

УДК 539.3

© 1995 г. А. М. ЖУКОВ

НОВЫЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О СВОЙСТВАХ СПЛАВА Д16Т ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С КРУЧЕНИЕМ

В литературе по пластичности начальная изотропия материала подразумевалась, но четко не оговаривалась. Из-за этого в 40-х годах столетия сделаны попытки опровергнуть теорию малых упругопластических деформаций. Основным нападкам подверглась гипотеза единой кривой упрочнения. Для некоторых металлов была обнаружена зависимость этой кривой от вида напряженного состояния. Эту зависимость пытались объяснить теорией метастабильности материала. Сущность последней состояла в том, что в процессе пластического деформирования якобы возникают физико-химические превращения, разные при разных видах напряженного состояния.

Опытами на двухосное растяжение сплава Д16Т [1] было убедительно показано, что несовпадение кривых упрочнения в форме $\epsilon_i(\epsilon_i)$, где ϵ_i и ϵ_i — интенсивность напряжений и интенсивность деформаций соответственно, обусловлено не метастабильностью сплава, а его начальной анизотропией. Опыты на растяжение с кручением этого сплава подтвердили сделанный вывод [2].

В публикуемой работе будет изложено то, что не отражено в [2], сделаны некоторые уточнения и приведены новые научные результаты.

Трубчатые образцы были изготовлены из прутка диаметром 40 мм. Они имели длину рабочей части 130—140 мм. Термической обработке образцы не подвергались ни в заготовках, ни в готовом виде. Всего испытано 12 образцов и все в условиях простого нагружения. Деформацию измеряли приборами, описанными в [3].

Перед программным нагружением каждый образец подвергался чистому растяжению и чистому кручению до напряжений, меньших соответствующих пределов пропорциональности σ_p и τ_p . По данным этих испытаний определены модули упругости E и G методом, описанным в [4]. В [2] они определены по графикам начальных линейных участков кривых $\sigma(\epsilon)$ и $\tau(\gamma)$.

Максимальное расхождение в значениях E и G , определенных двумя указанными методами, составляет 2,7% для E и 4,3% для G . Эти расхождения небольшие, но их целесообразно указать.

В табл. 1 указаны условия испытания каждого образца N , его наружный диаметр D (мм) и отношение среднего радиуса поперечного сечения R к толщине стенки h . Там же приведены основные результаты испытаний, причем модули упругости выражены в ГПа, напряжения в МПа и деформации в процентах.

В результате статистической обработки получено: $E = 70,5 \pm 0,6$ ГПа ($n = 11$, $v = 1,4\%$ и $\delta_m = 2,4\%$) и $G = 23,3 \pm 0,9$ ГПа ($n = 11$, $v = 5,7\%$ и $\delta_m = 10,7\%$). Здесь и во всем последующем доверительная вероятность принята равной 0,95 и обозначено: n — число измерений, v — коэффициент вариации, равный отношению среднего квадратического отклонения σ_{n-1} к среднему измеренному значению и δ_m — максимальное отклонение от среднего значения.

По известным формулам $\sigma_1 = 0,5(\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2})$, $\varphi = 0,5 \arctg(2\tau/\sigma)$, $\epsilon_1 = 0,5(\epsilon_z + \epsilon_\theta + ((\epsilon_z - \epsilon_\theta)^2 + \gamma^2)^{1/2})$, $\psi = 0,5 \arctg[\gamma/(\epsilon_z - \epsilon_\theta)]$ были вычислены наибольшее главное напряжение σ_1 и наибольшее относительное удлинение ϵ_1 и

