

3. Галин Л. А. Плоская упругопластическая задача.— ПММ, 1946, т. 10, вып. 3, с. 367—386.
4. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.
5. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
6. Доборджинидзе Л. Г. Комплексное представление смещений и напряжений для нелинейного упругого материала гармонического типа.— Тр. Тбил. матем. ин-та, 1979, т. 61, с. 37—48.

Тбилиси

Поступила в редакцию
12.V.1983

УДК 539.3:620.1

УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ В СРЕДЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

ТОЛОКОННИКОВ О. Л.

Различные конституционные соотношения механики деформируемого твердого тела базируются на гипотезах, прямая экспериментальная проверка которых возможна, если реализовать и контролировать разнообразные траектории деформирования образцов и поддерживать постоянными, в качестве параметров, температуру, гидростатическое напряжение σ и другие скалярные функции процесса [1].

Известные установки для испытаний трубчатых образцов действием осевой растягивающей силы Q , внутреннего давления Δp , крутящего момента M не приспособлены для наложения всестороннего давления на процесс формоизменения образцов.

Между тем известно [2, 3], что всестороннее сжатие достаточной величины оказывает заметное влияние на механические свойства материала, в частности существенно увеличивает предел пластических деформаций.

Экспериментальные исследования, проведенные при многоосном нагружении в среде высокого давления, ограничены по диапазону реализуемых и контролируемых видов напряженного состояния и не позволяют сделать обобщающих выводов, необходимых для обоснования известных и разработки новых моделей деформирования, учитывающих реальные свойства материалов.

Заметим, что в трубчатых образцах при двухосном растяжении реализуется весь диапазон фаз напряжений [4], а дополнительное наложение гидростатического давления $p \approx -\sigma$ позволяет, во-первых, проследить влияние первого инварианта тензора напряжений на характеристики формоизменения (при известном законе изменения объема) и, во-вторых, перенести испытания в область конечных пластических деформаций, недостижимых в нормальных условиях.

Для проведения таких испытаний создан экспериментальный комплекс¹, отвечающий ряду специфических требований, а именно:

нагружение трубчатого образца осевой растягивающей силой Q , избыточным давлением Δp при постоянном гидростатическом давлении p ;

независимость параметров внешней нагрузки друг от друга и от гидростатического давления;

неизменность гидростатического давления в процессе деформирования образца; измерение усилий, действующих непосредственно на образец, исключая влияние трения в уплотнениях;

измерение деформаций базовых размеров образца непосредственно в камере высокого давления с достаточной точностью;

реализация достаточно произвольной программы нагружения в двумерном пространстве напряжений [1] и возможность оперативной коррекции программы с учетом изменения геометрии образца.

Выполнить одновременно эти требования на известных установках не представляется возможным. Комплекс состоит из блока высокого давления, размещенного в бронированной камере и смонтированного на разрывной гидравлической машине

¹ Толоконников О. Л., Степунин В. И., Астапов В. Ф., Моисеев А. Г. Установка для исследования сложного напряженного состояния трубчатых образцов материалов.— Авт. свид. № 1021982. Кл. G01 № 3/40. Заявл. 5.10.1981. Опубл.: Открытия и изобретения, 1983, № 21, с. 118—119.

«Шоппер», блока низкого давления и управления параметрами нагружения, элементы этого блока заимствованы из [5], блока автоматизированной регистрации параметров процесса и оперативной коррекции программы испытаний, построенного на основе ЭВМ «Напри-К».

Блок ВД (фиг. 1) содержит контейнер 1 с размещенной в камере 50 мм «капсулой», источник ВД 17, имеющий дистанционное управление от блока низкого давления (на фигуре не показан), мультипликатор ВД 15 и манганиновый манометр 19, соединенные магистралью ВД с внутренней полостью образца 7.

Отличием установки является конструкция капсулы, состоящей из «плавающего» штока 6, торцы которого имеют равные диаметры и выведены из камеры, прибора измерения осевой силы и избыточного давления 9 [6], системы уплотнений 2, 10, 14, трубчатого образца 7 с установленным на нем малогабаритным тензометром 8 измерения осевой и окружной деформаций непосредственно в камере ВД [7], клапана одностороннего действия 11.

Плавающий шток 6 имеет глухое осевое и поперечное капиллярные отверстия для прохода жидкости во внутреннюю полость образца 7.

Введение в камеру ВД плавающего штока позволило: создать замкнутую гидравлическую магистраль высокого давления и через замкнутую магистраль низкого давления обеспечить неизменность объема сжатой жидкости ВД в процессе деформирования образца; нагружать образец осевой силой Q независимо от разности давлений во внутренней и наружной полостях образца, и от величины давления p в камере ВД.

Проблемой явилось создание малой разности больших внешнего p и внутреннего $p + \Delta p$ давлений, а также создание высокого давления внутри образца, так как трубопроводы ВД при $p > 500$ МПа должны быть жесткими ($\varnothing > 1,5$ см) и в то же время подводить сжатую жидкость к подвижному торцу плавающего штока, связанного капиллярным отверстием с внутренней полостью образца 7. Эти противоречивые требования решены размещением мультипликатора ВД 15 на подвижной traverse 16 разрывной машины и образования тем самым жесткой магистрали высокого давления.

