

Низкоуглеродистые стали по назначению подразделяют на две подгруппы.

1. *Малопрочные и высокопластичные* стали 08, 10. Из-за способности к глубокой вытяжке их применяют для холодной штамповки различных изделий. Без термической обработки в горячекатаном состоянии эти стали используют для шайб, прокладок, кожухов и других деталей, изготавливаемых холодной деформацией и сваркой.

2. *Цементуемые* ($C = 0,3\text{--}0,5\%$) – стали 15, 20, 25. Предназначены они для деталей небольшого размера (кулачки, толкатели, малонагруженные шестерни и т.п.), от которых требуется твёрдая, износостойкая поверхность и вязкая сердцевина. Поверхностный слой после цементации упрочняют закалкой в воде в сочетании с низким отпуском. В результате поверхность твердая, а сердцевина остается вязкой. Их используют для изготовления деталей машин и приборов невысокой прочности (крепёжные детали, втулки, штуцеры и т.п.), а также деталей, работающих под давлением при температуре от 40 до 425°C.

Среднеуглеродистые стали 30, 35, 40, 45, 50, 55 отличаются большей прочностью, но меньшей пластичностью, чем низкоуглеродистые. Их применяют после улучшения, нормализации и поверхностной закалки. В улучшенном состоянии – после закалки и высокого отпуска на структуру сорбита – достигаются высокая ударная вязкость, пластичность (рис. 2.4, а) и, как следствие, малая чувствительность к концентраторам напряжений. При увеличении сечения деталей из-за несквозной прокаливаемости механические свойства таких сталей снижаются (рис. 2.4, б).

После улучшения стали применяют для изготовления деталей небольшого размера, *работоспособность которых определяется сопротивлением усталости* (шатуны, коленчатые валы малооборотных двигателей, зубчатые колеса, маховики, оси и т.п.). При этом возможный размер деталей зависит от условий их работы и требований к прокаливаемости. Для деталей, работающих на растяжение – сжатие (например, шатуны), необходима однородность свойств металла по всему сечению и, как следствие, сквозная прокаливаемость. Для деталей, испытывающих главным образом напряжения изгиба и кручения (валы, оси и т.п.), которые максимальны на поверхности, толщина упрочнённого при закалке слоя должна быть не менее половины радиуса детали. Для изготовления более крупных деталей, работающих при невысоких циклических и контактных нагрузках, используют стали 40, 45, 50.

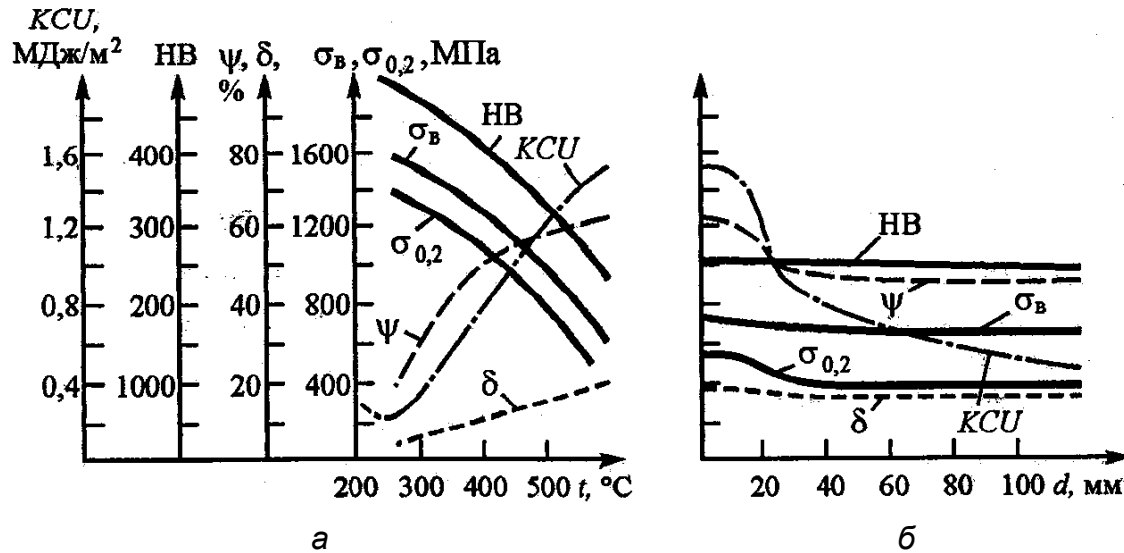


Рис. 2.4. Зависимость механических свойств стали 40 от температуры отпуска (а) и диаметра заготовок после отпуска при 580°С (б)

