

УДК 539.4.019.1

## О РОЛИ ПОДАТЛИВОСТИ НАГРУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ

ЖУРАВЛЕВ В. П.

В экспериментах на многих конструкционных материалах обнаружено, что максимальные регистрируемые в опыте напряжения и деформации зависят от податливости испытательной машины (см. обзор [1]). Вследствие большого практического значения такой зависимости ее изучение было темой многочисленных исследований, в результате которых сложилось мнение [1], что причиной влияния податливости нагружающего устройства на прочность образца является запас упругой энергии, имеющийся в системе образец — машина. С запасом упругой энергии в работах данного направления связывается и природа масштабного эффекта. Анализ этого вопроса заставляет, однако, принять иную точку зрения.

Пусть к испытываемому образцу приложена некоторая квазистатически изменяющаяся нагрузка. Мысленно устраним связь между образцом и машиной и заменим ее действие системой сил. После того как задан закон изменения этих сил во времени, безразлично, с помощью каких устройств осуществляется нагружение. Влияние податливости нагружающего устройства может проявляться лишь в скорости нагружения: при одной и той же скорости взаимного перемещения захватов испытательной машины скорость нагружения будет тем меньше, чем больше податливость нагружающего устройства. Когда механические свойства материала обладают заметной реономностью, указанное различие закона изменения напряжений влияет на результаты испытаний. К сожалению, во многих экспериментальных работах на это не обращалось внимания, т. е. временная зависимость прочности, установленная [2] для материалов различного строения и физико-механических свойств, не учитывалась. Проиллюстрируем сказанное на некоторых примерах.

В [3] изучалось влияние энергии, накопленной в нагружающей среде, на прочность цилиндрических сосудов, изготовленных из стали 20. Минимальный запас энергии создавался при испытании давлением масла сосудов, внутрь которых с малым зазором были вставлены сплошные стальные цилиндры. В этом случае запас энергии составлял примерно  $10^3$  Нм и практически был равен энергии деформации сосуда. Если масло заполняло весь цилиндр, то запас энергии составлял примерно  $3 \cdot 10^3$  Нм. Дальнейшее увеличение энергии достигалось следующим образом. Предварительное давление в сосуде создавалось компрессором высокого давления ( $P_{\max} = 20$  МПа), после чего сосуд доводился до разрушения нагнетанием масла из насоса ( $P_{\max} = 30$  МПа).

В случае заполнения всего сосуда воздухом запас энергии составлял примерно  $10^6$  Нм. Увеличение упругой энергии на три порядка сопровождалось снижением прочности примерно на 10%. Это обстоятельство трактовалось [3] как существенное экспериментальное подтверждение правильности энергетической интерпретации проблемы хрупких разрушений крупных сварных резервуаров давления. Однако, как следует из описания методики проведения опытов, тысячекратное увеличение запаса упругой энергии влекло за собой существенное увеличение времени нагружения. Вместе с тем для адекватного отражения экспериментальной зависимости прочности от величины аккумулированной энергии необходимо во всех испытаниях скорость нагружения сохранять неизменной. Влияние скорости нагружения на процесс разрушения описано в [4].

В [5] приведены результаты испытаний на двухосное растяжение при различных запасах упругой энергии образцов алюминиевого сплава В92Ц с крестообразным надрезом. В качестве среды, передающей давление под образец, были приняты жидкость АМГ-10 и газообразный азот. В первом случае запас упругой энергии составлял  $10$  Нм, во втором —  $1,5 \cdot 10^3$  Нм. Прочность во втором случае понизилась на 15% по сравнению с первым. Тем не менее выводы авторов [5] о влиянии величины упругой энергии на прочность при двухосном растяжении представляются ошибочными. Дело в том, что длительность этих опытов отличалась примерно в 50 раз и средняя скорость нагружения жидкостью и газом составляла соответственно  $1,5 \cdot 10^7$  и  $3 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>·с.

В [6] изложены методика и результаты испытаний шпилек на растяжение с кручением при различной податливости нагружающего устройства. Обнаружено, что отношение максимальных осевых усилий при податливости  $3,3 \cdot 10^{-7}$  и  $3 \cdot 10^{-9}$  м/Н составляет 0,68 (податливость  $3 \cdot 10^{-9}$  м/Н есть сумма податливостей шпильки и нагружающего устройства). Материал шпилек — сталь 30ХГСА. Термообработка: закалка с  $890^\circ\text{C}$ , отпуск при  $510^\circ\text{C}$ . Временное сопротивление  $\sigma_B = 1,1$  ГН/м<sup>2</sup>.

Указывается, что в испытаниях [6] воспроизведены реальные условия нагружения резьбовых деталей при затягивании. Это означает, что скорость нагружения при податливости  $3,3 \cdot 10^{-7}$  м/Н была в десятки раз меньше, чем при податливости  $3 \cdot 10^{-9}$  м/Н.

