

## **К вопросу о деформировании и разрушении стали 03X20H16AG6 в условиях неоднородного напряженного состояния при температурах до 4,2 К**

**Е. В. Воробьев, В. А. Стрижало**

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

*Приведены результаты исследования влияния концентрации напряжений на механические свойства стали 03X20H16AG6 в диапазоне температур 293...4,2 К. Показано, что в условиях глубокого охлаждения по мере уменьшения теоретического коэффициента концентрации напряжений реализуется эффект низкотемпературной прерывистой текучести, вызывающий аномальное изменение характеристик прочности и пластичности материала.*

**Ключевые слова:** концентрация напряжений, прерывистая текучесть, скачок деформации, характеристики прочности и пластичности.

Известно, что концентрация напряжений – один из основных конструктивных факторов, определяющих прочность и ресурс криогенной техники, и ее исследованию уделяется большое внимание. При снижении температуры ниже 30 К процесс деформирования металлических материалов теряет устойчивость в результате реализации эффекта низкотемпературной прерывистой текучести [1–4], что можно рассматривать как скачкообразное исчерпание прочности материала. На особую опасность данного явления в условиях концентрации напряжений было обращено внимание в работе [5]. Но этот аспект низкотемпературной прочности до настоящего времени остается практически не исследованным.

Цель работы – оценка влияния концентраторов на прочностные свойства, особенности деформирования и разрушения материала в связи с проявлением эффекта прерывистой текучести при широком варьировании остроты надрезов, вплоть до усталостной трещины.

Объектом исследования служила сталь 03X20H16AG6, образцы которой испытывали на растяжение на установке УМН-10 [1] при температурах 293, 77 и 4,2 К соответственно на воздухе и в среде жидкого азота и гелия. Благодаря использованию специального устройства [6] обеспечивалась высокая точность центрирования образцов, что особенно важно при наличии кольцевых концентраторов напряжений в условиях криогенных температур. Образцы диаметром 5 мм имели кольцевую выточку глубиной 1 мм и радиусом  $\rho$  в вершине 2; 1,5; 0,5; 0,25 и 0,1 мм. Теоретические коэффициенты концентрации напряжений  $K_\sigma$ , рассчитанные по методике Нейбера [7], равны соответственно 1,45; 1,54; 2,10; 2,75 и 3,60. Жесткость системы образец–машина составляла 12 МН/м. По результатам испытаний образцов с надрезом определяли их временное сопротивление  $\sigma_B^H$ , сопротивление отрыву  $S^H$ , относительное сужение  $\psi^H$ . При температуре 4,2 К определяли также напряжение предела (начала) прерывистой текучести  $\sigma_0^H$ , поскольку в данном случае переход материала в пластическое состояние происходит скачкообразно на участке упругого деформирования.

Испытания показали, что при температурах 293 и 77 К с ростом  $K_\sigma$  до 2,1 характеристики  $\sigma_B^H$  также увеличиваются, оставаясь далее практически постоянными; величина  $\psi^H$  монотонно уменьшается (рис. 1) и соответственно уменьшается (не показана на рис. 1) характеристика  $S^H$  – при 293 К от 2030 до 1650 МПа, при 77 К от 2920 до 2200 МПа. В то же время при 4,2 К зависимости характеристик прочности и пластичности от  $K_\sigma$  становятся немонотонными и (или) отличаются резкими перегибами (рис. 2), что происходит при изменении величины  $K_\sigma$  от 1,54 до 1,45 и от 2,75 до 3,60 (соответственно  $\rho$  от 2 к 1,5 мм и от 0,25 до 0,1 мм). Это связано с проявлением эффекта прерывистой текучести при данной температуре и ее особенностями, а именно: при указанных изменениях  $K_\sigma$  отмечается изменение числа скачков деформации  $N$  – с двух до одного и с одного до нуля соответственно (рис. 3).

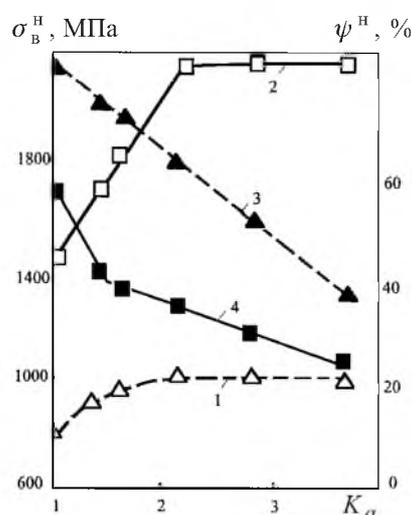


Рис. 1. Зависимости предела прочности (1, 2) и относительного сужения (3, 4) образцов с надрезом от коэффициента концентрации напряжений при температурах 293 (штриховые линии) и 77 К (сплошные линии).