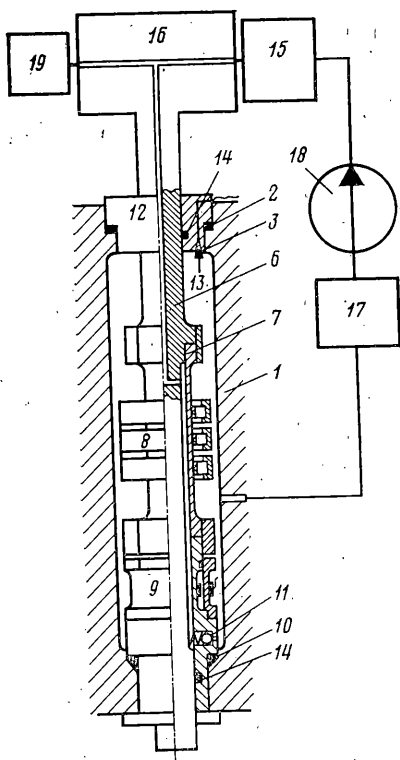
Условие $p = \text{const}$ обеспечено неизменностью объема предварительно сжатой жидкости в магистрали высокого давления, замкнутой через магистраль низкого давления.

Нагружение избыточным давлением Δp реализуется одновременным перемещением плунжеров мультипликатора 15 и мультипликатора источника высокого давления в противоположных направлениях за счет работы дифференциального насоса 18. Нагружение осевой силой обеспечено разрывной машиной через плавающий шток 6 независимо от величины p и Δp .

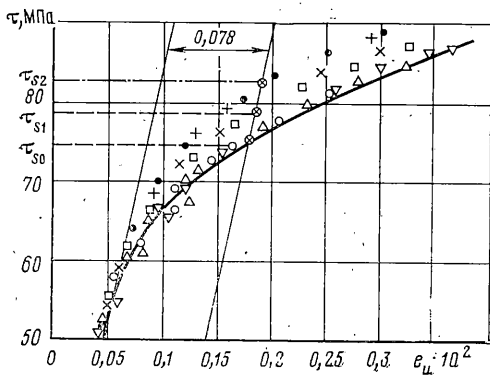
Измерение усилий и окружных деформаций основано на использовании упругих элементов с наклеенными тензорезисторами, измерение осевых деформаций с начальной базой 30 мм — реохордом. Влияние высокого давления и температуры на измерения учтено введением компенсационных элементов в камеру и градуировкой приборов.

Исходная информация и программа обработки показаний датчиков усилий и деформаций вводится в ЭВМ.

В процессе испытаний происходит опрос



Фиг. 1



Фиг. 2

показаний датчиков за 0,1 с и через тензометрический усилитель и аналогово-цифровой преобразователь ввод в оперативную память ЭВМ, непрерывное вычисление и вывод на печать характеристик напряженно-деформированного состояния образца [8].

Подсистема коррекции программы нагружения обеспечивает оперативную оценку текущего вида напряженного состояния и плавное изменение производительности разрывной машины при неизменной производительности дифференциального насоса 18.

Проведенные метрологические исследования показали среднеквадратичную погрешность измерений меньше 4,8%.

Автоматизированная обработка текущей информации и возможность коррекции программы испытаний открывает пути к управлению сложными процессами нагружения.

Следует отметить, что работы других исследователей и устройства для испытаний трубчатых образцов на двухосное растяжение в среде высокого давления нам неизвестны.

Испытания проводятся следующим образом. Собранный капсула вводится в камеру контейнера, уплотнения 2, 10 сжимаются траверсами и стяжными колоннами. Источником ВД 17 создается предварительное сжатие рабочей жидкости ВД в камере, при этом жидкость проникает через клапан 11 в полость внутри образца 7 и через капиллярные отверстия штока 6 — в полость ВД мультипликатора 15, отводя поршень мультипликатора в исходное положение; поршень мультипликатора источника ВД 17 занимает положение конца рабочего хода (фиг. 1).

Избыточное давление Δp внутри образца создается синхронным перемещением поршня мультипликатора 15 и источника ВД 17 в противоположных направлениях за счет перекачки насосом 18 замкнутого объема жидкости и низкого давления в магистрали источник ВД 17 — мультипликатор 15.

Объем сжатой жидкости при этом остается постоянным, и при увеличении диаметра образца обеспечено условие $p = \text{const}$.

Клапан 11 герметизирует внутреннюю полость образца при создании избыточного давления Δp .

Плавающий шток обеспечивает передачу осевой силы Q от траверсы 16 на образец 7 независимо как от величины всестороннего давления в камере, так и от разности давлений Δp внутри и снаружи образца, объем сжатой жидкости в камере не меняется, т. е. и в этом случае $p = \text{const}$.

Величина всестороннего давления $p + \Delta p$ регистрируется манганиновым манометром, градуированным по образцовому поршневому манометру.

