

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.43

Нестабильность деформации и прочность конструкционных сплавов в условиях концентрации напряжений и криогенных температур

Е. В. Воробьев, Т. В. Анпилогова

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

Приведены результаты исследования влияния концентрации напряжений на характеристики механических свойств титанового сплава 3М и алюминиевого сплава АМг5 в диапазоне температур 293...4,2 К. Показано, что в условиях глубокого охлаждения его характер существенно изменяется вследствие проявления эффекта низкотемпературной скачкообразной деформации.

Ключевые слова: концентрация напряжений, низкотемпературная прерывистая текучесть, скачок деформации, механические характеристики.

Необходимость учета особенностей деформирования и разрушения конструкционных сплавов в связи с реализацией эффекта прерывистой текучести или нестабильной (скачкообразной) деформации – одна из важных проблем низкотемпературной прочности [1]. Для сталей и сплавов криогенного назначения этот эффект проявляется в области температур ниже 30 К, где находятся точки кипения жидких водорода и гелия (соответственно 20 и 4,2 К). Локализуясь при каждом акте прерывистой текучести, пластическая деформация протекает с высокими скоростями и сопровождается интенсивным нагревом [2, 3].

Стартовые механизмы низкотемпературной прерывистой текучести металлических материалов обусловлены внутрикристаллическими взаимодействиями скоплений дислокаций с барьерами, возникновением тепловых вспышек при близких к нулю значениях теплоемкости [4]. Однако дальнейшее развитие скачкообразной деформации проявляется уже как свойство системы образец–машина (деталь–конструкция) в зависимости от ряда ее характеристик, которые условно можно разделить на две группы, определяемые системой нагружения и относящиеся непосредственно к детали. В первой группе в отношении рассматриваемого эффекта главную роль играют скорость деформирования или нагружения и жесткость системы [3, 5, 6], во второй – такие конструктивно-технологические факторы, как структура материала, состояние поверхности, размеры, форма, в том числе наличие концентраторов напряжений [7–9].

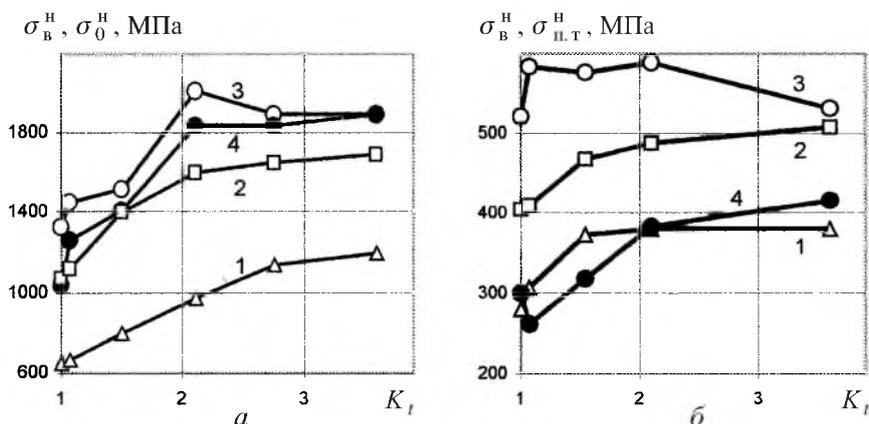
Учитывая, что одним из важных свойств низкотемпературной скачкообразной деформации является ее локальность, вопрос о взаимовлиянии этого своеобразного механизма концентрации деформации и концентраторов конструкционных с точки зрения прочности и разрушения сплавов крио-

генной техники с различной основой представляет теоретический и практический интерес. В настоящее время этот вопрос остается не исследованным, что и определяет цель данной работы.

Объектом исследования служили титановый сплав 3М и алюминиевый сплав АМг5. Образцы этих сплавов испытывали на статическое растяжение при температурах 293, 77 и 4,2 К. На рабочей части диаметром 5 мм они имели кольцевую выточку глубиной 1 мм с радиусом в ее вершине 10; 1,5; 0,5; 0,25 и 0,1 мм. Благодаря использованию специального устройства [10] обеспечивалась высокая точность центрирования образцов, что особенно важно при наличии кольцевых концентраторов напряжений в условиях криогенных температур. Соответствующие величины теоретических коэффициентов концентрации напряжений K_t составляли 1,08; 1,54; 2,10; 2,75 и 3,60. По результатам испытаний образцов с надрезом определяли предел прочности $\sigma_{\text{в}}^{\text{H}}$, а для алюминиевого сплава АМг5 при температуре 4,2 К – так называемый предел прерывистой текучести I рода $\sigma_{\text{п.т}}^{\text{H}}$ как напряжение, соответствующее потере устойчивости процесса пластической деформации после более или менее продолжительной стадии ее плавного накопления. Для высокопрочного материала (титанового сплава) при наличии концентратора наблюдается скачкообразный переход от стадии упругого деформирования к пластическому течению. В этом случае определяли соответствующее номинальное напряжение – предел прерывистой текучести II рода σ_0^{H} .

