

*А. В. Третьяков
К. М. Радченко*

ИЗМЕНЕНИЕ
МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ
МЕТАЛЛОВ
И СПЛАВОВ
ПРИ ХОЛОДНОЙ
ПРОКАТКЕ

*Металлургияиздат
1960*

А в т о р ы.

Андрей Владимирович Третьяков
Константин Михайлович Радченко

Редактор *М. А. Беняковский*

Редактор издательства *Н. Н. Цымбалист*
Технический редактор *Е. Д. Туркина*

Сдано в производство 9/XII 1959 г.

Подписано к печати 28/I 1960 г.

Бумага 60×92 ¹ / ₁₆	Бум. л. 2,75	печ. л. 5,5
Уч.-изд. л. 5,5	Зн. в 1 п.л. 40000	НС 12012
Тираж 3200	Цена 2 р. 75 к.	Заказ 86

Свердловская типография Металлургиздата,
г. Свердловск Дом промышленности

А. В. ТРЕТЬЯКОВ, К. М. РАДЧЕВ

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛИТЕРАТУРЫ ПО ЧЕРНОЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ
СВЕРДЛОВСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Свердловск 1960

АННОТАЦИЯ

В книге помещены данные о механических свойствах холоднокатаных черных и цветных металлов и их сплавов при различных величинах относительной деформации. Описаны методы определения механических свойств металлов испытанием на растяжение. Рассмотрено влияние на предел прочности, предел текучести и относительное удлинение различных параметров холодной прокатки.

Книга предназначена для инженерно-технических работников металлургических и машиностроительных заводов, а также для сотрудников проектных и научно-исследовательских институтов, она может быть полезной студентам высших технических учебных заведений.

ВВЕДЕНИЕ

Решениями XXI съезда КПСС намечено довести производство проката к концу семилетия до 65—70 млн т в год. Такой грандиозный рост производства проката невозможен без развития станостроения и интенсификации технологических процессов прокатки.

По данным ЦСУ, в СССР доля производства стальных листов в общем объеме выпуска проката в 1950 г. составляла 26,6%, а в 1955 г. — 29,5%. Очевидно, в ближайшие годы потребность в листовом прокате в СССР будет возрастать быстрее по сравнению с другими видами проката. Большое количество листового металла потребуется для различных отраслей промышленности СССР автомобильной, авиационной, радиотехнической, консервной и т. д. Учитывая это, необходимо увеличить выпуск листовой стали с таким расчетом, чтобы ее количество составляло в сортаменте проката к 1965 г. не менее 45%.

Таким образом, совершенно очевидна необходимость интенсивного развития в 1959—1965 гг. производства холоднокатаной стали.

Решающими условиями успешного выполнения задач, поставленных перед коллективами цехов холодной прокатки, технологами, конструкторами и научными работниками, являются создание новых высокопроизводительных станов холодной прокатки и модернизация существующих, лучшее использование мощностей прокатных станов, внедрение передовой технологии и т. д.

Для осуществления этих условий необходимы точные технологические расчеты и расчеты на прочность, главной частью которых является определение давления металла на валки и моментов прокатки. Величины давления металла на валки и моментов при холодной прокатке полос и листов зависят от ряда факторов, основные из них — механические свойства прокатываемого металла, изменяющиеся в широком диапазоне в зависимости от величины обжата.

Основные механические свойства холоднокатаных металлов — предел прочности (временное сопротивление разрыву — σ_B), предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и относительное удлинение (δ , %). Остальные показатели механических свойств, например твердость, относительное сужение и т. д., хотя и являются важными

показателями, характеризующими металл, однако они не принимаются во внимание при подсчете давления металла на валки, моментов прокатки и распределении обжатий по пропускам и переделам, поэтому ниже рассматриваться не будут.

В настоящее время существует ряд формул для подсчета давления металла на валки и моментов прокатки. Эти формулы могут быть в дальнейшем уточнены, однако ими можно пользоваться лишь при условии знания величины и характера изменения механических свойств в процессе деформации. Если некоторыми факторами, влияющими на процесс холодной прокатки, можно задаваться или принимать по аналогии при расчетах давления и моментов прокатки, то по изменениям механических свойств в процессе деформации необходимы экспериментальные данные.

Кроме того, данные по изменениям основных механических свойств металлов в процессе деформации позволяют более или менее правильно определить пластичность металла и поведение его при практических процессах деформации.