Их применяют после нормализации и поверхностной индукционной закали с нагревом ТВЧ тех мест, которые должны иметь высокую твёрдость поверхности (40–58 HRC) и сопротивление износу (шейки коленчатых валов, кулачки распределительных валов, зубья шестерён и т.п.).

Индукционной закалкой с нагревом ТВЧ упрочняют также поверхность длинных валов, ходовых винтов и других деталей, для которых важно ограничить деформации при термической обработке.

2.4. Легированные машиностроительные стали

2.4.1. Влияние легирующих элементов на механические свойства сталей

Легирующие элементы вводят для повышения конструкционной прочности стали. Легированные стали производят качественными, высококачественными или особо высококачественными.

При маркировке легированной стали используют сочетания букв и цифр, обозначающих ее химический состав. По ГОСТ 4543-71 принято обозначать хром – Х; никель – Н, марганец – Г, кремний – С, молибден – М, вольфрам – В, титан – Т, ванадий – Ф, алюминий – Ю, медь – Д, ниобий – Б, бор – Р, кобальт – К. Число, стоящее после буквы, указывает примерное содержание легирующего элемента в процентах. Если число отсутствует, то легирующего элемента меньше или около 1%.

Число в начале марки конструкционной легированной стали показывает содержание углерода в сотых долях процента. Например,

сталь 20ХН3А в среднем содержит 0,20% С, 1% Cr и 3% Ni. Буква А в конце марки означает, что сталь высококачественная. Особо высококачественные стали (например, после электрошлакового переплава) имеют в конце марки букву Ш, например 30ХГС-Ш.

Легированные стали применяют после закалки и отпуска, поскольку в отожженном состоянии они по механическим свойствам практически не отличаются от углеродистых.

Улучшение механических свойств обусловлено влиянием легирующих элементов на свойства феррита, дисперсность карбидной фазы, устойчивость мартенсита при отпуске, прокаливаемость, размер зерна. Легирующие элементы, растворяясь в феррите, упрочняют его.

К важнейшим факторам, способствующим повышению конструкционной прочности, относятся *снижение при легировании критической скорости закалки и увеличение прокаливаемости*. Наиболее эффективно повышает прокаливаемость введение нескольких элементов: Cr + Mo, Cr + Ni, Cr + Ni + Mo и др. При комплексном легировании высокие механические свойства можно получить практически в сечении любого размера, поэтому комплексно-легированные стали применяют для крупных деталей сложной формы. Большинство легирующих элементов измельчает зерно, что способствует повышению работоспособности при развитии трещины и снижению порога хладноломкости. После достижения необходимой прокаливаемости избыточное легирование (за исключением никеля) снижает трещиностойкость и облегчает хрупкое разрушение.

Таким образом, для обеспечения высокой конструкционной прочности количество легирующих элементов в стали должно быть рациональным.

2.4.2. Легированные стали нормальной и повышенной статической прочности

Из сталей нормальной и повышенной прочности наибольшее применение в машиностроении имеют низкоуглеродистые (цементуемые) и среднеуглеродистые (улучшаемые) стали, содержащие, как правило, в сумме не более 5% легирующих элементов.

Низкоуглеродистые (0,1–0,3% С) легированные стали (ГОСТ 4543-71) используют в состоянии наибольшего упрочнения, т.е. после закалки и низкого отпуска со структурой (в зависимости от состава стали) низкоуглеродистого мартенсита или бейнита.

Функциональное назначение низкоуглеродистых сталей – цементируемые (нитроцементируемые) детали (*зубчатые колеса, кулачки* и т.п.), работающие в условиях трения. После насыщения поверхности углеродом, закали и низкого отпуска низкоуглеродистые стали наряду с твердой поверхностью (58–63 HRC) имеют достаточно прочную и вязкую сердцевину, устойчивую к воздействию циклических и ударных нагрузок.

