

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

С. Т. КИШКИН и С. З. БОКШТЕЙН

**ПЛАСТИЧНОСТЬ И УПРОЧНЕНИЕ СТАЛИ И ПРОБЛЕМА  
ЛЕГИРОВАНИЯ**

(Представлено академиком А. А. Бочваром 17 V 1947)

В свое время одним из авторов данной работы было экспериментально установлено (<sup>1</sup>), что при пластической деформации сталей в состоянии пересыщенного твердого раствора углерода в  $\alpha$ -решетке происходит образование высокодисперсных карбидов железа и этим процессом, блокирующим сдвиги, в основном определяется упрочнение стали как при холодной деформации, так и при термической обработке.

Однако физическая природа высокой пластичности мартенсита легированных сталей после их закалки и низкого отпуска оставалась неясной. Решение этого вопроса определяло решение и всей проблемы легирования сталей в области прочности. Исследование естественно было начать с определения влияния легирования на механические свойства  $\alpha$ -решетки в ее стабильном состоянии, перейдя затем к феррито-карбидной смеси и мартенситу.

Определялась, при испытании на растяжение, полная кривая истинных напряжений ( $S$ ) в функции от истинной деформации [ $e = \ln(F_0/F)$ ] и сопротивление малым пластическим деформациям ( $\sigma_{0,001}$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) при помощи экстензометра Мартенса.

Изучение кривых истинных напряжений для легированного железа ( $C < 0,05\%$ ) — типичная диаграмма для никелевого феррита дана на рис. 1 — показывает, что легирование различными элементами (Ni, Si, Co, Mn, Cr, Mo) не оказывает существенного влияния на общий ход процесса упрочнения феррита. Общим для всех элементов является уменьшение пластичности ( $\Psi$  или  $e$ ), сохранение постоянным коэффициента упрочнения и некоторое увеличение сопротивления пластической деформации ( $\sigma_p$ ,  $\sigma_s$ ,  $\sigma_b$ ), в результате которого и наблюдается небольшое повышение сопротивления  $\alpha$ -раствора вязкому разрушению ( $S_k$ ). При высокой концентрации кремния ( $\sim 4\%$ ) в  $\alpha$ -Fe пластичность

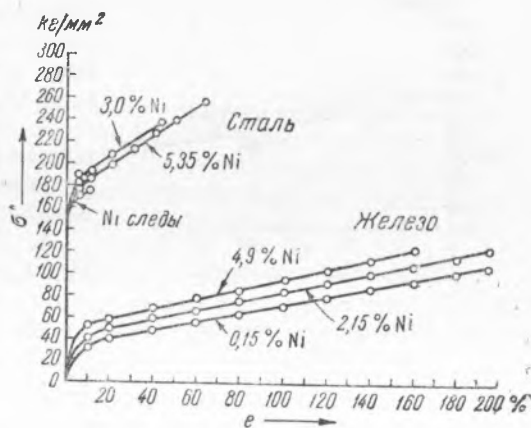


Рис. 1. Влияние Ni на упрочнение стали (0,35%С) и железа при деформации растяжением (закалка, отпуск 200°)

феррита равна нулю и разрушение из пластичного переходит в хрупкое, что объясняется уменьшением количества плоскостей, по которым может идти пластическая деформация (2). Характерно слабое упрочнение феррита в результате легирования и невозможность получения в легированном феррите высокой прочности, получаемой на стали. Относительное влияние различных элементов на механические свойства феррита (рис. 2) достаточно удовлетворительно согласуется с объяснениями, которые исходят из различия в кристалло-химическом строении железа и легирующих элементов и различия в размерах их атомов.