В связи с отсутствием обобщающих материалов по характеру и величине изменения механических свойств цветных и черных металлов и их сплавов в процессе холодной прокатки и учитывая большую потребность в них для повседневного пользования, авторы поставили своей целью обобщить и уточнить имеющийся по данному вопросу материал, пополнив его результатами исследований, проведенных на ряде заводов, в научно-исследовательских институтах и непосредственно авторами. С целью обобщения данных по основным механическим свойствам для большей части металлов нами включены в книгу графики, в которых, однако, приводятся не все основные механические свойства металлов. Это связано с отсутствием данных в литературе или необходимых образцов металлов для проведения недостающих механических испытаний.

Часть графиков, заимствованных из литературы, проверена дополнительно проведенными авторами испытаниями и часть из них уточнена. Некоторые кривые графиков приводятся впервые.

Если данный справочник окажет известную помощь научно-техническим работникам в их практической работе, авторы будут считать свою задачу выполненной.

Все замечания по книге и пожелания будут приняты авторами с глубокой благодарностью.

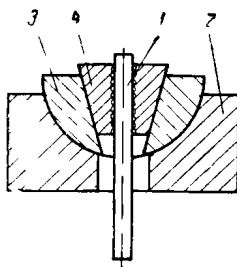
ГЛАВА I

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ХОЛОДНОКАТАНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Основными механическими свойствами, характеризующими холоднокатанные металлы при растяжении, являются предел прочности (временное сопротивление разрыву σ_b), предел те-

Рис 1 Схема шаровой опоры

1 — испытуемый образец,
2 — шаровая опора, 3 —
самоустанавливающийся
вкладыш, 4 — клинья с
рифленной поверхностью



кучести ($\sigma_{0,2}$) и относительное удлинение (δ , %).

Предел прочности, предел текучести и относительное удлинение определяют на специальных машинах, предназначенных для испытаний на растяжение [1].

Основные условия испытания на растяжение определяются соответствующими ГОСТ. Машины для испытания должны осуществлять растяжение образцов плавно, без толчков и ударов. Согласно ГОСТ 1497-42, скорость растяжения для металлических образцов не должна превышать 4 мм/мин до появления текучести и 20 мм/мин — за пределом текучести. Испытательная машина должна иметь соответствующий аттестат, а также периодически (не реже одного раза в два года) подвергаться проверке.

При растяжении образца необходимо иметь линейную схему напряженного состояния. Однако достигнуть этого удается обычно лишь приближенно. Объясняется это неизбежными перекосами образца, несовпадением осей захватов и неточностью изготовления самого образца. У сильно наклепанных металлов изгибающие напряжения, вызываемые недостаточной точностью

установки образца, могут привести к преждевременному разрушению.

Для уменьшения изгиба образца необходимо применять самоцентрирующиеся шаровые опоры в захватах (рис. 1). Клинья в этих опорах должны иметь рифленую поверхность для лучшего удерживания тонких образцов. Образцы для испытаний на растяжение (рис. 2) должны удовлетворять требо-

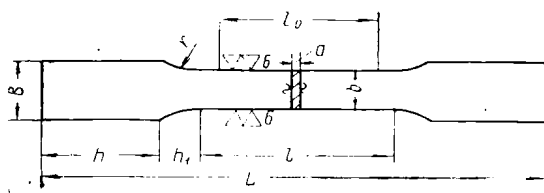


Рис. 2. Плоский образец.

ваниям ГОСТ 1497—42. Они могут быть нормальными или пропорциональными, в соответствии с размерами, указанными в табл. 1.

Таблица 1

Размеры образцов

Образцы		Длина l_0 , мм	Площадь поперечного сечения F_0 , мм ²	Диаметр круглого образца d_0 , мм	Символы для обозначения кратности об- разцов (относ- шение $\frac{l_0}{d_0}$)
Нормальный	длинный	200	314	20	δ_{10}
	короткий	100			δ_5
Пропорцио- нальный	длинный	$11,3\sqrt{F}$	Произволь- ная	Произволь- ный	δ_{10}
	короткий	$5,65\sqrt{F}$			δ_5

У плоских образцов отклонения от номинальных размеров по ширине (выбранной в зависимости от величин l_0 и F_0) допускаются в пределах $\pm 0,5$ мм. Колебания в ширине по всей длине рабочей части плоского образца не должны превышать $\pm 0,1$ мм. Смещение оси головки относительно оси рабочей части плоского образца не допускается. Сопряжение рабочей части образца с головками должно быть плавным.

