

Министерство образования Российской Федерации
Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С.П.Королёва

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Методические указания к практическому занятию

Самара, 2004

ББК 461
И20
УДК 621.74:629.7(075.8)

Сост. Уваров В.В., Заббаров Р., Носова Е.А.

Уваров В.В., Заббаров Р., Носова Е.А. Влияние содержания углерода на механические свойства углеродистых сталей: Методические указания к практическому занятию.

В методических указаниях изучается влияние содержания углерода на основные механические свойства углеродистых сталей. В качестве основных механических свойств использованы предел текучести и прочности, относительное удлинение, твёрдость и ударная вязкость. Выполнение данной работы позволяет наглядно показать уровень формирования свойств в сталях с различным содержанием углерода.

Предназначены для студентов технологических специальностей 11060, 120400, 130100, 130200 и 130300, изучающих курсы «Технология конструкционных материалов», «Основы производства и обработки металлов», «Материаловедение».

Подготовлено на кафедре «Технология металлов и авиаматериаловедение»

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королёва.

Рецензент – кандидат технических наук, доцент Чертков Г.В.

1. ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Цель работы – исследовать влияние содержания углерода на механические свойства сталей: предел прочности при растяжении σ_B , относительное удлинение δ , твёрдость НВ, ударную вязкость КСV.

1. Определение и общая характеристика углеродистых сталей.

Сплавы железа с углеродом, содержащие до 2,14% С при малом содержании других элементов, называется углеродистыми сталями. В машиностроении эти стали используются для изготовления деталей разного, чаще всего неотчетливого, назначения и являются достаточно дешёвым материалом. В промышленности эти стали поставляются в виде проката, поковок, профилей различного назначения.

Углеродистые стали выплавляются в электропечах и кислородных конвертерах. Наилучшими свойствами обладает электросталь, более чистая по содержанию вредных примесей – серы и фосфора, а также газов и неметаллических включений.

По качеству различают стали обычного качества и качественные стали. Стали обыкновенного качества содержат не более 0,05%S и не более 0,04%P. качественные стали содержать не более 0,04%S и не более 0,35% P, они менее загрязнены неметаллическими включениями и газами.

Стали обыкновенного качества изготавливают по ГОСТ 380-94. Обозначают их буквами «Ст» и цифрами от 0 до 6, например, Ст0, Ст1, ..., Ст6. Цифры – условный номер марки стали в зависимости от её химического состава. Химический состав стали должен соответствовать нормам, указанным в табл.1.

Таблица 1

Содержание элементов в углеродистых сталях обыкновенного качества, %

Марка стали	С	Mn	Si в стали			S	P
			кп	пс	сп		
Ст 0	≤0,23	-	-	-	-	0,06	0,07
Ст 1	0,06-0,12	0,25-0,5	0,05	0,05-0,17	0,12-0,30	0,05	0,04
Ст 2	0,09-0,15	0,25-0,5	0,05	0,05-0,17	0,12-0,30	0,05	0,04
Ст 3	0,14-0,22	0,3-0,62	0,07	0,05-0,17	0,12-0,30	0,05	0,04
Ст 4	0,18-0,27	0,4-0,7	0,07	0,05-0,17	0,12-0,30	0,05	0,04
Ст 5	0,28-0,37	0,5-0,8	-	0,05-0,17	0,15-0,35	0,05	0,04
Ст 6	0,38-0,49	0,5-0,8	-	0,05-0,17	0,15-0,35	0,05	0,04
Ст 3Г	0,14-0,22	0,8-1,1	-	0,05-0,17	-	0,05	0,04
Ст 5Г	0,28-0,37	0,8-1,1	-	0,05-0,17	-	0,05	0,04

Примечания:

1. В сталях Ст 1 – Ст 6 допускается не более 0,3%Cr; 0,3%Ni; 0,3%Cu; 0,3%As; 0,01%N.
2. В сталях, выплавленных из керченских руд, допускается до 0,15%As и 0,05%P.
3. В сталях, выплавленных в электропечах, допускается не более 0,012%N.

Чем больше цифра условного номера стали, тем выше в ней содержание углерода. В конце обозначения марки стоят буквы «кп», «пс», «сп», которые указывают на способ раскисления: «кп» – кипящая, «пс» – полуспокойная, «сп» – спокойная. Как правило, продукция из сталей обыкновенного качества поставляется в нормализованном состоянии (нагрев и выдержка при температурах выше фазовых превращений с последующим охлаждением на воздухе).

