

**Министерство образования Российской Федерации**  
**Южно-Уральский государственный университет**  
**Кафедра физического металловедения и физики твёрдого тела**

**669.14(07)**  
**У932**

**В.Г. Ушаков, В.И. Филатов, Х.М. Ибрагимов**

**Выбор марки стали**  
**и режима термической обработки**  
**деталей машин**

**Учебное пособие для студентов-заочников**  
**машиностроительных специальностей**

**Челябинск**  
**Издательство ЮУрГУ**  
**2001**

УДК 669.14.018.4 (075.8) + [621.78: 669.14] (075.8)

Ушаков В.Г., Филатов В.И., Ибрагимов Х.М. Выбор марки стали и режима термической обработки деталей машин: Учебное пособие для студентов-заочников машиностроительных специальностей. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 23 с.

Учебное пособие по курсу «Материаловедение» предназначено для студентов-заочников, выполняющих контрольную работу по выбору материалов для деталей машин и инструментов и режимов их термической обработки.

Ил. 5, табл. 4, список лит. – 12 назв.

Одобрено учебно-методической комиссией физико-металлургического факультета.

Рецензенты: доц., к.т.н. Р.К. Галимзянов и к.т.н. Д.В. Шабуров.

## Введение

Из всех известных в технике материалов лучшее сочетание прочности, надёжности и долговечности имеет сталь, поэтому она является основным материалом для изготовления ответственных изделий, подвергающихся большим нагрузкам. Свойства стали зависят от её структуры и состава. Совместное воздействие термической обработки, которая изменяет структуру, и легирования - эффективный способ повышения комплекса механических характеристик стали.

Выбор стали для изготовления той или другой детали и метод её упрочнения определяется в первую очередь условиями работы детали, величиной и характером напряжений, возникающих в ней в процессе эксплуатации, размерами и формой детали и т.д.

### 1. Выбор марки стали для деталей машин

При выборе марки стали для конкретной детали конструктор должен учитывать требуемый уровень прочности, надёжности и долговечности детали, а также технологию её изготовления, экономию металла и специфические условия службы детали (температура, окружающая среда, скорость нагружения и т.п.).

Единых принципов при выборе марки стали пока не разработано, поэтому каждый конструктор выполняет эту задачу в зависимости от своего опыта и знаний; вследствие этого при выборе марки стали случаются и ошибки, что может привести к нежелательным последствиям.

Решая эту задачу, прежде всего, необходимо знать форму, размеры и условия работы детали. Предположим, что чисто конструктивно оптимальное решение найдено. Если сила, действующая на деталь, известна, то можно определить уровень напряжений в наиболее опасных сечениях детали (чем сложнее конфигурация изделия, тем точность такого расчёта меньше). Так как модули упругости для всех сталей практически одинаковы ( $E \sim 2 \cdot 10^5$  МПа,  $G \sim 0,8 \cdot 10^5$  МПа), то во многих случаях можно подсчитать упругую деформацию при максимальной нагрузке. При невозможности проведения таких расчётов необходимо провести натурные испытания. Если эта деформация находится в допустимых пределах, то следует перейти к основному вопросу – выбору марки стали, а если нет, то необходимо изменить конфигурацию детали: увеличить сечение, ввести рёбра жесткости и др. Следует помнить, что путём подбора марки стали упругую деформацию уменьшить практически невозможно. После этого следует перейти к оценке прочности, надёжности и долговечности детали.

Прочность характеризует сопротивление металла пластической деформации. В большинстве случаев нагрузка не должна вызывать остаточную пластическую деформацию выше определённого значения. Для многих деталей машин (за исключением пружин и других упругих элемен-

тов остаточной деформацией, меньшей 0,2 %, можно пренебречь, то есть, условный предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) определяет для них верхний предел допустимого напряжения [1].

Надёжность - это свойство материала противостоять хрупкому разрушению. Деталь должна работать при соблюдении условий, предусмотренных проектом (напряжение, температура, скорость нагружения и т.п.) и преждевременный её выход из строя свидетельствует о том, что она выполнена не из того металла, были нарушения технологии её изготовления или допущены серьёзные ошибки в расчётах прочности и т.д. Но в процессе эксплуатации возможны кратковременные отклонения некоторых параметров от пределов, установленных проектом, и если при этом деталь выдержала экстремальные условия, то она надёжна. Следовательно, надёжность зависит от температуры, скорости деформации и других выходящих за пределы расчёта параметров.

Долговечность – это свойство материала сопротивляться развитию постепенного разрушения, и она оценивается временем, в течение которого деталь может сохранять работоспособность. Это время не бесконечно, т.к. в процессе эксплуатации могут изменяться свойства материала, состояние поверхности детали и т.п. Другими словами, долговечность характеризуется сопротивлением усталости, износу, коррозии, ползучести и другим воздействиям, которые определяются временными показателями.

### 1.1. Определение допустимого напряжения

Показателем, наиболее обобщённо характеризующим прочность материала, является условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , определённый на гладком образце при одноосном растяжении. В этом случае сталь имеет наиболее низкие значения  $\sigma_{0,2}$  (при вязком разрушении), чем при других видах нагружения. Рассмотрим такой пример. Имеем 3 стали с разными значениями условного предела текучести:  $\sigma'_{0,2} < \sigma''_{0,2} < \sigma'''_{0,2}$  (рис.1). Выясним, будет ли экономия материала, если вместо стали 1 применить более прочную сталь 3. Это целесообразно, если могут быть использованы напряжения, равные  $\sigma'''_{0,2}$ , а это возможно, если допустима возникающая при таком напряжении деформация, равная  $\Delta l_3$ . Если же при эксплуатации детали допустима деформация не более чем  $\Delta l_1$ , то при напряжениях, больших  $\sigma'_{0,2}$ , размеры детали выйдут за допустимые пределы. Следовательно, в этом случае замена стали 1 сталью 3 не эффективна.

Таким образом, степень допустимой деформации (упругой и пластической) определяет и допустимый уровень напряжения, что является основным для выбора марки стали по прочности.

Данные ГОСТа (гарантируемые механические свойства) могут быть заложены в расчёты прочности деталей машин, если сталь на машиностроительных заводах не подвергается обработке, приводящей к изменению её структуры (холодная или горячая пластическая деформация, тер-

мическая обработка и т.п.), т.е. свойства металла в исходном состоянии и в изделии остаются неизменными.