Тензомер 8, градуируется на специальном стенде, имитирующем изменение диаметра и осевой базы образца, помещенного в среду ВД, с относительной погрешностью измерений $\delta < 1,5\%$.

Градуировка прибора измерения величин Q и Δp проводится в нормальных условиях и в среде ВД с применением образцовых манометра и упругой динамометрической скобы.

Влияние давления и температуры исключается введением компенсационных тензодатчиков в камеру ВД и соединением их с рабочими датчиками в мостовую схему.

На фиг. 2 показаны результаты испытаний трубчатых образцов из латуни Л63 диаметром 22 мм, толщиной стенки 1 мм, длиной рабочей части 100 мм. Реализовано пропорциональное нагружение образцов при различных фиксированных значениях p с измерением окружной и осевой деформаций образца непосредственно в камере ВД. Измерения обработаны в координатах: октаэдрическое касательное напряжение τ — интенсивность формоизменения e_u [4] с использованием условия несжимаемости при $e_u > 0,05\%$. При этом обнаружено увеличение условного предела текучести τ_s (при $e_u = 0,078\%$) на 8–12% при наложении давления $250 < p < 500$ МПа (светлые точки и треугольники соответствуют $p = 20$ МПа; светлые квадраты и косые кресты — $p = 300$ МПа; темные точки и прямые кресты — $p = 450$ МПа).

Таким образом, созданная установка позволяет проводить испытания материалов при сложном (двухосном) напряженном состоянии образца, используя постоянное гидростатическое давление в качестве параметра процесса, подобного температуре, измеряя при этом характеристики напряженно-деформированного состояния образца с достаточной достоверностью и точностью. Параметры комплекса: $20 < p < 1100$ МПа, $0 < \Delta p < 35$ МПа, $0 < Q < 30$ кН, время одного нагружения 50–200 с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 274 с.
2. Механические свойства материалов под высоким давлением. Под ред. Х. Л. Пью. М.: Мир, 1973, вып. 1. 296 с.; вып. 2. 374 с.
3. Уральский В. И., Плазотин В. С., Шефтель Н. И. и др. Деформация металлов жидкостью высокого давления. М.: Metallургия, 1976. 424 с.

4. Толоконников Л. А. Механика деформируемого твердого тела. М.: Высш. школа, 1979. 318 с.
5. Долгушин Г. Г., Исаев Ю. И. Универсальный испытательный стенд на давление 20 000 кгс/см².— Тр. Всес. науч.-исслед. ин-т физ.-техн. и радиотехн. измерений, 1969, вып. 104(164), с. 144–147.
6. Моисеев А. Г., Степуни В. И., Толоконников О. Л. Прибор для измерения осевой силы и малой разности давлений в камере высокого давления.— Заводск. лаборатория, 1983, т. 49, № 5, с. 85–86.
7. Моисеев А. Г., Толоконников О. Л. Тензомер для измерения осевых и окружающих деформаций в трубчатых образцах.— Заводск. лаборатория, 1982, т. 48, № 11, с. 85–86.
8. Моисеев А. Г., Толоконников О. Л. Применение ЭВМ при механических испытаниях трубчатых образцов в сложном напряженном состоянии.— Заводск. лаборатория, 1983, т. 49, № 3, с. 76–78.

Тула

Поступила в редакцию
27.II.1983

УДК 539.3

К ИНТЕГРИРОВАНИЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ СИММЕТРИЧНО ДЕФОРМИРОВАННОЙ КРУГЛОЙ ПЛАСТИНКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ

ИВАНОВ В. К.

В работе приводится новый случай интегрируемости гипергеометрического уравнения Гаусса, применяемого для расчета симметрично деформированной круглой пластинки переменной жесткости. Полученное решение представлено в конечном виде.

В [1] уравнения растяжения и изгиба симметрично деформированной круглой пластинки переменной жесткости при замене независимой переменной приводятся к гипергеометрическому уравнению Гаусса

$$x(x-1)y'' + [(a+b+1)x-c]y' + aby = 0 \quad (1)$$

где a, b, c — постоянные коэффициенты, зависящие от параметров жесткости пластинки.

Решение гипергеометрического уравнения может быть представлено посредством степенных рядов или определенных интегралов [2]. Решения в конечном виде, если не считать тех случаев, когда гипергеометрический ряд обрывается, известны в шести случаях [3]. Если исходное уравнение (1) записать кратко: $H(a, b, c, x, y) = 0$, то указанные шесть случаев имеют следующий вид:

$$H(a, a+1/2, 2a+1, x, y) = 0, \quad H(a, a-1/2, 1/2, x, y) = 0 \quad (2)$$

$$H(a, a+1/2, 3/2, x, y) = 0, \quad H(1, b, c, x, y) = 0$$

$$H(a, b, a, x, y) = 0, \quad H(a, b, a+1, x, y) = 0$$

В публикуемой работе представлено решение в конечном виде для случаев (m — любое целое положительное число):

$$H(a, b, a+1+m, x, y) = 0 \quad (3)$$

В [4] рекомендуется для обыкновенных дифференциальных уравнений, у которых коэффициенты перед функцией и ее производными — полиномы, частное ре-