

УДК 669.18 (075.8)

СПОЖИВЧІ ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

В. С. Богушевський, І. А. Ципан

*Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут”*

Приведені основні характеристики вуглецевих сталей і Державні стандарти, за якими їх випускають.

Приведены основные характеристики углеродистых сталей и государственные стандарты, по которым их выпускают.

Basic descriptions of carbon steel and state standards, by which they are produced on, are resulted.

Вступ

Сплави заліза з вуглецем, що вміщують менше 2,14 вуглецю при малій кількості інших елементів називають вуглецевими сталями [1]. Вуглецеві сталі завершають кристалізацію з утворенням аустеніту. В їх структурі немає евтектики (ледебурита), завдяки чому вони мають високу пластичність, особливо при нагріванні і добре деформуються.

Вуглецеві (нелеговані) сталі є найбільш дешевими і складають біля 80 % об'єму виробництва сталі. Ці сталі виплавляються різними способами: в конвертерах, мартенівських і електропечах, від чого залежить кількість шкідливих домішок і якість. Найкращі властивості має електросталь – найбільш чиста по вмісту сірки, фосфору і неметалевих включень.

Вуглець – найважливіший елемент, що визначає структуру і властивості вуглецевої сталі. Із збільшенням вмісту вуглецю в структурі сталі збільшується кількість цементиту. При вмісті до 0,8 мас.% С сталь складається із фериту і перліту, при вмісті більше 0,8 мас.% С в структурі сталі, крім перліту з'являється структурно вільний вторинний цементит.

Ферит має низьку міцність, але порівняно пластичний. Цементит характеризується високою твердістю і міцністю, але крихкий. Тому із збільшенням вмісту вуглецю збільшується твердість і міцність, зменшується в'язкість і пластичність сталі. Збільшення міцності відбувається до 0,8 – 1 мас.% вуглецю. При більш високому вмісті вуглецю зменшується не тільки пластичність, але і міцність. Це пов'язано з утворенням сітки крихкого цементиту навколо перлітних зерен, яка легко руйнується при навантаженні. У

зв'язку із цим заевтектоїдні сталі спеціально відпалюють, в результаті чого отримують структуру зернистого перліту.

Із збільшенням вмісту вуглецю погіршується зварюваність сталі, а також здатність деформуватися у гарячому і особливо холодному стані. Краще за все обробляються різанням середньовуглецеві сталі з вмістом 0,3 – 0,4 мас.% вуглецю. Низьковуглецеві сталі при механічній обробці дають погану поверхню і стружку, що важко видаляється.

Обов'язковими домішками в вуглецевих сталях є манган, силіцій, сірка і фосфор, а також гази – кисень, азот і водень. Корисними домішками є манган і силіцій. Вміст мангану у вуглецевій сталі становить до 0,8 мас.%. У цій кількості манган, розкиснює сталь і повністю розчиняється в фериті і зміцнює його, збільшуючи прогартованість сталі, і зменшує шкідливий вплив сірки. У повністю розкисненій вуглецевій сталі може бути до 0,4 мас.% силіцію, що повністю розчиняється у фериті, що призводить до його зміцнення.

Шкідливими домішками є сірка і фосфор. Сірка знижує пластичність і в'язкість сталі, особливо при низьких температурах, а також призводить до червоноламкості при прокатці і куванні. Сірка утворює із залізом сульфід, який добре розчиняється в металі. При малому вмісті мангану внаслідок високої ліквациї сірки в сталі утворюється евтектика Fe-FeS (температура плавлення 988 °С), що розташовується по границям зерен. При нагріванні сталевих заготовок до температури гарячої деформації включення евтектики окрихчують сталь, а у деяких випадках можуть плавиться і при деформуванні утворювати надриви і тріщини. Манган ліквідує червоноламкість, бо його сульфід не утворює сітки по границям зерен і мають температуру плавлення біля 1620 °С. Разом із тим, сульфід мангану, як і інші неметалеві включення, також знижують в'язкість і пластичність, зменшують міцність сталі при утомленні. Тому вміст сірки повинен бути низьким. Підвищений (до 0,2 мас.%) вміст сірки допускається тільки в автоматних сталях для виготовлення кріпильних деталей невідповідального призначення (сірка покращує оброблюваність сталі).

Фосфор розчиняється в фериті в кількості до 1,2 мас.%, зменшуючи пластичність, розташовуючись біля границь зерен і сприяючи їх окрихчуванню. Це призводить до підвищення межі червоноламкості.