При температурах 293 и 77 К с увеличением K_t до определенной величины (1,54...2,75) значения $\sigma_{\text{в}}^{\text{H}}$ для исследуемых материалов, как и для ряда аустенитных сталей [7, 9], возрастают, оставаясь далее практически на одном уровне, при $T = 4,2$ К соответствующие зависимости становятся немонотонными и отличаются резкими перегибами (рисунок). Подобный вид имеют также зависимости пределов прерывистой текучести. В каждом случае характерно наличие двух участков: прироста и спада прочности. Это связано с различным проявлением эффекта прерывистой текучести по мере увеличения остроты надреза – амплитуда скачков деформации и их количество резко снижаются, причем для высокопрочного материала – титанового сплава (как и для стали 03Х20Н16АГ6 [9]) при $K_t = 3,6$ величины $\sigma_{\text{в}}^{\text{H}}$ и σ_0^{H} становятся равными (для алюминиевого сплава с увеличением K_t значения $\sigma_{\text{п.т}}^{\text{H}}$ и $\sigma_{\text{в}}^{\text{H}}$ сближаются), а разрушение происходит непосредственно по завершении стадии упругого деформирования.

Таким образом, низкотемпературная прерывистая текучесть реализуется не только в условиях однородного линейного и плоского [11], но и существенно неоднородного объемного напряженного состояния материала, обусловленного наличием концентраторов напряжений. Об универсальности данного эффекта свидетельствует то, что он проявляется для сплавов с разными основой, кристаллическим строением и уровнем прочности. Однако прерывистая текучесть в зоне концентратора имеет и существенные отличия от “обычной”, фиксируемой при испытании цилиндрических образцов. Это – резкое снижение количества и амплитуды скачков деформации, вплоть до их полного исчезновения, по мере увеличения остроты надреза.



Зависимости пределов прочности (1–3) и пределов прерывистой текучести (4) образцов с надрезом из титанового сплава 3М (а) и алюминийевого сплава АМг5 (б) от коэффициента концентрации напряжений при различных температурах: 1 – $T = 293$ К; 2 – $T = 77$ К; 3, 4 – $T = 4,2$ К.

Кроме того, прерывистая текучесть приводит к существенному изменению влияния концентрации напряжений на механические свойства, характер деформирования и разрушения материалов. С увеличением до определенных пределов радиуса закругления выточки (уменьшение жесткости и неоднородности напряженного состояния) возрастают количество скачков и концентрация деформации, а следовательно, деформационное упрочнение и характеристики прочности.

Линейно-упругое поведение конструкционного элемента вплоть до появления скачка деформации при наличии концентратора предопределяет возможность его внезапного разрушения. Вероятность последнего возрастает при увеличении запаса упругой энергии и скорости нагружения или при высокоэнергетических импульсных воздействиях [3, 5, 6, 8].

Резюме

Наведено результати дослідження щодо впливу концентрації напружень на характеристики механічних властивостей титанового сплаву 3М і алюмінієвого сплаву АМг5 у діапазоні температур 293...4,2 К. Показано, що в умовах глибокого охолодження його характер істотно змінився в результаті прояву ефекту низькотемпературної стрибкоподібної деформації.

1. Троценко В. Т., Стрижало В. А., Новогрудский Л. С. и др. Прочность материалов и конструкций. – Киев: Академперіодика, 2005. – 1085 с.
2. Стрижало В. О., Воробийов С. В. Енергетичні перетворення під час низькотемпературного переривчастого течіння металів // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 5. – С. 71 – 74.
3. Воробьев Е. В., Стрижало В. А. Развитие низкотемпературной скачкообразной деформации металлов и возможности ее устранения // Пробл. прочности. – 1999. – № 1. – С. 41 – 52.

4. *Клявин О. В.* Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах. – М.: Наука, 1987. – 255 с.
5. *Воробьев Е. В.* Влияние скорости деформирования на прочность и деформативность сплавов при температуре 4,2 К // Пробл. прочности. – 2000. – № 6. – С. 84 – 92.
6. *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.
7. *Степанов Г. А., Басов И. В.* Низкотемпературная прочность и пластичность аустенитных сталей при наличии концентратора напряжений // Там же. – 1989. – № 1. – С. 108 – 110.
8. *Воробьев Е. В.* Чувствительность аустенитных сталей к концентрации напряжений в условиях глубокого охлаждения и высокоэнергетических импульсных воздействий // Там же. – 1991. – № 4. – С. 89 – 91.
9. *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 // Там же. – 2003. – № 2. – С. 48 – 53.
10. *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.
11. *Воробйов Є. В.* Нестабільність деформування та зміцнення матеріалів в умовах глибокого охолодження: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2004. – 36 с.

Поступила 25. 04. 2006