Влияние большинства элементов на механические свойства стали (0,3—0,4%С) в высокоотпущенном состоянии (закалка+отпуск 650°

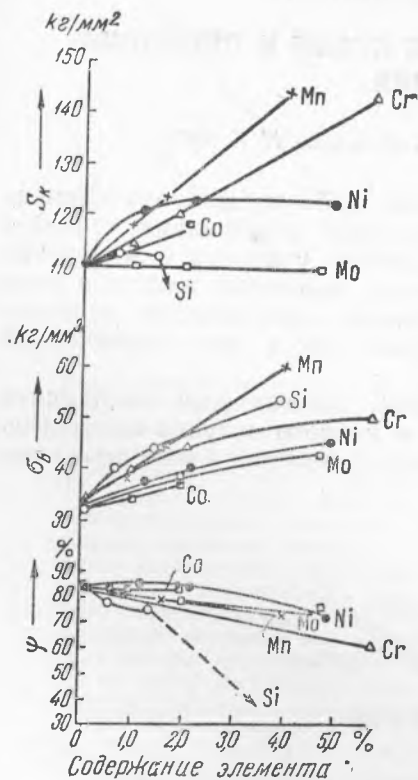


Рис. 2. Влияние легирующих элементов на механические свойства феррита

1 час) во многом аналогично влиянию их на свойства чистого феррита: несколько уменьшается при легировании пластичность и немного повышается прочность. При наличии элементов, сильно тормозящих процесс карбидообразования (например V), прочность стали значительно повышается и после отпуска при 650°.

Рассмотрение диаграмм истинных напряжений для легированной стали после закалки и отпуска при 200° показывает следующее:

1. Чрезвычайно интенсивное упрочнение в начальный момент деформации как для углеродистой, так и для легированной стали.

2. Для углеродистой стали кривая обрывается при относительно малой деформации (около 10%), вследствие чего сопротивление вязкому разрушению ( $S_k$ ) занижено.

3. Легирование стали увеличивает пластичность мартенсита, при этом развивается процесс упрочнения и повышается сопротивление разрушению.

4. Для большинства элементов (Si, Mn, Cr) имеется оптимальная концентрация, выше которой пластичность мартенсита и соответственно  $S_k$  падают. Следует отметить выдающуюся роль Ni в увеличении способности высоко-

прочной стали пластически деформироваться, что обеспечивает получение высокого значения истинного предела прочности (рис. 3).

5. Коэффициент упрочнения стали (тангенс угла наклона кривых в области развитой пластической деформации) при легировании не изменяется.

6. Сопротивление пластической деформации ( $\sigma_s$ ,  $\sigma_b$ ) при легировании изменяется слабо.

Сопоставляя упрочнение в результате легирования при различных структурных состояниях феррита, феррито-карбидной смеси и мартенсита, можно видеть, что действительно существенное упрочнение происходит при легировании стали с мартенситной структурой. Если принять (3), что сопротивление разрушению от среза  $S_k = \sigma_s + e \operatorname{tg} \alpha$ , то очевидно, что повышение сопротивления разрушению мартенсита при легировании специальными элементами связано с увеличением  $e$ , так

как  $\sigma_s$  и  $tg \alpha$  при этом практически не меняются. Таким образом, проблема легирования стали, с точки зрения прочности, в значительной степени связана с проблемой пластичности мартенсита.

Исследование влияния углерода (0,19—0,51%) на процесс упрочнения кремнистой (2,3% Si) стали показало, что с увеличением содержания углерода в закаленной стали резко возрастает коэффициент упрочнения как в начальной стадии, так и в области развитой пластической деформации, в связи с чем повышается сопротивление стали разрушению. Одновременно сокращается пластичность и при 0,51% C наступает хрупкое разрушение. При более высоком содержании углерода прочность падает. Таким образом, в условиях пластического разрушения углерод упрочняет сталь, а при хрупком — роль углерода прямо противоположна. Отпуск стали, приводящий к распаду мартенсита и коагуляции карбидов, уменьшает прочность при вязком разрушении.

