



Московский государственный технический университет  
имени Н. Э. Баумана

## **Методические указания**

**Л.А. Московских, Н.С. Герасимова**

# **ОТПУСК ЗАКАЛЕННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана

Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
Калужский филиал

**Л.А. Московских, Н.С. Герасимова**

# **ОТПУСК ЗАКАЛЕННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

*Методические указания*



УДК 669.01  
ББК 30.3  
М82

**Рецензент:**

зам. главного инженера ОАО «Калужский  
турбинный завод» *А.З. Павловский*

Утверждено методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана  
(протокол № 1 от 06.10.15)

**Московских Л. А.**

М82 Отпуск закаленных углеродистых сталей : методические указания по выполнению лабораторной работы по курсу «Материаловедение» / Л. А. Московских, Н. С. Герасимова. — Калуга : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. — 20 с.

В методических указаниях рассматриваются основные виды отпуска углеродистых сталей и превращения, происходящие при этом. Описаны влияния легирующих элементов на превращения при отпуске.

Указания предназначены для студентов всех специальностей.

УДК 669.01  
ББК 30.3

© Московских Л.А.,  
Герасимова Н.С., 2016  
© Издательство МГТУ  
им. Н.Э. Баумана, 2016

## ВВЕДЕНИЕ

Закаленные стали имеют высокие твердость и прочность, но очень низкие пластические свойства, т. е. сталь в закаленном состоянии очень хрупка и ненадежна в эксплуатации. Причиной высокой твердости и хрупкости является пересыщение твердого раствора на основе  $\alpha$ -железа углеродом и возникающие из-за этого огромные внутренние напряжения. Для устранения этого недостатка применяют следующую операцию термообработки — *отпуск*.

В зависимости от процессов, происходящих при отпуске, и от изменений структуры и свойств различают три вида отпуска:

- 1) низкотемпературный отпуск;
- 2) среднетемпературный отпуск;
- 3) высокотемпературный отпуск.

При отпуске формируются окончательная структура и свойства изделия.

Отпуск полностью или частично устраняет внутренние напряжения, возникающие при закалке. Эти напряжения снимаются тем полнее, чем выше температура отпуска.

Наиболее интенсивно напряжения снижаются в результате выдержки в течение 15–30 мин. После выдержки в течение 1,5 ч напряжения снижаются до минимальной величины, которая может быть достигнута отпуском при данной температуре.

**Цель работы:** формирование навыков определения влияния температуры отпуска на твердость закаленных углеродистых сталей.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

*Отпуском* называют термическую операцию, заключающуюся в нагреве закаленной стали до температур, не превышающих точку  $A_{C1}$  (т. е. не выше линии *PSK*), выдержке и последующем охлаждении чаще всего на воздухе. Отпуск является окончательной операцией термической обработки, в результате которой сталь получает требуемые механические свойства.

**Целью отпуска** является повышение вязкости и пластичности, снижение твердости и уменьшение внутренних напряжений закаленных сталей.

С повышением температуры нагрева прочность обычно снижается, а пластичность и вязкость растут. Температуру *отпуска* выбирают исходя из требуемой прочности конкретной детали.

## 1.1. ОСНОВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ ПРИ ОТПУСКЕ

Пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железа (*мартенсит*) обладает большим запасом свободной энергии и поэтому не является стабильным. Следовательно, в закаленной стали должны протекать процессы, приводящие систему к более устойчивому состоянию, т. е. *углерод* должен выделяться из решетки *мартенсита*. Эти процессы идут и при комнатной температуре, но с бесконечно малой скоростью. При нагреве закаленной стали скорость диффузии увеличивается, и чем выше температура, тем выше подвижность атомов *углерода*. Таким образом, происходит распад пересыщенного твердого раствора с образованием равновесных фаз: *карбидов* и *феррита*. Рассмотрим последовательно этапы распада *мартенсита* при нагреве.

