

## Эффекты надреза при низкотемпературной прерывистой текучести сталей

**Е. В. Воробьев**

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

*При температуре 4,2 К обнаружено сильное упрочнение образцов с надрезами с большим радиусом закругления из аустенитных сталей. Это явление рассматривается с точки зрения условий реализации эффекта низкотемпературной прерывистой текучести. Выявлена корреляция между характеристикой прочности и количеством скачков деформации в зоне концентрации напряжений.*

**Ключевые слова:** надрез, низкотемпературная прерывистая текучесть, скачок деформации, локализация деформации, концентрация напряжений, упрочнение.

**Введение.** При глубоком охлаждении пластическая деформация металлических материалов теряет устойчивость в результате возникновения низкотемпературной прерывистой текучести или скачкообразной деформации [1]. У таких высокопрочных металлов, как аустенитные стали, этот эффект проявляется в области температур ниже 30 К, где находятся точки кипения жидких водорода и гелия (соответственно 20 и 4,2 К). Обычно он регистрируется в виде пилообразных диаграмм растяжения, на которых спады нагрузки могут достигать более половины исходного уровня. Локализуясь при каждом акте прерывистой текучести, пластическая деформация протекает с высокой скоростью и сопровождается сильным нагревом [2].

Реализация этого явления, как и эффекта Портевена–Ле Шателье\*, существенно зависит как от условий нагружения, так и конструкционных факторов, в том числе надрезов [3, 4].

Учитывая такую важную особенность низкотемпературной скачкообразной деформации, как локальность, представляет интерес вопрос о взаимовлиянии этого своеобразного механизма концентрации деформации и конструкционных концентраторов с точки зрения низкотемпературной прочности и пластичности.

Как показывают результаты работы [4], характер зависимости предела прочности образцов с надрезом, изготовленных из аустенитных сталей, от теоретического коэффициента концентрации напряжений  $K_t$  при глубоком охлаждении существенно изменяется. При температурах 293 и 77 К с увеличением  $K_t$  до некоторой величины (примерно до двух) значения предела прочности также возрастают, а далее остаются практически на одном уровне. Однако при испытаниях в среде жидкого гелия отмечается немонотонный характер этой зависимости с наличием резких перегибов. Эти изменения обусловлены возникновением эффекта низкотемпературной прерывистой текучести, причем его проявления также изменяются по мере увеличения остроты надреза. Снижается как амплитуда скачков деформации, так и их количество вплоть до полного исчезновения. Например, у стали 03Х20Н16АГ6 уже при величине радиуса закругления  $\rho = 2$  мм наблюдаются лишь два скачка, при  $\rho = 1$  мм – один, при  $\rho = 0,1$  мм – скачки отсутствуют [4]. Это означает, что эффект прерывистой текучести полностью подавляется вследствие стесненности деформации при повышении жесткости напряженного состояния материала. С другой стороны, при наличии так называемого “мягкого” концентратора (с большим радиусом закругления)

\* Эффект не является универсальным, так как наблюдается лишь у некоторых сплавов, а скачки деформации и напряжения при этом во много раз меньше, чем в случае низкотемпературной прерывистой текучести.

можно ожидать значительного увеличения количества скачков деформации и соответствующего роста характеристик прочности за счет деформационного упрочнения.

Цель данной работы – оценка возможности увеличения упрочнения металла в результате усиления эффекта низкотемпературной прерывистой текучести путем применения “мягких” надрезов и сравнение характеристик прочности различных аустенитных сталей при охлаждении до 4,2 К.

**Материалы и методики.** При криогенных температурах традиционно используются нержавеющие стали аустенитного класса, которые сохраняют пластичность при охлаждении вплоть до температур, близких к абсолютному нулю. Поэтому для исследования были выбраны следующие стали: хромоникелевая 12X18Н10Т; хромоникельмарганцевая 03X20Н16АГ6 и хромомарганцевая 03X13АГ19. Две последние стали, упрочненные азотом, особонизкоуглеродистые. Также исследовалась среднеуглеродистая сталь 45 как материал контрастный по своим пластическим свойствам ввиду охрупчивания при низких температурах.

