

$(K_{\sigma})_d$  и увеличивается предел выносливости конкретной детали. Влияние способа поверхностного упрочнения на  $\beta_{упр}$  показано в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Повышение предела выносливости валов при поверхностном упрочнении

Вид поверхностной обработки	$\sigma_b$ , МПа (сердцевины)	Коэффициент упрочнения валов $\beta_{упр}$		
		гладких ( $K_{\sigma} = 1$ )	с малой концентрацией напряжений ( $K_{\sigma} < 1,5$ )	с большой концентрацией напряжений ( $K_{\sigma} = 1,8...2$ )
Индукционная закалка с нагревом ТВЧ	600–800 800–1000	1,5–1,7 1,3–1,5	1,6–1,8 –	2,4–2,8 –
Азотирование	900–1200	1,1–1,3	1,5–1,7	1,7–2,1
Цементация	400–600 700–800 1000–1200	1,8–2,0 1,4–1,5 1,2–1,3	3 – 2	– – –
Дробеструйный наклёп	600–1500	1,1–1,3	1,5–1,6	1,7–2,1
Накатка роликом	–	1,1–1,3	1,3–1,5	1,6–2,0

Видно, что эффективность технологических методов тем значительнее, чем острее концентратор напряжений (выше  $K_{\sigma}$ ).

Выбор метода поверхностного упрочнения детали зависит от условий ее эксплуатации, формы, размеров, марки выбранной стали и других факторов.

Наиболее напряженные детали (*зубчатые колеса, вал-шестерни и др.*) подвергают цементации, применяя для их изготовления низкоуглеродистые стали. После насыщения углеродом, закалки и низкого отпуска эти стали при высокой поверхностной твердости сохраняют вязкую сердцевину, способную воспринимать ударные нагрузки.

*Комбинированное упрочнение* характеризуется высокой эффективностью, поскольку ППД дополнительно увеличивает твердость поверхностных слоёв (на 10–20%) и формирует в них высокие остаточные напряжения сжатия. В итоге предел выносливости цементованных деталей увеличивается в 1,5–2 раза. ППД эффективно также для деталей, закалённых с нагревом ТВЧ, особенно при обрыве упрочнённого слоя у концентратора.

В коррозионных средах сопротивление усталости рассмотренных выше некоррозионно-стойких сталей резко снижается и не зависит от их статической прочности (рис. 2.10). Такие стали применяют с поверхностным покрытием из цинка, кадмия, хрома или никеля. Широко используют также специальные коррозионно-стойкие стали.

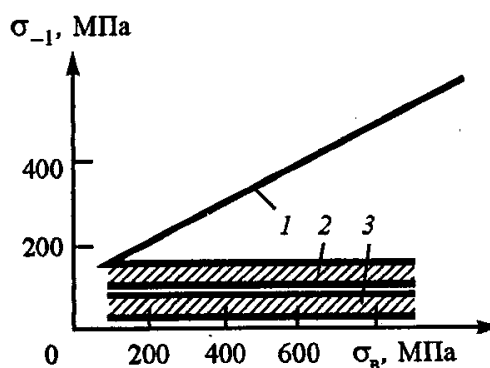


Рис. 2.10. Зависимость предела выносливости углеродистых сталей от временного сопротивления при испытании в различных средах: 1 – на воздухе; 2 – в пресной воде; 3 – в морской воде

## 2.5. Стали с высокими упругими свойствами

### 2.5.1. Основные требования к пружинным материалам

Стали и сплавы с высокими упругими свойствами находят широкое применение в машино- и приборостроении. В машиностроении их используют для изготовления рессор, амортизаторов, силовых пружин различного назначения.

Требования к этим сталям:

- высокий предел упругости и предел текучести;
- высокий предел выносливости;
- релаксационная стойкость (релаксация – это самопроизвольно затухающее падение рабочих напряжений в изделии при постоянной деформации);
- достаточная пластичность и вязкость;
- сквозная прокаливаемость при закалке в масле или на воздухе.