Благоприятное сочетание прочности, пластичности и вязкости, а также высокая хладостойкость (порог хладноломкости лежит в области отрицательных температур) обуславливают применение низкоуглеродистых сталей и без поверхностного упрочнения. Механические свойства таких сталей (без поверхностного упрочнения) после двойной закали и низкого отпуска, т.е. термической обработки цементируемых деталей, приведены в табл. 2.2. При использовании этих сталей для деталей, от которых не требуется износостойкая поверхность, проводят однократную закалку по режиму I и низкий отпуск. Все стали, кроме 18Х2Н4Мn, приведенные в табл. 2.2, относятся к перлитному классу.

Хромистые стали 15Х, 20Х, а также содержащие дополнительно ванадий (15ХФ) или бор (20ХР), образуют группу дешёвых сталей нормальной прочности. Для уменьшения коробления их закаливают не в воде, а в масле. В результате они приобретают структуру троостита или бейнита и упрочняются несколько меньше (табл. 2.2). Стали этой группы применяют для небольших деталей (сечением не более 25 мм), работающих при средних нагрузках.

Таблица 2.2

Режимы термической обработки и механические свойства
низкоуглеродистых легированных сталей

Марка стали	Температура			Механические свойства (не менее)				
	закалки		отпуска	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	KCU , МДж/м ²
	I	II		МПа		%		
15X	880	770–820	180	700	500	12	45	0,7
15XФ	880	760–810	180	750	550	13	50	0,8
30XГТ	880	850	200	1500	1300	9	40	0,6
25XГМ	860	–	200	1200	1100	10	45	0,8
12XН3А	860	760–810	180	950	700	11	55	0,9
12X2Н4А	860	760–800	180	1150	950	10	50	0,9
18X2Н4МА	950	860	200	1150	850	12	50	1,0

К группе сталей повышенной прочности относятся комплексно-легированные, а также экономно-легированные стали с повышенным содержанием углерода (0,25–0,30%).

Хромоникелевые стали 12ХН3А, 20ХН3А, 12Х2Н4А, 20Х2Н4А применяют для крупных деталей ответственного назначения. После закалки в масле эти стали в сечениях до 100 мм имеют структуру низкоуглеродистого мартенсита в смеси с нижним бейнитом, которая обеспечивает сочетание высокой прочности и вязкости.

Хромоникельмолибденовая (хромоникельвольфрамовая) сталь 18Х2Н4МА (18Х2Н4ВА) наиболее высоколегирована и имеет высокие механические свойства. Сталь при даже очень медленном охлаждении получает структуру мартенсита (или смесь мартенсита и бейнита). Отжиг для неё неприменим. В качестве смягчающей операции проводят высокий отпуск на сорбит.

Сталь 18Х2Н4МА относится к мартенситному классу, закаливается на воздухе и прокаливается практически в любом сечении. Её применяют для *крупных деталей особо ответственного назначения*. Сталь 18Х2Н4МА (18Х2П4ВА) из-за присутствия молибдена (вольфрама) слабо разупрочняется при отпуске (рис. 2.5). Её используют также в улучшенном состоянии при *больших статических и ударных нагрузках*.