Качественные углеродистые стали, поставляемые по химическому составу и по механическим свойствам (ГОСТ 1050-88) маркируются двузначными числами 05, 08, 10, 15, ..., 60, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. При обозначении кипящей или полуспокойной стали в конце марки указывается степень раскисления: кп или пс. В случае спокойной стали степень раскисления не указывается.

По содержанию углерода качественные углеродистые стали подразделяются на низкоуглеродистые (до 0,25%С), среднеуглеродистые (0,3-0,5%С) и высокоуглеродистые (до 0,65% С). состав и свойства некоторых марок сталей обыкновенного качества и качественных углеродистых сталей приведены в табл.2 и 3

Таблица 2

Состав и свойства некоторых марок углеродистых сталей обыкновенного качества в нормализованном состоянии

Марка стали	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ²
	Не менее			
Ст0	≥ 310	-	20	-
Ст1	320-420	-	31	-
Ст2	340-440	-	29	0,9-1,1
Ст3	380-490	255	26	0,7-1,0
Ст4	410-530	265	24	-
Ст5	490-630	295	20	-
Ст6	≥ 590	315	15	-

Примечание: В кипящих сталях Ст1кп-Ст4кп значения σ_B на 10-20 МПа, $\sigma_{0,2}$ на 10 МПа меньше, а δ на 1% больше, чем в приведённых сталях тех же марок.

Качественные углеродистые стали, поставляемые по химическому составу и по механическим свойствам (ГОСТ 1050-88) маркируются двузначными числами 05, 08, 10, 15, ..., 60, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. При обозначении кипящей или полуспокойной стали в конце марки указывается степень раскисления: кп или пс. В случае спокойной стали степень раскисления не указывается.

По содержанию углерода качественные углеродистые стали подразделяются на низкоуглеродистые (до 0,25%С), среднеуглеродистые (0,3-0,5%С) и высокоуглеродистые (до 0,65% С). состав и свойства некоторых марок сталей обыкновенного качества и качественных углеродистых сталей приведены в табл.2 и 3

Таблица 2

Состав и свойства некоторых марок углеродистых качественных сталей в нормализованном состоянии (ГОСТ 1050-88)

Марка стали	Содержание углерода, %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	$HВ$, кг/мм ²	КСУ, Дж/см ²
		Не менее				Не более	
08	0,05-0,12	320	196	33	60	131	-
10	0,07-0,14	330	205	31	55	143	-
15	0,12-0,19	370	225	27	55	149	-
20	0,17-0,24	410	245	25	55	163	100
25	0,22-0,3	450	275	23	50	170	88
30	0,27-0,35	490	295	21	50	179	78
35	0,32-0,4	530	315	20	45	207	69
40	0,37-0,45	570	335	19	45	217(187)	59
45	0,42-0,5	600	355	16	40	229(197)	49
50	0,47-0,55	630	375	14	40	241(207)	38
55	0,52-0,6	650	380	13	35	255(217)	34
60	0,57-0,65	680	400	12	35	255(229)	30
70	0,67-0,75	730	430	9	30	269(237)	-

Примечания:

1. В сталях допускается не более 0,8%Mn; 0,37%Si; 0,04%S; 0,035%P; 0,25%Cr; 0,30%Ni; 0,30%Cu; 0,08%As.
2. Механические свойства указаны для стальных заготовок с поперечным сечением до 80 мм.
3. Ударная вязкость сталей 25...60 дана после улучшения (закалки и высокого отпуска при 600^oC).
4. Значения $HВ$ в скобках даны после отжига, без скобок – в нормализованном состоянии или после высокого отпуска.

Углеродистые стали, содержащие 0,7-1,3%C относят к инструментальным и пружинным сталям. Их используют для изготовления ударного и режущего инструмента, а также для пружин и рессор, работающих в обычных условиях. Они маркируются У7, У8, ...У13, где «У» означает углеродистую сталь, а цифра – содержание углерода в десятых долях процента. Если в конце маркировки поставлена буква А, то это означает, что сталь улучшенного металлургического качества (У7А, У8А, ..., У13А). Эти стали поставляют после отжига. Состав и основные свойства инструментальных сталей приведены в табл.4.