Особенность их работы состоит в том, что при больших статических, циклических или ударных нагрузках в них *не допускается остаточная деформация*. В условиях кратковременного статического нагружения сопротивление малым пластическим деформациям характеризуется пределом упругости, при длительном статическом или циклическом нагружении – релаксационной стойкостью.

Релаксация напряжений характеризуется снижением рабочих напряжений в изделии от  $\sigma_1$  до  $\sigma_2$  при заданной упругой деформации  $\varepsilon_1$  (рис. 2.11). Релаксация напряжений опасна тем, что при переходе части упругой деформации в пластическую ( $\varepsilon_{\text{ост}}$ ) упругие элементы после разгрузки изменяют размеры и форму.

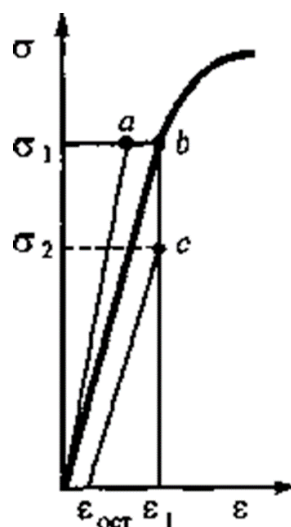


Рис. 2.11. Диаграмма деформации, объясняющая релаксацию и упругое последействие

Для достижения в сплаве высокого предела упругости и релаксационной стойкости необходимо создать стабильную дислокационную структуру, в которой прочно заблокированы все дислокации и перемещение дислокаций. Для закрепления дислокаций используют все средства создания эффективных барьеров: легирование, повышение плотности дислокаций, выделение дисперсных частиц вторичных фаз. Наиболее благоприятную субструктуру, обеспечивающую высокие упругие свойства, формирует термомеханическая обработка. Ее успешно применяют для всех пружинных сплавов.

### 2.5.2. Рессорно-пружинные стали

Для обеспечения работоспособности силовых упругих элементов рессорно-пружинные стали должны иметь высокие пределы упругости, выносливости и релаксационную стойкость. Этим требованиям удовлетворяют стали с повышенным содержанием углерода 0,5–0,7% (табл. 2.6), которые подвергают закалке и отпуску при 420–520°C.

Закаленная на мартенсит сталь имеет невысокий предел упругости. Он заметно повышается при отпуске, когда образуется структура троостита (рис. 2.12). В этой структуре феррит из-за сильного фазового наклепа имеет высокую плотность малоподвижных дислокаций, которые, кроме того, эффективно блокируются дисперсными карбидными частицами. Поэтому троостит отличается стабильной дислокационной структурой.

Кроме высоких упругих свойств, отпуск на троостит обеспечивает некоторое повышение пластичности и вязкости разрушения.

## Рессорно-пружинные стали

Марки сталей	$\sigma_B$ , МПа	HRC	Применение
Углеродистые 65, 70, 75, 80,	1100–1150	40–50	Рессоры, буфера, жалюзи радиатора, подушки сиденья, круглые и плоские пружины
Кремнистые 55ГС, 55С2, 60С2А, 70С3А	1200–1800	38–50	Клапанные пружины, пружины нажимного диска, задней и передней подвески
Кремнистые дополнительно легированные 65С2ВА, 60С2ХФА, 70С2ХА, 60С2Н2А	1750–1900	42–49	Высоконагруженные пружины и рессоры ответственного назначения
Без кремния 50ХФА, 50ХГФА	До 1400	42–48	Клапанные пружины и рессоры автомобилей и тракторов

Хорошие результаты дает также изотермическая закалка на структуру нижнего бейнита. Она обеспечивает высокие механические свойства при малой деформации изделий.

