

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

С. З. БОКШТЕИН И С. Т. КИШКИН

**ПРИРОДА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К КОНЦЕНТРАЦИЯМ
НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**

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

Крайне повышенная чувствительность высокопрочных сплавов к концентрациям напряжений на десятки лет затормозило применение этих материалов в технике. Оказалось, что высокая прочность материала, полученная путем испытаний гладкого образца, не может быть реализована в конструкции. Изучению природы этого явления, которое особенно сильно проявляется в мартенситных сталях, и посвящено данное исследование.

Чувствительность к надрезу в значительной мере связана со способностью закаленной стали и ряда других пересыщенных твердых растворов распадаться под напряжением. Процесс распада под напряжением наиболее интенсивно начинается у дна надреза, где действует пик напряжений. В силу этого у дна надреза, даже при ничтожно малой локальной пластической деформации, происходит интенсивное образование карбидов железа, что приводит к гетерогенизации стали и препятствует перераспределению напряжений за счет пластической деформации, как это происходит, например, у чистых металлов. Второй причиной чувствительности к надрезу является заниженное сопротивление отрыву при хрупком разрушении, зависящее от степени однородности твердого раствора, а также искаженности его решетки.

В соответствии с теорией, развитой Фридман (1), проводится различие между вязким и хрупким разрушением; первое связывается с действием касательных, а второе — нормальных напряжений. Физическая природа закономерностей хрупкого разрушения являлась основным предметом данного исследования.

Непосредственно в закаленном состоянии углеродистая сталь (0,40% С) при испытании образцов с надрезом * на статический изгиб разрушается хрупко, обнаруживая низкое сопротивление отрыву (при высоком значении H_B) (рис. 1). Отпуск стали сопровождается увеличением сопротивления отрыву и уменьшением чувствительности к надрезу **, наиболее значительным в интервале интенсивного выделения углерода из раствора (100—300°); сопротивление срезу при этом падает.

* По методике Я. М. Потак: испытание на статический изгиб надрезанных круглых образцов, имеющих $d = 19$ мм, глубину надреза 2 мм, угол раскрытия 90° и радиус надреза 0,1 мм.

** Предположение о таком качественном влиянии отпуска на сопротивление отрыву и сопротивление срезу впервые в ясной форме было сформулировано Певзнер (?).

Аналогично, продолжительный отпуск при 200° С, приводящий к выделению углерода из α -раствора (3), дает увеличение прочности при хрупком разрушении (рис. 2).

Увеличение содержания углерода (0,25—1,2%) в закаленной или отпущенной до 200° стали приводит к резкому уменьшению нагрузки при хрупком разрушении образцов, подвергнутых испытанию на изгиб (рис. 3); аналогичные данные при испытании на кручение были получены Ратнер (4). Падение прочности происходит наиболее интен-

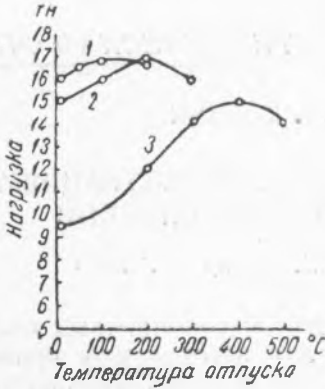


Рис. 1. Влияние отпуска на чувствительность никелевой стали к надрезу. 1—4,60% Ni, 2—2,90% Ni, 3—0,9% Ni

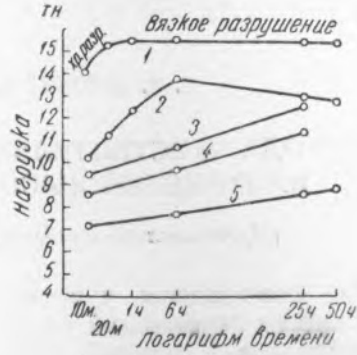


Рис. 2. Влияние выдержки при отпуске 200° С на величину нагрузки при разрушении стали. 1—Ni-сталь 4,69% Ni, 2—Ni-сталь 2,99% Ni, 3—Si-сталь 1,66% Si, 4—С-сталь, 5—Si-сталь 2,46% Si

сивно при увеличении концентрации углерода до 0,5—0,6%. Закономерность изменения прочности мартенсита при хрупком разрушении от отрыва отвечает закономерности изменения насыщенности углеродом ячеек кристаллической решетки α -железа (см. на рис. 3 пунктирную линию).

Таким образом, высокая чувствительность к надрезу и заниженное сопротивление отрыву структуры мартенсита в стали объясняются внедрением в кристаллическую решетку атомов углерода, растягивающих ее и ослабляющих силу межатомных связей, вследствие чего сопротивление нормальным напряжениям уменьшается. С другой стороны, сопротивление касательным напряжениям при этом возрастает. Упрочнение в случае пластического разрушения и понижение прочности в случае хрупкого разрушения — такова роль углерода в закаленной стали.

