникновения обработку проводят при относительно высоких температурах 900–950 °C, что позволяет увеличить содержание углерода в поверхностном слое, получая после закалки и низкого отпуска большую поверхностную твердость, сопротивление износу и высокую ударную вязкость в сердцевине. Цементация классифицируется в зависимости от типа науглероживающей среды: в твердом карбюризаторе (например, древесный уголь); в газовом (например, смесь эндогаза и природного газа); в кипящем слое (например,

из инертных частиц графита, сжижаемых пропан-бутановой смесью); в пастах (например, композиции из сажи или древесноугольной пыли с содой и декстрином) и др. Газовая цементация считается наиболее производительной, дешевой и технологичной, позволяет автоматизировать процесс ХТО. В настоящее время газовая цементация занимает доминирующее место среди процессов цементации сталей.

Насколько развита химико-термическая обработка в промышленности Республики Беларусь? На основе данных инвентаризации печного хозяйства, проводившегося в 2009 г., можно сделать укрупненную оценку количества эксплуатировавшихся печей для цементации и нитроцементации в 150 единиц. Сегодня это количество уменьшилось по различным причинам [1]. Но что это за печи? В большинстве случаев это либо классическая, но уже устаревшая советская шахтная печь Ц-105, либо польские агрегаты Pekat, либо немецкие Ipsen. Если производство энергоэффективных газопламенных печей и электропечей с окислительной атмосферой было освоено в Беларуси в начале 2000–2010-х гг. [1, 2], то вопрос специальных печей и генераторов атмосферы для ХТО отечественной разработки был упущен. Отметим, что определенное развитие получило направление ионно-плазменного азотирования [3, 4]. В настоящее время ведутся также перспективные работы по ионно-плазменной цементации. На тракторном заводе работает линия вакуумной цементации специальных сталей немецкой фирмы ALD. Эти процессы цементации, без-

условно, являются перспективными, однако ближайший технологический горизонт по ряду технико-экономических причин останется за традиционной газовой цементацией сталей.

Важным индикатором развития данной сферы является наличие патентов. За последние 25 лет в области ХТО в нашей стране было получено менее 20 патентов на изобретение или полезную модель. Из них половина касается составов для обмазок либо для цементации в твердом карбюризаторе, то есть улучшения старых технологий. Единичные патенты посвящены печам для ХТО, опять же улучшениям существующих конструкций, и нет ни одного, касающегося генераторов атмосферы. В то же время промышленная политика предприятий до последнего времени была ориентирована на закупку западного оборудования с отсутствием какого-либо интереса и запроса на отечественные разработки. События последнего года привели к полному прекращению поставок со стороны западных компаний оборудования для ХТО, комплектующих к нему (например, специальных защищенных нагревателей типа «радиационная труба»). Прервано и обслуживание программного обеспечения агрегатов. Более того, оно может вообще дистанционно отключаться. Могут ли сохраняться иллюзии по поводу дальнейшей судьбы технологий ХТО и намерений зарубежных поставщиков соответствующего оборудования? Ситуация серьезная и требует повышенного внимания. Если не форсировать работы в этом направлении сейчас, то уже через полгода-год высока вероятность воз-

никновения технологических проблем для отдельных секторов машиностроения и станкостроения вплоть до полной остановки или общего отхода на более низкие технологические уклады. Цементирование сталей с помощью их обдува при нагреве углеродсодержащим светильным газом стало массово применяться в конце XIX в. на предприятиях сталепромышленника Круппа в Германии для получения броневых сталей [5]. Тогда это было большим технологическим скачком по сравнению с использовавшимися гарвеевскими броневыми стальями, которые неделями цементировались в засыпке древесного угля. Есть ли у нас уверенность, что, не развивая собственную научно-техническую и инженерную базу в этой области, нам не придется совершать аналогичный скачок, только в обратную сторону?

