

Исследование конденсации азота в титане

© А.Л. Лысенко

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, 248000, Россия

Исследован процесс конденсации азота в титане, протекающий в мобильных системах вакуумирования. Путем оптимизации формы элементов газопоглотителя удалось уменьшить отрицательное воздействие плавления титана и увеличить поверхность взаимодействия титановых таблеток с азотом. Установлено, что оптимальной формой элементов является сплошной цилиндр. Проведена оптимизация способа иницирования процесса для обеспечения скорейшего иницирования реакции (транспортировки фронта горения к большей поверхности). Показано, что на скорость последующего поглощения азота существенное влияние оказывает конфигурация расположения быстровоспламеняющихся таблеток, примыкающих к инициатору, и места иницирования.

Ключевые слова: энерготехнологические процессы, конденсация азота, транспортно-кинетические процессы.

Введение. Предварительные исследования [1] показали, что в процессе конденсации азота в титане участвует только часть таблеток. Остальные таблетки расплавляются и коагулируются, значительно сокращая тем самым поверхность конденсации. В конечном итоге это приводит к уменьшению количества поглощенного азота и ухудшению кинетики процесса газопоглощения. Снизить отрицательное воздействие плавления титана и увеличить поверхность взаимодействия титановых таблеток с азотом можно в результате корректировки изменения размеров и геометрической формы элементов газопоглотителя. При этом изменяются условия теплообмена для элементов газопоглотителя и тепловой режим взаимодействия титана с азотом. Экспериментальная отработка этих факторов показала, что наилучшие интегральные рабочие характеристики устройства достигаются при использовании таблеток, спрессованных в форме втулок и сплошного цилиндра [2]. Для дальнейшей оптимизации транспортно-кинетических процессов и окончательного выбора формы титановых таблеток были проведены эксперименты с этими таблетками.

Исследование таблеток титана, спрессованных в форме цилиндра. Элементы газопоглотителя в виде сплошных цилиндров отличаются простотой изготовления и удобством при укладке в картридж. Были исследованы изменение температуры в соответствующих точках на внутренней стенке устройства и кинетика поглощения азота, определяемая по изменению давления в камере.

Полученная экспериментальная зависимость отображает момент подачи импульса напряжения на инициатор и его длительность. Анализ данных показывает, что после подачи электрического импульса

температура возрастала в точках, расположенных в ближайшем к слою воспламенительных таблеток сечении. Практически одновременно повышается температура в следующем сечении, что свидетельствует о том, что фронт горения плоский и охватил все сечение. Но далее температура начинала расти заметно позже, чем в точке, расположенной ближе к отверстию во фланце устройства, через которое подается азот, и фронт искривлялся. При этом отставание фронта горения вдоль нижней образующей только увеличилось по сравнению с распространением фронта вдоль верхней образующей.

Исследование таблеток титана, спрессованных в форме втулок. Эксперименты с таблетками в форме цилиндров показали, что основная масса азота поглощается внешними слоями таблеток, а внутренние слои расплавляются и коагулируют. Тем самым резко снижается проницаемость таблеток, что отрицательно сказывается на их поглотительной способности. Поэтому представляло интерес провести эксперименты с таблетками в виде втулок, т. е. с полыми цилиндрами. Анализ термограмм показал, что тенденция к отставанию распространения фронта горения вдоль нижней образующей по сравнению с верхней сохранилась и для данной конфигурации газопоглотительных элементов. Показанные термодатчиками несколько более высокие значения максимальных температур по сравнению с предыдущим экспериментом, объясняются особенностями укладки элементов в картридже. В данном эксперименте была предпринята попытка более рационального использования внутреннего пространства устройства с созданием дополнительных сквозных каналов для подвода газа к удаленно расположенным элементам.

