

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.43

Упрочнение сталей при охлаждении до 4,2 К в условиях концентрации напряжений

Е. В. Воробьев, В. А. Стрижало, Т. В. Анпилогова

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрены результаты исследования влияния концентрации напряжений на величину низкотемпературного упрочнения сталей 12X18H10T и 03X20H16AG6. Показано, что по мере охлаждения до температуры жидкого гелия увеличение их пределов прочности достигает 165 и 240%, причем вклад конструкционного фактора значительно снижается для первой стали и не изменяется для второй.

Ключевые слова: надрез, низкотемпературная прерывистая текучесть, концентрация напряжений, упрочнение, характеристики прочности и пластичности.

Введение. Проблема максимального использования прочностных ресурсов материалов, с одной стороны, существенно осложняется конструкционными факторами типа надрезов, которые вызывают высокую концентрацию напряжений [1]. С другой стороны, упрочнение конструкционных сплавов, которое достигается при глубоком охлаждении, – наиболее значительный резерв повышения экономичности криогенных конструкций [2]. Задача практического использования низкотемпературного упрочнения сталей и сплавов особенно актуальна при создании устройств со сверхпроводящими функциональными элементами, так как в этом случае можно существенно снизить потребление дорогостоящих хладагентов и увеличить эффективность магнитных систем [3].

Для установок термоядерного синтеза, ускорителей элементарных частиц и других крупногабаритных конструкций важное значение имеет непосредственное снижение их материалоемкости. Устройства со сверхпроводящими магнитными системами в большинстве случаев удовлетворяют основному условию практической применимости эффекта низкотемпературного упрочнения, так как они подвергаются воздействию максимальных нагрузок при фиксированной криогенной температуре, а не в процессе отогрева [4].

Целью данной работы является исследование влияния глубокого охлаждения на характер и составляющие упрочнения сталей криогенной техники с учетом концентрации напряжений как одного из главных факторов, определяющих прочность и ресурс деталей машин.

Материалы и методики. В криогенных средах традиционно используются нержавеющие аустенитные стали, которые сохраняют пластичность при глубоком охлаждении вплоть до температур, близких к абсолютному нулю. Для исследования были выбраны следующие стали: хромоникелевая 12X18H10T и хромоникельмарганцевая 03X20H16AG6, контрастные по признаку стабильности аустенитной структуры [5]. Наиболее детально исследовалась сталь 12X18H10T, получившая большое распространение.

Использовались цилиндрические образцы диаметром 5 мм с кольцевой выточкой глубиной 1 мм и радиусом в вершине 1,5; 0,5; 0,25 и 0,1 мм. Соответствующие величины теоретических коэффициентов концентрации напряжений $K_t = 1,54; 2,1; 2,75$ и 3,6. С помощью специального устройства [6] обеспечивалась высокая точность центрирования образцов, что особенно важно при наличии кольцевых надрезов в условиях криогенных температур.

Испытания образцов на статическое растяжение проводили на разрывной машине УМН-10 с гидравлическим приводом при максимальной нагрузке 100 МН. Жесткость испытательной машины составляет 14,5 МН/м. Машина укомплектована криостатом и другим специальным оборудованием [7]. Образцы испытывали при температурах 293, 77 и 4,2 К соответственно в комнатных условиях, в средах жидкого азота и жидкого гелия. На компьютере автоматически получали диаграмму нагрузка–удлинение. По результатам испытаний образцов с надрезом определяли предел прочности σ_B^H , относительное сужение после разрыва ψ^H , а при температуре 4,2 К – также верхний предел прерывистой текучести образцов с надрезом $\sigma_{пв}^H$. Эта характеристика является аналогом верхнего предела прерывистой текучести $\sigma_{пв}$ для гладких образцов [7] – напряжение, соответствующее началу первого спада нагрузки на участке начального упругого деформирования образца.

Результаты и их обсуждение. При испытании образцов из стали 12X18H10T при 293 К с увеличением остроты надреза предел прочности σ_B^H непрерывно возрастает, при температуре 77 К большой прирост данной характеристики (на 350 МПа) наблюдается с увеличением K_t до 2,1 (рис. 1). Относительное сужение образцов после разрыва значительно снижается, более интенсивно это происходит при температуре 293 К (рис. 1). Испытания образцов в среде жидкого гелия свидетельствуют о немонотонности зависимостей пределов прочности и пластичности от коэффициента K_t или наличия резких перегибов (рис. 2). Подобные изменения характера рассматриваемых зависимостей при температуре 4,2 К отмечались также для стали 03X20H16AG6.