Кадровый потенциал в этой области, к сожалению, тает на глазах. Инженерные кадры по специализации 1–42 01 01–01 03 «Металловедение, технология и оборудование термической обработки металлов» готовит лишь одна кафедра (БНТУ). Вопросами технологических режимов ХТО в инициативном порядке занимаются лишь отдельные группы исследователей, число которых можно пересчитать по пальцам одной руки. Среди таких групп – кафедра «Материаловедение в машиностроении» механико-технологического факультета БНТУ [6, 7], лаборатория металлургии в машиностроении Объединенного института машиностроения НАН Беларуси [8, 9]. Лаборатория электрофизики Физико-технического института НАН Беларуси успешно

развивает направление ионной химико-термической обработки [3, 4], которое, безусловно, является новым словом в ХТО. К сожалению, данное оборудование пока достаточно узко специализировано и не решает всех задач поверхностного упрочнения сталей.

Сегодня остро стоит вопрос о создании отечественных печных агрегатов для цементации, соответствующего оснащения для генерации атмосфер (эндогенераторы, газоприготовители), автоматизированных систем управления атмосферой, например, углеродным потенциалом, программных комплексов для моделирования процессов диффузионного насыщения углеродом и другими компонентами сталей и сплавов. Отметим, что такие работы проводятся в инициативном порядке в Институте тепло- и массообмена (С.И. Шабуня, В.И. Калинин, В.В. Мартыненко, П.С. Гринчук, А.Н. Ознобишин).

Остановимся подробнее на наиболее распространенном и востребованном процессе газовой цементации. Общий принцип газовой цементации одинаков для всех вариантов работы оборудования. Необходимо получить атмосферу с большой концентрацией углеродсодержащего газа CO, определенным содержанием метана и минимальным количеством углекислого газа и паров воды. Достигается это в реакции частичного катализического окисления углеводородного газа в каталитическом реакторе (эндогенераторе). Для ее осуществления необходим внешний подвод энергии. Химические реакции разложения метана и угарного газа на поверхности стали уже

в печах цементации являются основным источником углерода, который, диффундируя от поверхности и по межзеренным границам, осуществляет насыщение поверхностных слоев стали углеродом. Традиционное аппаратное оформление агрегата ХТО состоит из эндогенератора, газоприготовителя, в котором к эндогазу по командам системы управления углеродным потенциалом домешивается метан, и собственно печи, где идет процесс цементации при температуре 900–950 °C. Ключевой задачей системы управления процессом является поддержание концентрации основных компонентов атмосферы в заданном узком диапазоне. При этом концентрации газов меняются при взаимодействии с цементируемым металлом, а процесс протекает в неравновесных условиях. Поэтому управление цементационной атмосферой – достаточно сложная задача.

В основу систем управления составом атмосферы для традиционных систем цементации заложена концепция углеродного потенциала, под которым понимают величину, характеризующую науглероживающую способность цементирующей атмосферы и выражаемую содержанием углерода в поверхностном слое металла, находящегося в равновесии с этой атмосферой. В научно-технической литературе до сих пор нет однозначно признанной методики расчета углеродного потенциала, вследствие чего на практике часто возникают разнотечения в этом вопросе (что, собственно, нужно регулировать в атмосфере?) и, соответственно, проблемы с качеством цементации. Это свидетельствует об отсутствии

нужного уровня понимания и описания данного процесса.