Наиболее детально исследовалась сталь 12X18Н10Т, получившая широкое распространение. Использовались цилиндрические образцы диаметром 5 мм с кольцевой выточкой глубиной 1 мм и радиусом в ее вершине 1,5; 0,5; 0,25 и 0,1 мм. Величины теоретических коэффициентов концентрации напряжений  $K_t$  составляют соответственно 1,54; 2,10; 2,75 и 3,60. Кроме того, для исследования указанных материалов использовались образцы с выточкой радиусом  $\rho = 6$  мм. Для таких образцов  $K_t = 1,09$ . В качестве исходных использовались гладкие цилиндрические пятикратные образцы с диаметром рабочей части 3 мм ( $\rho = \infty$ ,  $K_t = 1$ ).

Испытания образцов на статическое растяжение проводили на разрывной машине УМН-10 с гидравлическим приводом, максимальной нагрузкой 100 МН. Жесткость испытательной машины составляет 14,5 МН/м. Машина оснащена криостатом и другим специальным оборудованием для испытаний материалов в криогенных средах [5]. Образцы испытывали при температуре 293, 77 и 4,2 К в комнатных условиях, в среде жидкого азота и жидкого гелия соответственно. На компьютере автоматически получали диаграмму нагрузка–удлинение. По результатам испытаний образцов с надрезом определяли их предел прочности  $\sigma_b^H$ , сопротивление отрыву  $S^H$ , относительное сужение после разрыва  $\psi^H$ .

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1 представлены результаты испытаний образцов с надрезом из стали 12X18Н10Т при температуре жидкого гелия. Расширение диапазона радиусов закруглений кольцевых выточек до  $\rho = 6$  мм позволило выявить очень сильное упрочнение материала – величина сопротивления отрыву достигла 4060 МПа, что превышает соответствующие величины для  $K_t = 1$  и 1,54 на 600...800 МПа. При этом предел прочности увеличивается до 1990 МПа, и зависимость  $\sigma_b^H - K_t$  также получает локальный максимум.

Следует отметить, что величина  $S^H$  у аустенитных сталей уже при комнатной температуре значительно больше (~2000 МПа), чем у стали 45, при охлаждении до 4,2 К сопротивление отрыву сталей 12X18Н10Т и 03X20Н16АГ6 увеличивается соответственно на 1800 и 1600 МПа, а стали 03X13АГ19 снижается на 250 МПа (рис. 2). В условиях комнатной температуры все исследованные материалы имеют близкие значения характеристик прочности  $\sigma_b^H$  (рис. 3,а).

С понижением температуры в интервале 293...4,2 К характеристика пластичности  $\psi^H$  стали 45 уменьшается до нуля, стали 03X13АГ19 – в 1,6 раза (до 21%). Для сталей 03X20Н16АГ6 и 12X18Н10Т  $\psi^H$  уменьшается незначительно: до 46 и 51% соответственно (рис. 3,б). Большое снижение пластичности стали 03X13АГ19, как и сопротивления отрыву (рис. 3,а), показывает, что возможность ее применения при криогенных температурах ограничена.

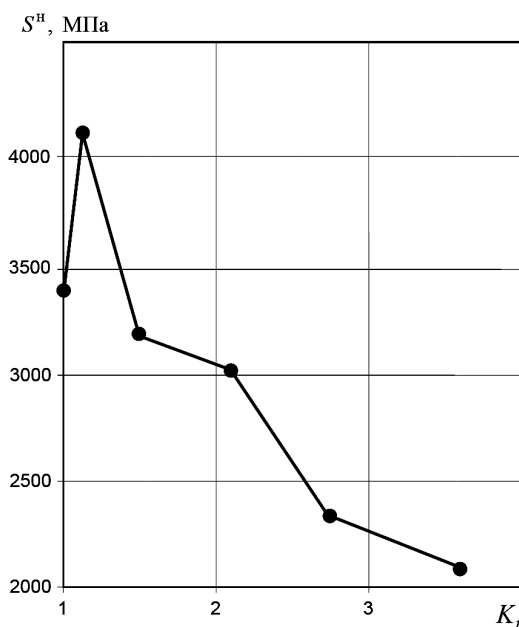


Рис. 1. Зависимость сопротивления отрыву образцов с надрезом из стали 12Х18Н10Т от коэффициента концентрации напряжений при температуре 4,2 К.