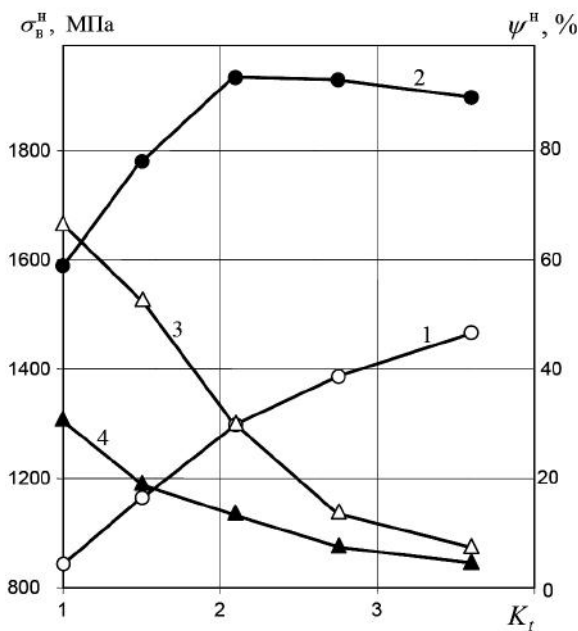


Рис. 1. Зависимости предела прочности (1, 2) и относительного сужения (3, 4) образцов с надрезом из стали 12X18H10T от коэффициента концентрации напряжений при температурах 293 (1, 3) и 77 К (2, 4).

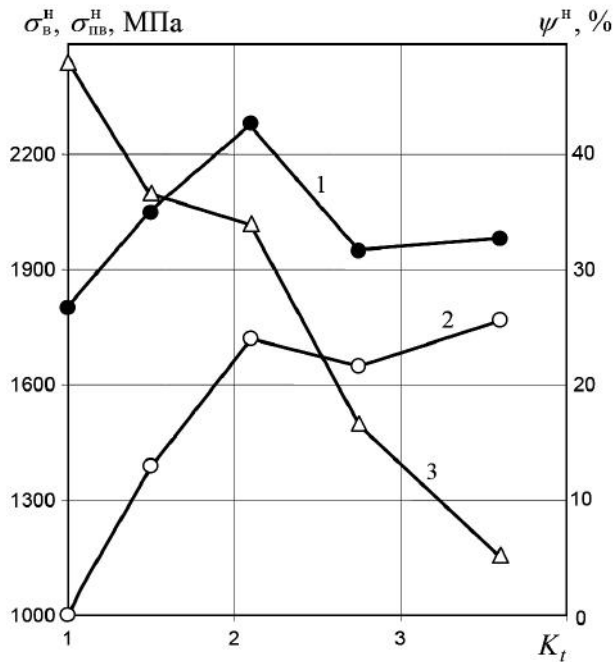


Рис. 2. Зависимости предела прочности (1), предела прерывистой текучести (2) и относительного сужения (3) образцов с надрезом из стали 12Х18Н10Т от коэффициента концентрации напряжений при температуре 4,2 К.

Наибольшая прочность ($\sigma_B^H = 2400$ МПа) этой стали достигнута при $K_t = 2,75$ [8]. Для стали 12Х18Н10Т максимум этой характеристики соответствует $K_t = 2,1$ (рис. 2). Аналогично для этих сталей изменяются и зависимости верхних пределов прерывистой текучести $\sigma_{пв}^H$.

Для того чтобы определить общую величину упрочнения (как низкотемпературного, так и “конструкционного”, т.е. связанного с действием надреза), представим ее как отношение $\sigma_B^H / \sigma_B^{293}$ (отношение предела прочности образца с надрезом при данной температуре к пределу прочности, полученному на гладком образце при температуре 293 К). С понижением температуры этот показатель существенно увеличивается (рис. 3,а). В то же время вклад чисто конструкционного упрочнения резко уменьшается, для острых надрезов почти до нуля (рис. 3,б). Величину конструкционной составляющей прочности можно также представить в виде $\sigma_B^H / \sigma_B - 1$, где первый член – так называемый коэффициент конструкционной прочности. Очевидно, что для гладких образцов конструкционное упрочнение отсутствует при всех температурах.