По-видимому, эти особенности реализации указанного эффекта определяются не только величиной коэффициента концентрации напряжений, но и радиуса закругления вершины надреза. При этом с увеличением жесткости напряженного состояния амплитуда скачков уменьшается, а при  $\rho = 0,1$  мм прерывистая текучесть уже не проявляется. Максимальная нагрузка определяется сопротивлением отрыву, т.е. напряжению  $\sigma_0^H$  не достигается. Очевидно, что повышение прочности при увеличении числа скачков происходит за счет значительного деформационного упрочнения в зоне концентратора при неизотермическом скачкообразном пластическом течении. Именно резкое повышение температуры при скачке [2] оказывает пластифицирующее действие в условиях стесненности деформации, что проявляется в значительном приросте относительного сужения (рис. 2). Такое упрочнение происходит при возникновении скачка деформации, когда  $\sigma_0^H < S^H$ , т.е. при

этом образец не разрушается. Разрушение на первом же скачке, непосредственно после участка упругого деформирования, происходит при наличии сверхкритического запаса упругой энергии в неподгружаемой системе, разрушение после завершения скачка – при сверхкритической скорости деформирования или нагружения в подгружаемой системе [3, 4]. Результатом преждевременного разрушения образца является снижение  $\sigma_B^H$  до  $\sigma_0^{H*}$ . С другой стороны, поскольку величина потенциальной упругой энергии  $W$  при данной нагрузке  $P$  определяется жесткостью  $C$  системы образец-машина,  $W = P^2/2C$ , то, увеличивая  $C$ , можно добиться обратного эффекта – роста числа скачков деформации [4], что приведет к увеличению  $\sigma_B^H$  и  $S^H$ . Очевидно, что для получения сопоставимых результатов испытаний образцов, полученных на разном оборудовании, необходима регламентация стандартных механических испытаний при данной температуре по параметру жесткости системы.

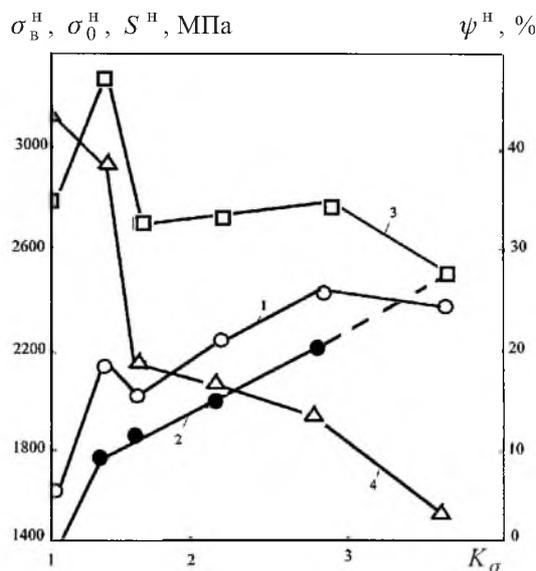


Рис. 2. Зависимости предела прочности (1), предела прерывистой текучести (2), сопротивления отрыву (3) и относительного сужения (4) образцов с надрезом от коэффициента концентрации напряжений при температуре 4,2 К.

Испытывали также образцы с максимально острым концентратором – трещиной. Кольцевая усталостная трещина глубиной  $\sim 0,7$  мм наносилась на образцах диаметром 6 мм на установке УНТ-1 [8], позволяющей с высокой точностью задавать глубину трещин и обеспечивать их концентричность. При температуре 4,2 К образцы разрушаются на линейном участке диаграммы растяжения. Величина номинального разрушающего напряжения  $\sigma_{co}$ , соответствующая в этом случае как  $\sigma_B^H$ , так и  $S^H$ , составляет 2510 МПа,

\* Снижение уровня  $\sigma_0^H$  возможно путем инициирования прерывистой текучести электромагнитным, тепловым, силовым импульсами [5].

т.е. при дальнейшем увеличении концентрации напряжений эти характеристики существенно не изменяются. Полученный согласно [9] критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_c$  для образца данного диаметра составляет  $92,3 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ .

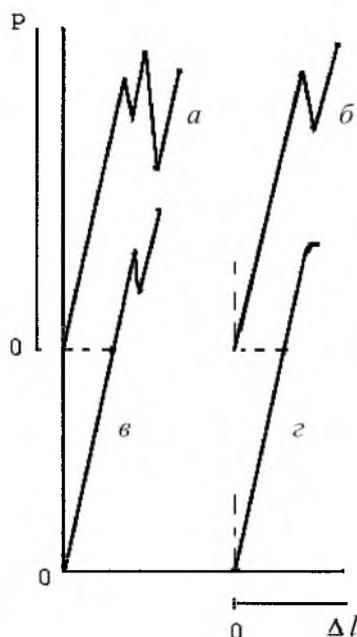


Рис. 3. Вид диаграмм деформирования образцов с надрезом из стали 03X20H16AG6 при  $T = 4,2 \text{ К}$  и различном радиусе у вершины надреза:  $a - \rho = 2,0 \text{ мм}$ ;  $б - \rho = 0,5 \text{ мм}$ ;  $в - \rho = 0,25 \text{ мм}$ ;  $г - \rho = 0,1 \text{ мм}$ .