Временная зависимость прочности при разрушении высокопрочных среднелегированных сталей, в том числе и стали 30ХГСА, установлена во многих исследованиях [7]. Так, например, статистическая обработка данных по разрушению высокопрочных болтов в условиях эксплуатации показала [8], что из зарегистрированных 370 случаев разрушения болтов 53% падает на замедленное разрушение, 44% — на разрушение при монтаже по различным причинам и 3% — на разрушение от перегрузок при эксплуатации; 80% разрушенных болтов были изготовлены из стали 30ХГСА с  $\sigma_B = 1,0-1,4$  ГН/м<sup>2</sup>.

Исследование замедленного разрушения закаленной стали 30ХГСА показало [9], что длительная прочность шпилек при внецентренном растяжении в 1,67 раза меньше кратковременной (длительность испытания не превышала трех суток).

В связи со сказанным имеет смысл рассмотреть некоторые исследования масштабного эффекта существует энергетическая теория [10], ставящая прочность в зависимость от величины упругой энергии, аккумулированной в системе образец — машина. Первые экспериментальные подтверждения этих теорий принято [11] считать опыты [12—14]. В [12] изучался масштабный эффект при хрупком разрушении фосфористого железа. Неизменность скорости взаимного перемещения захватов в испытаниях образцов различных размеров обосновывалась ссылкой на [15]. В действительности в [15] речь идет о другом, а именно, там установлено слабое влияние скорости деформирования на порог хладноломкости, т. е. на переход из вязкого состояния в хрупкое углеродистой стали ( $C = 0,20\%$ ). В обсуждаемой же работе разрушению подвергались образцы, находящиеся в хрупком состоянии. Это было установлено специальными опытами, которые показали [12], что фосфористое железо становится хрупким в интервале температур  $0 - (-50^\circ\text{C})$ . Испытания геометрически подобных образцов во всех случаях проводились в среде жидкого воздуха ( $-194^\circ\text{C}$ ).

Опыты [13, 14] проводились также с заданной постоянной скоростью перемещения и, следовательно, большим образцам соответствовала меньшая скорость нагружения. Именно это обстоятельство, а не увеличение упругой энергии и явилось причиной понижения хрупкой прочности образцов кремнистой стали.

Рассмотрим испытания геометрически подобных образцов, находящихся в хрупком состоянии. Пусть  $C_1$  и  $C_2 = kC_1$  — жесткости малого и большого образцов ( $k$  — коэффициент подобия);  $C_{11}$ ,  $C_{22}$  и  $V_1$ ,  $V_2$  — жесткости нагружающих устройств и скорости взаимного перемещения захватов в испытаниях малого и большого образцов соответственно. Тогда условие равенства скоростей деформаций в этих испытаниях имеет вид

$$V_2/V_1 = kC_{11}(C_{22} + kC_1) / [C_{22}(C_{11} + C_1)] \quad (1)$$

Значительный масштабный эффект обнаружен в испытаниях сверхпрочной стали Н-11 [16], где отмечается, что скорость деформации при всех испытаниях поддерживалась, насколько возможно, постоянной и выбранные соответствующим образом скорости перемещения находились в диапазоне  $2,1 \cdot 10^{-6} - 6,3 \cdot 10^{-6}$  м/с ( $0,127 - 0,381$  мм/мин). Действительно, максимальный коэффициент подобия надрезанных образцов (серия В) в испытаниях на растяжение был равен трем. Однако, как следует из (1), равенство отношения скоростей перемещения активного захвата испытательной машины коэффициенту подобия лишь в редких случаях может обеспечить равенство скоростей деформации.

Опыты [16] проводились в зависимости от величины требуемой нагрузки на одной из трех машин: «Инстрон», «Болдуин — Тейт — Эмери» или «Рилль». Отсутствие в [16] данных о жесткости этих машин, а также жесткости образцов не позволяет оценить отличие скоростей деформаций в этих испытаниях.

Следует отметить еще одно важное, хотя и находящееся в стороне от данного исследования, обстоятельство. В [16] подчеркивается, что цель работы — изучение геометрического масштабного эффекта, обусловленного влиянием размеров, а не просто различием механических свойств вследствие различных условий термической или механической обработки больших и малых образцов. Далее там же говорится: «Образцы после грубой механической обработки подвергались термообработке в следующем порядке: аустенизация при  $1000^\circ\text{C}$ , охлаждение на воздухе, трехкратный отпуск при  $510^\circ\text{C}$  длительностью 2 ч. каждый». Между тем известно, что для устранения влияния технологических факторов на масштабный эффект, термообработке

должны подвергаться не образцы различных размеров, а заготовки. Затем после установления однородности свойств по сечению из заготовок вырезаются образцы различных размеров. Подробно процедура тщательного разделения технологического и геометрического (физического) масштабных факторов изложена в [47].