| N | τ/σ | D | R/h | E | G | σ_p | τ_p | σ_s | τ_s | σ_b | τ_b | ϵ_b | γ_b |
|-----|-------------------|-------|-------|------|------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|--------------|------------|
| 1 | 0 | 30,92 | 9,81 | 68,8 | 25,8 | 385,5 | — | 392,4 | — | 522,5 | — | 10,5 | — |
| 9 | 0 | 30,77 | 9,90 | 69,2 | 22,0 | 363,0 | — | 382,6 | — | 597,4 | — | 11,6 | — |
| 2 | $\tau/\sigma = 0$ | 29,28 | 21,03 | 66,0 | — | 306,1 | — | 394,5 | — | 394,5 | — | 2,44 | — |
| 6* | ∞ | 30,88 | 9,93 | 71,6 | 23,2 | — | 136,4 | — | 148,1 | — | 200,1 | — | 7,62 |
| 7* | 0,092 | 30,84 | 9,85 | 70,3 | 22,1 | 294,3 | 27,1 | 325,7 | 60,1 | 577,2 | 55,8 | 8,43 | 3,24 |
| 3 | 0,184 | 30,33 | 12,14 | 71,1 | 22,1 | 305 | 56,0 | 325,7 | 60,1 | 531,3 | 106,6 | 8,86 | 7,07 |
| 4 | 0,280 | 30,34 | 12,36 | 70,8 | 23,5 | 246 | 68,7 | 284,5 | 79,3 | 501,2 | 149,9 | 8,42 | 11,9 |
| 5* | 0,377 | 30,32 | 12,10 | 71,1 | 23,0 | 232,7 | 87,7 | 272,7 | 101,6 | 464,8 | 182,7 | 8,71 | 11,13 |
| 8* | 0,470 | 30,85 | 9,78 | 70,6 | 22,6 | 227,4 | 105,9 | 235,4 | 109,6 | 432,2 | 210 | 7,52 | 14,1 |
| 10* | 0,526 | 30,71 | 10,02 | 69,7 | 24,9 | 186,4 | 98,1 | 219,7 | 122,6 | 333,7 | 191,3 | 3,74 | 8,89 |
| 11* | 0,650 | 30,77 | 9,90 | 70,1 | 24,2 | 181,5 | 117,9 | 188,4 | 121,8 | 294,3 | 199,9 | 3,99 | 7,85 |
| 12* | 0,743 | 30,68 | 10,01 | 71,8 | 23,0 | 147,0 | 109,0 | 173,6 | 129,6 | 238,4 | 179,5 | 1,88 | 7,44 |

их направления φ и ψ по отношению к продольной оси образца z . Так как окружная деформация ϵ_θ в опытах при сложном напряженном состоянии не измерялась, то ее пришлось вычислять по формуле $\epsilon_\theta = -\mu\sigma/E - 0,5\epsilon_z''$, где ϵ_z'' — продольная пластическая деформация. Для всех образцов было принято $\mu = 0,31$, а E для каждого образца использовано свое.

Углы φ и ψ приведены в табл. 2. Начальные значения ψ соответствуют упругой области деформирования, а конечные — пластической области. Как видно, угол $\Delta = |\varphi - \psi|$ мал. В упругой области он не превышает $3,4^\circ$ (образец № 8). В главных осях тензора напряжений σ_{ij} имеем $\epsilon_i = 15,06 \cdot 10^{-4}$ вместо $\epsilon_i = 15,15 \cdot 10^{-4}$ в главных осях тензора деформаций ϵ_{ij} . Поправка в значениях σ_i/ϵ_i составляет всего 0,6%. В пластической области Δ достигает максимального значения $6,4^\circ$ (образец № 12). Поправка для ϵ_i в главных осях σ_{ij} составляет 1,9% ($293,5 \cdot 10^{-4}$ вместо $299,2 \cdot 10^{-4}$ в главных осях ϵ_{ij}).

В упругой области σ_1 (ϵ_1) имеет начальный линейный участок, наклон которого является модулем упругости сплава для направления φ ; он обозначен через $E_{\varphi*}$, а теоретическое значение модуля обозначено E_{φ} . Последний определяется по формуле

$$E_{\varphi} = \frac{E_\theta}{a \cos^4 \varphi + b \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + \sin^4 \varphi}$$

$$a = E_\theta/E_z, \quad b = E_\theta/G_{z\theta} - 2\mu_{z\theta}a$$

По опытным данным в упругой области определены также значения $G_{\varphi*} = \tau_{\max}/\gamma_{\max}$, а теоретические значения G_{φ} вычислены по формуле

$$G_{\varphi} = \frac{G_{z\theta}}{1 + [G_{z\theta}(1 + \mu_{z\theta})/E_z + G_{z\theta}(1 + \mu_{\theta z})/E_\theta - 1] \sin^2 2\varphi}$$