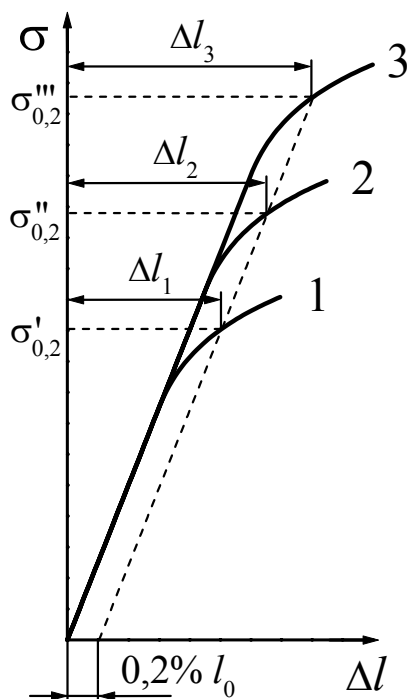


Рис.1. Начальный участок диаграммы деформации в координатах «Условное растягивающее напряжение ( $\sigma$ ) – абсолютное удлинение ( $\Delta l$ )» трёх сталей (1,2,3), где

$$\sigma = \frac{P}{F_0}, P - \text{растягивающая нагрузка}$$

в данный момент испытания,

$F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца;

$\Delta l = l_i - l_0$ ,  $l_i$  – длина образца на расчётном участке в данный момент испытания, а  $l_0$  – начальная расчётная длина образца

При повышении температуры отпуска от 200 до 600<sup>0</sup>С условный предел текучести углеродистых сталей с 0,2%С уменьшается от ~1200 до ~600 МПа, а сталей с 0,4%С – от ~1600 до ~800 МПа [2], следовательно, варьированием температуры отпуска можно изменить прочностные свойства стали примерно в 2 раза.

Однако в общем случае не следует стремиться к получению прочности выше необходимой, т.к. при этом, как правило, снижается вязкость стали, т.е. уменьшается надёжность стали как конструкционного материала. Другими словами, большой запас прочности, достигаемый применением более прочных материалов, - не гарантия надёжности, скорее наоборот.

## 1.2. Обеспечение надёжности

Случаи неожиданных разрушений наблюдаются нередко при напряжениях в 2...4 раза меньших, чем допустимые, и ещё в большее число раз меньших, чем  $\sigma_{0,2}$ . При этом возможна лишь незначительная упругая деформация и практически полное отсутствие пластической. Как же объяснить это противоречие?

Работа разрушения  $A = A_3 + A_p$ , где

$A_3$  – работа, затраченная на зарождение трещины;

$A_p$  – работа микропластической деформации в устье растущей трещины.

Любой поверхностный дефект приводит к уменьшению  $A_3$ , и могут наблюдаться случаи, когда  $A_3 = 0$  (внутренние дефекты менее существенны, т.к. наибольшие напряжения сосредотачиваются на поверхности детали). В этом случае только  $A_p$  материала определяет надёжность детали. Для оценки надёжности материала чаще всего используют следующие параметры [3]:

1)  $KCU = \frac{A}{S_0}$ , где  $S_0$  – площадь поперечного сечения ударного образца в месте надреза радиусом 1 мм и глубиной 2 мм;

2)  $KCT = \frac{A}{S_{\text{нетто}}}$ , где  $S_{\text{нетто}}$  – площадь поперечного сечения ударного образца, в котором перед испытанием наведена усталостная трещина глубиной  $\sim 1$  мм;

3) порог хладноломкости;

4) критерий Ирвина ( $K_{1c}$ ).

Ударная вязкость **KCU** оценивает работоспособность материала в условиях ударного нагружения при комнатной температуре при наличии в металле U – образного концентратора напряжения. Параметр **KCT** характеризует работу развития трещины в этих же условиях нагружения и оценивает способность материала тормозить начавшееся разрушение. Если материал имеет **KCT** = 0, то это означает, что процесс его разрушения идёт за счёт упругой энергии системы «образец – нож маятника копра». Такой материал хрупок, эксплуатационно ненадёжен. И, наоборот, чем больше параметр **KCT**, определённый при рабочей температуре, тем выше надёжность материала в условиях эксплуатации.

Порог хладноломкости характеризует влияние снижения температуры на склонность материала к хрупкому разрушению. Его определяют по результатам испытаний образцов с надрезом при понижающейся температуре. Сочетание при таких испытаниях ударного нагружения, надреза и низких температур – основных факторов, способствующих охрупчиванию, важно для оценки поведения материала при экстремальных условиях эксплуатации.

На переход от вязкого разрушения к хрупкому указывают изменения строения излома и резкое снижение ударной вязкости (рис.2), наблюдаемое в интервале температур ( $t_b - t_n$ ). Строение излома изменяется от волокнистого матового при вязком разрушении ( $t_{\text{испыт.}} \geq t_b$ , где  $t_b$  – верхний порог хладноломкости), до кристаллического блестящего при хрупком разрушении ( $t_{\text{испыт.}} \leq t_n$ , где  $t_n$  – нижний порог хладноломкости). Порог хладноломкости обозначают интервалом температур ( $t_b - t_n$ ), либо одной температурой  $t_{50}$ , при которой в изломе образца сохраняется 50% волокнистой составляющей и величина **KCU** снижается на половину.

О пригодности материала для работы при заданной температуре судят по температурному запасу вязкости, равному разности температуры эксплуатации и  $t_{50}$ . При этом, чем ниже температура перехода мате-

риала в хрупкое состояние по отношению к рабочей температуре, тем больше температурный запас вязкости и выше гарантия от хрупкого разрушения.