Рекомендуемые размеры (мм) для пропорциональных плоских образцов приведены ниже.

a	8,0—3,6	3,5—1,1	1,0—0,6	0,5—0,1
b	20	20	15	10
B	30	30	20	15
h	50	40	40	30
h_1	15	10	10	10

Для определения относительного удлинения, на расчетную длину образца наносят с помощью специальной гребенки (рис. 3) деления через каждые 5—10 мм в виде неглубоких рисок для образцов толщиной до 2 мм; при более тонких образцах деления наносят карандашом.

В специальных лабораториях, при проведении испытаний больших партий образцов, применяют разметочные машины.



Рис. 3. Гребенка для нанесения делений на образец.

При испытаниях образцов на растяжение определяют следующие механические свойства, характеризующие холоднокатаный металл:

1. Предел текучести σ_s (физический), т. е. наименьшее напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки,

$$\sigma_s = \frac{P_s}{F_0} \text{ кг/мм}^2,$$

где P_s — нагрузка, соответствующая этому напряжению, кг;

F_0 — начальная площадь поперечного сечения образца, мм².

2. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ (условный), т. е. напряжение, при котором растягиваемый образец получает остаточное удлинение, равное 0,2% от первоначальной расчетной длины,

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} \text{ кг/мм}^2,$$

где $P_{0,2}$ — нагрузка, соответствующая этому напряжению, кг.

3. Предел прочности при растяжении σ_b (временное сопротивление разрыву), т. е. напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца,

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0} \text{ кг/мм}^2,$$

где P_b — наибольшая нагрузка, предшествующая разрыву образца, кг.

4. Относительное удлинение при разрыве δ_n , т. е. отношение приращения длины образца (после разрыва) к его первоначальной расчетной длине, выраженное в процентах,

$$\delta_n = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \%,$$

где l_1 — длина образца на расчетном участке после разрыва, мм;

l_0 — расчетная (начальная) длина его, мм.

Рассмотрим первичную диаграмму растяжения для мягкой углеродистой стали (рис. 4). По оси абсцисс отложены в определенном масштабе абсолютные удлинения образца Δl , а по оси ординат — соответствующие нагрузки P . Основными харак-

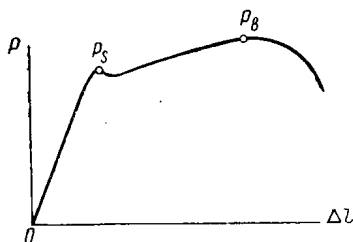


Рис. 4. Первичная диаграмма растяжения.

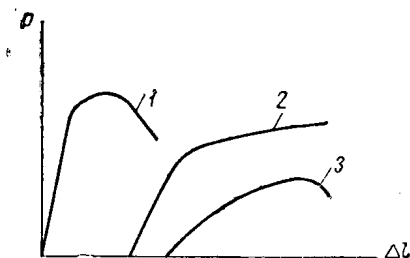


Рис. 5. Типичные кривые растяжения:

1 — сильно наклепанная сталь; 2 — бронза; 3 — чугун.

терными точками на данной кривой являются точки P_s и P_b , соответствующие нагрузкам при пределе текучести и пределе прочности. Однако не все металлы имеют площадку текучести. У сильно наклепанной стали, а также у бронзы и чугуна площадка текучести отсутствует. На рис. 5 приведены типичные кривые растяжения для различных металлов. Вне зависимости от характера кривой нагрузка — деформация определение предела прочности и относительного удлинения не вызывает затруднений: расчет выполняют по вышеприведенным формулам, используя результаты испытаний. Определение величины σ_b производится с точностью до $0,5 \text{ кг/мм}^2$. При этом доли до $0,25 \text{ кг/мм}^2$ отбрасывают, а доли $0,25 \text{ кг/мм}^2$ и больше принимают за $0,5 \text{ кг/мм}^2$.

Вычисление относительного удлинения производят с точностью до $0,5\%$. При этом доли до $0,25\%$ отбрасывают, а доли $0,25\%$ и больше принимают за $0,5\%$.