Таблица 4

Влияние углерода на механические свойства горячекатаных сталей

Марка стали	Содержание углерода, %	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	$HВ$, кг/мм ²
		Не менее			Не более
У7	0,65-0,74	830	11	33	250
У8	0,75-0,84	950	9	31	275
У10	0,95-1,04	960	6	27	300
У11	1,05-1,14	900	5	25	310
У12	1,15-1,24	800	4	23	325
У13	1,25-1,35	780	<4	<22	340

2. Теоретические основы влияния углерода на структуру и свойства стали

Углерод является важнейшим элементом, определяющим структуру и свойства стали. Даже малое изменение оказывает заметное влияние на свойства стали. Это связано с изменением структурных составляющих сплавов при увеличении содержания углерода в стали. Для железоуглеродистых сплавов характерны следующие фазовые и структурные составляющие, существующие при комнатной температуре и полученные при очень медленном охлаждении из расплава (равновесное состояние).

Феррит – твёрдый раствор углерода в α -железе - $Fe_\alpha(C)$. Максимальная растворимость углерода в феррите около 0,006%С при 20⁰С. феррит имеет невысокую прочность и твёрдость, но высокую пластичность.

Цементит – химическое соединение железа с углеродом Fe_3C , обладает очень высокой твёрдостью и прочностью, но весьма хрупок.

Перлит – это двухфазная структура, она представляет собой смесь феррита и цементита. Перлит образуется при медленном охлаждении (ниже 727⁰С) и содержит 0,8%С.

Установлено, что с увеличением углерода в структуре стали растёт содержание цементита. При содержании до 0,8%С сталь состоит из феррита и перлита, при содержании более 0,8%С в структуре стали кроме перлита появляется структурно-свободный вторичный цементит.

Феррит имеет низкую прочность, но сравнительно высокую пластичность. Цементит же характеризуется высокой твёрдостью и прочностью, но низкой пластичностью (хрупок). Поэтому с ростом содержания углерода должны увеличиваться твёрдость и прочность, и уменьшаются пластичность и вязкость стали. Рост прочности происходит при содержании в стали 0,8-1,0%С. при увеличении содержания более 1%С уменьшается не только пластичность, но и прочность стали. Это связано с образованием хрупкого цементита вокруг перлитных зёрен, легко разрушающихся при нагружении.

Углерод оказывает существенное влияние и на технологические свойства стали: свариваемость, обрабатываемость резанием и давлением. С увеличением содержания углерода ухудшается свариваемость, а также способность деформироваться в горячем, и особенно в холодном, состоянии.

3. Основные механические свойства и методы их определения

В данном разделе излагаются лишь краткие понятия об основных механических свойствах, ставящие цель напомнить их содержание, изученное в дисциплине «Сопротивление материалов».

Механические свойства материалов определяют на специальных образцах. В зависимости от условий приложения нагрузки различают статические и динамические испытания. При статических испытаниях нагрузка

прилагается медленно и плавно возрастает. При динамических она прилагается с высокой скоростью.

Испытания могут выполняться при нормальной (комнатной) или повышенной температуре.

Наиболее распространёнными механическими характеристиками являются: твёрдость, пределы прочности и упругости, ударная вязкость. Определяют также предел выносливости и предел ползучести. Предел прочности определяют в испытаниях на растяжение, сжатие, кручение и изгиб.

Определение предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и сужения. Эти характеристики определяются при испытаниях на растяжение; это наиболее распространённый метод определения свойств конструкционных материалов.

