

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования

«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра технологии металлов

## **ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ**

Методические указания к лабораторной работе  
по дисциплине «Материаловедение» для студентов  
направлений 15.03.01. (150700.62) «Машиностроение», 15.03.05.  
(151900.62) «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств», специальности 21.05.04.  
(130400.65) «Горное дело», специализация  
«Горные машины и оборудование»  
очной формы обучения

Составители В. В. Драчев  
К. П. Петренко

Утверждены на заседании кафедры  
Протокол № 5 от 12.11.2014  
Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
направления 15.03.01. (150700.62)  
Протокол № 4 от 19.11.2014  
Электронная копия находится  
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2014

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомиться с технологическим процессом химико-термической обработки на примере цементации, нитроцементации и азотирования. Исследовать структуру и свойства обработанных поверхностных слоев деталей.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Химико-термической обработкой (ХТО) называют поверхностное насыщение стали различными элементами путем их диффузии из внешней среды при высокой температуре. Цель ХТО – повышение твердости, износостойкости, усталостной прочности, контактной выносливости и коррозионной стойкости поверхности деталей машин.

Процесс ХТО состоит из трех стадий:

1. Диссоциация – выделение насыщающего элемента в активном атомарном состоянии.
2. Адсорбция – захват поверхностью стали свободных атомов насыщающего элемента.
3. Диффузия – проникновение насыщающего элемента в глубь металла.

В зависимости от того, каким элементом насыщают поверхностный слой, существуют следующие виды ХТО:

- цементация (углеродом);
- азотирование (азотом);
- нитроцементация, цианирование (углеродом и азотом одновременно);
- диффузионное насыщение металлами и неметаллами (хромирование – хромом, алитирование – алюминием, силицирование – кремнием, борирование – бором и др.).

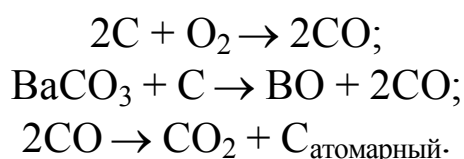
### 2.1. Цементация

Цементация – процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом.

Цементации подвергают детали машин, которые должны иметь износостойкую рабочую поверхность и вязкую сердцевину: зубчатые колеса, валы, пальцы, кулачки, червяки и т. д. Такие свойства обеспечивают вязкие низкоуглеродистые стали, содержащие 0,10-0,25 % углерода. Для цементации используют стали марок 10, 15, 20, 25, 15Х, 20Х, 15ХГР, 18ХГТ, 25ХГТ, 12ХН3А, 20ХН4А, 20ХН2М и др. Поверхность насыщается углеродом до 0,8 – 1,1 % на глубину 0,5 – 2 мм.

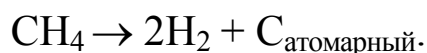
В промышленности применяют два способа цементации: в твердом и в газовом карбюризаторе (науглероживающей среде).

Наиболее распространенный твердый карбюризатор состоит из древесного угля с добавками 20 – 25 %  $\text{BaCO}_3$  для интенсификации процесса и 3 – 5 %  $\text{CaCO}_3$  для предотвращения спекания частиц карбюризатора. Детали, подлежащие цементации, и карбюризатор упаковывают в стальной ящик и нагревают в печи до температуры 910 – 930 °С. При этом протекают реакции:



Образующиеся активные атомы углерода диффундируют вглубь металла. Слой толщиной 1 мм образуется за 8 – 10 ч. После цементации ящик охлаждают на воздухе до 400 – 500 °С и затем раскрывают.

При газовой цементации в качестве карбюризатора используют природный газ, состоящий почти полностью из метана  $\text{CH}_4$ , а также жидкие углеводороды (керосин, бензол и др.), каплями подаваемые в герметичное рабочее пространство печи, где они образуют газовую среду по реакции:



Температура цементации 930 – 950 °С. Слой толщиной 1 мм образуется за 6 – 7 ч. В случае газовой цементации можно получить заданную концентрацию углерода в слое, сокращается длительность процесса (не надо прогревать ящики), обеспечивается