Методика определения предела текучести зависит от характера кривой нагрузка — деформация. Для материалов, дающих ярко выраженную площадку текучести, обычно определяют физический предел текучести σ_s . Для материалов, у которых от-

существует ярко выраженная площадка текучести, определяют условный предел текучести $\sigma_{0,2}$.

Физический предел текучести может быть определен или измерением соответствующей ординаты P_s на диаграмме растяжения (рис. 4), или фиксированием характерного момента прекращения роста нагрузки по силоизмерителю машины. Второй способ менее надежен в связи с субъективностью визуального отсчета.

Условный предел текучести также может быть определен двумя способами: по диаграммной записи или замером деформации тензометром. По диаграмме растяжения, полученной непосредственно на машине, условный предел текучести определяют в том случае, если масштаб диаграммы обеспечивает соответствие одному миллиметру ординаты не более 1 кг/мм^2 напряжения образца. При обработке диаграммы растяжения, для определения условного предела текучести, прежде всего находят начало координат, для чего через прямолинейный участок линии растяжения проводят прямую до пересечения с горизонтальной осью. Затем от найденного начала координат откладывают отрезок $OA = 0,2 \frac{P l_0}{100}$

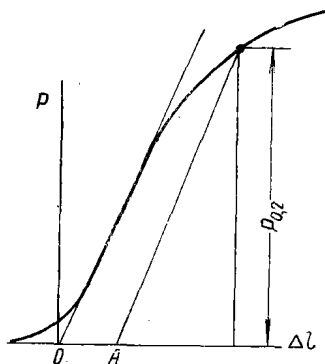


Рис. 6. Определение условного предела текучести.

и через точку A проводят прямую, параллельную начальному участку кривой растяжения, до пересечения с ней. Ордината точки пересечения принимается за нагрузку, определяющую условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ (рис. 6).

Хотя первый способ и менее точен, чем второй, однако благодаря своей простоте он получил большее распространение.

При определении условного предела текучести вторым способом пользуются различными механическими тензометрами. Образец закрепляют в опорах машины и после приложения к нему нагрузки, отвечающей начальному напряжению σ_0 , на образец устанавливают тензометр.

Для стали начальное напряжение σ_0 принимается равным 5 кг/мм^2 ; для всех других металлов и сплавов начальное напряжение принимается равным не более 10% ожидаемого предела текучести. Затем образец нагружают (от руки) до напряжения $\sigma_1 \approx 2\sigma_0$ и после выдержки в течение 5 сек. разгружают до начального напряжения σ_0 . Указатель шкалы тензометра устанавливают на нулевое или другое произвольное деление начального участка шкалы. Это показание принимают за исходное. Затем образцу сообщают ряд последовательно возрастающих нагрузок, с измерением каждый раз остаточного удли-

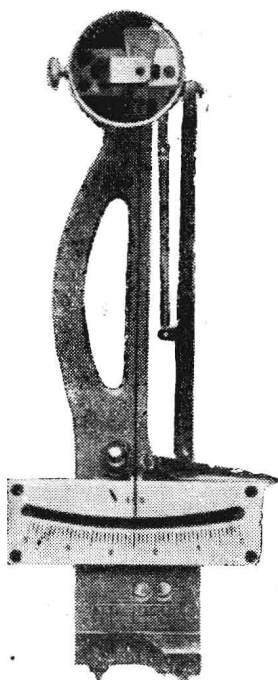


Рис. 7. Механический тензорезистор TP-1958.

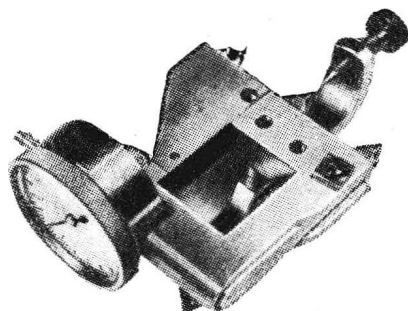


Рис. 8. Механический тензорезистор конструкции Веткина.

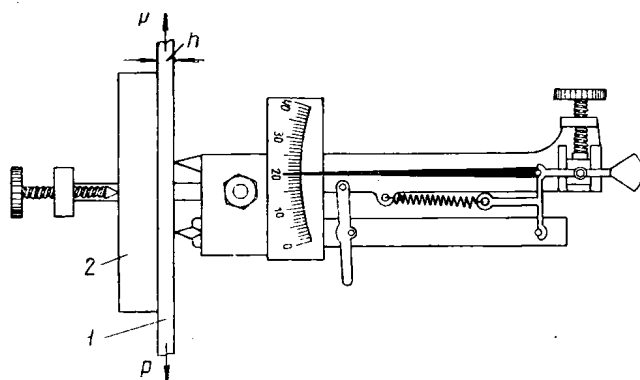


Рис. 9. Установка тензорезистора на тонком образце:
1 — образец; 2 — медная подкладка.