Кисень, азот, водень знаходяться в сталі або у вигляді твердого розчину в фериті, або утворюють хімічні з'єднання (оксиди, нітриди), або знаходяться у вільному стані у порах металу. Кисень і азот погано розчиняються у фериті. Вони забруднюють вуглецеву сталь крихкими неметалевими включеннями, знижуючи в'язкість і пластичність сталі. Водень знаходиться у твердому розчині і сильно окрихчує сталь. Збільшення вмісту водню призводить до утворення внутрішніх тріщин – флокенів.

Крім того, в вуглецевих сталях присутні такі випадкові домішки, як хром, нікель і мідь, присутність яких пояснюється забрудненням шихти [2 – 4].

Серед вуглецевих сталей виділяють [5]:

- сталь вуглецеву звичайної якості;
- вуглецеву якісну конструкційну сталь;
- сталь вуглецеву конструкційну підвищеної і високої оброблюваності різанням;
- вуглецеві ресорно-пружинні сталі;
- сталі для холодної штамповки і висадки;
- сталі для ливарних деталей машинобудування;
- сталь для котлобудування і посудин, що працюють під тиском;
- сталь вуглецева конструкційна для мостобудування;
- сталь для армування залізобетонних конструкцій;
- сталь зварювана для суднобудування.

Сталь вуглецева конструкційна підвищеної і високої оброблюваності різанням

Виготовляється по ГОСТ 1414-75 (цей ГОСТ визначає також хімічний склад сталей) і ГОСТ 5521-93 та використовується для обробки на станках автоматах, а також для обробки тиском із подальшою обробкою різанням. Використання цих сталей дозволяє значно знизити витрату ріжучого інструмента, скоротити час обробки, зменшити знос ріжучого інструмента.

В залежності від хімічного складу поділяється на три групи – вуглецева сірчана, вуглецева свинецьвміщуюча і вуглецева сірчаноселеніста. За видами обробки ця сталь поділяється на гарячекатану, калібровану, круглу із спеціальною обробкою поверхні – сріблянка. За станом матеріалу виготовляється без термічної обробки, термічно обробленою – Т, нагартованою – Н (калібрована сталь і сріблянка). Механичні властивості сталі приведені в таблицях 1 і 2.

У вуглецевих сірчаних термічно необроблених конструкційних сталей з підвищенням вмісту вуглецю (марки А11 – А35) межа міцності при розтягуванні (тимчасовий опір розриву), σ_B , збільшується з 420 до 520 МПа, рівномірне відносне подовження, δ_B , зменшується з 22 до 15 %, відносне звуження при розриві, φ , зменшується з 34 до 23 %, межа твердості по Бринелю, HB , збільшується з 1600 до 2100 МПа. При нагартуванні σ_B і HB збільшуються, а δ_B зменшується, наприклад, для сталі А11 ці характеристики становлять $\sigma_B = 500$ МПа, $\delta_B = 10$ %, $HB \leq 2070$ МПа.

Для сталі А12 значення модуля нормальної пружності $E = 202$ ГПа.

Таблиця 1. Механічні властивості гарячекатаної і каліброваної вуглецевої сірчаної сталі підвищеної і високої оброблюваності різанням

Марка	Термообробка	σ_B , МПа	δ_B , %	φ , %	<i>HB</i> , МПа
A11	без термообробки	420	22	34	≤ 1600
A30	«	520	15	25	≤ 1850
A40Г	«	600	14	20	≤ 2070
A11	H	500	10	...	≤ 2070
A30	«	550	6	...	≤ 2230
A40Г	«	600	7	...	≤ 2290

Таблиця 2. Механічні властивості нормалізованої вуглецевої конструкційної сталі підвищеної і високої оброблюваності різанням (розмір заготовки 25 мм).

Група	Марка	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	<i>HB</i> , МПа
Свинецьвміщуюча	AC40	580	340	19	≤ 1870
Сірчаноселеніста	A35E	540	320	20	...
	A45E	610	360	16	≤ 1970

Вуглецеві ресорно-пружинні сталі

Вуглецеві сталі 65, 70, 75, 80, 85, У7 – У13, У7А – У13А використовують для виготовлення пружин і ресор, що працюють у звичайних умовах. Ці сталі мають високу межу текучості, межу утоми, добру в'язкість і пластичність. Значення межі текучості вуглецевих пружинних сталей після кінцевої термообробки повинно бути не нижче 800 МПа, характеристики пластичності $\delta \geq 5$ %, $\varphi \geq 20 - 25$ %. Для пружинних сталей 65, 70, 85 у відпаленому або високо відпущеному стані модуль здвигу $G = 85 - 86$ ГПа.