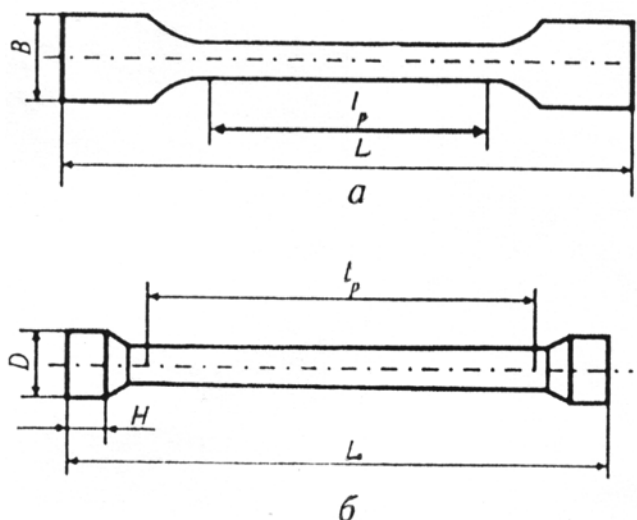


Рис.1. Образцы для испытаний на растяжение

Испытания выполняются на разрывных машинах с использованием специальных образцов (рис. 1). Головки образцов помещают в зажимы разрывной машины и образцы растягивают до разрушения.

В процессе приложения нагрузки в образце возникает напряжение (σ), равное отношению приложенного усилия (P) к площади образца (F): $\sigma = P/F$ (МПа или кгс/мм²). Под действием приложенной нагрузки возникает деформация — изменение размеров образца. Деформация может быть упругой или пластической.

Упругая деформация полностью снимается (исчезает) после снятия нагрузки. Упругая деформация не приводит к заметным изменениям в структуре и свойствах материала. Различают абсолютную и относительную деформацию. Абсолютная (Δl) — изменение размера (длины при испытаниях на растяжение), относительная ε — отношение абсолютной деформации к первоначальной длине (l), т.е. $\Delta l/l$.

Между напряжением и относительной упругой деформацией существует линейная зависимость — закон Гука: $\sigma = E\varepsilon$, где E — модуль упругости, свойство материала, характеризующее его жесткость, т.е. способность сопротивляться упругим деформациям.

Пластическая деформация не исчезает после снятия нагрузки (согните алюминиевую проволоку, после того как нагрузка снята, проволока не разгибается — она пластически деформирована).

При испытаниях на растяжение строится диаграмма в координатах «относительная деформация δ — напряжение σ » (рис. 2). При этом определяются: предел прочности (σ_B) — напряжение, при котором происходит разрушение образца (максимальная точка на кривой « ε – σ »); *предел пропорциональности* — максимальное напряжение, при котором отсутствует пластическая деформация. Поскольку точное определение предела пропорциональности затруднено, в практике определяется *предел текучести* (σ_T) — напряжение, вызывающее остаточную деформацию определенной величины, например $\sigma_{0,2}$ — напряжение, при котором остаточная деформация равна 0,2% от первоначальной длины образца. При $\sigma > \sigma_T$ возникает остаточная деформация $\varepsilon_{ост}$ (см. рис. 2).

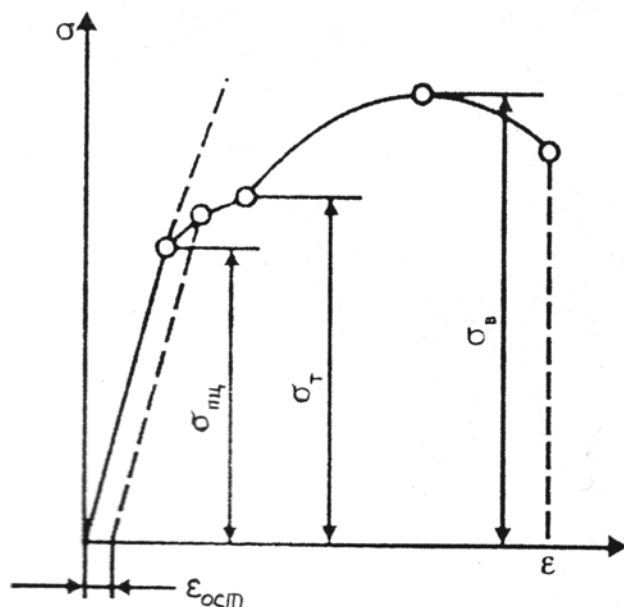


Рис. 2 - Диаграмма растяжения

Перед разрушением образец претерпевает пластическую деформацию, он удлиняется, при этом происходит образование шейки — уменьшение диаметра. *Относительное удлинение* $\delta = \Delta l / l$, относительное сужение $\psi = (F_0 - F_k) / F_0$, (здесь F_0 и F_k — первоначальная и минимальная площади образца после разрушения) характеризуют пластичность материала. Чем больше эти характеристики, тем материал пластичнее.