возможность полной механизации и автоматизации процессов, упрощается последующая термическая обработка изделий. Ее широко применяют на заводах, изготавливающих детали массовыми партиями. Цементация в твердом карбюризаторе используется в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Структура цементованного слоя после медленного охлаждения определяется содержанием углерода и, в соответствии с диаграммой Fe – Fe<sub>3</sub>C, состоит из трех зон: заэвтектоидной наружной (C > 0,8 %, структура – перлит и цементит вторичный), эвтектоидной (C = 0,8 %, структура – перлит) и доэвтектоидной (C < 0,8 %, структура – феррит и перлит) (рис. 1). Структура доэвтектоидной (переходной) зоны отличается от структуры сердцевины меньшим количеством феррита, доля которого возрастает от поверхности к сердцевине. Принято различать полную и эффективную толщину цементованного слоя. За эффективную толщину принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины доэвтектоидной зоны.

После цементации обязательно выполняют термическую обработку с целью обеспечения максимальной твердости цементованного слоя и вязкой сердцевины. В зависимости от условий работы детали, а также от технологических свойств стали применяют различные режимы термической обработки (рис. 2).

Для ответственных, тяжело нагруженных деталей машин, испытывающих динамические нагрузки, применяют сложную термическую обработку, состоящую из двух закалок (полной и неполной) и низкого отпуска (рис. 2, а). При первой закалке (полной) с нагревом выше температуры A<sub>c3</sub> на 30 – 50 °С происходит перекристаллизация сердцевины детали с образованием мелкого аустенитного зерна, что обеспечивает мелкозернистость продуктов распада. Одновременно при этом в поверхностном слое растворяется цементитная сетка, которая при быстром охлаждении вновь не образуется. Вторую закалку (неполную) с нагревом выше A<sub>c1</sub> на 30 – 50 °С проводят для устранения перегрева цементованного слоя и придания ему высокой твердости. Заключительной операцией является низкий отпуск при 160 – 200 °С, переводящий мартенсит закалки в поверхностном слое в отпущенный мартенсит и уменьшающий остаточные напряжения.