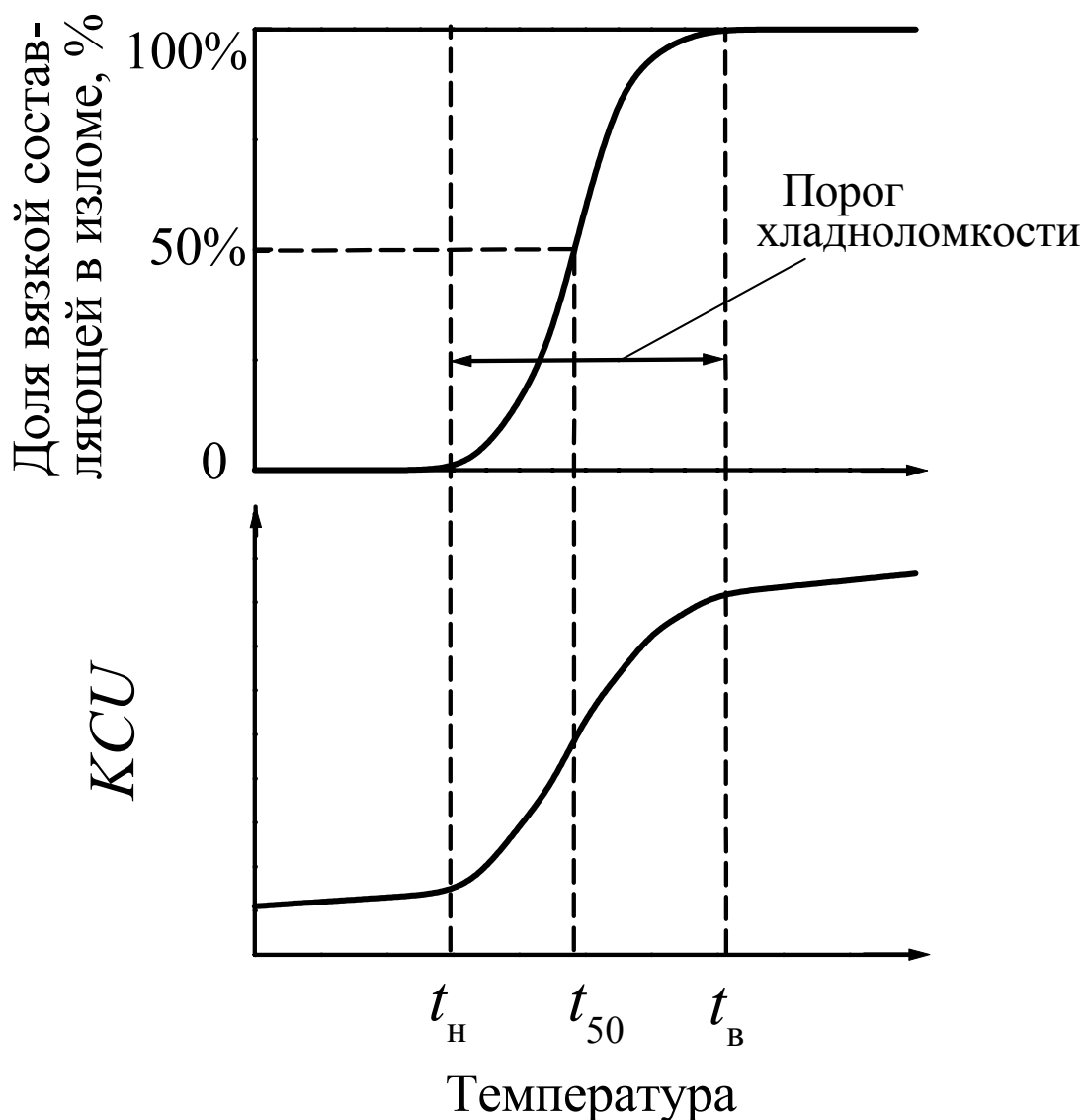


Рис.2 Влияние температуры испытания на процент вязкой составляющей в изломе и ударную вязкость ( **KCU** ) стали.

Запас вязкости для ответственных деталей, испытывающих динамические нагрузки, принимается равным  $60^{\circ}$ , для неответственных деталей и промежуточного случая соответственно  $20^{\circ}$  и  $40^{\circ}$ .

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что следует выбирать такой режим обработки, чтобы порог хладноломкости ( $t_{50}$ ) детали, работающей при комнатной температуре, был бы не выше, чем  $-20^{\circ} \dots -40^{\circ}\text{C}$ .

Порог хладноломкости стали существенно зависит от её чистоты, т.е. содержания в ней примесей. В табл. 1 приведено изменение  $t_{50}$  стали при увеличении на 0,01% содержания некоторых примесей [4].

Таблица 1

Влияние некоторых элементов на порог хладноломкости стали

Химический элемент	Смещение $t_{50}$ , °C	Химический элемент	Смещение $t_{50}$ , °C
<b>O</b>	+ 15	<b>Cu</b>	+ 1
<b>N</b>	+ 10	<b>Sn</b>	+ 30
<b>C</b>	+ 2	<b>Zn</b>	+ 7
<b>P</b>	+ 7	<b>Bi</b>	+ 25
<b>S</b>	- 10	<b>Sb</b>	+ 20

Следует отметить, что влияние примесей на порог хладноломкости стали наиболее сильно проявляется при их содержании до ~ 0,05%. При большей концентрации примесей интенсивность их влияния резко снижается. Обычно количество вредных примесей в стали составляет тысячные или десятитысячные доли процента. Наиболее значительно из них на температуру хладноломкости влияет кислород. Поэтому способ раскисления и вакуумная обработка - очень важные металлургические приёмы повышения качества стали, т.к. они приводят к снижению содержания кислорода и азота в стали.

Помимо чистоты стали на порог хладноломкости влияют и структурные факторы, в частности, размер зерна: чем оно крупнее, тем  $t_{50}$  выше. Измельчить зерно можно путём проведения термической обработки. Поэтому при выборе марки стали необходимо решить, что в данном конкретном случае более целесообразно: получить сталь более высокой чистоты и удовлетвориться свойствами металла, полученными в состоянии поставки, или ориентироваться на термическую обработку. Для сталей, применяющихся в высокопрочном состоянии ( $\sigma_{0,2} = 1400...1800$  МПа), необходимо использование всех способов повышения их надёжности.

Высокопрочные стали являются уже не столь надёжными, т.к. они полностью вязко не разрушаются, а имеют хрупко-вязкий излом, однако их также необходимо оценить с точки зрения надёжности. При этом следует иметь в виду, что они обычно применяются для тонких деталей, а с уменьшением толщины (< 10 мм)  $t_{50}$  резко понижается. В этом случае целесообразно воспользоваться критерием Ирвина  $G_{1c}$  (интенсивность напряжений в устье трещины). Величина его зависит от силы, необходимой для продвижения вершины трещины на единицу длины. По своему смыслу и размерности (Н/м или Н·м/м<sup>2</sup>) критерий  $G_{1c}$  аналогичен удельной работе распространения трещины (КСТ, Н·м/м<sup>2</sup> или Дж/м<sup>2</sup>). При расчётах пользуются коэффициентом интенсивности напряжений:  $K_{1c} = \sqrt{E \cdot G_{1c}}$ , МПа·м<sup>1/2</sup>. Высокопрочные материалы, как показал



А.Гриффитс, потому и являются не надёжными, что они при хрупком и хрупко-вязком разрушении чрезвычайно чувствительны к различным дефектам. Следовательно, не идеальная прочность такого материала, которая равна теоретической (для стали  $\sim 20.000$  МПа), а величина дефекта (длина трещины) определяет допустимую нагрузку. Поэтому для высокопрочных материалов допустимы не почти мифические свойства прочности идеального материала, а размер дефекта и способность к затуплению трещины (косвенно характеризуемая значением  $K_{1c}$ ), что и определяет допустимую нагрузку (рис.3).

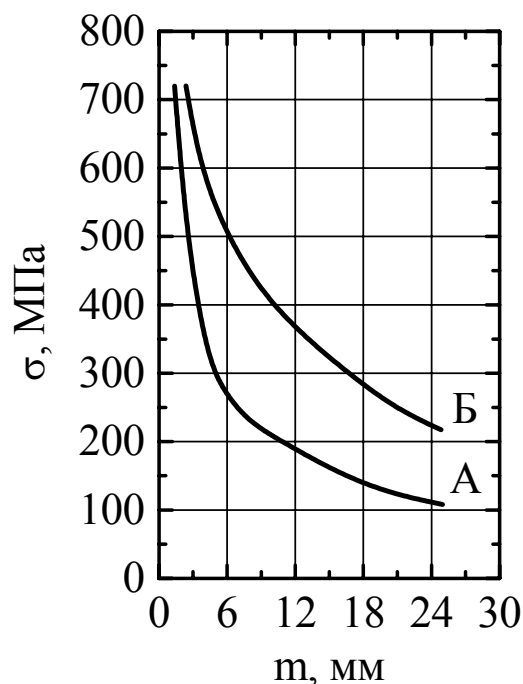


Рис.3 Зависимость критического напряжения ( $\sigma$ ) от размера дефекта ( $m$ ) для двух сталей (А и В) с разным значением  $K_{1c}$ :  
 А –  $K_{1c} = 31,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ,  
 Б –  $K_{1c} = 57,0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  [5]

Как видно из рис.3, при  $\sigma = 200$  МПа дефект длиной 6 мм безопасен. При таком дефекте разрушение произойдёт при  $\sigma = 260$  МПа, если  $K_{1c} = 31,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  и при 500 МПа, если  $K_{1c} = 57,0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , хотя условный предел текучести в обоих случаях может быть и одинаковым.