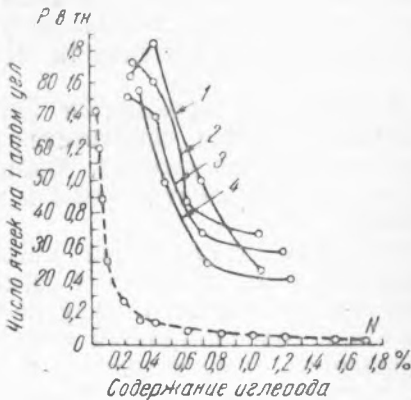


Рис. 3. Влияние углерода на чувствительность стали к надрезу (закалка, отпуск 200° С). 1—Ni-сталь, 2—С₂-сталь, 3—Si-сталь, 4—С-сталь

Легирование стали различными элементами (Ni, Cr, Si, Mn) повышает сопротивление стали отрыву и уменьшает чувствительность ее к надрезу (рис. 1, 2, 3). Для большинства элементов имеется оптимальная концентрация, выше которой чувствительность к надрезу возрастает. Высокое содержание Si (2,5%) в стали делает ее более чувствительной к надрезу, чем в случае чисто углеродистой стали (рис. 2), что следует связать с сильно тормозящим влиянием, оказываемым крем-

нием на распад мартенсита. Выдающаяся роль в уменьшении чувствительности к надрезу принадлежит никелю. Характерно, что переход от хрупкого разрушения к вязкому происходит при тем более низкой температуре отпуска (рис. 1), или при тем меньшей выдержке (рис. 2), или, наконец, при тем более высоком содержании углерода (рис. 3), чем выше содержание никеля в стали. Таким образом, легирование определенными элементами, как и отпуск, повышает предельную концентрацию углерода, при которой разрушение из вязкого (от среза) переходит в хрупкое (от отрыва).

Увеличение сопротивления отрыву и уменьшение чувствительности к надрезу при легировании может быть объяснено повышением пластичности мартенсита в надрезанном образце, что обеспечивает выравнивание концентрации напряжений, приводящих к преждевременному локальному разрушению.

Повышение пластичности мартенсита при легировании, как было нами показано, связано с получением более равномерного распределения углерода в пределах дендритного зерна. Наличие неоднородностей, являющихся как бы внутренними надрезами, может создать местную концентрацию напряжений, и, в условиях отсутствия перераспределения их, локальное разрушение. Сопротивление отрыву с этой точки зрения имеет двойственную природу: во-первых, оно отражает величину атомных связей в решетке, и во-вторых, степень однородности и закономерность распределения напряжений в опасном сечении. Наличие неоднородностей может быть причиной заниженного сопротивления отрыву и повышенной чувствительности к надрезу.

В этой связи изучалось влияние различного рода неоднородностей на чувствительность к надрезу.

Испытание на статический изгиб надрезанных образцов (0,4% С, 3% Cr) после закалки и отпуска до 200° обнаружило заниженное сопротивление отрыву литых образцов по сравнению с коваными. Гладкие образцы литой стали при испытании на растяжение также разрушались хрупко. Очевидно, сильная структурная неоднородность литой стали, играющая роль внутренних надзоров и создающая высокий градиент напряжений, является причиной высокой чувствительности к концентрации напряжений даже при отсутствии внешнего надреза.

Влияние структурной неоднородности на чувствительность к надрезу можно было проследить также при испытании стали, прошедшей полную закалку (структура мартенсита) и неполную (смесь мартенсита и феррита). Присутствие, кроме мартенсита, небольших количеств пластичной составляющей — феррита, особенно в случае неравномерного распределения его или расположения по границам зерна, резко повышает чувствительность стали к надрезу.

Пример концентрационной гетерогенизации (ведущей к повышению чувствительности к надрезу) внутри кристаллической решетки дают стареющие сплавы, в частности, бериллиевая бронза, старение в которой протекает аналогично старению алюминиевых сплавов (рис. 4).

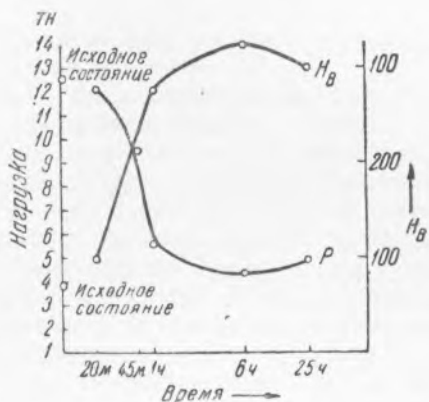


Рис. 4. Влияние старения на чувствительность к надрезу (сплав Cu — Be)

Таким образом, чувствительность к надрезу высокопрочных сплавов, представляющих распадающиеся пересыщенные твердые растворы (особенно опасны растворы по типу внедрения), в основном связана с неспособностью этих материалов гасить пики напряжений в местах их концентрации и заниженным сопротивлением отрыву.

Поступило
17 V 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. Б. Фридман, Механические свойства металлов, 1946. ² Л. М. Певзнер, Тр. ВИАМ, 1944—45 гг. ³ Г. В. Курдюмов и Н. Ослон, ЖТФ, 9, в. 21 (1939). ⁴ С. И. Ратнер, Зав. лаборатория, № 7—8 (1946).