нения после разгрузки до начального напряжения σ_0 . Испытания прекращают, когда длина образца увеличивается на 0,2% своего первоначального значения (при σ_0).

При пользовании тензомерами для определения условного предела текучести можно также производить ступенчатое нагружение образца (без промежуточных разгрузок). Это дает возможность построить по данным нагрузка — деформация кривую растяжения, по которой определяют предел текучести. В этом случае требуется большая затрата времени, однако результаты, полученные таким способом, можно считать более точными.

Для определения условного предела текучести описанным выше способом применяют различные тензометры: механические, оптические, оптико-механические, электрические и т. д. Наибольшее распространение в заводских условиях получили в настоящее время механические тензометры, которые вполне пригодны для проведения испытаний образцов из холоднокатаных полос.

На рис. 7 показан механический тензометр, устанавливаемый на образец двумя призмами. Одна из призм неподвижна и соединена с корпусом прибора; другая, подвижная, является продолжением главного рычага передаточного механизма. Отсчет деформации производится визуально по зеркальной шкале.

Механический тензометр конструкции Веткина (рис. 8) отличается от описанного тем, что в нем рычажная система и шкала заменены индикатором. Этот тензометр очень удобен при определении предела текучести.

Оба тензометра применяются при определении механических свойств плоских образцов толщиной 0,4 мм и больше.

Установка описанных выше тензометров непосредственно на образцы тоньше 0,4 мм затруднительна, поэтому для их установки на тонкие и тончайшие образцы применяют специальную медную подкладку (рис. 9).

Кроме указанных тензометров, для испытаний тонких и тончайших образцов можно применять тензометр конструкции Татаренкова (рис. 10). Этот тензометр устанавливают непосредственно на тонкие образцы.

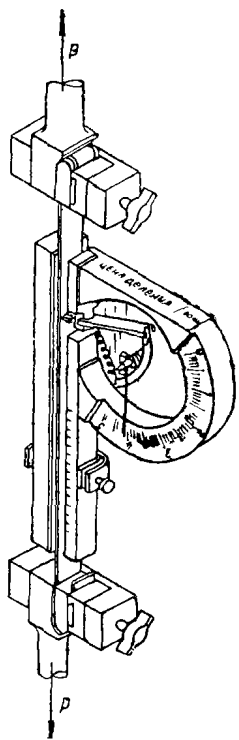


Рис 10 Механический тензометр конструкции Татаренкова.

ГЛАВА II

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И ТЕРМООБРАБОТКИ

Механические свойства металлов и сплавов существенно зависят от химического состава, структуры и термообработки их. Знание этих зависимостей необходимо прокатчикам для оценки поведения металла при пластической деформации.

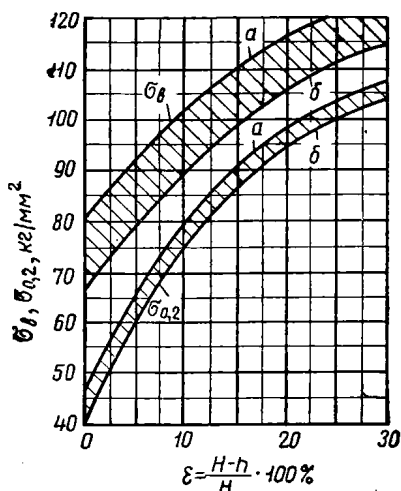


Рис. 11. Сравнение механических свойств стали 1X18H9 различных плавок:

а — 0,14% С; 17,75% Cr; 9,45% Ni;
б — 0,11% С; 17,98% Cr; 9,90% Ni.

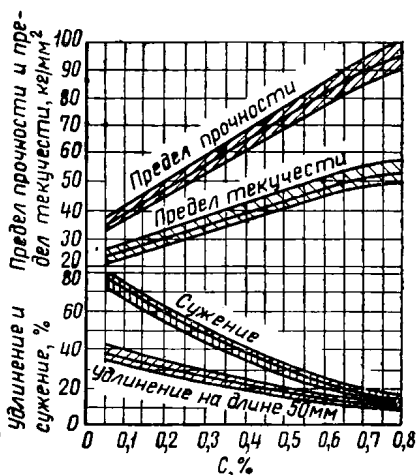


Рис. 12. Свойства горячекатаной стали в зависимости от содержания углерода.

