

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Л. М. ПЕВЗНЕР

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ
СТАЛИ ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

(Представлено академиком А. А. Бочваром 28 IV 1947)

Повышение прочности детали сложной конфигурации путем подбора соответствующих материалов является одной из основных задач современного металловедения. Среди исследованных до сих пор „высокопрочных“ материалов первое место занимают подвергнутые закалке и отпуску при низкой температуре обычные конструкционные стали, которые дают на гладких образцах сочетание высокой прочности ($\sigma_B > 200$ кг/мм²) и пластичности ($\psi = 45-50\%$). Однако реальная прочность деталей, изготовленных из этих материалов, вследствие высокой чувствительности к надрезу не повышается, а часто даже резко падает по сравнению с деталями из стали средней прочности ($\sigma_B 110-120$ кг/мм²). Эти материалы с высоким σ_B имеют также склонность к самопроизвольному растрескиванию.

Если принять, что разрушение при статических нагрузках может происходить под действием нормальных напряжений (путем отрыва) и под действием касательных напряжений (путем среза) (1), то для повышения прочности надрезанного образца необходимо: 1) максимально повысить сопротивление разрушению материала (сопротивление отрыву S_T и сопротивление срезу t_k); 2) уменьшить концентрацию напряжений в момент разрушения, максимально повысив способность материала к выравниванию напряжений в процессе пластической деформации.

Результаты изучения физико-механических свойств структур закалки и низкого отпуска углеродистых и среднелегированных конструкционных сталей могут быть сведены к следующему:

1. Низкая разрушающая нагрузка и пластичность, близкая к нулю, при растяжении, изгибе, кручении и иногда при сжатии и вместе с тем высокая твердость и высокое сопротивление разрушению при вдавливании показывают, что сопротивление отрыву мартенсита углеродистой стали очень низко, а сопротивление касательным напряжениям и сопротивление срезу t_k весьма высоко (2). Характерной особенностью мартенсита является наличие больших внутренних напряжений; склонность к поводкам и к образованию макро- и микротрещин.

2. Закономерность изменения механических свойств углеродистой стали при отпуске (повышение, а затем падение разрушающих нагрузок при изгибе, растяжении и кручении) хорошо объясняется предложенной нами (2, 3) схемой, согласно которой S_T с повышением температуры отпуска растет, а t_k падает (рис. 1). Непосредственным доказательством правильности этой схемы является изменение харак-

тера разрушения при кручении (до максимума нагрузки излом под углом 45° к оси образца, после максимума — перпендикулярно оси образца) (4).

3. С повышением содержания углерода в стали S_T уменьшается, а t_k растет, что также доказано измерениями при кручении (5). Влияние азота аналогично влиянию углерода.

4. Приведенные данные показывают, что во всех случаях, когда уменьшается тетрагональность решетки мартенсита (распад мартенсита при отпуске, уменьшение содержания С в стали) и когда уменьшаются внутренние напряжения, сопротивление отрыву растет. Сопротивление срезу t_k , наоборот, растет при увеличении тетрагональности решетки. Наличие напряжений, повидимому, не оказывает вредного влияния на t_k .

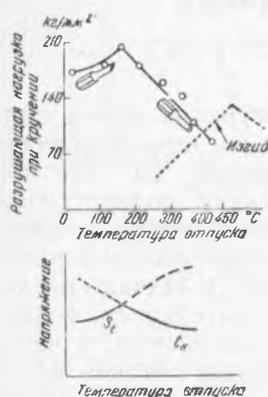
5. Влияние многих легирующих элементов на мартенсит углеродистой стали (как показали обширные исследования С. Т. Кишкина и С. З. Бокштейна и наши работы) выражается в значительном повышении сопротивления отрыву.

6. Высокая чувствительность к надрезу легированного мартенсита объясняется отчасти пониженным S_T , но главным образом, высоким градиентом напряжений при разрушении.

Малая способность к перераспределению напряжений легированного мартенсита, вероятно, связана с очень высоким $D_{нач}$ (2), а также с особым поведением распадающегося в процессе деформации твердого раствора (6).

7. Все изложенное привело нас к заключению, что для уменьшения чувствительности к надрезу необходимо: а) всемерно уменьшить напряжения 1-го, 2-го и 3-го рода, б) перейти к структурам более устойчивым, в частности к менее пересыщенным твердым растворам.