Для краевой трещины при внецентренном растяжении компактного образца в отличие от осесимметричной характерно предшествующее разрушению скачкообразное формирование пластической зоны по механизму прерывистой текучести [10]. Это может указывать на необходимость использования для определения характеристик трещиностойкости в условиях глубокого охлаждения лишь одного типа образцов.

Отметим, что образцы с острым надрезом и с трещиной эквивалентны, так как при малых радиусах закругления материалы нечувствительны к остроте надреза вплоть до максимально достижимой, т.е. получаемой в усталостной трещине [11]. Поэтому высокоэнергетические импульсные воздействия могут инициировать разрушение (и соответствующее снижение механических характеристик, достигающее 20%) не только образцов с надрезом [5], но и с кольцевой трещиной.

Исследовалось влияние совокупности надрезов, каковой является резьба, на прочность и деформативность стали. При этом использовали образцы с нарезанной по всей длине рабочей части (15 мм) резьбой М3 и М3 × 0,35 – нормальной и мелкой. Если прочностные характеристики этих образцов, определенные исходя из среднего диаметра резьбы, незначительно отличаются от таковых для гладких образцов, то характеристика, соответствующая

$\sigma_B^H$ , для обеих резьб на 18% превышает  $\sigma_B$ , а относительное удлинение  $\delta'$  остается существенно меньшим. Характер температурной зависимости отношения  $\delta'/\delta$  немонотонный, что отражает переход от гомогенного механизма деформирования к скачкообразному: при охлаждении от комнатной температуры  $\delta'/\delta$  увеличивается до 0,88 при 77 К для обоих видов резьб и уменьшается до 0,44 (М3) и 0,66 (М3 × 0,35) при 4,2 К. Также значительно отличаются и отношения чисел скачков деформации  $N'/N$  для образцов с резьбой и гладких образцов при температуре жидкого гелия. Для образцов с резьбами М3 и М3 × 0,35  $N'/N$  составляет 0,60 и 0,83 соответственно.

Таким образом, реализация эффекта низкотемпературной прерывистой текучести при глубоком охлаждении существенно изменяет степень влияния концентрации напряжений на механические характеристики, характер деформирования и разрушения исследуемой стали.

С увеличением до определенных пределов радиуса закругления выточки (с уменьшением жесткости и неоднородности напряженного состояния) возрастают число скачков и соответственно концентрация деформации и, как следствие, характеристики прочности. Аналогичный результат прогнозируется при повышении жесткости системы образец–машина.

Линейно-упругое поведение конструкционного элемента вплоть до появления скачка деформации предопределяет возможность преждевременного разрушения. Наиболее неблагоприятным сочетанием конструктивных и эксплуатационных факторов является наличие концентраторов напряжения при повышенных запасах упругой энергии и скоростях нагружения или высокоэнергетических импульсных воздействиях. Сам же резкий переход от упругого деформирования к локализованному пластическому течению происходит при достижении предельного состояния по развитию чрезмерных деформаций или исчерпанию несущей способности.

## Резюме

Наведено результати дослідження впливу концентрації напружень на механічні властивості сталі 03Х20Н16АГ6 у діапазоні температур 293...4,2 К. Показано, що в умовах глибокого охолодження по мірі зменшення теоретичного коефіцієнта концентрації напружень реалізується ефект низкотемпературної переривчастої текучості, що викликає аномальну зміну характеристик міцності та пластичності матеріалу.

1. Стрижало В. А., Новогрудский Л. С., Воробьев Е. В. Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 180 с.
2. Стрижало В. А., Воробьев Е. В. Низкотемпературная прерывистая текучесть конструкционных сплавов // Пробл. прочности. – 1993. – № 8. – С. 37 – 46.
3. Стрижало В. А., Воробьев Е. В., Новогрудский Л. С. Влияние предварительного деформирования на прерывистую текучесть материалов при температуре 4,2 К // Там же. – 1995. – № 8. – С. 12 – 20.

4. Воробьев Е. В. О влиянии жесткости системы нагружения на сопротивление деформированию и разрушению образцов сплавов при глубоком охлаждении // Там же. – 2001. – № 1. – С. 98 – 104.
5. Воробьев Е. В. Чувствительность аустенитных сталей к концентрации напряжений в условиях глубокого охлаждения и высокоэнергетических импульсных воздействий // Там же. – 1992. – № 4. – С. 97 – 99.
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. – Опубл. 23. 11. 91, Бюл. № 43.
7. Нейбер Г. Концентрация напряжений. – М.; Л.: Гостехиздат, 1947. – 204 с.
8. Копанев А. А., Воробьев Е. В., Новогрудский Л. С. Универсальная установка для нанесения усталостных трещин // Пробл. прочности. – 1990. – № 9. – С. 110 – 112.
9. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – Введ. 01. 01. 86.
10. Стрижало В. А., Значковский О. Я., Новогрудский Л. С. Особенности распространения трещин в конструкционных сплавах при температурах до 4,2 К // Пробл. прочности. – 1997. – № 6. – С. 36 – 40.
11. Knott J. F. Fundamentals of Fracture Mechanics. – London: Butterworths, 1973. – 256 p.

Поступила 10. 07. 2002