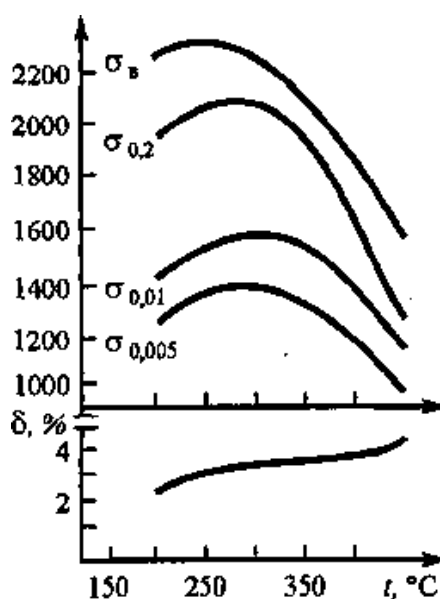


Рис. 2.12. Зависимость механических свойств пружинной стали (0,6% C, 2% Si) от температуры отпуска

Рессорно-пружинные стали 65, 70, 75, 80, 85, 60Г, 65Г, 70Г характеризуются невысокой релаксационной стойкостью, особенно при нагреве. Они непригодны для работы при температурах выше 100°C. Из них изготавливают пружины небольшого сечения.

Легированные рессорно-пружинные стали относятся к перлитному классу. Основными легирующими элементами в них являются

Si (1–3%), Mn (~ 1%), а в сталях более ответственного назначения – Cr (~ 1%), V (~ 0,15%) и Ni (< 1,7%). Легирование (за исключением Si и Mn) мало влияет на предел упругости. Более существенно оно проявляется в повышении прокаливаемости, релаксационной стойкости, предела выносливости. В связи с этим легированные стали предназначены для больших по размеру упругих элементов и обеспечивают их более длительную и надежную работу.

*Кремнистые стали 55С2, 60С2, 70С3А* применяют для пружин и рессор толщиной до 18 мм.

*Стали, не содержащие кремния 50ХФА, 50ХГФА*, которые по сравнению с кремнистыми и кремнемарганцевыми сталями подвергаются более высокому нагреву при отпуске (520°C), обладают теплостойкостью, меньшей чувствительностью к надрезу. Они *предназначены для рессор легковых автомобилей, клапанных и других пружин ответственного назначения, которые могут работать при температурах до 300 °С.*

Стали 60С2ХА и 60С2Н2А прокаливаются в сечениях соответственно до 50 и 80 мм и применяются *для крупных тяжело нагруженных и особо ответственных пружин и рессор*. Механические свойства сталей определяются содержанием углерода и температурой отпуска.

Наиболее высокие механические свойства имеют стали 70С3А, 60С2ХА и 60С2Н2А:  $\sigma_B > 1800$  МПа;  $\sigma_{0,2} \geq 1600$  МПа;  $\delta \geq 5\%$ ;  $\psi > 20\%$ . Их предел упругости составляет  $\sigma_{0,01} = 880\text{--}1150$  МПа, а твердость – 38–48 HRC. При такой прочности и твердости стали чувствительны к концентраторам напряжений, поэтому на сопротивление усталости большое влияние оказывает состояние поверхности. При отсутствии поверхностных дефектов (обезуглероживания, окалины, грубых рисок и др.) предел выносливости сталей при изгибе не ниже 500 МПа, а при кручении – 300 МПа. Для уменьшения чувствительности к концентраторам напряжений готовые пружины и листы рессор подвергают поверхностному наклепу обдувкой дробью. После упрочнения дробью предел выносливости увеличивается в 1,5–2 раза.

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. По каким признакам классифицируют конструкционные стали?
2. Опишите влияние углерода и постоянных примесей на свойства стали.
3. Дайте характеристику углеродистым сталям. Назовите виды углеродистых сталей.

4. Назовите сферы применения углеродистых сталей обыкновенного качества и качественных.

5. Как влияют легирующие элементы на механические свойства стали?

6. Какие легированные стали относятся к сталям нормальной и повышенной прочности? Укажите марки сталей и назовите их термообработку.

7. Какие легированные стали относятся к высокопрочным? Назовите требования, предъявляемые к ним.

8. Какие характеристики необходимы для выбора легированной стали с повышенной циклической прочностью?

9. От чего зависит циклическая прочность стали?

10. Назовите виды сталей с повышенной циклической прочностью, их термообработку.

11. Какие требования предъявляются к пружинным материалам?

12. Дайте характеристику сталям с высокими упругими свойствами. Назовите оптимальный интервал твердости для рессор.