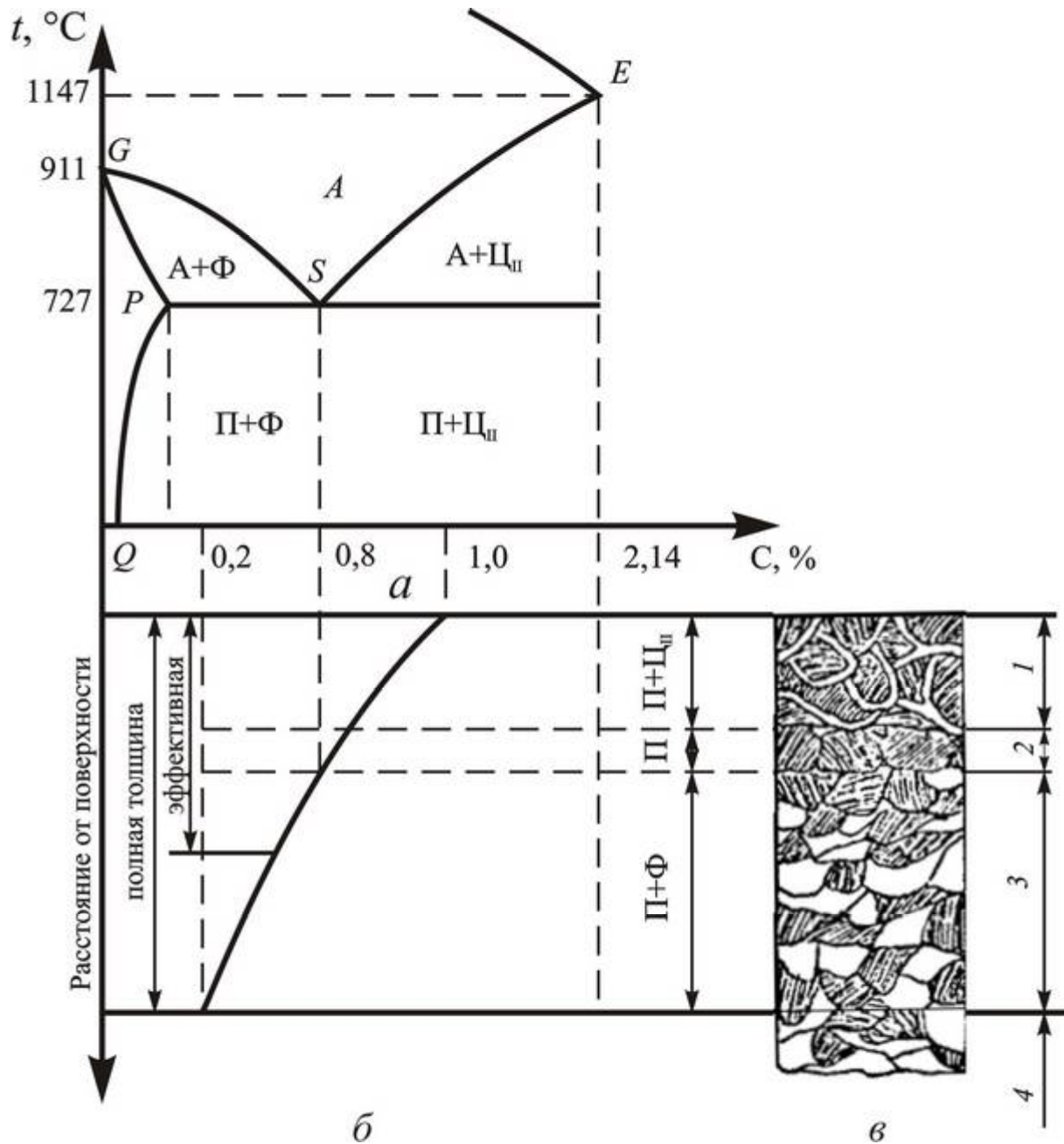


Рис. 1. Влияние содержания углерода на структуру цементованного слоя:  
*a* – диаграмма состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C; *б* – изменение содержания углерода в цементованном слое; *в* – структура цементованного слоя (1 – заэвтектоидная зона, 2 – эвтектоидная зона, 3 – доэвтектоидная (переходная) зона, 4 – сердцевина)