Рис. 1. Схема изменения сопротивления отрыву S_T и сопротивления срезу t_k углеродистой стали в зависимости от температур отпуска (2, 3). Численные величины взяты из работы (4)



Эти меры должны повысить S_T и в особенности увеличить способность к благоприятному перераспределению напряжений. Склонность к самопроизвольному разрушению также должна уменьшиться. Желательно, чтобы сопротивление срезу t_k при этом не уменьшалось; некоторое понижение σ_B нам кажется допустимым, хотя очевидно, что очень низкий предел прочности и заниженные пределы σ_e и σ_s могут оказаться непригодными для конструкционных материалов вследствие появления недопустимой пластической деформации.

Для достижения поставленной нами цели можно наметить следующие пути: а) применение изотермической обработки (получение бейнита и „малонапряженного“ мартенсита); б) получение путем более высокого легирования мартенситной структуры при охлаждении на воздухе, т. е. с минимальными остаточными напряжениями; в) получение путем специального легирования стали, сохраняющей высокую прочность при высоком отпуске (т. е. также при минимальных остаточных напряжениях).

Ниже изложены первые результаты наших опытов* по применению изотермической обработки к сталям 30ХГСА и 40ХНМА. Изучались бейнитные структуры, полученные путем выдержки при температуре изотермы до конца распада аустенита. Преимуществом

* Большая часть опытов проведена В. Г. Мищенко и Р. Е. Мазель.

этой структуры являлись относительная однородность, менее искаженная, менее пересыщенная (по сравнению с мартенситом) решетка Fe- α -раствора, пониженные напряжения. Преимущество изотермической обработки на бейнит („Austempering“) для углеродистых сталей доказано давно (7); менее ясен вопрос о легированных сталях.

Сравнение свойств после изотермической обработки и после обычной закалки и отпуска на ту же твердость (45—46 R_c) показало:

1. Свойства гладких образцов (изучались истинные кривые при растяжении и кручении):

а) Пределы прочности примерно равны 160—165 $\text{кг}/\text{мм}^2$.

б) Сопротивление разрушению при растяжении (S_k) бейнита повышается незначительно (с 267 до 293 $\text{кг}/\text{мм}^2$ для 30 ХГСА и с 238 до 279 $\text{кг}/\text{мм}^2$ для 40 ХНМА, т. е. на 10—20%).

в) Повышение пластичности при растяжении (ψ) такого же порядка.

Таким образом, по механическим свойствам гладких образцов бейнит отличается от мартенсита незначительно.

2. Ударная вязкость (α_k) бейнита во всех случаях выше. Особенно большая разница получилась для плавки Б стали 40 ХНМА.

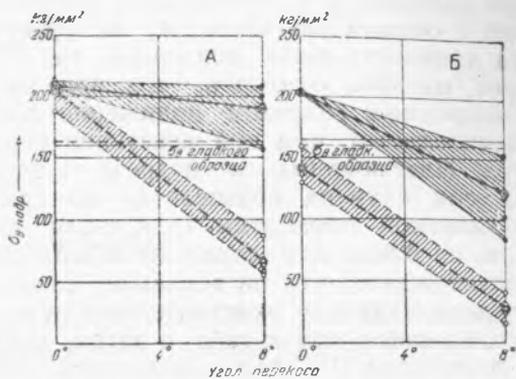


Рис. 2. Повышение статической прочности болтов из стали 40ХНМА путем применения изотермической обработки. — изотермическая обработка: закалка с 850° в соль при 325°, выдержка 30 мин.; — нормальная обработка: закалка с 850° в масло, отпуск 300° 2 часа. А — плавка А, Б — плавка Б

Эта плавка после высокого отпуска не отличалась от кондиционной плавки А, но после низкого отпуска давала пониженные значения α_k (3 $\text{кг м}/\text{см}^2$ вместо 5), что, как оказалось, было вызвано повышенным количеством неметаллических включений.

3. Чувствительность к надрезу определялась при растяжении и растяжении с перекосом (8, 9). Испытывались болты и образцы диаметром 10 мм (надрез глубиной 1 мм, r дна надреза 0,1 мм). Результаты приведены на рис. 2 и 3.

а) Максимальное повышение $\sigma_{в \text{ надр}}$ (в 5—6 раз) получалось для плавки Б 40 ХНМА. Нужно отметить, что после нормальной обработки эта плавка дала исключительно низкое $\sigma_{в \text{ надр}}$ (даже при растяжении без перекоса). Очевидно, включения, играющие роль внутренних надрезов, особенно опасны для стали после низкого отпуска (вследствие высокой чувствительности к надрезу структур низкого отпуска) и мало влияют на ее свойства после высокого отпуска.

