

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 (¹), что при пластической деформации сталей в состоянии пересыщенного твердого раствора углерода в α -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 α -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 (Ψ или e), сохранение постоянным коэффициента упрочнения и некоторое увеличение сопротивления пластической деформации (σ_p , σ_s , σ_b), в результате которого и наблюдается небольшое повышение сопротивления α -раствора вязкому разрушению (S_k). При высокой концентрации кремния ($\sim 4\%$) в α -Fe пластичность

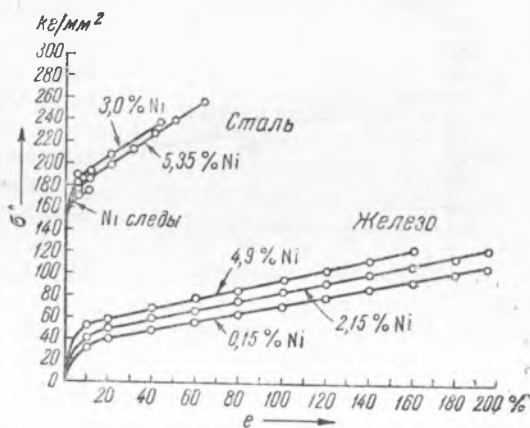


Рис. 1. Влияние Ni на упрочнение стали (0,35%С) и железа при деформации растяжением (закалка, отпуск 200°)

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°

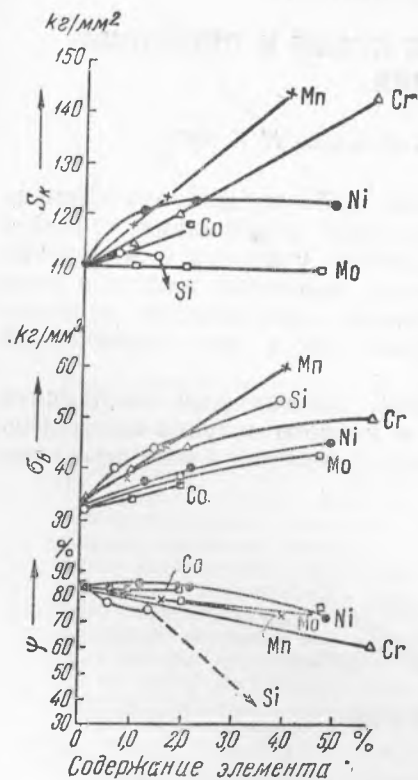


Рис. 2. Влияние легирующих элементов на механические свойства феррита

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 (σ_s , σ_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 σ_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.

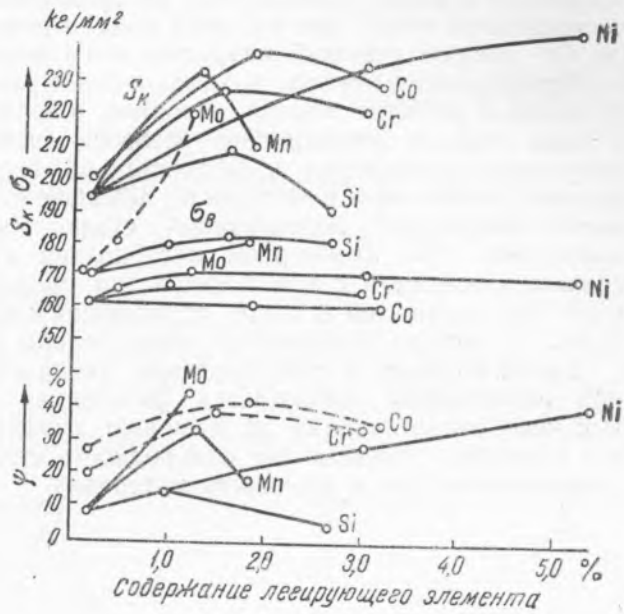


Рис. 3. Влияние легирующих элементов на механические свойства стали (0,35%С) (закалка, отпуск 200°)

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.

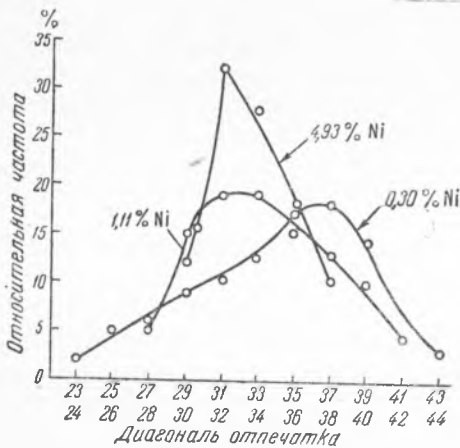


Рис. 4. Влияние Ni на распределение микротвердости мартенсита (0,32% С)

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

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