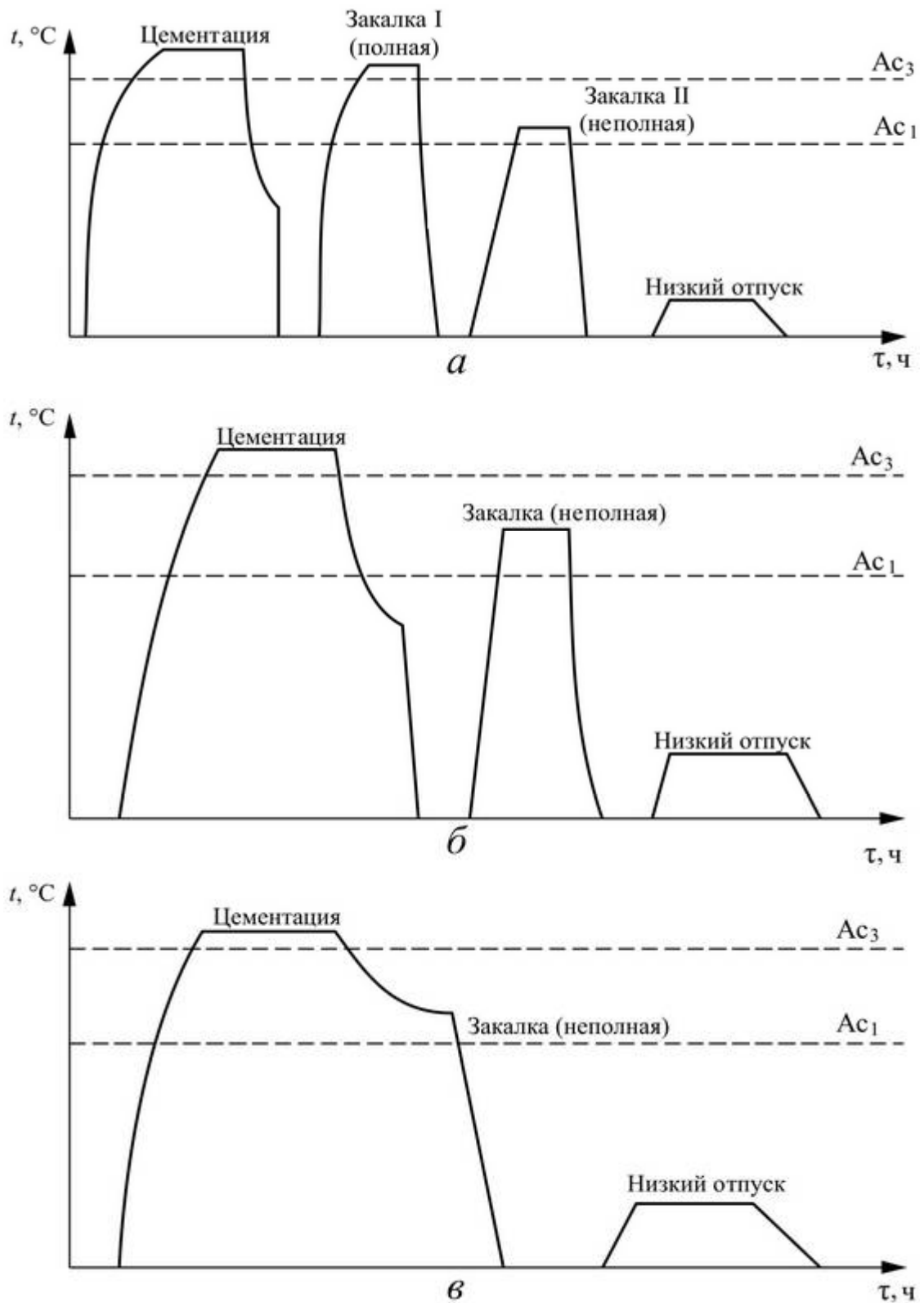


Рис. 2. Режимы термической обработки цементованных деталей:  
*а* – для ответственных деталей; *б, в* – для менее ответственных деталей из углеродистых сталей и для деталей из легированных наследственно мелкозернистых сталей

Для менее ответственных деталей из углеродистых сталей и для деталей из легированных наследственно мелкозернистых сталей применяют более простую термообработку, состоящую из одной неполной закалки и низкого отпуска (рис. 2, б). В этом случае температура неполной закалки несколько повышается, чтобы растворить цементитную сетку в заэвтектоидной зоне цементованного слоя и обеспечить образование глобулярных вторичных карбидов.

В случае газовой цементации закалку можно проводить после подстуживания с цементационного нагрева (рис. 2, в). Такая обработка является наиболее экономичной.

В результате термической обработки поверхностный слой будет иметь структуру отпущенного мартенсита с глобулярными включениями вторичных карбидов (твердость 56 – 62 HRC или 650 – 800 HV). Структура сердцевины зависит от химического состава стали и может быть: феррито-перлитной (160 – 180 HB) – в углеродистых сталях (стали 15, 20, 25), сорбитной (25 – 35 HRC) – в низколегированных сталях (15X, 20X, 15XФ, 20Г2), бейнитной или даже мартенситной с пониженным содержанием углерода (40 – 45 HRC) – в среднелегированных сталях (20ХН3А, 20Х2Н4А, 20ХН3ФА).

## 2.2. Азотирование

Азотированием называется процесс диффузионного насыщения поверхности стали азотом. Для азотирования применяют среднеуглеродистые стали, содержащие Cr, Mo, V, W, Al, Ti. Нитриды этих элементов обладают высокой твердостью и термической устойчивостью. Типичными для азотирования являются стали 38Х2МЮА, 38ХМЮА, 35ХМЮА. В настоящее время для этой цели применяют также конструкционные стали 40ХФА, 30Х3МФ1, 38ХНМФА, 40ХГМ, 30Х3ВА, 30ХГТ, 30ХТ2, 30ХТ2Н3Ю, а при невысоких контактных нагрузках – 30Х, 40Х. Кроме того, для повышения коррозионной стойкости азотированию подвергают жаропрочные и коррозионно-стойкие конструкционные стали, а также высокопрочные чугуны.

Перед азотированием детали подвергают термической обработке, состоящей из закалки и высокого отпуска (температура

отпуска должна быть выше температуры азотирования) – улучшению на структуру сорбита отпуска. Затем производят механическую обработку, придающую окончательные размеры изделию. После азотирования производят окончательное шлифование или полирование.