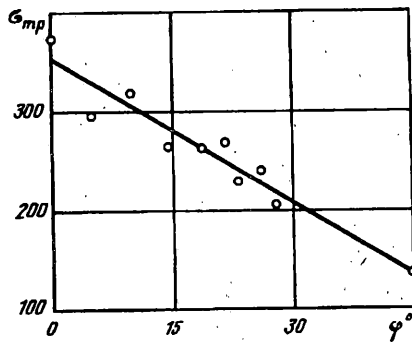
В вычислениях E_{φ} и G_{φ} использованы следующие упругие константы: $E_z = 70,5$ ГПа, $\mu_{z\theta} = 0,31$, $E_\theta = 66,0$ ГПа, $\mu_{\theta z} = 0,22$ и $G_{z\theta} = 23,3$ ГПа. Формулы для E_{φ} и G_{φ} взяты из [5].

Результаты вычислений сведены в табл. 2, где δ_1 и δ_2 определяют максимальные отклонения от средних значений $E_{\varphi*}$ и $G_{\varphi*}$, отнесенные к последним. Из этой таблицы можно усмотреть, что δ_1 не превышает 4,7%, а δ_2 — 16,4%. Превышение десяти процентов δ_2 имеет только у двух из 11 образцов.

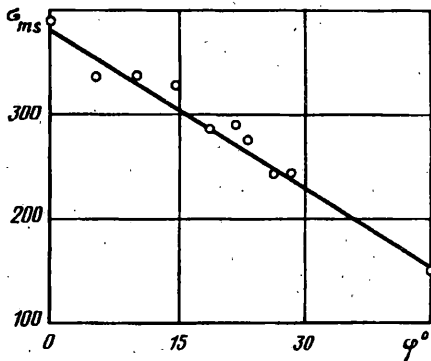
Изложенное позволяет заключить о возможности надежного определения модулей упругости E_φ и G_φ путем испытаний на растяжение с кручением

Таблица 2

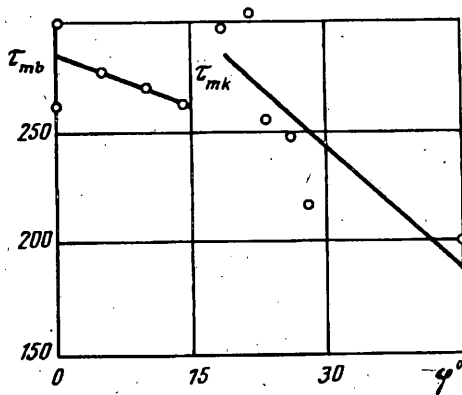
| № | 1,2 | 7 | 3 | 4 | 5 | 8 | 10 | 11 | 12 | 6 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| φ^0 | 0 | 5,23 | 10,1 | 14,6 | 18,5 | 21,6 | 23,2 | 26,2 | 28,0 | 45 |
| ψ^0 | 0 | 6,3—5,9 | 12—15,6 | 17,2—19,2 | 20—22,3 | 25—26 | 22,5—27,8 | 29,2—29,6 | 30—34,4 | — |
| E_{φ^*} | $70,5 \pm 0,6$ | $69,9 \pm 2,6$ | $72,5 \pm 3,1$ | $70,7 \pm 0,8$ | $69,5 \pm 0,7$ | $70,6 \pm 0,7$ | $64,1 \pm 1,8$ | $66,6 \pm 2,8$ | $63,5 \pm 1,7$ | |
| n | 11 | 5 | 4 | 4 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | |
| ν | 1,4 | 2,7 | 2,7 | 0,7 | 0,9 | 2,0 | 2,0 | 3,1 | 2,0 | |
| $E_{\varphi'}$ | 70,5 | 70,4 | 69,8 | 68,8 | 67,3 | 67,3 | 66,9 | 66,1 | 65,7 | |
| δ_1 | 0 | +0,7 | -3,7 | -2,7 | -2,2 | -4,7 | 4,4 | -0,7 | 3,5 | |
| G_{φ^*} | | $28,0 \pm 1,3$ | $27,3 \pm 2,8$ | $25,9 \pm 1,3$ | $26,9 \pm 0,2$ | $26,7 \pm 0,6$ | $24,6 \pm 1,4$ | $26,1 \pm 1,3$ | $25,3 \pm 0,7$ | $23,3 \pm 0,9$ |
| n | | 5 | 4 | 6 | 6 | 6 | 4 | 5 | 5 | 11 |
| ν | | 3,9 | 6,4 | 4,6 | 0,9 | 2,1 | 3,7 | 3,9 | 2,4 | 0,7 |
| $G_{\varphi'}$ | | 23,4 | 23,7 | 24,1 | 24,5 | 24,9 | 25,1 | 25,5 | 25,7 | 23,3 |
| δ_2 | | -16,4 | -13,2 | -4,9 | -6,9 | -6,7 | 2,0 | -2,4 | 1,6 | 0 |