Определение твердости. Твердость характеризует сопротивление материала большим пластическим деформациям. Наиболее распространенные методы определения твердости связаны с внедрением специального тела, называемого индентором, в испытуемый материал с таким усилием, чтобы в материале остался отпечаток индентора. О величине твердости судят по отпечатку. Определение твердости — наиболее распространенный метод определения свойств материала. Это объясняется рядом причин: определение твердости является неразрушающим методом, так как деталь после такого

измерения может быть использована по назначению; испытания на твердость не требуют высокой квалификации и, кроме того, зная твердость, можно судить и о других механических свойствах.

Метод Бринелля. В качестве индентора используется стальной закаленный шарик, который вдавливается в испытуемый образец на специальном прессе. Вдавливание шарика происходит при постоянной нагрузке, в результате на поверхности образца образуется отпечаток в виде сферической лунки (рис.3). Диаметр отпечатка измеряется в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью микроскопа Бринелля — это лупа со шкалой. Значения твердости — это отношение приложенной нагрузки к площади поверхности отпечатка.

Значения твердости вычисляются по формуле:
$$HB = \frac{2P}{D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Здесь HB- обозначение твердости; P - прилагаемая нагрузка (кгс); D и d - диаметры шарика и отпечатка (мм).

На практике пользуются таблицей в которой указаны значения твердости в зависимости от диаметра отпечатка.

Диаметр шарика и нагрузку выбирают так, чтобы соблюдалось соотношение: $d=(0,25\div 0,5)D$, т.е. для разных материалов эти параметры различны. При диаметре индентора 10мм, нагрузке 3000 кгс (29 430 Н) и времени выдержки под нагрузкой 10 с твердость обозначается только цифрами и латинскими буквами например 200НВ. Эти условия приняты для определения твердости сталей и чугунов.

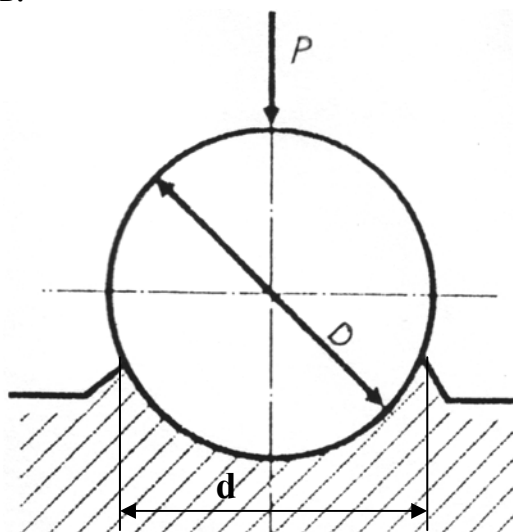


Рис. 3 – Схема определения твёрдости по Бринеллю.

Определение ударной вязкости и вязкости разрушения. Испытания на ударную вязкость относятся к динамическим. Для определения ударной вязкости используют образцы с надрезом, который служит концентратором напряжений. Используют U- и V-образные образцы. В зависимости от формы надреза ударная вязкость обозначается KCU или KCV.

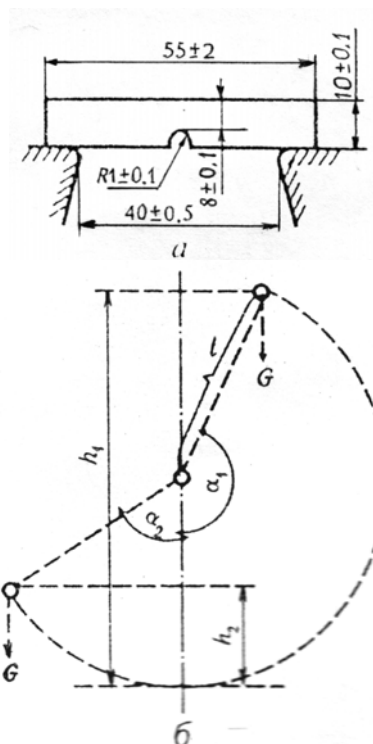


Рис.4 – Схема определения ударной вязкости

Образец устанавливают на маятниковом копре (рис.4) так, чтобы удар маятника происходил против надреза, раскрывая его. Маятник поднимают на высоту h_1 , при падении он разрушает образец, поднимаясь на высоту h_2 , $h_1 > h_2$ (так как часть запасенной при подъеме работы тратится на разрушение образца). Таким образом, работа разрушения составит: $A = mg(h_1 - h_2)$ [кгс·м или Дж]. Ее значения считываются со шкалы, установленной на маятниковом копре.