Хімічний склад ресорно-пружинних сталей визначає ГОСТ 14959-79.

Механічні властивості ресорно-пружинних сталей після термообробки (табл. 3) змінюються наступним чином: σ_B , σ_T і *HB* збільшуються з підвищенням вмісту вуглецю, δ_5 і φ зменшуються. З підвищенням вмісту мангану σ_B і *HB* збільшуються, а δ_5 і φ зменшуються.

Для вуглецевої сталі У8, що загартована від 1080 у маслі і відпущена при 370 і 470 К, в'язкість руйнування K_{1c} при температурі 77 К дорівнює відповідно 11,4 і 16,6 МПа м^{1/2}.

Таблиця 3. Механічні властивості вуглецевої ресорно-пружинної сталі (ГОСТ 14959-79)

Марка	Режим термообробки	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	φ , %	<i>HB</i> , МПа
65	3, 1100, м + О, 740	931	785	10	35	≤ 2290
70	3, 1100, м + О, 740	1030	834	9	30	≤ 2290
85	3, 1090, м + О, 740	1128	981	8	30	≤ 2690
65Г	3, 1100, м + О, 740	981	785	8	30	≤ 2410

При нагартуванні пружинної стрічки σ_B збільшується (табл. 4).

Таблиця 4. Механічні властивості сталюї пружинної стрічки

Марка	Товщина, мм	Стрічка відпалена		Стрічка нагартована
		σ_B , МПа	δ_5 , %	σ_B , МПа
60Г, 65Г, У7, У7А	$\leq 1,5$	≤ 650	≥ 15	750-1200
У8, У8А	$> 1,5$	≤ 750	≥ 10	750-1200
У8Г, У8ГА, У12	0,08-3,0	≤ 750	≥ 10	750-1200

Сталі для холодної штамповки і холодної висадки

Сталь тонколистова холоднокатана низьковуглецева якісна для холодної штамповки по ГОСТ 9045-80 призначена для витяжки деталей автомобільних кузовів і холодної штамповки деталей.

Сталь поділяють на листову і рулону чотирьох різних класів обробки поверхні; випускають для дуже глибокої витяжки – ВГ, складної витяжки – СВ, особливо складної витяжки – ОСВ і дуже особливо складної витяжки – ВОСВ. Сталь випускається в термічно обробленому стані. Хімічний склад низько-вуглецевої сталі визначає ГОСТ 9045-80, а якісної листової і рулонної сталі – ГОСТ 1050-88. Механічні властивості сталі наведені в таблиці 5.

Таблиця 5. Механічні властивості сталі для холодної штамповки

Категорія	Марка	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 %, не менше, при товщині листа, мм			HRB
				0,5-1,5	1,6-2,0	2,1-3,0	
				ВГ	08пс	255-363	
СВ	08Ю	255-353	≤ 206	34	38	...	48
ОСВ	08Ю	255-323	≤ 196	36	40	...	46
ВОСВ	08Ю	255-363	≤ 186	40	42	...	46

Механічні властивості якісної листової і рулонної сталі змінюються наступним чином: з підвищенням вмісту вуглецю (сталь 08кп – сталь 50) σ_B підвищується відповідно з 270 – 390 до 550 – 730 МПа, δ_4 – знижується з 25 до 12 %.

З низьковуглецевих якісних сталей по ГОСТ 1050-88 і низьковуглецевих сталей звичайної якості по ГОСТ 380-94 виготовляють сталюну холоднокатану стрічку [6], що поділяється за станом металу на особливо-м'яку (ОМ), м'яку (М), напівнагартовану (ПН), нагартовану (Н) і високонагартовану (ВН). Стрічка поділяється також за точністю виготовлення, товщиною і шириною, а також за якістю поверхні. Механічні властивості стрічки наведені в таблиці 6.

В'язкість руйнування K_{1c} вуглецевої сталі хімічного складу наближеного до 08кп, в залежності від розміру феритного зерна (12 – 85 мкм) при температурі 250 К змінюється від 47,2 до 15,7 МПа · м^{1/2}. Для сталі 20 при температурі 200 К $K_{1c} = 56,5$ МПа · м^{1/2}.

Сталь якісна конструкційна вуглецева для холодного видавлювання виготовляється по ГОСТ 10702-78. Сталь поділяється по способу виготовлення на гарячекатану, калібровану; гарячекатану і калібровану із спеціальною обробкою поверхні. За станом матеріалу вона поділяється на термічески оброблену (ТО, ТС), нагартовану (Н).