Ниже приведены результаты опытов с газопоглотителями разной формы:

Форма таблетки	Цилиндр	Втулка
V_0 , л.....	70	70
M_0 , г.....	775,8	655,4
$p_{\text{атм}}$, Па.....	101,06	101,19
$T_{\text{окр}}$, К.....	291	291
ΔM , г.....	69	59,3
$\Delta M/M_0$	0,089	0,0905
$V_{\text{ц}}$, дм ³	23,942	23,942
ΔV , дм ³	59	50,706
$\Delta V/M_0$, л/г.....	0,076	0,077
Δt , с.....	3,72	2,19
Δt_{50} , с.....	36,14	33,72
p_{min} , кПа.....	21,4	32

Примечание. Здесь V_0 — полный объем емкостей; из которых поглощался азот; M_0 — масса газопоглотителя; $p_{\text{атм}}$ — начальное давление азота

(атмосферное); $T_{\text{окр}}$ — начальная температура; ΔM — приращение массы газопоглотителя после окончания процесса; V_{μ} — мольный объем газа при данных начальных условиях; ΔV — объем поглощенного азота; Δt — время задержки зажигания (от нажатия кнопки и подачи импульса на иницирующую спираль до падения давления ниже атмосферного); Δt_{50} — временной интервал достижения давления 50 кПа от момента нажатия кнопки иницирующего устройства; p_{min} — минимальное давление, достигнутое давление в процессе газопоглощения.

Согласно этим данным, сплошные цилиндрические таблетки поглощают большее количество азота, чем полые (втулки), что обусловлено большей начальной массой газопоглотителя. В то же время такие удельные характеристики, как масса $\Delta M/M_0$ и объем $\Delta V/M_0$ поглощенного азота на грамм газопоглотителя оказались практически равными. При этом время достижения давления 50 кПа в этих экспериментах было примерно на одном уровне. Это свидетельствует о том, что на начальном этапе поглощения (до $p = 50$ кПа) размер и форма газопоглотительного элемента особой роли не играют. Эти факторы сказываются на последующем этапе и на достигаемом минимальном давлении.

Результаты экспериментов, подтверждают вывод о том, что на конечное давление, а следовательно, на количество конденсированного азота основное влияние оказывает масса газопоглотительных элементов (чем она выше, тем больше конденсируется азота и ниже конечное давление). Поскольку большая масса достигается при использовании газопоглотительных элементов в форме сплошных цилиндров, то оптимизацию других рабочих характеристик устройства проводили с элементами данной формы.

Оптимизация стадии энерготехнологических процессов в момент иницирования процесса конденсации. Процесс конденсации начинается после иницирования химической реакции между титаном и азотом. От эксперимента к эксперименту имелись незначительные вариации по массе составных частей инициатора. Инициатор срабатывал от подачи импульса напряжения, что обеспечивало локальный запуск реакции. Чтобы обеспечить скорейшее иницирование реакции (транспортировку фронта горения к большей поверхности), к инициатору должны примыкать более быстрогорящие таблетки. Конфигурация расположения этих таблеток и место иницирования, как следует из общих представлений теории транспортно-кинетических процессов, оказывают существенное влияние на скорость последующего процесса поглощения азота. По результатам исследований был сделан вывод, что оптимальным является расположение инициатора в центральном слое.

Влияние места иницирования на характеристики энерготехнологических процессов конденсации. Для ускорения процесса

конденсации рядом с инициатором в том же ряду расположили четыре газопоглощающих элемента, спрессованных из смеси порошков титана и сажи. Кинетика горения таблеток из смеси титана и сажи более высокая, чем из чистого титана, что обеспечивало ускорение процесса транспортировки фронта горения на большей поверхности газопоглощающих элементов. Процесс конденсации азота протекал нестационарно, со стадиями ускорения и замедления. И хотя конечное давление было приемлемым, кинетика его падения и время достижения $p = 50$ кПа были неудовлетворительными (больше минуты). По-видимому, данное расположение инициатора фактически блокировало доступ азота к части элементов, поскольку выделившаяся в промежуточном сечении теплота, приводила к локальному повышению здесь давления и, следовательно, уменьшению перепада давления между данным сечением и входным отверстием, а также к уменьшению переноса азота к элементам, лежащим в более удаленном сечении. Этот вывод был также подтвержден визуальным анализом элементов после процесса газопоглощения: по цвету элементов было обнаружено, что часть из них не принимала участие в процессе газопоглощения.