Часто вариантом измерения углеродного потенциала является использование показаний кислородного датчика (лямбда-зонда), помещенного в печную атмосферу. Идея этой методики опирается на реакции  $\text{CO} + \text{CO} \rightarrow 2\text{C} + \text{O}_2$  и  $\text{CO}_2 \rightarrow \text{C} + \text{O}_2$ . Поскольку концентрация CO в печи практически постоянная, то, измеряя концентрацию O<sub>2</sub>, можно оценить активность углерода. Далее приходится допустить, что стандартный кислородный датчик способен измерять ультразвуковые концентрации порядка 10<sup>-19</sup>, и считать, что именно вторая из указанных выше реакций определяет производство углерода. Насколько точны могут быть такие измерения? Открытым остается вопрос и о реагировании рассматриваемого датчика на изменения концентрации CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O в печи. Не поддается вниманию объяснению факт, почему кислородный датчик заменяет измерения компонентного состава цементационной атмосферы в традиционных системах управления. Более того, показания лямбда-зонда очень сильно зависят от состояния его поверхности. На ней постепенно и неизбежно осаждается сажа, показания начинают «плыть», и управление становится некорректным. Зонд требует постоянной чистки, что в условиях непрерывной работы проблематично и, вообще говоря, неправильно. Отметим, что на этом принципе построено управление процессом цементации в агрегатах такого известного производителя, как Ipsen. И это рождает ряд других вопросов, в частности, какой же уровень технологий нам предлагают

и продают за очень нескромные деньги западные компании?

В ИТМО проводятся исследования проблем цементации и генерации соответствующих атмосфер. Прежде всего ведутся работы по созданию

модели насыщения поверхности металла углеродом, основанной на рассмотрении гетерогенных процессов на поверхности цементируемой стали. При этом аналогом углеродного потенциала является поверхност-

ная концентрация адсорбированных поверхностью металла атомов углерода. Эта величина не ограничена растворимостью углерода в металле и определяется балансом гомогенно-гетерогенных реакций и диффузии углерода в металле.

Экспериментальные исследования [10, 11], показали, что для генерации эндогаза в объемах порядка  $10 \text{ нм}^3/\text{ч}$  достаточно объема катализатора около 1 л, в отличие от десятков литров катализатора в эндогенераторах традиционной конструкции. Для создания качественной цементационной атмосферы важнее не объем катализатора, а равномерность его нагрева. Этого легче достичь на малом объеме катализатора. Соответствующие технические решения отработаны в ИТМО и проверены на практике.

Второй принципиальный момент – построение системы управления по газовому анализу. В предлагаемом нами подходе используется не лямбда-зонд с описанными выше проблемами, а уже апробированная проточная система газового анализа. В данной схеме мини-компрессор откачивает газовую пробу по трубке из печи и непрерывно прокачивает ее через последовательно соединенные газоанализаторы оптического типа (для CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>). Перед этим газовая проба охлаждается и фильтруется. Такая система газового анализа намного более стабильна, информативна и достоверна с точки зрения построения системы автоматизированного управления процессом газовой цементации, легко перестраивается при изменении условий протекания процесса. Более того, решен прин-



Рис. 1. Автоматизированная система управления цементационной атмосферой двух шахтных печей СШЦ-8.16/10



Рис. 2. Колпаковая трехстеновая печь для спекания трения дисков в защитной атмосфере, разработанная и изготовленная в ИТМО

циональный момент: на относительно недорогой элементной базе создан собственный многокомпонентный газоанализатор, который может встраиваться в системы управления процессом цементации и нитроцементации. Создана линейка экспериментальных эндогенераторов производительностью до  $10 \text{ нм}^3/\text{ч}$  по продуктому газу, на которых решен и отработан ряд принципиальных технических моментов.

Пример системы управления углеродным потенциалом, функционирующей на указанных принципах [12], показан на рис. 1. Она предназначена для регулирования состава цементационной атмосферы в рабочем пространстве двух шахтных печей, смонтирована и налажена на промышленном предприятии и применима для газовой цементации в большинстве существующих печей шахтного и камерного типа. Все детали, прошедшие процесс цементации с помощью данной системы, удовлетворяли техническим требованиям заказчика.

Отметим, что Институт тепло- и массообмена имеет опыт проектирования и изготовления и печного оборудования со специальными атмосферами, что важно в контексте проблемы создания собственного оборудования для ХТО. Так, для технологий спекания фрикционных дисков для автотракторной техники ранее были созданы колпаковые печи с защитными атмосферами (эндогаз, водород) (рис. 2).