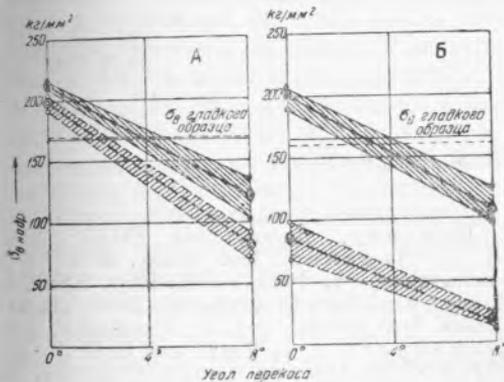


Рис. 3. Повышение статической прочности образцов с надрезом путем применения изотермической обработки. А — сталь 30ХГСА. — изотермическая обработка: закалка с 880° в соль 315°, выдержка 15 мин.; — нормальная обработка: закалка с 880° в масло, отпуск 300° — 2 часа. Б — термообработка стали 40ХНМА та же, что на рис. 2

нормальной обработки эта плавка дала исключительно низкое $\sigma_{в \text{ надр}}$ (даже при растяжении без перекоса). Очевидно, включения, играющие роль внутренних надрезов, особенно опасны для стали после низкого отпуска (вследствие высокой чувствительности к надрезу структур низкого отпуска) и мало влияют на ее свойства после высокого отпуска.

б) Наиболее интересные данные получились для кондиционной стали 40 ХНМА плавки А (рис. 2). При растяжении болтов без перекоса $\sigma_{В \text{ надр}}$ после изотермической и нормальной обработки почти равны, зато при перекосе в 8° прочность бейнита выше почти в 3 раза. Наиболее существенно, что прочность бейнита плавки А при перекосе в 8° очень мало (всего на 7%) понижается по сравнению с осевым растяжением; по сравнению же с $\sigma_{В}$ гладкого образца эта прочность даже повышена на 19% ($\sigma_{В \text{ надр}} = 190 \text{ кг/мм}^2$). Следует, однако, отметить, что при растяжении с перекосом образцов с кольцевым надрезом понижение прочности может оказаться более значительным, чем при испытании болтов.

в) Пластичность в надрезе ψ после изотермической обработки во всех случаях повышается по сравнению с пластичностью после нормальной обработки (для стали 40 ХНМА плавки Б с 4,4 до 7% , т. е. на 82% ; для стали 30 ХГСА с 9 до 12% , т. е. на 66%). Это подтверждает, что по величине пластичности в надрезе можно качественно судить о чувствительности к надрезу (²). Как показали наши исследования при изгибе, а затем исследования Закса (¹⁰), Фридмана и Володиной (¹¹) при растяжении, падение прочности надрезанного образца сопровождается еще значительно большим падением пластичности.

Результаты проведенных нами исследований показали, что бейнит средне- и малолегированных сталей, который по механическим свойствам гладких образцов мало отличается от структур закалки и низкого отпуска, дает значительно повышенную прочность и пластичность надрезанных образцов в самых жестких условиях испытания, т. е. сталь со структурой бейнита как конструкционный материал значительно лучше, чем сталь со структурой обычного мартенсита.

Можно надеяться, что дальнейшее изучение чувствительности к надрезу бейнитов даст возможность получить материал с высокой конструкционной прочностью при статических нагрузках.

Лаборатория физики металлов
Всесоюзного института
авиационных материалов

Поступило
28 IV 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Я. Б. Фридман, Деформация и разрушение металлов при статических и ударных нагрузках, 1946. ² Л. М. Певзнер, Диссертация, ВИАМ, 1943; Изв. АН СССР, ОТН, № 12 (1944). ³ Л. М. Певзнер, Зав. лабор., № 6 (1946). ⁴ Н. Н. Давиденков, Динамические испытания, М., 1936; Techn. Phys. USSR, 3, No. 6 (1936); Greene and Stout, Trans. Am. Soc. f. Metals, 28, June (2), 282 (1940). ⁵ С. И. Ратнер, Зав. лабор., №№ 7, 8 (1946). ⁶ С. Т. Кишкин, Техника возд. флота, № 11 (1943). ⁷ E. S. Davenport, E. L. Roff and E. C. Bain, Am. Soc. Steel Treat., 22, No. 4, 289 (1934). ⁸ K. Matthaes, Luftfahrtforschung, 15, No. 1/2, 28 (1938). ⁹ С. Е. Беляев, Зав. лабор., № 6 (1945). ¹⁰ G. Sachs, J. Lubahn and L. E. Ebert, Trans. Am. Soc. f. Met., 34, 517 (1945); G. Sachs and J. Lubahn, J. Appl. Mech., 12, № 4, 241 (1945). ¹¹ Я. Б. Фридман и Т. А. Володина, ДАН, 55, № 8 (1947).