Таким образом, для сталей, разрушающихся вязко, выбор материала основан на соответствии рассчитанных напряжений и условного предела текучести при условии обеспечения удовлетворительного запаса вязкости, гарантирующего малую вероятность хрупкого разрушения. Для сталей же со смешанным или хрупким разрушением выбор напряжений определяется значениями  $K_{1c}$  и предельным размером дефекта. К сожалению, не накоплены ещё данные по  $K_{1c}$ , а методы обнаружения (измерения) дефектов, особенно внутренних, недостаточно отработаны.

### **1.3. Обеспечение долговечности**

Для большинства деталей машин их выход из строя в основном связан с двумя видами повреждений – износом и усталостью.

Износ представляет собой постепенное удаление с поверхности детали частиц металла. Чем выше твёрдость металла, тем меньше износ, хотя отдельные характеристики структуры (например, включения карбидов) или свойств (способность к наклёпу) могут внести определённый, а иногда и существенный вклад в сопротивление изнашиванию. Следовательно, способы повышения поверхностной твёрдости (поверхностная закалка или химико-термическая обработка – цементация, азотирование, цианирование и другие процессы) приводят, разумеется, в разной степени, к повышению износостойкости.

Усталостное разрушение состоит из трёх этапов:

- зарождение усталостной трещины;
- распространение трещины;
- лом детали (окончательное разрушение).

Распространение трещины и лом могут протекать по двум различным механизмам – вязкому и хрупкому (второй значительно быстрее первого). Это ещё раз свидетельствует о том, что сталь, испытывающая длительное воздействие повторно-переменных (циклических) напряжений, должна также иметь достаточный запас вязкости.

Усталостная трещина зарождается на поверхности детали в результате воздействия растягивающих напряжений. При наличии концентраторов напряжений растягивающие напряжения вокруг них повышаются, что и способствует более быстрому возникновению зародышевой трещины усталости. Наоборот, при наличии на поверхности детали остаточных сжимающих напряжений, действующие растягивающие напряжения уменьшаются и, следовательно, затрудняется образование зародышевой усталостной трещины.

Общий принцип повышения усталостной прочности металла состоит в том, что на поверхности детали создаётся слой с остаточными напряжениями сжатия за счёт поверхностного наклёпа, поверхностной закалки, химико-термической обработки и некоторых других менее распространённых способов поверхностного упрочнения. Так как эти слои обладают высокой твёрдостью, то указанные виды обработки приводят к повышению не только усталостной прочности, но и износостойкости.

Обеспечение таких параметров долговечности, как коррозионная стойкость, жаропрочность и др. в данном пособии не рассматривается.

### **1.4. Технологические и экономические требования**

Кроме необходимого комплекса механических свойств, к конструкционным сталям предъявляются и технологические требования, суть которых в том, чтобы трудоёмкость изготовления деталей из них была минимальной. Для этого сталь должна обладать хорошей обрабатываемостью.

мостью резанием и давлением, свариваемостью, способностью к литью и т.д. Эти свойства зависят от её химического состава и правильного выбора режимов предварительной термической обработки.

Наконец, к материалам для деталей машин предъявляются и экономические требования. При этом надо учитывать не только стоимость стали, но и трудоёмкость изготовления детали, её эксплуатационную стойкость в машине и другие факторы. В первую очередь нужно стремиться выбрать более дешёвую сталь, т.е. углеродистую или низколегированную. Выбор дорогой легированной стали оправдан только в том случае, когда за счёт повышения долговечности детали и уменьшения расхода запасных частей достигается экономический эффект.

Следует иметь в виду, что легирование стали должно быть рациональным, т.е. обеспечивать необходимую прокаливаемость. Введение легирующих элементов сверх этого, помимо удорожания стали, как правило, ухудшает её технологические свойства и повышает склонность к хрупкому разрушению.

## 1.5. Заключение

Как было отмечено выше, нет чётких единых принципов выбора марок сталей для изготовления деталей машин, т.е. немаловажную роль в этом процессе играет субъективный фактор. Это во многом связано ещё и с тем, что изложенные выше требования к материалу нередко противоречивы. Так, например, более прочные стали менее технологичны, т.е. труднее поддаются обработке резанием, холодной объёмной штамповке, сварке и т.д. Решение обычно компромиссно между указанными требованиями. Например, в массовом машиностроении предпочитают упрощение технологии и снижение трудоёмкости изготовления детали некоторой потерей свойств. В специальных же отраслях машиностроения, где проблема прочности (или удельной прочности) играет решающую роль, выбор стали и последующая технология её термической обработки должны рассматриваться только из условия достижения максимальных эксплуатационных свойств. При этом не следует стремиться к излишне высокой долговечности данной детали по отношению к долговечности самой машины.

Выбор материала обычно осуществляется на основании сравнительного анализа 2...3 марок сталей, из которых изготавливаются аналогичные детали других моделей машин.

Приступая к этой работе, вначале необходимо выяснить, какие нагрузки испытывает деталь. Если это напряжения растяжения или сжатия и они более или менее равномерно распределены по сечению, то деталь должна иметь сквозную прокаливаемость. Поэтому с увеличением сечения детали следует применять и более легированные стали. В табл. 2 приведены в качестве примера значения критического диаметра прокаливаемости  $D_{95}$  (95% мартенсита) некоторых сталей в зависимости от легирования [6].

## Критический диаметр некоторых сталей

№ п/п	Сталь	Критический диаметр $D_{95}$ (мм) при закалке:	
		в воде	в минеральном масле
1	40	10	2
2	40X	30	5
3	40ХН	50	35
4	40ХНМ	100	75

Например, для изготовления детали диаметром 30 мм можно рекомендовать сталь 40X (или другую сталь, имеющую такую же прокаливаемость), закалённую в воде. Если конфигурация детали сложная и охлаждение в воде приводит к значительной деформации, то вместо воды в качестве закалочной среды следует применять минеральное машинное масло, а вместо стали 40X – сталь 40ХН. В том же случае, когда деталь испытывает только изгибающие или крутящие нагрузки, её сердцевина не подвергается воздействию напряжений, поэтому прокаливаемость стали не имеет такого важного значения.

У многих деталей машин (валов, шестерён и т.д.) поверхность в процессе эксплуатации подвергается истиранию и в то же время на них воздействуют динамические (чаще всего ударные) нагрузки. Для успешной работы в таких условиях поверхность детали должна иметь высокую твёрдость, а сердцевина быть вязкой. Такое сочетание свойств достигается правильным выбором марки стали и последующим упрочнением её поверхностных слоёв. Для изготовления подобных деталей можно применять различные группы сталей и способы их поверхностного упрочнения:

а) малоуглеродистые стали ( $C \leq 0,3\%$ ) и подвергнуть их цементации (нитроцементации), закалке и низкому отпуску;

б) среднеуглеродистые стали (40, 45, 40X, 45X, 40ХН и др.), упрочняемые поверхностной закалкой с последующим низким отпуском;

в) среднеуглеродистые легированные стали (38X2МЮА и др.), которые подвергают азотированию.