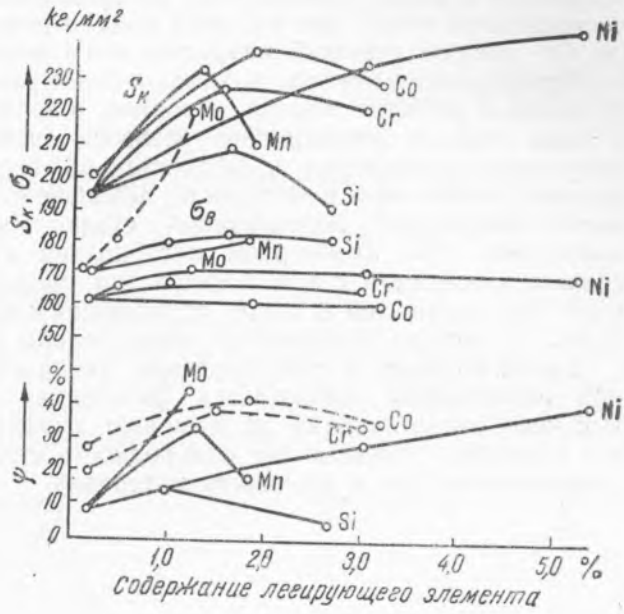


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на механические свойства стали (0,35%С) (закалка, отпуск 200°)

Исследование процесса упрочнения стали после предварительной гомогенизации (1250°) показало, что в случае закалки и низкого отпуска гомогенизация повышает пластичность стали, благодаря чему разрушение при высоком содержании углерода (0,51%) вместо хрупкого становится вязким; в случае высокого отпуска гомогенизация на свойства стали влияния не оказывает. Таким образом, повышение однородности раствора повышает пластичность стали.

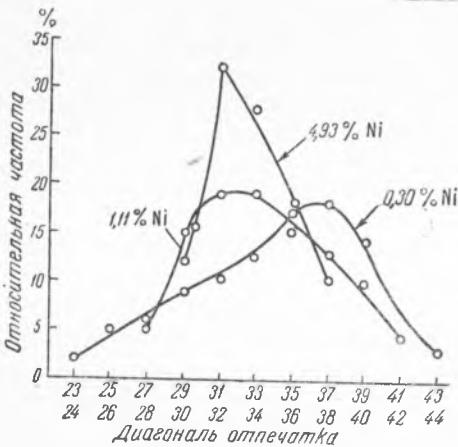


Рис. 4. Влияние Ni на распределение микротвердости мартенсита (0,32% С)

ку углерод ответственен за то или иное значение твердости мартенсита. Типичные кривые распределения, построенные на основе большого числа (до 200) отпечатков (прибор Ганемана,

нагрузка 20 г) для никелевой серии (0,32% С) даны на рис. 4. Характер кривых, полученных для углеродистой стали, отражает крайне неравномерное распределение углеродов в растворе. Легирование мартенсита никелем (равно как Si, Cr, Mn, Mo, Co, V) существенно меняет форму кривой. Вместо 11 групп твердости (при 0,3% Ni) основание кривой охватывает (при 4,93% Ni) только 5 групп, что свидетельствует о более равномерном распределении углерода в мартенсите легированной стали; при высокой концентрации некоторых элементов (Si, Cr) разброс значений микротвердости возрастает.

Легирующие элементы вызывают более равномерное распределение углерода в решетке железа, вероятно, в пределах дендритного зерна; с этим связано уменьшение разброса значений микротвердости в результате легирования и, следовательно, более равномерное распределение напряжений в материале, лежащее в основе высокой пластичности закаленной легированной стали. Уменьшение пластичности мартенсита при чрезмерном легировании стали Si, Mn, Cr следует связать в основном с повышенной (по сравнению с Ni) микроликвацией этих элементов в стали, приводящей к гетерогенизации ее структуры, что всегда сказывается отрицательно на пластичности.

Таким образом, в гомогенизации твердого раствора по углероду при легировании заключается физическая природа пластичности и высокого сопротивления разрушению специальных сталей. Поэтому все средства, повышающие однородность сплава, будут повышать как пластичность, так и прочность материала.

Поступило  
17 V 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> С. Т. Кишкин, Изв. АН СССР, ОТН, № 12 (1946). <sup>2</sup> С. Barrett, G. Ansel and R. Mehl, Trans. ASM, 25, 3 (1937). <sup>3</sup> Я. Б. Фридман, Деформация и разрушение металлов при статических и ударных нагрузках, 1946.