Таблиця 6. Механічні властивості холоднокатаної стрічки

Стан матеріалу	Марка	σ_B , МПа	δ_5 , %, при товщині листа, мм		
			до 1,5	1,5-2,0	вище 2,0
ОМ	08кп, 08пс, 10кп	250-400	23	26	30
М	08кп, 08пс, 10кп	300-450	17	18	20
Н	08, 10	420-600	4
ВН	08кп, 08пс, 10кп, 8,Ст1кп, Ст2кп	500-800

Хімічний склад сталей відповідає маркам 08кп, 08пс, 08, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, 25, 30, 35, 40, 45 і 50 по ГОСТ 1050-88, за винятком масової долі силіцію, що встановлюється не більше 0,03 % для сталі марки 10кп, не більше 0,10 % для напівспокійних марок сталі і не більше 0,20 % для сталі марок 25 – 45. Масова доля мангану в останніх не більше 0,60 %. Силіцій при вмісті більше 0,17 – 0,20 % у середньо-вуглецевих сталях (0,4 – 0,5 % С) сильно знижує їх пластичність.

На висадку дуже впливає твердість сталі – сталь твердістю менше 1310 МПа і більше 2550 МПа по Брінелю не годиться для холодної висадки. Механічні властивості сталі наведені в таблиці 7.

Як для гарячекатаної сталі, так і каліброваної із спеціальною обробкою поверхні зі збільшенням вмісту вуглецю збільшується твердість HB , МПа: сталь 08 – 1150 і 1310 відповідно, сталь 45 – 1700 і 2070. Також зростає σ_B , МПа, з 314 – 412 до 588 і зменшується φ , %, з 60 до 40. Зі збільшенням вмісту мангану HB , МПа, зростає: сталь 15 – 1250 і 1490 відповідно, 15Г – 1630 і 1630.

Таблиця 7. Механічні властивості сталі для холодного видавлювання і висадки

Марка	HB , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	φ , %	HB , МПа
	Гарячекатана				
10	1370	392	8	55	1790
20	1560	490	7	40	2070
30	1790	559	7	40	2290

Сталі для ливарних деталей машинобудування

Ливарні властивості сталей набагато гірші, ніж у чавуна і багатьох ливарних сплавів. Чим більше в сталі вуглецю, тим більше скорочується об'єм, тому більшість сталей для відливок вміщує 0,07 – 0,50 % С.

Хімічний склад вуглецевих сталей для відливок відповідає ГОСТ 977-75. Сталі поділяють на такі, що виплавлені основним і кислим способом. За призначенням сталі поділяють на три групи: I – відливки загального призначення, II – відливки відповідального призначення, III – відливки особливовідповідального призначення.

Для відливок основними нормуючими показниками є межа текучості або межа міцності, відносне подовження, ударна в'язкість. Відливки проходять термічну обробку.

Аналіз механічних властивостей сталі (табл. 8) показує. Із зростанням масової частки вуглецю σ_B і σ_T збільшуються, δ , φ і a_n зменшуються. При зменшенні температури ударна в'язкість для всіх марок сталі знижується.

Таблиця 8. Механічні властивості вуглецевих ливарних сталей

Марка	Режим ТО	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %	φ , %	a_n , кДж/м ²
15Л	Н,1180-1200+О, 940-960	400	200	24	35	500
30Л	Н,1150-1170+О, 880-900	480	260	17	30	350
45Л	Н,1130-1150+О, 940-960	550	320	12	20	300
30Л	З,1130-1150+О, 880-900	500	300	17	30	350
45Л	З,1130-1150+О, 820-870	600	400	10	20	250

Сталь для котлобудування і посудин, що працюють під тиском

Низьковуглецева сталь марок 12К, 15К, 16К, 18К, 20К і 22К поставляється в гарячекатаному стані у вигляді листів товщиною до 60 мм. Її хімічний склад і механічні властивості (табл. 9) відповідають ГОСТ 5520-79.

Для всіх марок сталі σ_B , δ і a_n практично не залежать від товщини, σ_T зменшується на 5 %. Із зростанням вмісту вуглецю (сталі 12К і 18К, товщиною 20 мм) і σ_B , МПа збільшується з 353 – 410 до 431 – 519, σ_T , МПа, з 225 до 275, δ падає з 20 до 24 %, a_n з 800 до 600 кДж/м², причому у всіх випадках після механічного старіння a_n знижується майже вдвічі. Межа текучості знижується з підвищенням температури. Так для сталі 12К σ_T , МПа, при 470 і 720 К відповідно становить 176 і 78. Межа повзучості також падає з підвищенням температури. Так, для сталі 22К межа повзучості, $\sigma_{1/10^4}$, МПа (напруження, що визиває деформацію 1 %) за час 10⁴ годин, при 670 і 720 К відповідно дорівнює 212 і 96.