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

анизотропных трубчатых образцов. Желательно в этих испытаниях дополнительно измерять ϵ_ϕ .

Нам представляется, что технологию изготовления трубчатых испытательных образцов можно максимально приблизить к технологии изготовления изделий. Тогда модули упругости E_ϕ и G_ϕ , определенные по испытаниям на растяжение с кручением, будут надежнее отражать упругие свойства материала в изделии.

В [4] показано, что для металлов сход с линейного участка кривой деформирования сопровождается возникновением остаточных деформаций после разгрузки, а для полимерных материалов появлением петли гистерезиса. По этой причине было важно установить условие перехода в нелинейную область деформирования сплава при сложном напряженном состоянии.

Исходные опытные данные для указанного условия были получены следующим образом: для каждого образца в увеличенном масштабе были построены начальные участки кривых $\sigma(\epsilon)$ и $\tau(\gamma)$; на одной из этих кривых раньше начинался сход с линейного участка; ордината точки схода с линейного участка этой кривой принималась за предел пропорциональности, второй же предел находился по журналу испытаний как соответствующий первому. Найденные пределы пропорциональности σ_p и τ_p помещены в табл. 1.

Оказалось, что σ_p и τ_p зависят от ϕ . С ростом ϕ они убывают. По σ_p и τ_p для каждого образца были вычислены: наибольшее нормальное напряжение σ_{mp} , наибольшее касательное напряжение τ_{mp} и интенсивность напряжений σ_p . Приняв линейную зависимость этих величин от ϕ , были определены линии регрессии: $\sigma_{mp} = 350 - 4,81\phi$, $\tau_{mp} = 167 - 0,913\phi$ и $\sigma_p = 334,7 - 2,67\phi$.

Максимальные отклонения опытных точек от линий регрессии соответственно

Таблица 3

| № | τ/σ | $\varepsilon_i = 1\%$ | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|---------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0 | 408,1 | 433,4 | 470,9 | 498,3 | 529,7 |
| 7 | 0,092 | 392,4 | 429,7 | 453,2 | 478,7 | 502,3 |
| 8 | 0,47 | 345,3 | 398,3 | 423,8 | 437,5 | 455,2 |
| 11 | 0,65 | 313,9 | 353,2 | 378,7 | 404,2 | 431,6 |
| 12 | 0,743 | 310 | 337,5 | 355,1 | 376,7 | 396,3 |
| 6 | ∞ | 278,6 | 300,2 | 317,8 | 355,5 | 357,1 |

Таблица 4

| № | τ/σ | $\gamma_m = 1\%$ | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|---------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0 | 204 | 221,7 | 235,4 | 249,2 | 264,9 |
| 7 | 0,092 | 194,2 | 206,0 | 216,8 | 223,7 | 237,4 |
| 8 | 0,47 | 172,7 | 194,2 | 206,0 | 213,9 | 225,6 |
| 11 | 0,65 | 160,9 | 180,5 | 190,3 | 198,2 | 208,0 |
| 12 | 0,743 | 153,0 | 173,6 | 184,4 | 191,3 | 198,2 |
| 6 | ∞ | 149,1 | 162,8 | 170,7 | 176,6 | 182,2 |

равны 10%, 12,7% и 11,8%. Таким образом, теория наибольших нормальных напряжений лучше предсказывает начало перехода сплава в нелинейную область деформирования. На фиг. 1 наклонная прямая изображает линию регрессии, а точки — опытные значения σ_{mp} .