Азотирование проводят в герметичных камерах, куда подается аммиак  $\text{NH}_3$ . При нагреве он диссоциирует по реакции:



Атомарный азот адсорбируется поверхностью стали и диффундирует вглубь металла.

Существует две разновидности азотирования: низкотемпературное – для повышения поверхностной твердости и износостойкости и высокотемпературное – для улучшения коррозионной стойкости.

Обычно применяют низкотемпературное азотирование, которое проводят при температуре  $500 - 520 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $24 - 60$  ч. Толщина слоя составляет  $0,3 - 0,6$  мм, твердость  $1100 - 1200 \text{ HV}$ . Высокотемпературное азотирование ведут при  $650 - 700 \text{ }^\circ\text{C}$ . Продолжительность процесса  $1 - 6$  ч при толщине слоя  $0,3 - 0,4$  мм и твердости  $800 - 950 \text{ HV}$ .

Структура азотированного слоя, распределение азота и твердости в ней приведены на рис. 3. Она включает в себя темный тонкий слой коррозионно-стойкой  $\epsilon$  – фазы (твердый раствор на основе  $\text{Fe}_2\text{N}$ ), затем следует зона белой нетравящейся  $\gamma'$  – фазы (твердый раствор на основе  $\text{Fe}_4\text{N}$ ), третья зона представляет из себя азотистый эвтектоид – смесь азотистого феррита  $\alpha$ ,  $\gamma'$  – фазы, карбонитридов и нитридов. Эффективной азотируемой зоной считается зона внутреннего азотирования без первой зоны.

По сравнению с цементацией азотирование имеет ряд преимуществ: более высокая твердость и износостойкость поверхностного слоя, сохранение им высоких свойств при нагреве до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  (цементованный слой – до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ), повышенное сопротивление коррозии. Недостатками азотирования являются большая длительность процесса и необходимость применения дорогих легированных сталей.