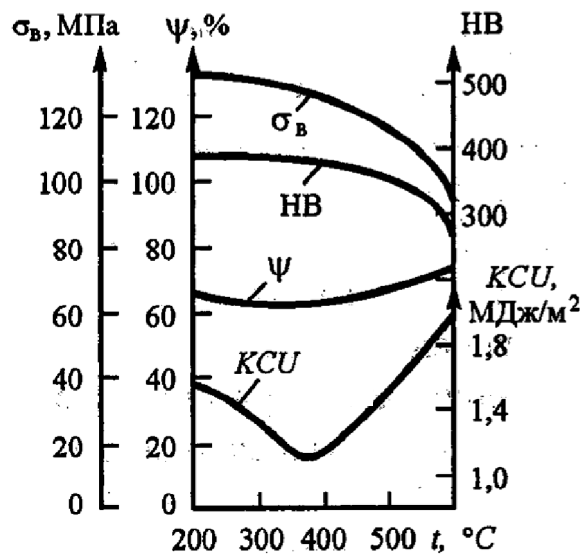


Рис. 2.5. Влияние температуры отпуска на механические свойства стали 18Х2Н4ВА

Недостатками среднелегированных сталей, содержащих 3–4% Ni, является сохранение до 60% остаточного аустенита после закалки, поэтому стали необходимо обрабатывать холодом для того, чтобы вызвать превращение остаточного аустенита в мартенсит и обеспечить высокую твердость поверхности.

Хромомарганцевые стали с титаном (18ХГТ, 30ХГТ) и **молибденом** (25ХГМ) относятся к экономно-легированным и предназначены для замены хромоникелевых сталей. Вместо никеля они содержат марганец; титан и молибден введены для измельчения зерна и снижения чувствительности к перегреву. Эти стали применяют для деталей крупносерийного и массового производства (*зубчатых колёс автомобилей*).

Среднеуглеродистые (0,3–0,5% С) легированные стали (ГОСТ 4543-71) приобретают высокие механические свойства после термического улучшения – закалки и высокого отпуска (500–650°C) на структуру сорбита. Улучшение этих сталей в отличие от нормализации обеспечивает повышенный предел текучести в сочетании с хорошей пластичностью и вязкостью, высоким сопротивлением развитию трещины. Кроме того, улучшение заметно снижает порог хладноломкости, который в этих сталях, в отличие от низкоуглеродистых, лежит при более высоких температурах.

Улучшаемые легированные стали применяют для большой группы деталей машин, *работающих не только при статических, но и в условиях циклических и ударных нагрузок* (валы, штоки, шатуны и др.), *концентрации напряжений*, а в некоторых случаях и *при пониженных температурах*.

Хромистые стали 40Х, 45Х, 50Х относятся к дешевым конструкционным материалам. С увеличением содержания углерода возрастает прочность, но снижаются пластичность и вязкость, повышается порог хладноломкости этих сталей (табл. 2.3). Стали 45Х, 50Х из-за невысокой вязкости рекомендуются для изделий, работающих без значительных динамических нагрузок.

Таблица 2.3

Термическая обработка и механические свойства
улучшаемых легированных сталей

Марка стали	Темпера- тура за- калки, °C	Отпуск		σ _В	σ _{0,2}	δ	ψ	KCU, МДж/м ²	t ₅₀ ^B	t ₅₀ ^H
		t, °C	Среда	МПа		%			°C	
				не менее						
40X	860	500	Вода, масло	1000	800	10	45	0,6	0	−100
50X	830	520	То же	1100	900	9	40	0,4	20	−60
30XГСА	880	540	»	1100	850	10	45	0,5	20	−60
40XH	820	500		1000	800	11	45	0,7	−30	−100
40XH2MA	850	620	»	1100	950	12	50	0,8	−40	−120
38XH3MA	850	600	Воздух	1200	1100	12	50	0,8	−60	−140

Хромокремнемарганцевые стали 30ХГСА, 35ХГСА содержат по 1% Cr, Mn и Si и называются *хромансилями*. Это дешевые стали, сочетающие хорошие технологические и механические свойства. Хромансили свариваются всеми видами сварки, хорошо штампуются, удовлетворительно обрабатываются резанием, прокаливаются в деталях сечением 30–40 мм. Их широко применяют в автомобилестроении (*валы, сварные конструкции, детали рулевого управления*).

Хромоникелевые стали 40ХН, 45ХН, 50ХН обеспечивают высокий комплекс механических свойств в деталях сечением 40–50 мм. Из-за присутствия никеля эти стали, в отличие от хромистых, имеют более высокий температурный запас вязкости и меньшую склонность к хрупкому разрушению.