В этом случае очень часто определённые требования предъявляют и к сердцевине деталей, в первую очередь, по прочности. В качестве примера в табл. 3 приведены структура и условный предел текучести сердцевины деталей диаметром 20 мм некоторых сталей после цементации, закалки и низкого отпуска [4].

Таблица 3

Структура и условный предел текучести сердцевинны некоторых сталей

№ п/п	Сталь	Структура сердцевинны детали	$\sigma_{0,2}$ , МПа
1	20	Феррит + перлит	~300
2	20Х	Бейнит	~700
3	18ХГТ	Мартенсит отпуска	~1000

Выше отмечалось, что возникающие усилия и габаритные размеры детали в большинстве случаев известны заранее, следовательно, известны и рабочие напряжения. Фактически, за исключением отдельных случаев, о которых речь будет идти ниже, уровень напряжений для стальных изделий должен находиться в пределах 1600...600 МПа (в таких примерно пределах изменяется  $\sigma_{0,2}$  при повышении температуры отпуска от 200 до 650 °С большинства конструкционных сталей). В реальных изделиях напряжения должны быть в 1,5 ... 2 раза ниже (так называемый запас прочности).

Табличных данных, которыми обычно пользуются конструкторы, недостаточно для правильного выбора материала. Такую работу должны осуществлять совместно конструктор и металлург: конструктор сообщает условия работы и геометрию детали, а металлург выбирает материал, наиболее пригодный для этих целей.

## 2. Выбор режима окончательной термической обработки деталей машин

Механические свойства стали определяются не только её составом, но зависят и от её строения (структуры). Поэтому целью термической обработки является получение необходимой структуры, обеспечивающей требуемый комплекс свойств стали. Различают предварительную и окончательную термическую обработки. Предварительной термической обработке подвергают отливки, поковки, штамповки, сортовой прокат и другие полуфабрикаты. Она проводится для снятия остаточных напряжений, улучшения обрабатываемости резанием, исправления крупнозернистой структуры, подготовки структуры стали к окончательной термической обработке и т.п. Если предварительная термическая обработка обеспечивает требуемый уровень механических свойств, то окончательная термическая обработка может и не проводиться.

При выборе упрочняющей обработки, особенно в условиях массового производства, предпочтение следует отдавать наиболее экономичным и производительным технологическим процессам, например, поверхностной закалке при глубинном индукционном нагреве, газовой цементации, нитроцементации и т.д.

Как известно, конструкционные стали общего назначения делятся на две группы:

- низкоуглеродистые ( $C = 0,10 - 0,25\%$ ) и
- среднеуглеродистые ( $C = 0,30 - 0,50\%$ ).

Низко- или малоуглеродистые стали подвергают цементации или нитроцементации с последующей обязательной закалкой и низким отпуском. Поэтому их чаще называют цементуемыми. Эти стали применяют для изготовления деталей машин, у которых поверхность в результате трения подвергается износу и одновременно на них действуют и динамические нагрузки. Для успешной работы в этих условиях поверхностный слой детали должен иметь твёрдость HRC 58 ... 62, а сердцевина обладать высокой вязкостью и повышенным пределом текучести при твёрдости HRC 30 ... 42.

При выборе вида химико-термической обработки следует иметь в виду, что нитроцементация имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией [8]: процесс проводится при более низкой температуре ( $840 \dots 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$  вместо  $920 \dots 930 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), получаются меньшие деформации и коробление изделий, диффузионный слой обладает более высоким сопротивлением износу и коррозии. Однако глубина нитроцементованного слоя должна быть в пределах  $0,2 \dots 0,8 \text{ мм}$ , т.к. при большей глубине в поверхностном слое детали появляются дефекты. Поэтому нитроцементации подвергают детали сложной формы, склонные к короблению, у которых глубина упрочнённого слоя должна быть до  $1 \text{ мм}$ . Если же по условиям работы детали глубина слоя должна быть более  $1 \text{ мм}$ , то следует отдать предпочтение газовой цементации.

Окончательные свойства цементованных деталей достигаются в результате последующей термической обработки, состоящей из закалки и низкого отпуска. Этой обработкой можно исправить структуру и измельчить зерно сердцевины и цементованного слоя, неизбежно увеличивающегося во время длительной выдержки (до  $10 \dots 11 \text{ час}$ ) при высокой температуре цементации, получить высокую твёрдость на поверхности и хорошие механические свойства сердцевины детали. В большинстве случаев, особенно для наследственно-мелкозернистых сталей, применяют закалку с  $820 \dots 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , т. е. выше критической точки  $A_{c1}$  сердцевины. Это обеспечивает получение максимальной твёрдости на поверхности детали и частичную перекристаллизацию, и измельчение зерна сердцевины. После газовой цементации часто применяют закалку без повторного нагрева, а непосредственно из цементационной печи после подстуживания деталей до  $840 \dots 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Такая обработка уменьшает коробление обрабатываемых изделий, но не исправляет структуру. Поэтому непосредственную закалку применяют только для наследственно-мелкозернистых сталей. Ответственные детали иногда подвергают двойной закалке: первая с  $880 \dots 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (выше  $A_{c3}$  сердцевины) для исправления структуры сердцевины; вторая с  $760 \dots 780 \text{ }^{\circ}\text{C}$  – для придания поверхности детали высокой твёрдости. Недостатки такой обработки:

сложность процесса, повышенное коробление, возможность окисления и обезуглероживания. В результате закалки поверхностный слой приобретает структуру высокоуглеродистого мартенсита и 15 ... 20% остаточного аустенита, иногда может быть небольшое количество избыточных карбидов.

После нитроцементации чаще применяют закалку непосредственно из печи с подстуживанием до 800 ... 825 °С.

Заключительной операцией термической обработки цементованных (нитроцементованных) деталей является низкий отпуск при 160 ... 180 °С, который снимает напряжения и переводит мартенсит закалки в поверхностном слое в отпущенный мартенсит. Структура сердцевины в зависимости от размеров сечения и прокаливаемости детали может быть разной: феррит + перлит, нижний бейнит или малоуглеродистый мартенсит с небольшим количеством остаточного аустенита.

После закалки высоколегированных сталей в структуре цементованного слоя сохраняется большое количество остаточного аустенита (до 60 % и более), снижающего твёрдость, и, следовательно, износостойкость детали. Для его разложения после закалки проводят обработку холодом, но чаще – высокий отпуск при 630 ... 640 °С, после чего следует повторная закалка с пониженной температуры (760 ... 780 °С) и низкий отпуск.

Среднеуглеродистые конструкционные стали применяют для изготовления деталей машин, к которым предъявляются высокие требования по пределу текучести, пределу выносливости и ударной вязкости. Такой комплекс механических свойств достигается в результате улучшения, т.е. закалки с высоким отпуском. Поэтому среднеуглеродистые стали называют также улучшаемыми. Структура стали после улучшения – сорбит отпуска. Закалка с высоким отпуском создаёт наилучшее соотношение прочности и вязкости стали, уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивает работу развития трещины и снижает температуру верхнего и нижнего порогов хладноломкости.