На рис. 4 для стали 03Х20Н16АГ6 приведены аналогичные зависимости, полученные на основе данных [8]. Как видно, максимальное общее упрочнение для этой стали (240%) намного больше, чем для стали 12Х18Н10Т (165%) – рис. 4,а и 3,а. При этом конструкционное упрочнение стали 03Х20Н16АГ6, в отличие от такового стали 12Х18Н10Т, практически не зависит от температуры – рис. 4,б и 3,б. При температурах 77 и 4,2 К приведенный предел прочности σ_B^H / σ_B стали 12Х18Н10Т с увеличением концентрации напряжений резко снижается [2]. Это связано с нестабильностью ее аустенитной структуры и образованием мартенсита охлаждения при криогенных температурах.

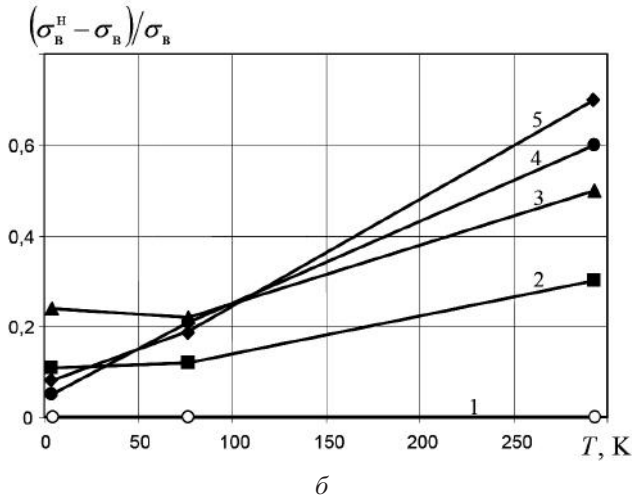
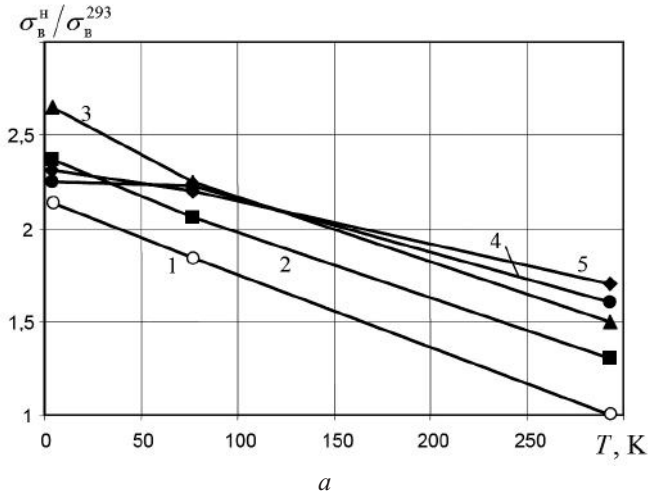
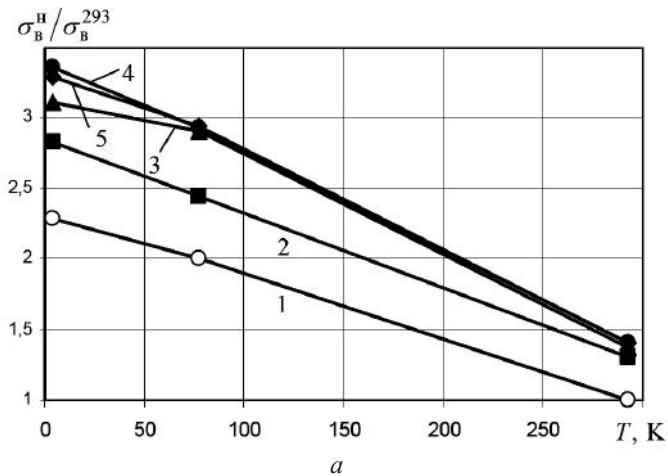


Рис. 3. Температурные зависимости приведенного предела прочности (а) и конструкционного упрочнения (б) образцов из стали 12Х18Н10Т. (Здесь и на рис. 4: 1 – $K_t = 1$; 2 – $K_t = 1,54$; 3 – $K_t = 2,1$; 4 – $K_t = 2,75$; 5 – $K_t = 3,6$.)