Анализ испытаний с переменным запасом упругой энергии наглядно демонстрирует ограниченность критерияльного понятия о прочности, основанного на допущении критического характера разрушения. Поскольку процесс разрушения развивается во времени и разрыв может произойти при разных уровнях напряжения, скорость нагружения играет существенную роль. В рассмотренных выше опытах это обстоятельство не учитывалось, что привело к неверной трактовке результатов испытаний с различной податливостью нагружающего устройства и определенному завышению зависимости прочности от размеров образцов.

Автор благодарит А. А. Вакуленко за критические замечания и помощь в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Зилова Т. К., Новосильцева Н. И., Фридман Я. Б.* Методы испытания с переменным запасом упругой энергии и его влияние на механические свойства.— Заводская лаборатория, 1969, т. 35, № 10, с. 1229—1236.
2. *Журков С. Н., Нарзуллаев Б. Н.* Временная зависимость прочности твердых тел.— Ж. техн. физики, 1953, т. 23, вып. 10, с. 1677—1689.
3. *Шур Д. М.* Исследование влияния энергетических условий нагружения на прочность и склонность к хрупким разрушениям резервуаров давления.— Тр. ЦНИИ технол. и машиностр., 1963, № 40, с. 19—28.
4. *Журков С. Н., Томашевский Э. Е.* Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения.— В кн.: Некоторые проблемы прочности твердого тела. М.— Л.: Изд-во АН СССР, 1959, с. 68—75.
5. *Зилова Т. К., Новосильцева Н. И., Рязанов Н. В., Палкин Б. А., Сахаров Э. О., Фридман Я. Б.* Испытание на двухосное растяжение листовых материалов с различным запасом упругой энергии.— Заводская лаборатория, 1967, т. 33, № 5, с. 612—617.
6. *Зилова Т. К., Петрухина Н. И., Палкин Б. А., Рязанов Н. В., Фридман Я. Б.* Испытание шпилек на растяжение с кручением при различной податливости нагружающего устройства.— Заводская лаборатория, 1961, т. 27, № 7, с. 877—883.
7. *Потак Я. М.* Высокопрочные стали. М.: Металлургия, 1972. 208 с.
8. *Бендрышев О. Л., Петько В. В., Фридман Я. Б.* О причинах замедленного разрушения болтов из высокопрочных сталей.— Вест. машиностроения, 1960, № 7, с. 6—10.
9. *Зилова Т. К., Демина Н. И., Фридман Я. Б.* Методика оценки склонности материалов к замедленному разрушению.— Заводская лаборатория, 1956, т. 22, № 8, с. 967—972.
10. *Давиденков Н. Н.* Предисловие к книге Л. С. Мороза и С. С. Шуракова «Проблема прочности цементованной стали». Л.: Изд-во ЦНИИ трансп. машиностроения СССР, 1947, с. 3—6.
11. *Давиденков Н. Н.* О влиянии размеров образцов на их механические свойства.— Заводская лаборатория, 1960, т. 26, № 3, с. 319—320.
12. *Шевандин Е. М., Маневич Ш. С.* Эффект масштаба при хрупком разрушении стали.— Ж. техн. физ., 1946, т. 16, вып. 11, с. 1223—1234.
13. *Шевандин Е. М., Разов И. А., Серпенинов Б. Н.* Методика исследования процесса разрушения образцов разных размеров и учета влияния податливости нагружаемой системы.— Заводская лаборатория, 1956, т. 22, № 11, с. 1638—1642.
14. *Шевандин Е. М., Разов И. А., Решетников Р. Е., Серпенинов Б. Н.* О природе масштабного эффекта при разрушении металлов.— Докл. АН СССР, 1957, т. 113, № 5, с. 1057—1060.
15. *Витман Ф. Ф., Степанов В. А.* О влиянии скорости деформирования на хладноломкость стали.— Ж. техн. физ., 1939, т. 9, вып. 12, с. 1070—1085.
16. *Weiss V., Schaeffer G., Fehling J.* Effect of section size on notch strength.— Trans. ASME, Ser. D. J. Basic Engng, 1966, v. 88, No. 3, p. 675—681.— Рус. перев.: Влияние площади поперечного сечения на прочность образца с надрезом.— Тр. Америк. об-ва инж.-механиков. Сер. Д, 1966, т. 88, № 3, с. 153—161.
17. *Палеханова Н. Г., Рагнер С. И.* Масштабный эффект у пластичных металлов.— Ж. техн. физ., 1954, т. 24, вып. 3, с. 445—453.