Ударная вязкость — это относительная работа разрушения, т.е. работа, отнесенная к F площади образца до разрушения. Таким образом, $KCU(KCV) = A/F$.

4. Методические указания по порядку выполнения работы и содержанию работы

1. Студент получает задание по изучению влияния углерода для ряда марок сталей, характеризующихся увеличением содержания углерода. Например:
 Вариант 1: сталь 10, 20, 30, 40, 50, 60, У8, У10, У12.
 Вариант 2: сталь 08, 15, 25, 35, 45, 55, У7, У9, У13.
 Вариант 3: сталь Ст 0, Ст 2, Ст4, Ст6, У8, У10, У12.
 Вариант 4: сталь Ст 1, Ст 3, Ст 5, Ст 6, У7, У9, У10, У13.
 Вариант 5: сталь 10, 15, 25, 35, 45, 55, У7, У8, У10, У12 и т.д. (всего 8 вариантов).

По данным, взятым из ГОСТ (табл. 1, 2 и 3) студент заполняет часть табл.5 по химсоставу и механическим свойствам, подсчитывая и указывая при этом среднее содержание углерода.

Таблица 5

Зависимость механических свойств от содержания углерода

Марка стали	Содержание углерода		Механические свойства по стандарту			
	По стандарту	Среднее	Предел прочности, σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твёрдость, НВ, МПа	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²

Примечания:

1. Для инструментальных сталей У7, ..., У13 в нормализованном состоянии приводятся значения σ_B , δ и твёрдость НВ.
2. Для углеродистых сталей Ст 0, ..., Ст 6 в нормализованном состоянии приводятся средние значения σ_B , δ и ударная вязкость КСУ.

После заполнения таблицы 4 по стандартным данным студент строит графическую зависимость величины механических свойств углеродистых сталей от среднего содержания углерода. Рекомендуемая сетка для построения графика приведена на рис.5.

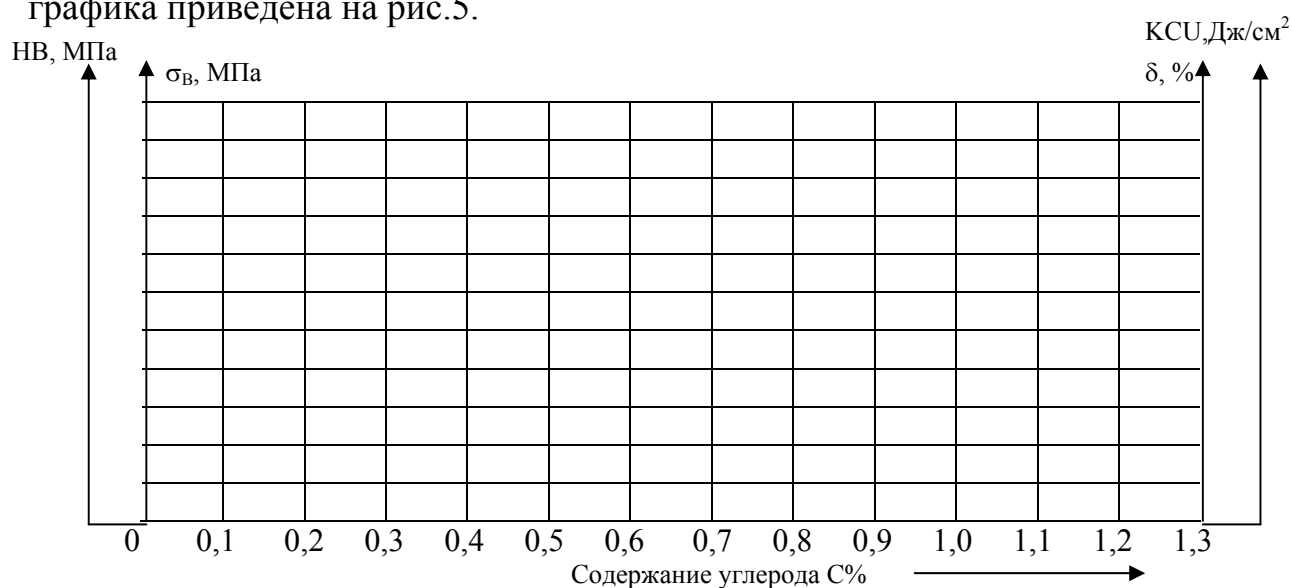


Рис.5. - Сетка построения графика зависимости механических свойств от содержания углерода в стали