Высокие механические свойства после улучшения возможны лишь при обеспечении требуемой прокаливаемости, поэтому она служит важнейшей характеристикой при выборе этих сталей. Кроме прокаливаемости в таких сталях важно получить мелкое зерно (не менее 5 балла) и не допустить развития отпускной хрупкости.

Улучшенная сталь имеет невысокую износостойкость. Для её повышения, если это требуется по условиям работы детали, применяют поверхностную закалку, а в ответственных случаях – азотирование.

Особые классы конструкционных сталей (рессорно-пружинные, шарикоподшипниковые, коррозионно-стойкие, жаропрочные и др.) в данном пособии не рассматриваются.

### 3. Пример выполнения контрольной работы №2 по курсу «Материаловедение»

В процессе изучения курса «Материаловедение» студенты-заочники выполняют две контрольные работы, из которых первая охватывает основные разделы предмета, а вторая ставит целью применить полученные при изучении данной дисциплины знания для решения конкретных задач по выбору материалов для деталей машин и инструментов и режимов их термической обработки. Однако, учитывая, что для этого необходимы знания из других учебных курсов (сопротивления материалов, деталей машин и др.), которые ещё не изучались, а также тот факт, что на практике выбор материала осуществляют, как правило, совместно конструктор и металлург, в контрольной работе №2 задача несколько упрощена: наряду с названиями детали и изделия предложена и марка стали для её изготовления. Поэтому студенту требуется не выбрать, а обосновать предложенную для данной детали марку стали, исходя из анализа условий работы детали, дать характеристику указанной стали, назначить режимы её термической обработки для получения требуемых свойств, описать микроструктуру и привести механические характеристики после этой обработки. Наряду с этим, необходимо указать и другие марки сталей, из которых изготавливают аналогичные детали иных моделей машин, и их типовую термическую обработку.

При работе над контрольной работой №2 следует пользоваться справочниками и другой технической литературой.

**Задача.** Какую из имеющихся на заводе сталей: Ст4сп, 45 или 40ХН рационально использовать для изготовления шатуна двигателя внутреннего сгорания (ДВС) двутаврового сечения с наибольшей толщиной 20 мм? Нужна ли термическая обработка выбранной стали и если нужна, то какая? Дать характеристику микроструктуры и привести механические свойства стали после окончательной термообработки.

#### 3.1. Анализ условий работы детали и требования, предъявляемые к материалу

Шатун двигателя внутреннего сгорания предназначен для превращения возвратно-поступательного движения поршня через поршневой палец, соединённый с верхней головкой шатуна, во вращательное движение коленчатого вала двигателя, также соединённого с ним посредством нижней головки через осевой шарнир. Отсюда может быть проведён силовой анализ условий работы шатуна. Шатун ДВС как балка работает на чистое сжатие. Максимальное усилие сжатия шатуна ( $P_{ш}$ ) определяется произведением максимальной силы давления ( $p_{max}$ ) сгоревших газов на днище поршня и площади днища поршня ( $F_n$ ), т.е.

$$P_{ш} = p_{max} \cdot F_n.$$

Характер силового воздействия на стержень шатуна во время работы ДВС меняется в соответствии с изменением назначения отдельной



стадии рабочего цикла двигателя. В четырёхтактных ДВС рабочий цикл состоит из нескольких стадий, основными из которых являются всасывание, сжатие, сгорание, расширение (рабочий ход) и выпуск. При всасывании шатун работает, в основном, на растяжение, а при сжатии, рабочем ходе и выпуске – на сжатие и продольный изгиб. При этом в районе поршневой головки шатуна температура может достигать 100...150 °С, а давление на поршень при сгорании топливной смеси – 4,0 ... 5,5 МПа в карбюраторных двигателях и 9 ...14 МПа – в дизельных [9].

Из приведённого анализа особенностей эксплуатации шатуна следует, что он работает в сложных условиях. Для достижения требуемой его надёжности целесообразно предусмотреть:

- необходимую жёсткость, т.е. высокое сопротивление упругим деформациям от приложенных наибольших нагрузок для исключения недопустимых искажений, нарушающих нормальную работу шатунных подшипников;
- достаточную конструктивную прочность с учетом всех приложенных постоянных и циклических нагрузок, включая периодические перегрузки, связанные с допустимой в эксплуатации сменой режимов работы двигателя;
- стабильность работы во времени или сопротивление остаточным деформациям и изнашиванию опорных поверхностей от рабочих воздействий в течение всего срока службы или заданных межремонтных периодов [10].

На основании расчётов конструктор определил, что сталь, из которой будет изготовлен данный шатун, должна иметь предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) не менее 800 МПа, а ударная вязкость (КСУ) её при этом должна быть не менее 0,7 МДж/м<sup>2</sup> ( 7 кГм/см<sup>2</sup>).

### 3.2. Выбор марки стали.

Проведём сравнительный анализ имеющихся сталей: Ст4сп, 45 и 40ХН. Их химический состав в соответствии с ГОСТами приведён в табл.4.

Таблица 4

Химический состав некоторых сталей

№ п/п	Марка стали	Содержание элементов, вес. %						
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
1	Ст4сп	0,18 – 0,27	0,4 – 0,7	0,15– 0,30	не более 0,050	не более 0,04	–	–
2	45	0,42– 0,50	0,5 – 0,8	0,17– 0,37	не более 0,035	не более 0,035	–	–
3	40ХН	0,36 – 0,44	0,5 – 0,8	0,17– 0,37	не более 0,035	не более 0,035	0,45 – 0,75	1,0 – 1,4

Сталь марки Ст4сп по ГОСТ 380 - 94 имеет в состоянии поставки  $\sigma_B = 420 \dots 540$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 240 \dots 260$  МПа, т.е. значительно меньше 800 МПа.

У стали 45 после нормализации, т.е. в состоянии поставки,  $\sigma_B \approx 610$  МПа,  $\sigma_{0,2} \approx 360$  МПа [11], что тоже ниже требуемого значения.

Сталь 40ХН в состоянии поставки (после отжига) по ГОСТу 4543–71 имеет твердость не более НВ2070 МПа ( $207 \text{ кг/мм}^2$ ). Между  $\sigma_B$  и НВ сталей существует приближённая зависимость  $\text{НВ} \approx 3,5 \sigma_B$  [12]. Следовательно, у стали 40ХН  $\sigma_B \approx 600$  МПа, а  $\sigma_{0,2} < 400$  МПа, т.к. отношение  $\sigma_{0,2}/\sigma_B$  для отожжённой легированной стали не превышает  $0,5 \dots 0,6$  [5].

Таким образом, ни одна из этих сталей в состоянии поставки не имеет  $\sigma_{0,2} \geq 800$  МПа, поэтому для получения требуемой величины предела текучести шатун необходимо подвергнуть термической обработке.