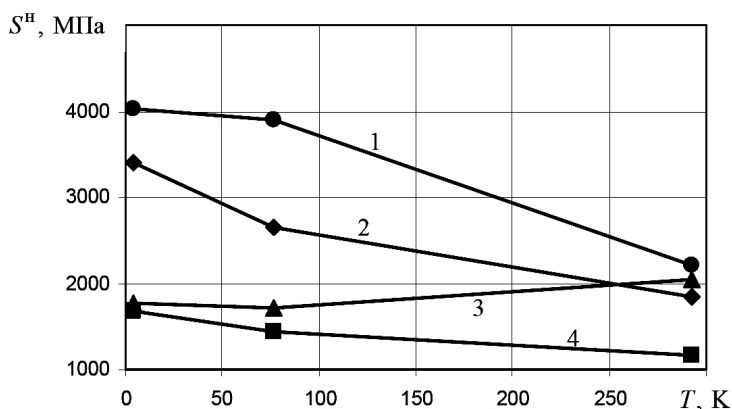


Рис. 2. Температурные зависимости величины сопротивления отрыву образцов с надрезом ( $\rho = 6$  мм) из сталей 12Х18Н10Т (1), 03Х20Н16АГ6 (2), 03Х13АГ19 (3) и 45 (4).

Вероятно, столь существенное увеличение прочности образцов с “мягким” надрезом из сталей 12Х18Н10Т и 03Х20Н16АГ6 при охлаждении до температуры жидкого гелия происходит за счет сильного деформационного упрочнения в зоне концентратора при неизотермическом прерывистом пластическом течении. Такое упрочнение обусловлено возможностью реализации довольно большого количества скачков деформации в зоне умеренного концентратора. Корреляцию между этим параметром и прочностными свойствами сталей 12Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6 и 03Х13АГ19 иллюстрирует рис. 4. Исключение составляет сталь 45, так как при температуре 4,2 К она переходит в хрупкое состояние и разрушается без единого скачка деформации. Амплитуда скачков довольно большая: 12, 21 и 8% исходного уровня для сталей 12Х18Н10Т, 03Х20Н16АГ6 и 03Х13АГ19 соответственно. Это примерно в 1,5 раза меньше, чем для гладких цилиндрических образцов, хотя количество