Другая возможная причина неравномерной кинетики конденсации азота — это высокая концентрация воспламенительных таблеток в одном месте. Поэтому было принято решение разместить инициатор в наиболее удаленном от входа сечении и более равномерно распределить воспламенительные таблетки. Сравнение результатов экспериментов, которые отличаются фактически только местоположением инициатора и размещением воспламенительных таблеток, приведено ниже:

Расположение инициатора	4-й ряд	5-й ряд	5-й ряд
Размещение воспламенителей	Полукольцо	По периметру через таблетку	Сплошное кольцо
V_0 , дм ³	70	70	70
M_0 , г.....	776,7	775,6	775,8
ΔM , г.....	66,4	69,1	69
$\Delta M/M_0$	0,085	0,089	0,089
V_{μ} , дм ³	24,5	24,278	23,942
ΔV , дм ³	58,1	59,9	59
$\Delta V/M_0$, дм ³ /г.....	0,075	0,077	0,076
Δt , с	1,94	3,96	3,72
Δt_{50} , с	62,21	41,27	36,14
P_{\min} , кПа.....	21	19	21,4

Из анализа кинетики изменения давления следует, что сделанные изменения в местоположении инициатора и размещении воспламенительных таблеток дали результат. Продолжением процесса оптими-

зации инициирования был последний ряд, который состоял только из инициатора и воспламенительных таблеток.

Согласно полученным данным, оптимизация местоположения инициатора и размещения воспламенительных таблеток позволила сократить время достижения давления 50 кПа почти в два раза (с 62 до 36 с), при этом остальные рабочие характеристики устройства практически не изменились.

Влияние конфигурации расположения воспламенительных таблеток на характеристики транспортно-кинетического процесса конденсации. В процессе газопоглощения наблюдается отстаивание распространения фронта горения вдоль нижней образующей по сравнению с верхней. Естественно, это связано с разной удаленностью газопоглотительных элементов до входного сечения. Факт, что фронт горения вдоль верхней образующей достигает входного отверстия раньше, негативно сказывается на величине газового потока к элементам, расположенным в нижней части устройства, поскольку на входе фактически создается «тепловая пробка». В идеале хотелось бы иметь плоский фронт горения, который движется с одинаковой скоростью по всему сечению устройства к входному отверстию. Но поскольку отверстие для газового потока расположено несимметрично, то возникают искривления фронта транспортировки (подачи) азота и с позиции газопоглощения разные элементы находятся в неравных транспортно-кинетических условиях [3]. Поэтому было предложено расположить вдоль нижней образующей ряд воспламенительных таблеток, чтобы реакция в нижней части устройства начиналась раньше и искривленный фронт горения из нижней и верхней частей достигал входного отверстия для газа примерно одновременно.

Использование быстрогорящих лент на стадии распространения фронта горения. Среди элементов, реагирующих с азотом, титан обладает рядом преимуществ: малая плотность, высокое стехиометрическое соотношение азота и металла, способность к устойчивому горению при низких давлениях азота. В экспериментах в качестве воспламенителей использовали таблетки, спрессованные из смеси титана и сажи, скорость горения которых выше, чем из чистого титана. Учитывая, что инициирование производили в точке расположения таблетки, распространение фронта горения по цепочке воспламенительных таблеток занимало некоторое время и инициирование процесса газопоглощения происходило неодновременно в разных точках устройства. Чтобы минимизировать длительность стадии воспламенения и инициировать процесс газопоглощения в разных точках сечения с наименьшей задержкой по времени, было предложено использовать ленты, спрессованные из смеси порошков титана и бора, скорость горения которых значительно больше, чем у таблеток из титана и сажи. Фактически отличие экспериментов заключалось только в том, что нижний слой воспламенительных таблеток из титана и сажи был заменен быстрогорящей лентой из титана и бора.