Химический состав сплавов устанавливается ГОСТ и ТУ. Содержание отдельных элементов может колебаться в установленных пределах или не превышать определенной величины. Изменение содержания в сплаве любого элемента, независимо от того, является ли он основным, легирующим или примесью, вызывает, при прочих равных условиях, соответствующее изменение механических свойств. В связи с этим один и тот же

сплав различных плавок может иметь неодинаковые механические свойства. Так, например, согласно рис. 11, предел прочности холоднокатаных листов, изготовленных из одной плавки нержавеющей хромоникелевой стали 1X18Н9, отличается от

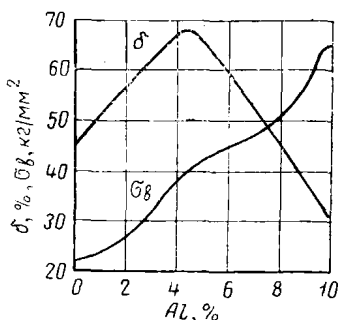


Рис. 13. Изменение механических свойств латуней.

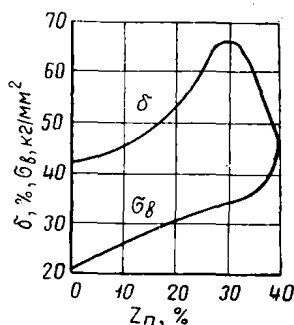


Рис. 14. Изменение механических свойств алюминиевых бронз.

предела прочности другой плавки той же стали (химический состав плавок — в пределах, допускаемых ГОСТ) до 10%.

На рис. 12 показаны свойства углеродистой горячекатаной стали в зависимости от содержания углерода [2]. Увеличение

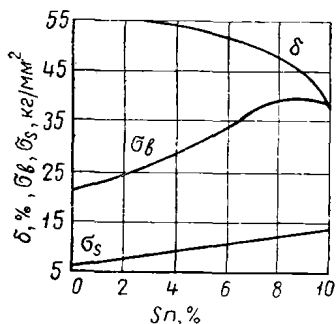


Рис. 15. Изменение механических свойств оловянистых бронз.

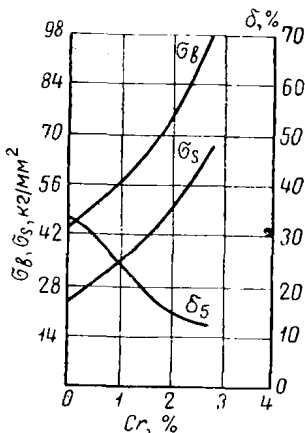


Рис. 16. Влияние хрома на механические свойства стали.

содержания углерода до 1,6% повышает предел прочности и уменьшает относительное удлинение и сужение.

Изменение механических свойств латуней, алюминиевых и оловянистых бронз в зависимости от содержания основных элементов приведено на рис. 13, 14 и 15 [3; 4].

Механические свойства металлов могут быть улучшены введением легирующих элементов. Легирование сталей марганцем, кремнием, вольфрамом, хромом, никелем повышает их предел прочности и текучести и снижает пластичность. На рис. 16 и 17 показано влияние хрома и никеля на механические свойства

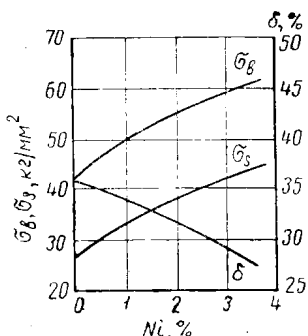


Рис. 17. Влияние никеля на механические свойства стали.

стали с содержанием 0,2% углерода [5].

Легирование алюминиевых сплавов медью, марганцем, кремнием повышает их прочность и снижает пластичность. Влияние кремния на изменение предела прочности и относительного удлинения сплава АМц показано на рис. 18 [6].