Для низкоуглеродистой стали Ст4сп улучшающее влияние термической обработки незначительно. Кроме того, эта сталь имеет повышенное содержание фосфора, который снижает ударную вязкость и повышает порог хладноломкости (каждые  $0,01\%$  Р сдвигают его на  $20\text{--}25$  °С в сторону положительных температур). Поэтому для такой ответственной детали, как шатун двигателя, применение стали обыкновенного качества недопустимо. Остаются стали 45 и 40ХН.

Для получения требуемых свойств и, в частности, ударной вязкости не менее  $0,7 \text{ МДж/м}^2$ , требуется провести улучшение, т.е. закалку с высоким отпуском. Для получения однородных свойств по всему сечению детали улучшаемые стали должны обладать полной, т.е. сквозной прокаливаемостью. Сталь 45 имеет критический диаметр при закалке в воде  $D_{90} = 10$  мм,  $D_{50} = 15$  мм (90% и 50% мартенсита в центре детали соответственно), а у стали 45ХН  $D_{90} = 20$  мм,  $D_{50} = 35$  мм даже при охлаждении в масле [6]. Таким образом, углеродистая сталь 45 не будет иметь требуемых свойств по всему сечению шатуна толщиной 20 мм, поэтому данный шатун необходимо изготовить из стали 40ХН.

### 3.3. Характеристика стали 40ХН

Химический состав стали приведён в табл. 4. Критические точки:  $A_{c1} = 710$  °С,  $A_{c3} = 760$  °С,  $M_n = 340$  °С [7]. Сталь легирована хромом и никелем. Оба элемента растворяются в феррите и упрочняют его. При этом хром несколько снижает вязкость феррита, а никель повышает её. Важное значение имеет влияние легирующих элементов на порог хладноломкости. Наличие хрома в стали способствует некоторому повышению порога хладноломкости, тогда как никель его интенсивно снижает (при содержании в стали 1% никеля порог хладноломкости снижается

на 60 ...80 °С), уменьшая тем самым, склонность стали к хрупкому разрушению. Поэтому никель является наиболее ценным легирующим элементом.

Основная цель легирования конструкционной стали – повышение её прокаливаемости. Оба названные элементы снижают критическую скорость закалки и увеличивают прокаливаемость стали.

Таким образом, хромоникелевые стали обладают достаточно высокой прокаливаемостью, хорошей прочностью и вязкостью. Поэтому их применяют для изготовления крупных деталей сложной конфигурации, работающих при динамических нагрузках.

На рис. 4 приведена диаграмма распада переохлаждённого аустенита стали 40ХН в изотермических условиях, а влияние температуры отпуска на механические свойства этой стали представлено на рис.5 [7].

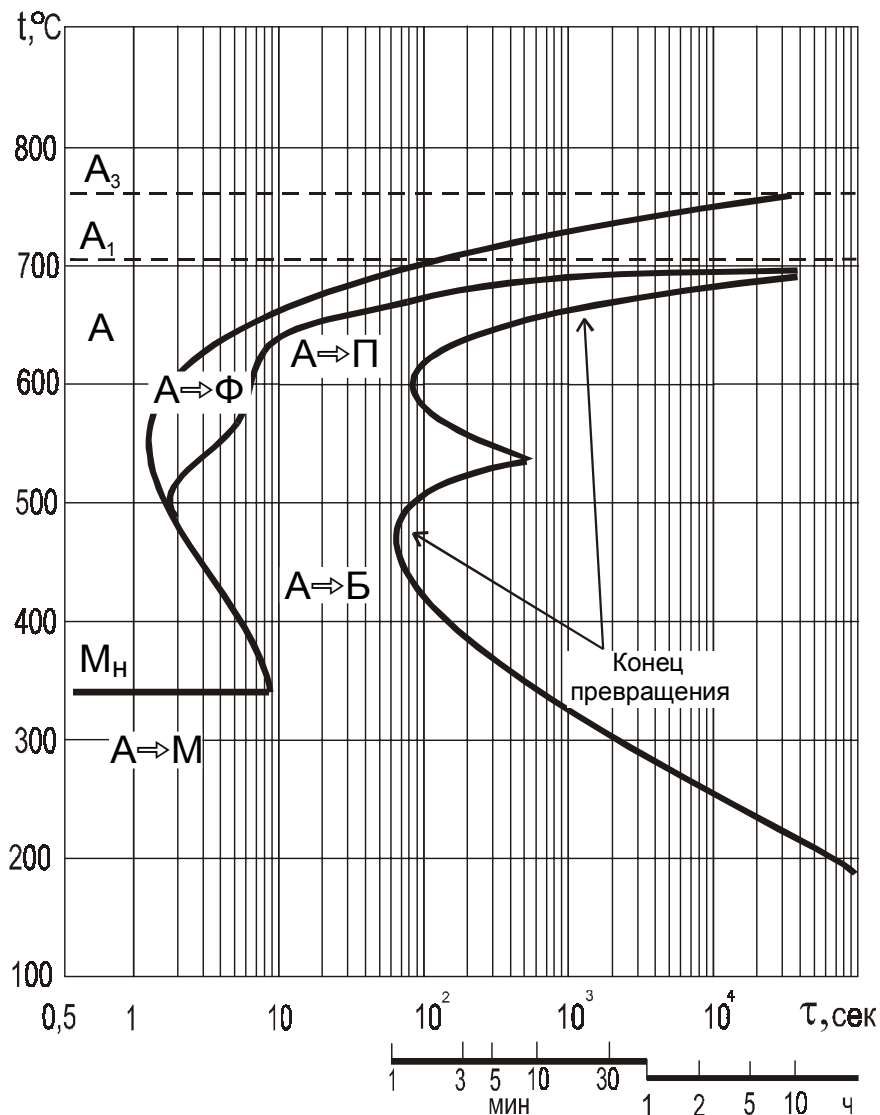


Рис. 4 Диаграмма изотермического превращения переохлаждённого аустенита стали 40ХН (температура аустенитизации 820°С).