Ниже приведены результаты экспериментов с использованием воспламенительных таблеток (числитель) и быстрогорящей ленты (знаменатель):

V_0 , л.....	70/70
M_0 , г.....	750,2/778
ΔM , г.....	68,1/70,3
$\Delta M/M_0$	0,0908/0,0904
V_{μ} , дм ³	24,23/23,97
ΔV , дм ³	58,93/60,18
$\Delta V/M_0$, дм ³ /г.....	0,079/0,077
Δt , с.....	2,81/1,77
Δt_{50} , с.....	32,75/27,53
P_{\min} , кПа.....	0,19/0,195

Такая замена позволила сократить время достижения давления 50 кПа более чем на 5 с. При этом интегральные характеристики по массе (объему) поглощенного азота несколько возросли.

Заключение. По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Для конструкции устройства наиболее оптимальным с точки зрения достижения более низкого конечного давления и наибольшего количества поглощенного азота является использование цилиндрических таблеток.

2. Место инициирования существенно влияет на временные характеристики процесса. В оптимальной конструкции наименьшее время достижения давления 50 кПа достигается при инициировании у дальнего от входного газового отверстия торца корпуса газопоглотительного устройства.

3. Оптимальная стадия воспламенения базируется на использовании быстрогорящих лент из титана и бора, что, с одной стороны, улучшает временные характеристики, а с другой — освобождает место для дополнительных газопоглотительных элементов (увеличивает массу поглощенного азота).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лысенко А.Л. *Физические процессы, протекающие при сжигании титана в среде азота, и разработка на их основе технологии вакуумирования*. Автореф. дис. ... на соискание ученой степени канд. техн. наук, Москва, 2008.
- [2] Лысенко А.Л., Горбунов А.К., Грачев В.В., Буланов А.В. *Физико-химические процессы в технологии вакуумирования при сжигании порошка титана в среде азота*. Москва, Научное издание технологий, 2008.
- [3] Лысенко Л.В., Буланов А.В., Лысенко А.Л. Оценка кинетики энерготехнологических процессов. *Сб. ст. Энерготехнологические процессы. Проблемы и перспективы*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

Статья поступила в редакцию 03.04.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лысенко А.Л. Исследование конденсации азота в титане. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/criogen/1256.html>

Лысенко Андрей Леонидович родился в 1974 г., окончил Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана. Кан. техн. наук, доцент кафедры физики КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: исследование энерготехнологических процессов.

Experimental technique in investigating the energotechnological process of nitrogen condensation in titanium

© A.L. Lysenko

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, 248000, Russia

This paper describes the design of the device to condense nitrogen in titanium. The author considers the variants of condensation of wet and dry nitrogen. The main stages of carrying out the experiment are demonstrated.

Keywords: *energotechnological processes, nitrogen condensation, transport and kinetic processes.*

REFERENCES

- [1] Lysenko A.L. Fizicheskie protsessy protekayushchie pri szhiganii titana v srede azota, i razrabotka na ikh osnove tekhnologii vakuumirovaniya. [Physical processes occurring during the combustion of titanium in nitrogen, and the development of technology based on their evacuation]. *Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Author's abstract of PhD diss.]. Moscow, 2008.
- [2] Lysenko A.L., Gorbunov A.K., Grachev V.V., Bulanov A.V. *Fiziko-khimicheskie protsessy v tekhnologii vakuumirovaniya pri szhiganii poroshka titana v srede azota* [Physico-chemical processes in vacuum technology for burning titanium powder in nitrogen]. Moscow, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2008.
- [3] Lysenko L.V., Bulanov A.V., Lysenko A.L. Otsenka kinetiki energotekhnologicheskikh protsessov [Evaluating the kinetics of energotechnological processes]. *V sbornike: Energotekhnologicheskie protsessy. Problemy i perspektivy* [Coll. Articles. Energotechnological processes. Problems and prospects]. Moscow, BMSTU Publ., 2004.

Lysenko A.L. (b. 1974) graduated from Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University. Ph.D., Assoc. Professor of the Physics Department, Kaluga Branch of BMSTU. Scientific interests include investigation of energotechnological processes.