Хромоникельмолибденовые (хромоникельвольфрамовые) стали 40ХН2МА, 38ХН3МА, 38ХН3МФА, а также 18Х2Н4МА (18Х2Н4ВА) относятся к глубокопрокаливаемым сталям, предназначенным для деталей с поперечным сечением 100 мм и более. Они имеют сильно выраженную склонность к отпускной хрупкости. Для ее устранения в деталях большого сечения недостаточно быстрого охлаждения от температуры высокого отпуска. Поэтому хромоникелевые стали легируют молибденом (вольфрамом).

Стали относятся к мартенситному классу, закаливаются на воздухе, обладают малой склонностью к хрупкому разрушению, *хорошо работают при динамических нагрузках и в условиях пониженных температур*. Кроме того, стали слабо разупрочняются при нагреве и могут применяться при температурах до 300–400°C. Они предназначены для деталей наиболее ответственного назначения (*валы и роторы турбин, тяжелонагруженные детали компрессорных машин, редукторов*).

2.4.3. Легированные высокопрочные стали

В лучших низко- и среднеуглеродистых сталях после типичной для них термической обработки прочность, оцениваемая временным сопротивлением, ограничивается значениями ниже 1500 МПа. При $\sigma_B \geq 1500$ МПа эти стали имеют высокую чувствительность к концентраторам напряжений и эксплуатационно ненадежны.

Развитие техники, стремление к созданию машин наименьшей массы требуют применения высокопрочных сталей, имеющих $\sigma_B > 1500$ МПа. Для предупреждения хрупкого разрушения таким сталям необходим определенный запас вязкости (*KCU* не менее 0,2 МДж/м²). При использовании высокопрочных сталей важно также соблюдение определенных тре-

бований к конструированию деталей и технологии обработки их поверхности. При проектировании необходимо избегать конструктивных концентраторов напряжений, а при изготовлении не допускать на поверхности глубоких рисок, царапин, обеспечивать минимальную ее шероховатость.

Высокопрочное состояние в сочетании с достаточно высоким сопротивлением хрупкому разрушению может быть получено при использовании: 1) среднеуглеродистых комплексно-легированных сталей после низкого отпуска или термомеханической обработки; 2) мартенситно-старееющих сталей; 3) метастабильных аустенитных сталей.

Среднеуглеродистые комплексно-легированные низкоотпущенные стали. После закалки и низкого отпуска уровень прочности стали определяется содержанием углерода и практически не зависит от присутствия легирующих элементов. Увеличение содержания углерода до 0,4% повышает временное сопротивление до 2400 МПа, но углеродистая сталь имеет полностью хрупкое разрушение. Необходимый запас вязкости при такой или несколько меньшей прочности достигается совокупностью мероприятий, главные из которых направлены на подбор рационального состава стали, получение мелкого зерна, обязательного для высокопрочного состояния, повышение металлургического качества металла.

Повышение вязкости достигается, прежде всего, легированием никелем (1,5–3%). Хром и марганец вводят для обеспечения нужной прокаливаемости.

К распространенным высокопрочным сталям относятся 30ХГСНА, 40ХГСНЗВА, 40ХН2СМА, 30Х2ГСН2ВМ, 30Х5МСФА. Характерные механические свойства двух сталей, определенные на образцах с трещиной (значения приведены в скобках) и без нее, приведены ниже:

	30ХГСНА	40ХГСНЗВА
σ , МПа	1850 (1670)	2000 (1200)
	1650 (1570)	1850 (1560)
δ , %	13/15	11/12
ψ , %	50/53	43/45
K_{CU} , МДж/м ²	0,55/0,62	0,45/0,5
K_{1C} , МПа м ^{1/2}	60/65	45/60

Примечание. В числителе – свойства после закалки с 900°C и низкого отпуска при 250°C, в знаменателе – после изотермической закалки.

Среднеуглеродистые стали, упрочненные термомеханической обработкой. Термомеханическая обработка (ТМО) совмещает два механизма упрочнения – пластическую деформацию аусте-

нита и закалку – в единый технологический процесс. Такое комбинированное воздействие применительно к среднеуглеродистым легированным сталям (30ХГСА, 40ХН, 40ХН2МА, 38ХН3МА и др.) обеспечивает высокую прочность (на образцах небольшого размера $\sigma_B = 2000\text{--}2800$ МПа) при достаточном запасе пластичности и вязкости.