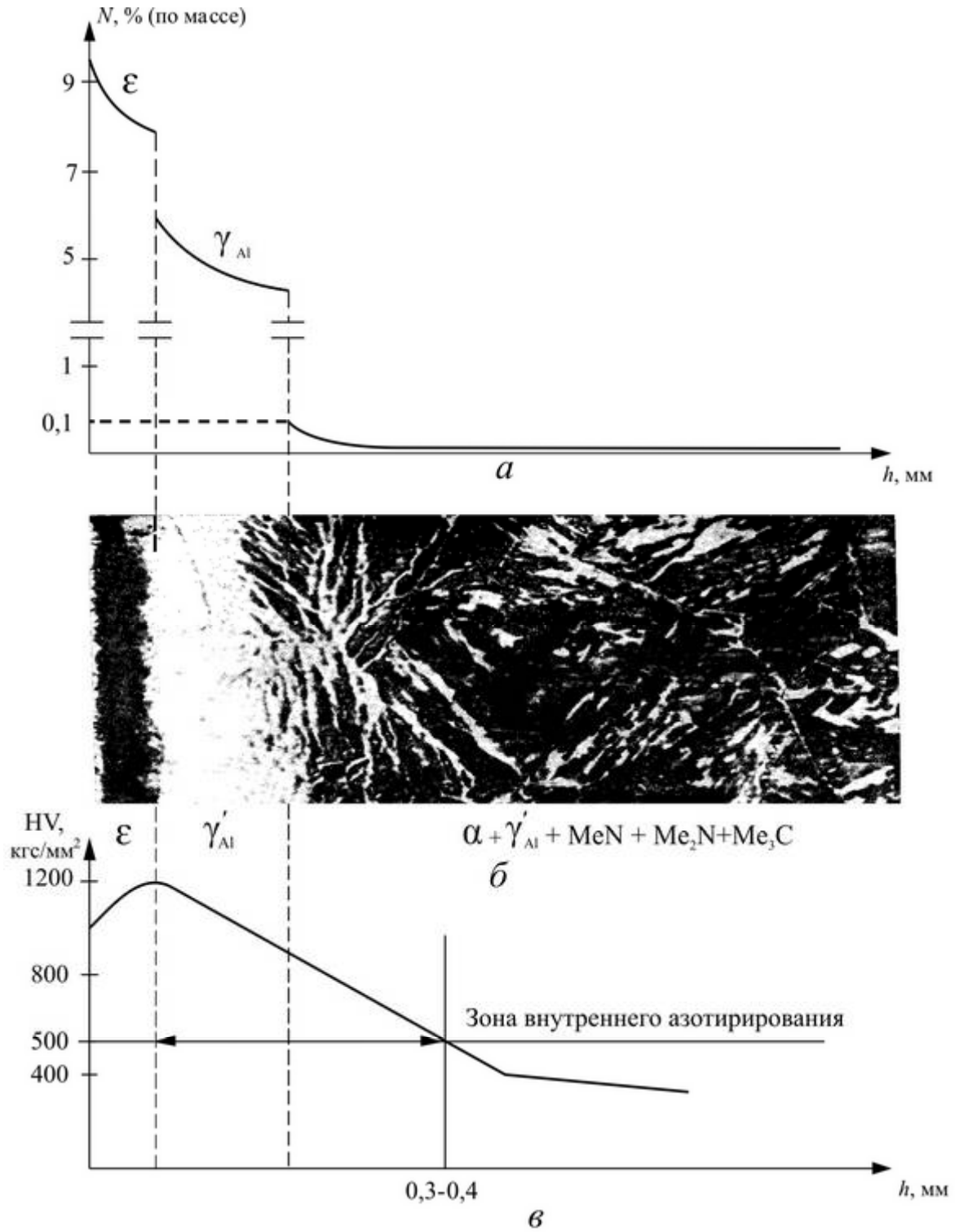


Рис. 3. Структура и свойства азотированного слоя:  
 $a$  – распределение азота;  $\bar{b}$  – структура;  
 $\bar{b}$  – распределение твердости

Азотирование применяют для изготовления деталей, испытывающих высокие циклические нагрузки, трение, абразивный износ: коленчатые валы, гильзы цилиндров, червяки, шестерни и др.

### 2.3. Нитроцементация

Нитроцементация – процесс насыщения поверхности стали одновременно углеродом и азотом. Этот метод ХТО применяется с той же целью и на тех же сталях, что и цементация.

Нитроцементацию проводят в газовой среде, состоящей из смеси природного газа и аммиака, при 840 – 860 °С. Продолжительность процесса 4 – 10 ч, толщина слоя 0,2 – 0,8 мм. После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи и низкий отпуск при 160 – 180 °С (рис. 2, в).

Одновременное насыщение стали углеродом и азотом может также производиться при 820 – 860 °С в расплавленных солях, содержащих цианистый натрий: 20 – 25 % NaCN, 25 – 50 % NaCl и 25 – 50 % Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Такой процесс называют цианированием. Несмотря на сокращение длительности (слой толщиной 0,15 – 0,30 мм образуется за 30 – 90 мин), цианирование используется реже из-за ядовитости цианистых солей.

Структура поверхностного слоя после термической обработки состоит из мартенсита отпуска, остаточного аустенита и небольшого количества мелких, равномерно распределенных карбонитридов. Твердость 58 – 60 HRC (700 – 750 HV). Сердцевина имеет ту же структуру, что и после цементации. Чаще всего это троостит, бейнит или низкоуглеродистый мартенсит с твердостью 40 – 45 HRC.

Преимуществами нитроцементации по сравнению с цементацией являются меньшая длительность процесса за счет ускорения диффузии углерода в присутствии азота, меньшая деформация деталей из-за более низкой температуры процесса, более простая термообработка за счет совмещения операций нитроцементации и закалки, большее сопротивление износу и коррозии. Однако, из-за меньшей глубины слоя, детали после нитроцементации уступают цементованным по контактной усталостной прочности.

Нитроцементацию широко применяют в автомобиле- и тракторостроении для изготовления деталей сложной конфигурации, склонных к короблению.

#### 2.4. Диффузионное насыщение металлами и неметаллами

Эти процессы применяют для повышения коррозионной стойкости, жаростойкости, твердости и износостойкости сталей и сплавов. Диффузионное насыщение обычно осуществляют в твердых средах (порошках) соответствующего состава. Насыщаемые детали вместе с порошком упаковывают в металлические контейнеры, нагревают до 1000 – 1200 °С и выдерживают несколько часов.