Создание отечественной линейки оборудования для ХТО требует не только погружения в научные основы процесса, но и большого объема конструкторских изысканий,

работ по производству металлоконструкций, монтажу теплоизоляции и т.д. Наукоемкая часть цементационного оборудования опирается на научноисследовательские работы Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси по частичному окислению углеводородных газов и разработке эффективных реакторов. К проектированию и выпуску необходимого печного и вспомогательного оборудования для ХТО активно подключилась компания «ПромТермоСистема» (termoin.by), с которой подписано долгосрочное соглашение о сотрудничестве. Для совершенствования вопросов, связанных

с режимами ХТО, необходимо привлекать исследовательские группы из профильных научных организаций, упомянутых выше. В ближайших планах – совместное создание первого полностью отечественного образца агрегата для химико-термической обработки, призванного потеснить, а в перспективе – заменить на отечественном рынке продукцию западных компаний. Главное, чтобы промышленность повернулась к отечественным разработкам и созданным инновациям лицом, а не ставила их в лист ожидания в надежде на параллельный импорт и возвращение зарубежных поставщиков. ■

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. П. Гринчук, А. Русецкий. Модернизация парка промышленных печей // Наука и инновации. 2010. Т. 12. №94. С. 49–52.
2. П. С. Гринчук, В. В. Торопов, А. Н. Ознобишин. Экспериментальное исследование тепловых режимов работы энергоэффективных электропечей сопротивления // Известия Национальной академии наук Беларусь. Серия физико-технических наук. 2012. №1. С. 90–94.
3. М.Н. Бояков и др. Поверхностное упрочнение инструментальных сталей путем ионно-плазменного азотирования / Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов: в 2 ч.– Минск, 2013. Вып. 34, ч. 2. С. 27–37.
4. А.А. Козлов. Технология упрочнения сложнопрофильных деталей из легированных сталей методом ионного азотирования в тлеющем разряде. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. ГНУ «ФТИ НАН Беларусь». – Минск, 2022.
5. Brown D.K. Warrior to Dreadnought: Warship Design and Development 1860–1905.– Pen and Sword, 2010.
6. В.М. Константинов, Б.Б. Хина. Об ускорении процессов ХТО в подвижных порошковых смесях / Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов.– Минск, 2015. Вып. 36. С. 262–272.
7. В.М. Константинов. Ускоренная диффузия легирующих элементов в железе при химико-термической обработке порошков во вращающемся контейнере // Доклады Национальной академии наук Беларусь. 2007. Т. 51. №2. С. 103–107.
8. С.Г. Сандомирский, А.Л. Валько, С.П. Руденко. Анализ влияния продолжительности цементации на эффективную толщину упрочненного слоя и магнитный параметр стали 18ХГТ после закалки // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. №3. С. 71–77.
9. В.А. Кукареко, А.Л. Валько, А.Н. Чичин. Влияние режима нагрева конструкционных сталей при высокотемпературной цементации на величину аустенитного зерна // Актуальные вопросы машиноведения. 2017. Т. 6. С. 372–375.
10. A. Al-Musa, S. Shabunya, V. Martynenko, V. Kalinin. Modeling of natural gas partial oxidation in an in-house developed pilot scale catalytic reactor based on local thermodynamic equilibrium concept // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 113. P. 238–245.
11. A. Al-Musa, S. Shabunya, V. Martynenko, V. Kalinin. Effect of active thermal insulation on methane and carbon dioxide concentrations in the effluent of a catalytic partial oxidation reactor for natural gas conversion to synthesis gas // Chemical Engineering Journal. 2015. V. 281. P. 852–859.
12. Автоматизированная система контроля и управления газовой цементацией стальных изделий в шахтной электрической печи: патент ВУ на полезную модель №12223 / П.С. Гринчук, С.И. Шабуня, А.Н. Ознобишин, В.И. Калинин, Н.И. Соловьев. – Опубл. 28.02.2020.