В зависимости от условий деформации аустенита – выше или ниже температуры рекристаллизации – различают соответственно высокотемпературную (ВТМО) и низкотемпературную (НТМО) термомеханическую обработку.

При ВТМО (рис. 2.6, а) сталь деформируют при температуре выше температуры A_3 и сразу закачивают с тем, чтобы не допустить развития рекристаллизации аустенита. При НТМО (рис. 2.6, б) деформация проводится в области повышенной устойчивости аустенита ($400\text{--}600^\circ\text{C}$). Рекристаллизация при этих температурах не происходит, однако необходимо избегать образования бейнитных структур.

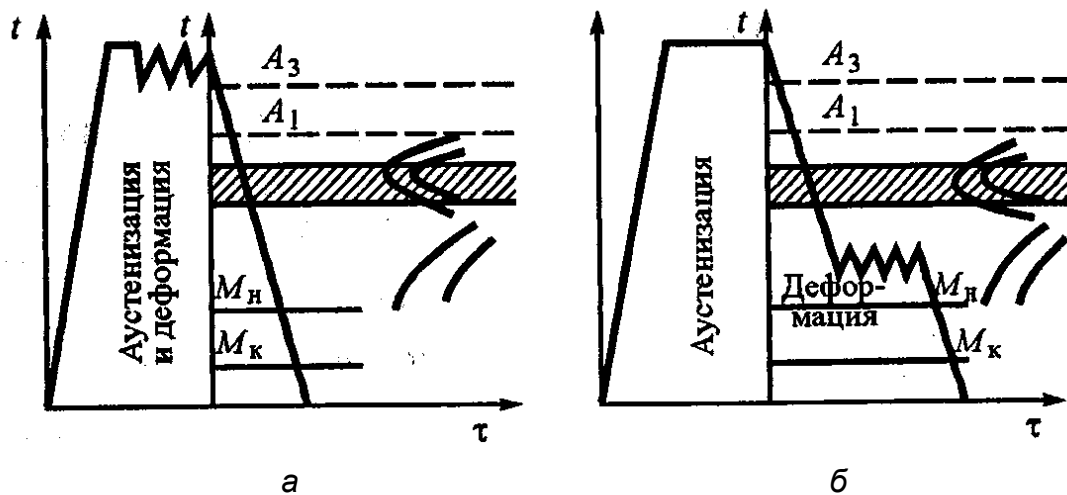


Рис. 2.6. Схема термомеханической обработки стали: а – ВТМО; б – НТМО (заштрихованная зона – интервал температур рекристаллизации)

ТМО обоих видов заканчивается низким отпуском при $100\text{--}200^\circ\text{C}$. При ТМО повышается весь комплекс механических свойств и особенно пластичность и вязкость, что наиболее важно для высокопрочного состояния. Наибольшее упрочнение ($\sigma_B < 2800$ МПа) достигается при НТМО. НТМО пригодна для легированных сталей с большой устойчивостью переохлаждённого аустенита.

ВТМО обеспечивает меньшее упрочнение ($\sigma_B < 2400$ МПа), но более высокие пластичность и вязкость. Она уменьшает также чувствительность к трещине (K_{1c} возрастает на $20\text{--}50\%$), снижает порог хладноломкости, повышает сопротивление усталости и затрудняет

разупрочнение при отпуске. Кроме того, ВТМО более технологична, так как аустенит выше точки A_3 пластичен и стабилен. Наиболее высокая прочность ($\sigma_B \approx 3000$ МПа) получена сочетанием ВТМО с последующей холодной пластической деформацией низкоотпущенных среднеуглеродистых сталей.

Мартенситно-стареющие стали. Это особый класс высокопрочных материалов, превосходящих по конструкционной прочности и технологичности рассмотренные выше среднеуглеродистые стали.

Их основа – безуглеродистые ($< 0,03\%$ С) сплавы железа с 8–25% Ni, легированные Co, Mo, Ti, Al, Cr и другими элементами (табл. 2.4).

Высокая прочность этих сталей достигается совмещением двух механизмов упрочнения: мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ – превращения и старения мартенсита. Небольшой вклад вносит также легирование твёрдого раствора.