При нагреве до  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  скорость распада *мартенсита* ввиду малой подвижности атомов настолько мала, что заметных изменений в строении закаленной стали не наблюдается даже с применением весьма точных методов исследования.

При более высоких температурах нагрева (до 160–180 °С) происходит выделение *углерода* из решетки *мартенсита* и образование очень мелких *карбидов*, связанных с *мартенситом*. Уменьшение концентрации *углерода* в твердом растворе снижает напряжения, поэтому твердость и хрупкость несколько уменьшаются. Однако образующиеся очень мелкие *карбиды* оказывают сопротивление движению дислокаций под действием приложенных нагрузок, поэтому прочность почти не снижается.

Процесс распада *мартенсита* завершается при нагреве до температур 300–350 °С. Чем выше температура, тем более интенсивно происходит распад, так как скорость диффузии *углерода* возрастает. *Мартенсит* превращается в мягкий *феррит*, *карбиды* немного укрупняются, однако все еще остаются мелкими и являются препятствием для движения дислокаций. Сталь с такой структурой имеет высокие прочностные и пластические характеристики, особенно высокий предел упругости.

При температурах выше 450–500 °С идет процесс укрупнения частиц *карбидов*, они приобретают округлую форму. Первый процесс называется **коагуляцией**, второй – **сфероидизацией**. Структура будет состоять из зерен *феррита* и крупных, сферической формы, *карбидов*. Сталь обладает высокой вязкостью и высокими пластическими свойствами при достаточной прочности.

## 2. ВИДЫ ОТПУСКА

В зависимости от процессов, происходящих при отпуске, и от изменений структуры и свойств различают три вида отпуска.

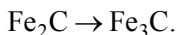
**1. Низкий (низкотемпературный) отпуск** проводят при температурах не выше 150–300 °С. Время выдержки при этом рекомендуется 2–3 ч. При таких температурах происходит частичное обезуглероживание *мартенсита* и выделение из него некоторого количества избыточного *углерода* в виде частиц  $\epsilon$ -*карбида железа*. Образующаяся структура, состоящая из частичного обезуглероженного мартенсита и  $\epsilon$ -*карбидов*, называется **отпущенным мартенситом**. Выход некоторого количества *углерода* из решетки *мартенсита* способствует уменьшению её искажения и снижению

внутренних напряжений. При таком отпуске несколько повышается прочность и вязкость без заметного снижения твердости. В целом изменение свойств при низком отпуске незначительно. Так, закаленная сталь с содержанием *углерода* 0,5–1,3 % после низкого отпуска сохраняет твердость в пределах 58–63 HRC, а следовательно, обладает высокой износостойкостью. Однако такая сталь не выдерживает значительных динамических нагрузок.

Низкому отпуску подвергают режущий и мерительный инструмент из углеродистых и низколегированных сталей, работающий без значительного разогрева рабочей части, высокоуглеродистые стали, все шарикоподшипниковые стали (**ШХ15**), детали, работающие в условиях износа, а также детали, прошедшие поверхностную закалку или цементацию.

**2. Средний (среднетемпературный) отпуск** выполняют при температурах 350–500 °С, проводится для деталей, в которых требуется максимальный предел упругости. Время выдержки рекомендуется 1–2 ч.

При таких температурах происходит дальнейшее обезуглероживание *мартенсита*, приводящее к его превращению в обычный  $\alpha$ -раствор, т. е. в *феррит*. Одновременно происходит карбидное превращение по схеме



В результате образуется феррито-цементитная смесь, называемая **трооститом отпуска**. Наблюдается снижение твердости до величины 40–50 HRC, а также снижение внутренних напряжений.

При повышении температуры активизируется диффузия. Диффузия *углерода* при такой температуре достаточна для превращения *мартенсита* в перлитную структуру, но недостаточна для перемещения *углерода* на большие расстояния. В итоге образуется смесь *феррита* и *цементита*.