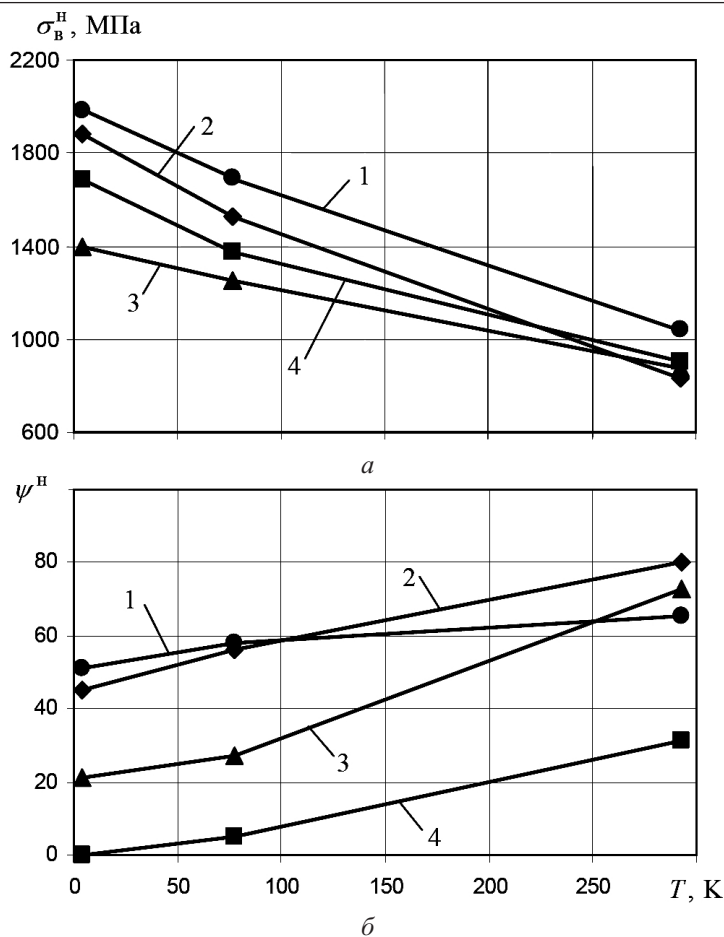


Рис. 3. Температурные зависимости величины предела прочности (а) и относительного сужения после разрыва (б) образцов с надрезом ( $\rho = 6$  мм) из сталей 12Х18Н10Т (1), 03Х20Н16АГ6 (2), 03Х13АГ19 (3) и 45 (4).

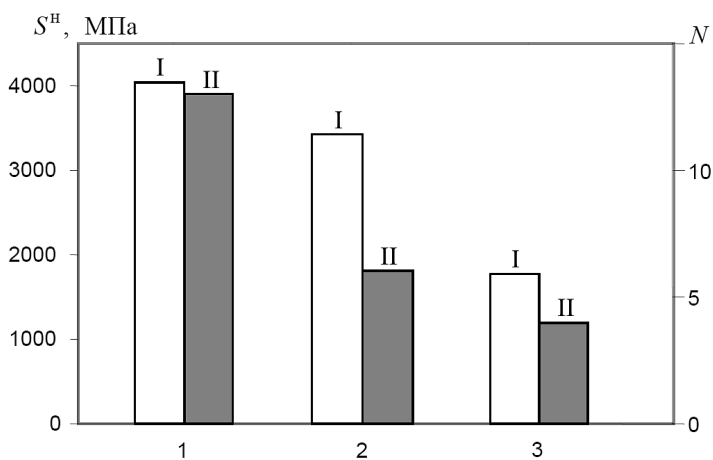


Рис. 4. Взаимосвязь между величиной сопротивления отрыву (I) и количеством скачков деформации (II) образцов с надрезом ( $\rho = 6$  мм) из сталей 12Х18Н10Т (1), 03Х20Н16АГ6 (2) и 03Х13АГ19 (3).

скачков  $N$  с появлением надреза снижается значительно сильнее (в 3–5 раз). Усредненное значение удлинения образца за один скачок для стали 03Х13АГ19 составляет 0,05 мм, что вдвое меньше, чем для двух других аустенитных сталей.

Таким образом, протяженные надрезы с малой величиной  $K_t$  могут служить своеобразными концентраторами эффекта низкотемпературной прерывистой текучести, и локальность, как одно из главных свойств данного эффекта, можно искусственно увеличить. Однако увеличение остроты надреза и соответствующее уменьшение деформируемого объема приводят к резкому снижению количества скачков деформации и характеристик прочности.

## Резюме

За температури 4,2 К виявлено сильне зміцнення зразків із надрізами з великим радіусом закруглення з аустенітних сталей. Це явище розглядається з точки зору реалізації ефекту низькотемпературної переривчастої текучості. Виявлено кореляцію між характеристикою міцності та числом стрибків деформації в зоні концентрації напружень.

1. *Пустовалов В. В.* Скачкообразная деформация металлов и сплавов при низких температурах (обзор) // Физика низких температур. – 2008. – **34**, № 9. – С. 871–913.
2. *Vorob'ev E. V. and Anpilogova T. V.* Kinetics of low-temperature discontinuous deformation of metals // Cryogenics. – 2015. – **68**. – P. 59–66.
3. *Maj P., Zdunek J., Mizera J., and Kurzydowski K. J.* The effect of a notch on the Portevin–Le Chatelier phenomena in an Al–3Mg model alloy // Mater. Character. – 2014. – **96**. – P. 46–53.
4. *Воробьев Е. В., Стрижало В. А.* К вопросу о деформировании и разрушении стали 03Х20Н16АГ6 в условиях неоднородного напряженного состояния при температурах до 4,2 К // Пробл. прочности. – 2003. – № 2. – С. 48–53.
5. *ДСТУ 7305:2013.* Метали. Метод випробування на розтяг металів і сплавів за низьких та криогенних температур. – Чинний з 01. 01. 2014.

Поступила 09. 09. 2015