2. Зависимость механических свойств отожженных углеродистых сталей от содержания углерода может быть определена экспериментально. На основании проведения механических испытаний получены уравнения регрессии (эмпирические формулы) для расчёта величины механических

свойств отожжённых сталей в зависимости от содержания углерода С в процентах.

Твёрдость: $HV = 875 + 2290 \times C$, МПа;

Предел прочности при растяжении

$$\sigma_B = \begin{cases} 300 + 275 \times C, & \text{если } C < 0,6\% \\ -1578 \times C^2 + 2885 \times C - 340, & \text{если } C > 0,6\% \end{cases}$$

Относительное удлинение: $\delta = 21,4 \times C^2 - 56,6 \times C + 39,4$, %

Ударная вязкость: $KCU = (23,2 \times C^2 - 28 \times C + 17,1) \times 100$, Дж/см².

Индекс KCV означает, что испытания на ударную вязкость проводили на образцах с U-образным надрезом.

Вычисленные значения HV, σ_B , δ и KCU заносят в таблицу 6.

Таблица 6

Зависимость механических свойств от содержания углерода по эмпирическим формулам для отожжённой стали

Марка стали	Содержание углерода		Механические свойства по стандарту			
	По стандарту	Среднее	Предел прочности, σ_B , МПа	Относительное удлинение δ , %	Твёрдость, HV, МПа	Ударная вязкость, KCU, Дж/см ²

После заполнения таблицы 6 строят графики зависимости механических свойств от среднего содержания углерода по рекомендованной выше на рис.4 сетке.

3. На основании полученных графических зависимостей механических свойств от содержания углерода делают выводы по работе о влиянии углерода на свойства стали.

Контрольные вопросы

1. Какой максимальный процент углерода может содержаться в стали?
2. Какова маркировка углеродистых сталей обыкновенного качества, качественных конструкционных сталей, инструментальных углеродистых сталей?

3. Какие вредные примеси содержатся в углеродистых сталях?
4. Что представляет собой испытания на растяжение?
5. Как вычисляется предел прочности σ_B , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ ?
6. Дайте определение понятию твёрдость.
7. Как находится твёрдость по Бринеллю НВ?
8. Что такое ударная вязкость, как вычисляется её значение?
9. Что такое феррит, цементит, перлит?
10. Какова структура стали при содержании углерода $C < 0,8\%$ и $C > 0,8\%$?
11. Почему при содержании углерода от 0 до 1% происходит рост прочности и уменьшение пластичности?
12. Почему при содержании углерода более 1% уменьшается не только пластичность, но и прочность?
13. На сколько % возрастает прочность и твёрдость у качественных углеродистых сталей при увеличении среднего содержания углерода от 0,1% до 0,6%?
14. На сколько % падает пластичность при увеличении среднего содержания углерода в углеродистых инструментальных сталях с 0,7% до 1,3%?
15. На сколько % уменьшается ударная вязкость у качественных конструкционных сталей при увеличении среднего содержания углерода с 0,25% до 0,5%.

Список литературы:

1. Журавлёв В.Н., Николаева О.Н. Машиностроительные стали: Справочник. – 4-е изд. перераб. и доп.- Машиностроение, 1992 – 480 с.
2. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Войткун Ф. Материаловедение: Учебник для вузов. Изд. 2-е перераб и доп.- СПб: Химиздат, 2002. – 696 с.
3. Фетисов Г.П., Карпман М.Г., Матюнин В.М. и др. Материаловедение и технология металлов: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2000, 638с.
4. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г. Материаловедение: Учебник для вузов – 3-е изд. перераб и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001 – 648 с.
5. Марочник сталей и сплавов/ В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др./ Под ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.