*Особенности среднего отпуска*: маленький размер кристаллов, кристаллы равноосные, мелкодисперсные (**троостит отпуска**).

Такой отпуск обеспечивает высокий предел упругости и предел выносливости, что позволяет применять его для различных упругих элементов, преимущественно для рессор, пружин, некоторых видов штампов.

**3. Высокий (высокотемпературный) отпуск** проводят при 500–600 °С. Время выдержки рекомендуется 0,5–1 ч. Структурные изменения при таких температурах заключаются в укрупнении (коагуляции) частиц *цементита*. В результате этого образуется феррито-цементитная смесь, называемая **сорбитом отпуска**. Так же как и *троостит отпуска*, эта структура характеризуется зернистым строением в отличие от пластинчатых структур *троостита* и *сорбита* закалки. Твердость стали после высокого отпуска снижается до 25–35 HRC. Однако уровень прочности при этом ещё достаточно высок. В то же время обеспечивается повышенная пластичность и особенно ударная вязкость, практически полностью снимаются внутренние напряжения, возникшие при закалке.

Таким образом, высокий отпуск на *сорбит* обеспечивает наилучший комплекс механических свойств, позволяющий применять его для деталей, работающих в условиях динамических нагрузок. Такой же отпуск рекомендуется для деталей машин из легированных сталей, работающих при повышенных температурах.

Высокий отпуск применяется для деталей, в которых необходимо сочетание высокой ударной вязкости и достаточной прочностью.

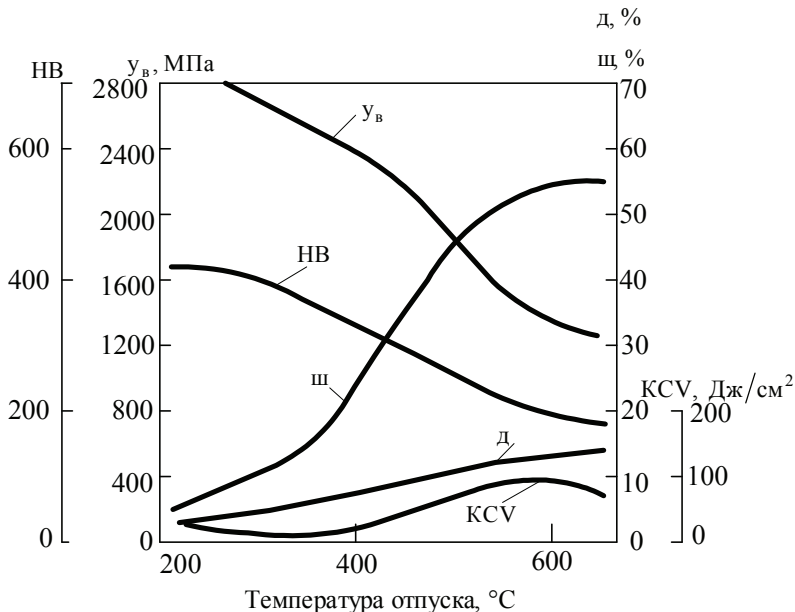
*Термическую обработку, состоящую из закалки на мартенсит и последующего высокого отпуска на сорбит, называют термическим улучшением.* Вообще термическому улучшению подвергают детали из среднеуглеродистых (0,3–0,5 % С) конструкционных сталей, к которым предъявляют высокие требования по пределу текучести, пределу выносливости и ударной вязкости. Однако износостойкость улучшенной стали вследствие её пониженной твердости невысока.

### **3. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ПОСЛЕ ОТПУСКА**

Характеристики прочности углеродистой стали (временное сопротивление, предел текучести и твердость) непрерывно уменьшаются с ростом температуры отпуска выше 300 °С, а показатели пластичности (относительное сужение и удлинение) непрерывно повышаются (рис. 1). Ударная вязкость начинает интенсивно возрастать



при температуре отпуска выше 300 °С. Максимальной ударной вязкостью обладает сталь с сорбитной структурой, отпущенная при 600 °С. Некоторое снижение ударной вязкости при температуре выше 600 °С обусловлено образованием слишком грубых частиц цементита.