Таблиця 9. Механічні властивості листової сталі для котлів і посудин, що працюють під тиском

Марка	Товщина, мм	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	a_n , кДж/м ²	
					у стані постачання	після старіння
12К	До 20	353-440	225	24	800	400
	21-40	353-440	216	24	800	400
	41-60	353-440	206	24	800	400
20К	До 20	402-509	245	25	600	300
	21-40	402-509	235	24	550	250
	41-60	402-509	225	23	500	250

Сталь вуглецева конструкційна для мостобудування

Товстолистова, широкострічкова, фасона і сортова прокатна сталь, що призначена для виготовлення мостових конструкцій, випускається по ГОСТ 6713-75. Цей же ГОСТ визначає хімічний склад сталі.

Механічні властивості сталі наведені в таблиці 10.

Таблиця 10. Механічні властивості сталі для мостобудування 16Д (Л – стрічкова, С – сортова і фасона)

Товщина, мм	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	a_n , кДж/м ² , при Θ , К			
				250	250	290	290
				Л	С	Л	С
До 20	380-520	≤240	≤26	≤350	≤400	≤350	≤400
21-40	380-520	≤230	≤26	≤350	≤400	≤350	≤400
41-60	380-520	≤220	≤26	≤350	≤400	≤350	≤400

* - Значення ударної в'язкості при температурі 250 К відноситься до стану поставки, а при 290 К після механічного старіння.

Сталь для армування залізобетонних конструкцій

Гарячекатана кругла сталь гладкого і періодичного профілю, що призначена для армування звичайних і попередньо напружених залізобетонних конструкцій випускається по ГОСТ 5781-82. Цей же ГОСТ визначає і хімічний склад арматурної сталі.

В залежності від механічних властивостей арматурна сталь поділяється на класи А-I – А-VI. Арматурна сталь поставляється в стрижнях або бухтах; арматурну сталь класу А-I виготовляють гладкою, а класів А-II – А-VI – періодичного профілю.

Арматурну сталь класів А-I – А-IV виготовляють гарячекатаною, класу А-V – з низькотемпературним відпуском, класу А-VI – з низькотемпературним відпуском або термомеханічною обробкою в потоці прокатного стану. Механічні властивості сталі наведені в таблиці 11.

Таблиця 11. Механічні властивості вуглецевої арматурної сталі по класах

Клас	Марка	Діаметр, мм	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ_5 , %
А-I	Ст3кп3, Ст3пс3, Ст3сп3	6-40	≤ 373	≤ 235	25
	Ст3кп2, Ст3пс2, Ст3сп2	6-18	≤ 490	≤ 235	25
А-II	Ст5сп2, Ст5пс2	10-40	≤ 490	≤ 294	19

Сталь зварювана для суднобудування

Вуглецева зварювана сталь для суднобудування випускається по ГОСТ 5521-76. Механічні властивості сталі наведені в таблиці 12.

Таблиця 12. Механічні властивості зварювальної сталі марки С для суднобудування

Товщина, мм	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	a_n , кДж/м ²
4	410-500	≤ 240	≤ 24	...
5-9	410-500	≤ 240	≤ 24	≤ 400
10-20	410-500	≤ 240	≤ 24	≤ 300

Як видно із таблиці механічні властивості сталі не залежать від товщини стрічки за винятком ударної в'язкості.

Література

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: Підручник / Д.Ф.Чернега, В.С.Богушевський, Ю.Я.Готвянський та ін.; За ред. Д.Ф.Чернеги, Ю.Я.Готвянського. – К.: Вища школа, 2006. – 503 с.
2. [http: www.istil.com.ua](http://www.istil.com.ua). Каталог продукції
3. [http: www.ilyich.ua](http://www.ilyich.ua). Каталог продукції
4. [http: www.dmz.com.ua](http://www.dmz.com.ua). Каталог продукції
5. Структури и свойства металлов и сплавов. Механические свойства металлов и сплавов: Справочник/Л.В.Тихонов, В.А.Кононенко, Г.И.Прокопенко, В.А.Рафаловский. – К.: Наукова думка, 1986. – 580 с.
6. Контроль и диагностика оборудования прокатного производства / И.Н.Богаенко, В.И.Донченко, Ю.Г.Савченко и др. – К.: Техніка. – 2000. – 151 с.