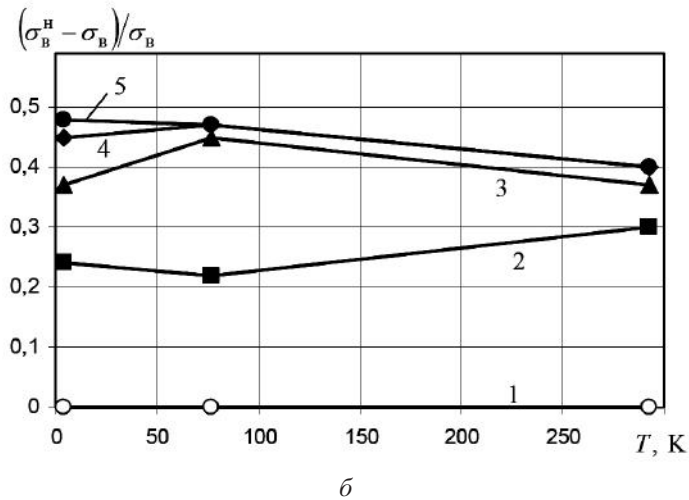


Рис. 4. Температурные зависимости приведенного предела прочности (а) и конструкционного упрочнения (б) образцов из стали 03Х20Н16АГ6.

Необходимо отметить, что вопрос о низкотемпературном упрочнении аустенитных сталей исследовался ранее [9] также после различных видов предварительной механической обработки образцов (растяжение, сжатие, кручение, поверхностный наклеп). Было показано, что предварительное растяжение, как и кручение, существенно влияет на условный предел текучести (для сталей 12Х18Н10Т и 03Х20Н16АГ6 он достигает 60 и 275% соответственно). Однако упрочнение, оцениваемое по пределу прочности, составляет лишь 15...20%. В этом отношении упрочняющее действие конструкционного фактора – надреза – значительно выше, чем технологического фактора – механической обработки.

Выводы

1. В условиях статического нагружения низкотемпературное упрочнение аустенитных сталей 12Х18Н10Т и 03Х20Н16АГ6, оцениваемое по пределу прочности, при наличии концентраторов напряжений достигает 165...240%.

2. При глубоком охлаждении конструкционная составляющая упрочнения стали 12Х18Н10Т резко снижается, а стали 03Х20Н16АГ6 практически не изменяется.

Резюме

Розглянуто результати дослідження впливу концентрації напружень на величину низкотемпературного зміцнення сталей 12Х18Н10Т та 03Х20Н16АГ6. Показано, що по мірі охолодження до температури рідкого гелію збільшення їх границь міцності сягає 165 і 240%, причому внесок конструкційного фактора значно знижується для першої сталі і не змінюється для другої.

1. Qu R., Zhang P., and Zhang Z. Notch effect of materials: strengthening or weakening // J. Mater. Sci. Technol. – 2014. – **30**, No. 6. – P. 599–608.
2. Новиков Н. В., Майстренко А. Л., Ульяновко А. П. Конструкционная прочность при низких температурах. – Киев: Наук. думка, 1979. – 232 с.
3. Vorob'ev E. V. Low-temperature strengthening of structural alloys under the action of strong magnetic fields // Strength Mater. – 1990. – **22**, No. 6. – P. 835–840.

4. *Воробьев Е. В., Стрижало В. А.* О нормировании прочности металлов в условиях низкотемпературной нестабильности пластической деформации и воздействия сильных магнитных полей // Пробл. прочности. – 1999. – № 5. – С. 42–52.
5. *Солнцев Ю. П., Ермаков Б. С., Слепцов О. И.* Материалы для низких и криогенных температур. Энциклопед. справ. – СПб.: Химиздат, 2008. – 768 с.
6. *А. с. 1693441 СССР, МКИ G 01 N 3/04.* Устройство для центрирования и крепления образцов с головками при механических испытаниях / *Е. В. Воробьев, А. А. Копанев, Л. С. Новогрудский.* – Оpubл. 23.11.91, Бюл. № 43.
7. *ДСТУ 7305:2013.* Метали. Метод випробування на розтяг металів і сплавів за низьких та криогенних температур. – Чинний від 01.01.2014.
8. *Воробьев Е. В., Стрижало В. А.* К вопросу о деформировании и разрушении стали 03X20H16AG6 в условиях неоднородного напряженного состояния при температурах до 4,2 К // Пробл. прочности. – 2003. – № 2. – С. 48–53.
9. *Воробьев Е. В.* Деформационное и низкотемпературное упрочнение аустенитных сталей при температурах до 4,2 К // Там же. – 2001. – № 6. – С. 96–102.

Поступила 03. 06. 2015