**Рис. 1.** Влияние температуры отпуска на механические свойства стали 45

#### 4. ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОТПУСКЕ

Скорость охлаждения после отпуска оказывает большое влияние на величину остаточных напряжений. Чем медленнее охлаждение, тем меньше остаточные напряжения. Так, охлаждение на воздухе дает напряжения в 7 раз меньше, а охлаждение в масле в 2,5 раза меньше по сравнению с охлаждением в воде. По этой

причине изделия сложной формы во избежание их деформации после отпуска следует охлаждать медленно (*на воздухе*), а детали из некоторых легированных сталей, склонных к отпускной хрупкости, рекомендуется охлаждать в *масле* (иногда даже в воде).

Указанные выше температурные интервалы стадий отпуска характерны для углеродистых сталей. При изменении химического состава закаливаемой стали они могут смещаться по температурной шкале на сотни градусов.

Легирующие элементы, входящие в состав легированных сталей, особенно такие как Mo, W, Cr, Ti, V и Si, сильно тормозят диффузионные процессы, происходящие при отпуске закаленной стали. Поэтому после отпуска при одинаковой температуре легированная сталь сохраняет более высокую твердость и прочность. Это делает легированные стали более теплостойкими, способными работать при повышенных температурах.

## 5. ОТПУСКНАЯ ХРУПКОСТЬ

Обычно с повышением температуры отпуска ударная вязкость увеличивается, а скорость охлаждения не влияет на свойства. Но для некоторых сталей наблюдается снижение ударной вязкости. Этот дефект называется **отпускной хрупкостью** (рис. 2). И является *недостатком* ряда легированных конструкционных улучшаемых сталей. Различают **отпускную хрупкость I и II рода**.

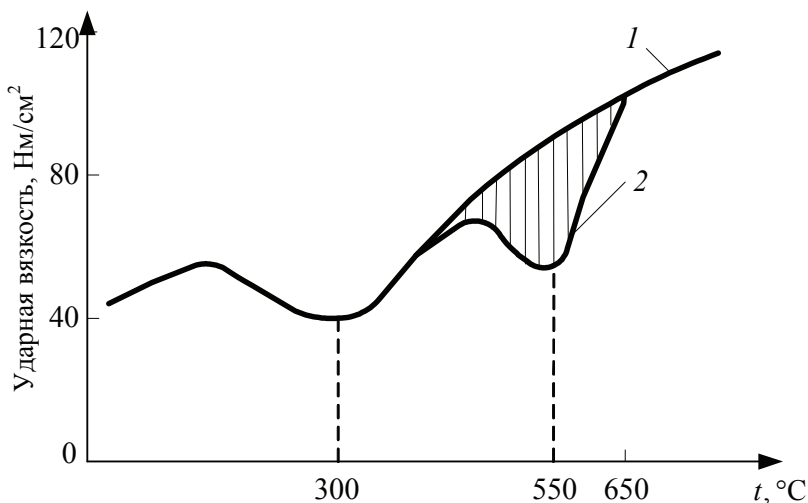
При медленном охлаждении кривая имеет два минимума — для *отпуска* при 300 °С и при 550 °С. *Отпускная хрупкость* в районе 300 °С проявляется у всех сталей независимо от состава и скорости охлаждения при отпуске.

**Отпускная хрупкость I рода** наблюдается при *отпуске* в области температур *около* 300 °С. *Она не зависит от скорости охлаждения*.

Это явление связано с неравномерностью превращения опущенного *мартенсита*. Процесс протекает быстрее вблизи границ зерен, чем внутри зерна. У границ наблюдается концентрация напряжений, поэтому границы хрупкие.

Отпускная хрупкость I рода «*необратима*», т. е. при повторных нагревах тех же деталей не наблюдается.