Упрочнение стали происходит в результате закалки и последующего старения. Мартенситно-стареющие стали закалывают от 800–860°C на воздухе. При нагреве легирующие элементы Ti, V, Al, Cu, Mo, обладающие ограниченной и переменной растворимостью в Fe_α , переходят в γ – раствор и при охлаждении не выделяются. После закалки образуется пересыщенный железоникелевый мартенсит. Благодаря высокому содержанию никеля, кобальта и малой концентрации углерода дислокации в нем обладают высокой подвижностью. Поэтому железоникелевый мартенсит при прочности $\sigma_B = 900...1000$ МПа имеет высокую пластичность ($\delta = 18...20\%$, $\psi = 75...85\%$), вязкость ($KCU = 2-3$ МДж/м²) и малую способность к упрочнению при холодной деформации. Последнее позволяет деформировать стали с большими степенями обжатия.

Основное упрочнение достигается при старении (480–520°C), когда из мартенсита выделяются мелкодисперсные частицы вторичных фаз (Ni_3Ti , $NiAl$, Fe_2Mo , Ni_3Mo и др.), когерентно связанные с матрицей. Для мартенситно-стареющих сталей характерен высокий предел текучести (табл. 2.4) и более высокий, чем у лучших пружинных сплавов, предел упругости ($\sigma_{0,002} = 1300$ МПа), низкий порог хладноломкости.

При прочности $\sigma_B = 2000$ МПа и более стали разрушаются вязко, хотя сопротивление распространению трещины у них невелико ($KCT \approx 0,2$ МДж/м²). Малая чувствительность к надрезам, высокое сопротивление хрупкому разрушению обеспечивают высокую конструкционную прочность изделий в широком диапазоне температур от криогенных до 450–500°C. При содержании Cr около 12% стали являются коррозионно-стойкими.

Таблица 2.4

Химический состав и механические свойства мартенситно-стабилизирующих сталей

Марка стали	Содержание элементов, %	σ_B	$\sigma_{0,2}$	K_{1c}	δ	ψ	KCU	KCT
		МПа		МПа·м ^{1/2}	%		МДж/м ²	
03Н18К9М5Т	18 Ni; 9 Co; 5 Mo; 0,9 Ti	2100	1900	75–85	8	50	0,5	0,20
03Н12К15М10	12 Ni; 15 Co; 10 Mo	2500	2400	–	6	30	0,3	–
03Х11Н10М2Т	11 Cr 10 Ni; 2 Mo; 0,9 Ti; 0,2 Al	1600	1550	90-105	8	50	0,5	0,2

Стали со стабилизирующим мартенситом применяют для наиболее ответственных деталей в авиации, ракетной технике, машиностроении, судостроении и как пружинный материал в приборостроении.

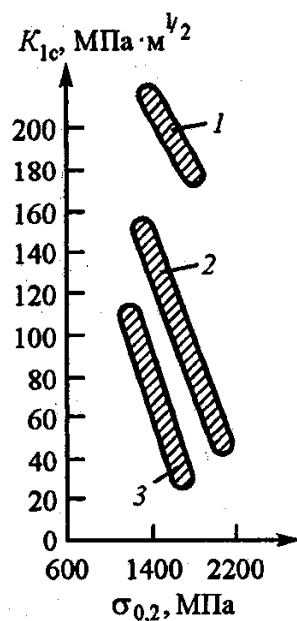


Рис. 2.7. Вязкость разрушения высокопрочных сталей: 1 – метастабильных аустенитных; 2 – мартенситно-стабилизирующих; 3 – хромоникелевых

Метастабильные аустенитные стали (трипстали) 25Н25М4Г, 30Х9Н8М4Г2С2 – новый класс высокопрочных материалов повышенной пластичности. Их подбирают таким образом, чтобы после закалки при температуре 1000–1100°C стали имели устойчивую аустенитную структуру (M_n лежит ниже 0°). Аустенитная структура обладает высокой вязкостью, но низким пределом текучести. Для упрочнения стали подвергают специальной тепловой обработке – пластической деформации с большими степенями обжатия (50–80%) при температуре 400–600°C. В ре-