Помимо основных и легирующих элементов, в сплавах присутствуют неизбежные примеси, которые оказывают различное влияние на их механические свойства. Некоторые примеси образуют неметаллические включения, которые ослабляют связь между зернами, снижая прочность металла. Так, например, сера и кислород в стали, образуя сульфиды и окислы, ухудшают ее свойства. Повышение содержания фосфора вызывает значительное увеличение предела

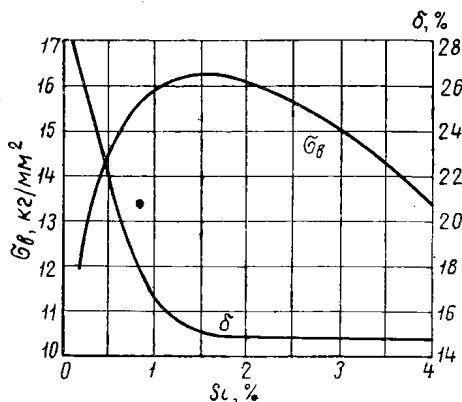


Рис. 18. Влияние кремния на механические свойства сплава АМц.

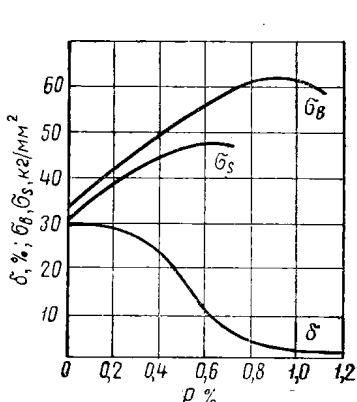


Рис. 19. Влияние фосфора на свойства стали.

прочности стали, а также способствует хладноломкости ее (рис. 19) [2]. Такие примеси, как сурьма, висмут и мышьяк резко ухудшают механические свойства латуней и бронз. Поэтому их содержание обычно не превышает сотых и тысячных долей процента.

Помимо химического состава, на свойства сплава, как отмечалось, оказывает влияние структура. Сплавы состоят из одной

или нескольких фаз, которые могут образовывать различные структурные составляющие, по-разному влияющие на свойства.

Стали после медленного охлаждения представляют смесь двух фаз — феррита и цементита, количественное соотношение и структурное состояние которых определяют механические свойства. Феррит является мягкой, пластичной составляющей, механические свойства которой следующие: $\sigma_s = 30 \text{ кг/мм}^2$, $\delta = 45\%$; $H_B = 80$. Цементит является хрупкой и твердой составляющей стали ($H_B = 700$) [7]. При введении в сталь легирующих элементов последние замещают атомы железа. Разли-

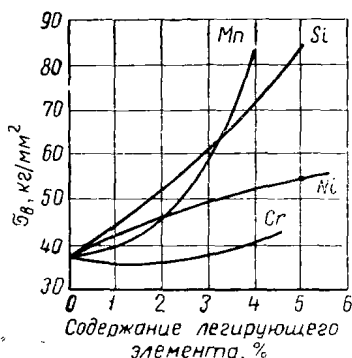


Рис. 20. Влияние легирующих элементов на предел прочности феррита.

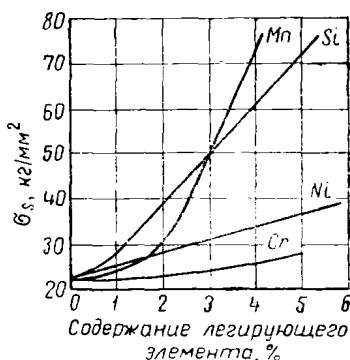


Рис. 21. Влияние легирующих элементов на предел текучести феррита.

чие размеров атомов железа и легирующих элементов приводит к изменению параметров решетки, а следовательно, и свойств феррита. Чем больше это различие, тем сильнее повышается прочность и снижается пластичность. Влияние легирующих элементов на предел прочности и текучести феррита [8] показано на рис. 20 и 21.

Некоторые легирующие элементы образуют карбиды, которые также оказывают влияние на механические свойства стали.

Феррит и цементит могут быть структурно свободными или образовывать перлит. Перлит может быть пластинчатым или зернистым и, кроме того, иметь различную степень дисперсности. В соответствии с этим механические свойства стали будут изменяться. Сталь с зернистой формой перлита более пластична и менее прочна, чем сталь с пластинчатой формой перлита. Чем выше степень дисперсности сплава, тем выше механические свойства его.

Некоторые сплавы цветных металлов (латуни, бронзы, сплавы никеля с медью) являются однофазными. Структурные