**Отпускная хрупкость II рода** наблюдается у легированных сталей при медленном охлаждении после отпуска в области 450–600 °С.



**Рис. 2.** Влияние отпуска на ударную вязкость легированной стали (схема):

1 — быстрое охлаждение; 2 — медленное охлаждение

При *высоком отпуске* по границам зерен происходит образование и выделение дисперсных включений *карбидов*. Приграничная зона обедняется легирующими элементами. При последующем медленном охлаждении происходит диффузия *фосфора* к границам зерна. Приграничные зоны обогащаются *фосфором*, снижаются прочность и ударная вязкость. Этому дефекту способствуют *хром*, *марганец* и *фосфор* (> 0,001 %). Уменьшают склонность к отпускной хрупкости II рода *молибден* и *вольфрам* (до 0,5 %), а также быстрое охлаждение после отпуска.

Отпускная хрупкость II рода «*обратима*», т. е. при повторных нагревах и медленном охлаждении тех же сталей в опасном интервале температур дефект может повториться.

Стали, склонные к отпускной хрупкости II рода, нельзя использовать для работы с нагревом до 650 °С без последующего быстрого охлаждения (например, штампы для горячей штамповки).

## 6. ЗАДАЧИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Задачи.** В настоящей работе студенты должны изучить основные виды отпуска углеродистых сталей.

После выполнения лабораторной работы студенты должны приобрести навыки:

- ◆ проведения отпуска углеродистых сталей;
- ◆ выбора необходимой температуры отпуска для любой марки углеродистой стали;
- ◆ описания структурных изменений, происходящих в стали при отпуске;
- ◆ описания влияния легирующих на превращения при отпуске;
- ◆ определения примерной области применения того или иного вида отпуска.

### **Порядок выполнения работы:**

1. Кратко опишите назначение, виды отпуска, превращения, происходящие при нагреве закаленных сталей.
2. Произведите отпуск образцов сталей 45 и У10, закаленных с оптимальных температур, по заданному преподавателем режиму. Для испытания используют образцы цилиндрической формы, высота которых 12–15 мм и диаметр 20 мм. Поверхности образцов должны быть плоскопараллельными и не иметь раковин, трещин и других видимых дефектов.

Режимы отпуска из закаленных образцов включают:

- ◆ нагрев образцов до температуры 200 °С, 300 °С, 400 °С, 500 °С, 600 °С;
- ◆ выдержку в печи при каждой заданной температуре отпуска в течение 30 мин;
- ◆ охлаждение образцов на воздухе.

Загрузку и выгрузку образцов из печей следует производить клещами с удлиненными ручками.

3. Зачистите торцевые поверхности отпущенных образцов и определите их твердость по Роквеллу (шкала С). Полученные значе-

ния переведите в числа твердости по Бринеллю и запишите в сводную таблицу результатов (табл. 1).

Таблица 1

**Влияние температуры отпуска на твердость закаленных сталей 45 и У10 (сводная таблица результатов)**

Сталь 45				Сталь У10			
№	Температура отпуска, °С	Тверд. после отпуска, НВ	Структура после закалки	№	Температура отпуска, °С	Тверд. после отпуска, НВ	Структура после закалки
Исходное состояние (закалка)			М	Исходное состояние (закалка)			М + Ц <sub>II</sub>
1	200			1	200		
2	300			2	300		
3	400			3	400		
4	500			4	500		
5	600			5	600		

4. Определите структуру образцов после отпуска, учитывая превращения, проходящие при заданной температуре, и полученную твердость.
5. Используя результаты, полученные всей группой, постройте графики зависимости твердости сталей 45 и У10 от температуры отпуска.
6. Проведите анализ полученных результатов, ответив на следующие вопросы:
  - ◆ Как изменилась твердость и структура закаленных сталей при повышении температуры отпуска?
  - ◆ Какому отпуску целесообразно подвергать детали машин из стали 45 и инструмента из стали У10?