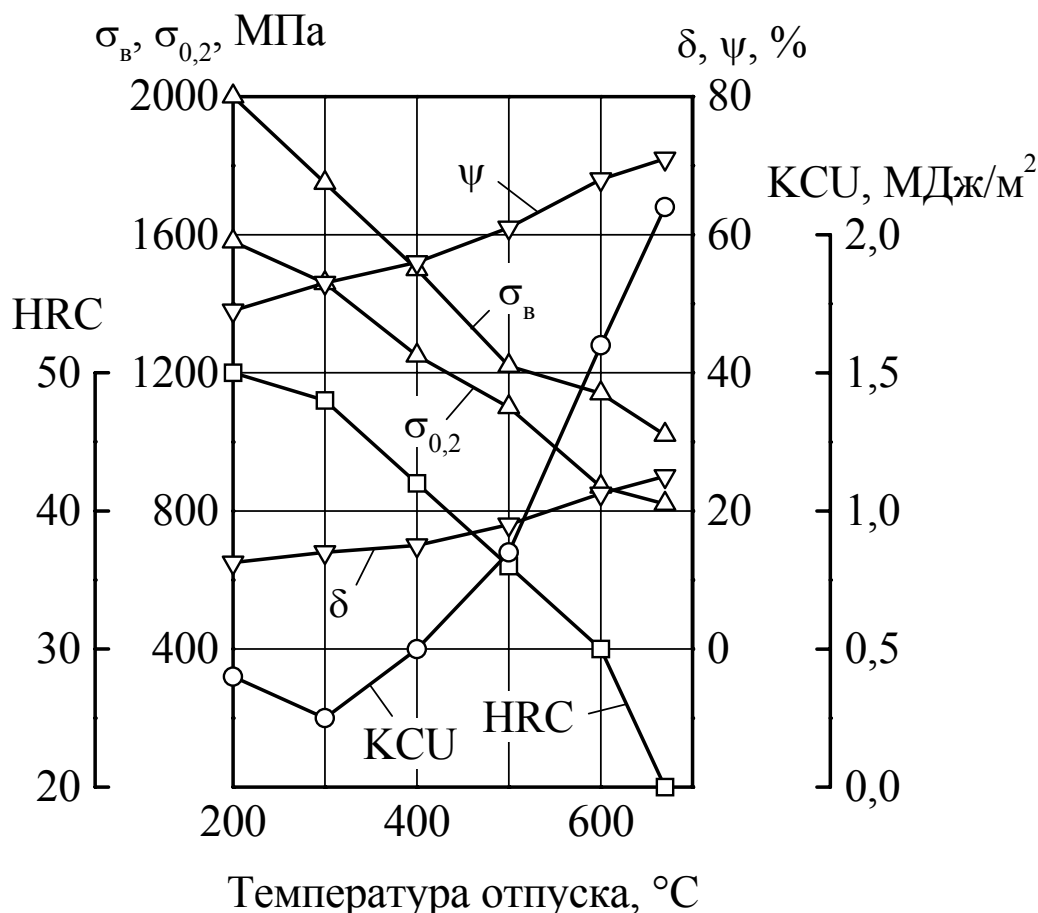


Рис. 5 Механические свойства стали 40ХН в зависимости от температуры отпуска (закалка от 820<sup>0</sup>С в масле).

### 3.4. Выбор и обоснование режимов термической обработки

Сталь 40ХН является доэвтектоидной конструкционной легированной сталью. Температура нагрева при закалке выбирается в этом случае на 50 ...70<sup>0</sup>С выше критической точки  $A_{c3}$ , т.е.

$$t_n = A_{c3} + (50 \dots 70) ^\circ\text{C} = 760 ^\circ\text{C} + 60 ^\circ\text{C} = 820 ^\circ\text{C}.$$

Для получения мартенситной структуры при закалке стали её необходимо охлаждать со скоростью не меньшей, чем критическая скорость закалки ( $V_{\text{охл.}} \geq V_{\text{кр.}}$ ). Значение  $V_{\text{кр.}}$  определим, воспользовавшись диаграммой изотермического превращения переохлаждённого аустенита, (рис. 4):

$$V_{\text{кр.}} = \frac{A - t_{\text{min}}}{1,5 \cdot \tau_{\text{min}}} = \frac{710 - 550}{1,5 \cdot 1,5} \approx 70 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{с}.$$

В качестве закалочной среды следует применить минеральное машинное масло, в котором скорость охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости переохлаждённого аустенита (650 ... 550 °С) составляет примерно 150 %/с, что больше  $V_{кр.}$  данной стали. В нижнем, мартенситном интервале температур масло охлаждает с не-большой скоростью (20... 30 %/с) [2], что уменьшает вероятность образования закалочных дефектов. После закалки структура стали по всему сечению шатуна состоит из мартенсита и ~ 3 ...5 % остаточного аустенита.

Для получения требуемых механических свойств и уменьшения внутренних напряжений, возникших при закалке, сталь подвергают отпуску. С повышением температуры отпуска прочностные свойства конструкционной стали уменьшаются, а её пластичность и вязкость возрастают. Для получения  $\sigma_{0,2} \geq 800$  МПа и  $KCU \geq 0,7$  МДж/м<sup>2</sup> температура отпуска стали 40ХН должна быть 600 °С (рис.5). В связи с тем, что хромоникелевые стали склонны к обратимой отпускной хрупкости, охлаждение шатунов из стали 40ХН до комнатной температуры при отпуске следует проводить ускоренно, например в масле.

Таким образом, окончательной термической обработкой шатуна ДВС из стали 40ХН является улучшение, т.е. сталь закалывают от температуры 820 °С в минеральном машинном масле и проводят высокий отпуск при температуре 600 °С с охлаждением также в масле. После такой термической обработки структура стали по всему сечению шатуна представляет собой сорбит отпуска, а механические свойства будут не менее [7]:

- предел прочности – 1100 МПа,
- предел текучести – 800 МПа,
- относительное удлинение – 20%,
- относительное сужение – 70%,
- ударная вязкость – 1,5 МДж/м<sup>2</sup>,
- порог хладноломкости:

$$\begin{aligned} t_{\text{верх}} &= - 40 \text{ }^\circ\text{C}, \\ t_{\text{нижн}} &= - 130 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Указанный комплекс механических свойств обеспечит заданную работоспособность шатуна двигателя внутреннего сгорания.

## Литература

1. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х томах. –7-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992.–Т.1 – 816 с.
2. Новиков И.И. Теория термической обработки: Учебник для вузов.– 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallургия, 1986. – 480 с.
3. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для высш. техн. учеб. завед. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
4. Гуляев А.П., Металловедение: Учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallургия, 1986. – 544 с.
5. Материаловедение : Учебник для высш. техн. учеб. завед.–2-е изд., испр. и доп. / Б.Н Арзамасов, И.И Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др. ; Под общей ред. Б.Н.Арзамасова – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
6. Качанов Н.Н. Прокаливаемость стали.–2-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallургия, 1978. – 192 с.
7. Термическая обработка в машиностроении: Справочник / Под ред. Ю.М. Лахтина и А.Г. Рахштадта – М.: Машиностроение, 1980. – 784 с.
8. Смирнов М.А., Счастливец В.М., Журавлёв Л.Г. Основы термической обработки стали: Учебное пособие. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 496 с.
9. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» – 4-е изд., перераб. и доп. – Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова.– М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
10. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчёт на прочность поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» – 4-е изд., перераб. и доп. – Д.Н. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко, и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
11. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали: Справочник.–4-е изд., перераб. и доп.– М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
12. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение: Учебное пособие для высш. учеб. завед. – 6-е изд. перераб. и доп. – М.: Metallургия, 1989. – 456 с.

## Оглавление

Введение .....	3
1. Выбор марки стали для деталей машин .....	3
1.1 Определение допустимого напряжения .....	4
1.2 Обеспечение надёжности .....	5
1.3 Обеспечение долговечности .....	10
1.4 Технологические и экономические требования .....	10
1.5 Заключение .....	11
Выбор режима окончательной термической обработки деталей машин .....	13
Пример выполнения контрольной работы № 2 по курсу «Материаловедение» .....	16
3.1 Анализ условий работы детали и требования, предъявляемые к материалу .....	16
3.2 Выбор марки стали .....	17
3.3 Характеристика стали 40ХН .....	18
3.4 Выбор и обоснование режимов термической обработки .....	20
Литература .....	22