В структуре насыщенного слоя образуются твердые растворы легирующего элемента в  $\alpha$ -железе и упрочняющие вторичные фазы в виде химических соединений ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Упрочняющие фазы повышают твердость и износостойкость, а окислы – коррозионную стойкость и жаростойкость.

Состав смесей, свойства и применение приведены в таблице.

Таблица

Процессы диффузионного насыщения

Процесс ХТО	Состав смеси, %	Твердость HV; глубина слоя $h$ , мм	Применение
Алитуирование	I. 49 – 49,5 Al; 49 – 49,5 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 1 – 2 $\text{NH}_4\text{Cl}$ II. 99,5 FeAl; 0,5 $\text{NH}_4\text{Cl}$	500 HV; $h = 0,2 – 1,0$	Для повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости

Продолжение таблицы

Процесс ХТО	Состав смеси, %	Твердость HV; глубина слоя $h$ , мм	Применение
Хромирование	I. 50 FeCr; 43 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 7 NH <sub>4</sub> Cl II. 60 FeCr; 38,8 каолин; 1,2 NH <sub>4</sub> Cl	1200 – 1300 HV; $h = 0,1 – 0,2$	Для повышения коррозионной стойкости, износостойкости, жаростойкости
Силицирование	I. 40 Si; 59 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 1 NH <sub>4</sub> Cl II. 75 FeSi; 20 шамот; 5 NH <sub>4</sub> Cl	200 – 300 HV; $h = 0,3 – 1,0$	Для повышения коррозионной стойкости, износостойкости и твердости
Борирование	I. Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> II. NaCl; BaCl <sub>2</sub> ; B <sub>4</sub> C	1800 – 2000 HV; $h = 0,1 – 0,2$	Для повышения средней износостойкости в 4 – 6 раз по сравнению с цементацией, высокой коррозионной стойкости в агрессивных средах

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с основными теоретическими положениями.
2. С помощью металлографического микроскопа изучить структуру цементованного слоя после цементации и после термической обработки, а также азотированного слоя. Зарисовать их.
3. Измерить распределение твердости в термообработанных образцах после цементации.

4. Используя окуляр со шкалой, измерить толщину заэвтектоидной, эвтектоидной и доэвтектоидной зон и рассчитать эффективную глубину цементованного слоя на образцах до термической обработки. Цену деления окулярной шкалы определить с помощью объект–микрометра с ценой деления 0,01 мм по формуле:

$$Ц = \frac{n_1 \cdot 0,01}{n_2},$$

где  $Ц$  – цена деления окулярной шкалы, мм;

$n_1$  – количество делений на объект-микрометре;

$n_2$  – количество делений на окулярной шкале.

#### 4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Наименование и цель лабораторной работы.
2. Рисунки структур цементованного и азотированного слоев.
3. Расчет эффективной толщины цементованного слоя.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое цементация, нитроцементация, азотирование?
2. С какой целью проводят ХТО?
3. Какие стали используются для различных видов ХТО?
4. Какие существуют способы цементации, азотирования?
5. В чем преимущество газовой цементации по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе?
6. Из каких зон состоит цементованный слой?
7. С какой целью проводится термическая обработка после цементации, нитроцементации, какие существуют варианты?
8. Каковы преимущества нитроцементации?
9. Особенности технологии азотирования, область применения.

10. Методы диффузионного насыщения металлами и неметаллами, их применение.

### **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Материаловедение: учебник для студентов вузов / под ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 648 с.
2. Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 4-е изд. – М.: Альянс, 2009. – 528 с.
3. Лахтин, Ю. М. Химико-термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин, Б. Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.

Составители

Вячеслав Владиславович Драчев  
Константин Петрович Петренко

## ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Методические указания к лабораторной работе  
по дисциплине «Материаловедение» для студентов  
направлений 15.03.01. (150700.62) «Машиностроение», 15.03.05.  
(151900.62) «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств», специальности 21.05.04. (130400.65)  
«Горное дело», специализация  
«Горные машины и оборудование»  
очной формы обучения

Рецензент С. В. Лацинина

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 08.12.2014. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Уч.-изд. л. 0,7. Тираж 50 экз. Заказ

КуГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А