**7. СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

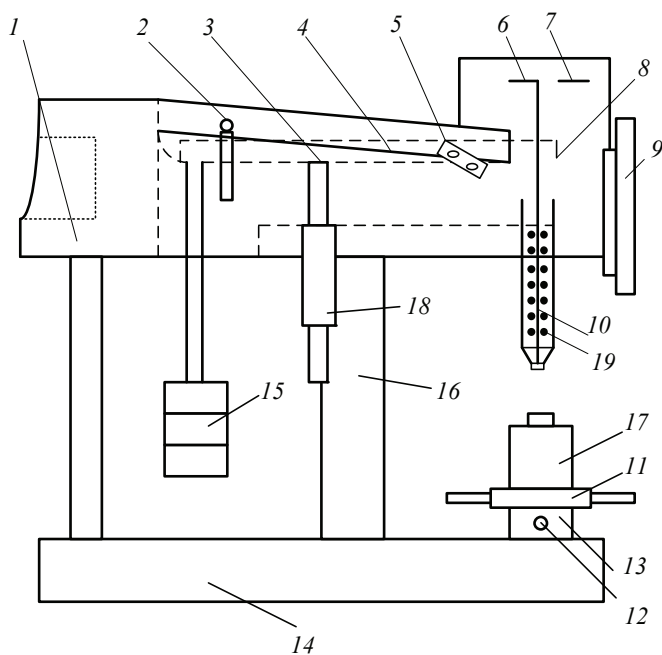
**Необходимые материалы и оборудование:**

1. Образцы закаленных сталей 45, У10.
2. Муфельная электропечь с заданной температурой (рис. 3).

3. Твердомер Роквелла (рис. 4).
4. Шлифовальный круг.
5. Клещи.
6. Таблица перевода твердости.



**Рис. 3.** Муфельная электропечь с заданной температурой



**Рис. 4.** Прибор для измерения твердости по Роквеллу

**Устройство прибора Роквелла.** На рис. 4 приведена принципиальная схема твердомера Роквелла. Основными его частями являются: поперечина 1, подвеска 2, шток амортизатора 3, рычаг 4, рукоятка 5, винт 6, крышка 7, рычажок 8, призма 9, шпиндель 10 с закрепленным на его конце индентором, маховик 11 для перемещения образца, шпонка 12, направляющая втулка 13, станина 14, грузы 15, стойка 16, подъемный винт 17, масляный амортизатор 18, пружина 19, индикатор с двумя шкалами — черной и красной. При этом с большой стрелкой индикатора всегда совмещается нуль черной шкалы, и ни в коем случае — красной. Барабан для точной установки шкалы индикатора на нуль, электромотор, обеспечивающий работу прибора.

## **ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующий материал:

1. Название и цель работы.
2. Краткие сведения о превращениях при нагреве в закаленной углеродистой стали.
3. Виды отпуска.
4. Таблица с данными по режимам отпуска, твердости и структуре исследуемых сталей до и после отпуска.
5. Графики изменения твердости закаленной стали в зависимости от температуры отпуска.
6. Ответы на все вопросы в задании.
7. Результаты и выводы из лабораторной работы.



## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение термической операции «отпуск».
2. После какого вида термической обработки производится отпуск?
3. Поясните, с какой целью проводится отпуск.
4. Перечислите, к каким видам изделий применяется низкотемпературный отпуск.
5. Перечислите, к каким видам изделий применяется среднетемпературный отпуск.
6. Перечислите, к каким видам изделий применяется высокотемпературный отпуск.
7. Перечислите, какие процессы протекают при отпуске до 200 °С.
8. Перечислите, какие процессы протекают при отпуске до 400 °С.
9. Перечислите, какие процессы протекают при отпуске до 600 °С.
10. Поясните, что представляет собой структура мартенсит отпуска.
11. Сформулируйте, что такое троостит отпуска.
12. Сформулируйте, что такое сорбит отпуска.
13. Перечислите, в каком температурном интервале отпуска наиболее интенсивно протекают процессы сфероидизации и коагуляции цементита.
14. Объясните, с каким процессом при отпуске связано уменьшение напряжений в стали.
15. Перечислите, как изменяются свойства закаленной стали при повышении температуры отпуска.
16. Объясните, чем отличается сорбит отпуска от троостита отпуска.
17. Назовите, какая структура образуется при отпуске до 200 °С.
18. Назовите, какая структура образуется при отпуске до 400 °С.
19. Назовите, какая структура образуется при отпуске до 600 °С.
20. Назовите, как изменяется прочность стали  $\sigma_B$  при отпуске до 600 °С.
21. Назовите, как изменяется предел текучести  $\sigma_{0,2}$  при отпуске до 400 °С.
22. Назовите, как изменяются характеристики пластичности  $d$  и  $\psi$  при отпуске до температуры 600 °С.

23. Назовите, какую операцию необходимо выполнить, если при отпуске получены более низкие твердость HRC и прочность  $U_B$ , чем требовалось.
24. Назовите, какую операцию необходимо выполнить, если при отпуске получили более высокие твердость HRC и прочность  $U_B$ , чем требовалось.
25. Назовите, какую температуру отпуска выбрать для изделий, от которых требуются высокие упругие свойства.
26. Назовите, какую температуру отпуска надо выбрать для изделий, от которых требуются высокие твердость и износостойкость.
27. Назовите, что произойдет в структуре стали, если после отпуска при 600 °C произвести дополнительный отпуск при 200 °C.
28. Перечислите, какие основные превращения идут при нагреве закаленных сталей.
29. Назовите, как влияет температура отпуска на структуру и свойства закаленных сталей.
30. Определите, какому отпуску следует подвергать детали, работающие в условиях износа, или режущий инструмент. Какова цель его и технология проведения?
31. Определите, какому отпуску следует подвергать силовые упругие элементы. Назовите, какие структура и свойства формируются при его проведении.
32. Определите, какому отпуску следует подвергать детали, работающие в сложных условиях нагружения (валы, оси, болты и др.).

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Арзамасов Б.Н. и др. *Материаловедение : учебник для вузов*. Москва, Машиностроение, 2001, 632 с.
- [2] Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. *Материаловедение*. 3-е издание. Москва, Машиностроение, 1990, 528 с.
- [3] Лахтин Ю.М. *Материаловедение*. Москва, Машиностроение, 1993, 448 с.
- [4] Шуваева Е.А., Перминов А.С. *Материаловедение. Неметаллические и композиционные материалы*. Москва, Изд-во МИСИС, 2013, 77 с.
- [5] Турилина В.Ю. *Материаловедение. Механические свойства металлов. Термическая обработка металлов. Специальные стали и сплавы*. Москва, Изд-во МИСИС, 2013, 154 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....	4
1.1. ОСНОВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ ПРИ ОТПУСКЕ .....	4
2. ВИДЫ ОТПУСКА .....	5
3. ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ПОСЛЕ ОТПУСКА .....	7
4. ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ПРЕВРАЩЕНИЯ ПРИ ОТПУСКЕ .....	8
5. ОТПУСКНАЯ ХРУПКОСТЬ .....	9
6. ЗАДАЧИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....	11
7. СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ....	12
ФОРМА ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ .....	15
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ .....	16
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА .....	18

**Лидия Антиповна Московских  
Наталья Сергеевна Герасимова**

**ОТПУСК ЗАКАЛЕННЫХ  
УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

*Методические указания*

Редактор *С.Н. Капранов*  
Корректор *Т.В. Тимофеева*  
Технический редактор *А.Л. Репкин*

Подписано в печать 09.03.2016.  
Формат 60×84/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Печ. л. 1,25. Усл. п. л. 1,16. Тираж 50 экз. Заказ № 30

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Изготовлено в редакционно-издательском отделе  
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана  
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57–31–87