Аналогично описанному поступили с определением условия пластичности сплава. Для σ_s принят допуск на остаточную деформацию 0,1% и для τ_s — 1,73%. В табл. 1 для каждого образца приведены σ_s и τ_s . В рассматриваемом случае линии регрессии таковы: $\sigma_{ms} = 384 - 5,05\varphi$, $\tau_{ms} = 184,2 - 0,943\varphi$ и $\sigma_{is} = 360 - 2,36\varphi$.

Максимальные отклонения опытных точек от этих линий регрессии 5,9%, 6,9% и 7,8% соответственно. Лучшее согласие с опытом вновь дало условие пластичности, основанное на теории наибольших нормальных напряжений. Правда, и два остальных условия пластичности также приемлемо согласуются с опытом. О степени согласия с опытом дают результаты, представленные на фиг. 2.

Кривые упрочнения в форме $\sigma_i(\varepsilon_i)$ и $\tau_m(\gamma_m)$ зависят от τ/σ (см. табл. 3, 4). С ростом τ/σ напряжения σ_i и τ_m систематически убывают.

Далее, используя для трех образцов полученный в опытах индивидуальный закон упрочнения, провели сравнение теоретических значений с опытными данными, и были получены большие расхождения теории с опытом. Для образца № 8, например, оно достигло 16,8%, для образца № 11—17,5% и для образца № 12—66,4%.

Проводилось также сопоставление с теорией течения, вытекающей из принципа запаздывания векторных свойств, предложенного А. А. Илюшиным [6]. Она имеет вид $\bar{S}/S = d\bar{\mathcal{E}}/d\mathcal{E}$, где \bar{S} — вектор напряжений, а $d\bar{\mathcal{E}}/d\mathcal{E}$ — вектор касательной к траектории деформирования $\bar{\mathcal{E}}(t)$. Компоненты векторов \bar{S} и $\bar{\mathcal{E}}$ вычислялись так, что $S = \sigma_i$ и $\mathcal{E} = \varepsilon_i$.

Так как надежное определение направления вектора касательной к опытной траектории деформирования затруднено (оно зависит от того, как соединены кривой смежные точки), то взамен вектора $d\bar{\mathcal{E}}/d\mathcal{E}$ бралось $\Delta\bar{\mathcal{E}}/\Delta\mathcal{E}$, где $\Delta\bar{\mathcal{E}}$ — вектор, соединяющий две смежные опытные точки траектории $\bar{\mathcal{E}}(t)$, причем конец этого вектора соответствует точка траектории нагружения $\bar{S}(t)$.

По формулам $S_k = \Delta\bar{\mathcal{E}}_k/\Delta\mathcal{E}$ и $\Delta\bar{\mathcal{E}}_k = \Delta\mathcal{E}S_k/S$ ($k = 1, 2, \dots, 5$) для трех образцов

определялись теоретические значения S_z и $\Delta\mathcal{E}_z$ и сравнивались с опытными. Для образца № 3 ($\tau/\sigma = 0,184$, $\beta = 6,9^\circ$) максимальное расхождение этой теории с опытом составило 30,3%, для образца № 5 ($\tau/\sigma = 0,377$ и $\beta = 4,3^\circ$) — 14,6% и для образца № 11 ($\tau/\sigma = 0,65$, $\beta = 8,8^\circ$) — 24,7%. Здесь β — угол между вектором \bar{S} и вектором $\Delta\mathcal{E}$ на последней (до разрушения или потери устойчивости образца) ступени нагружения. Из приведенного видно, что и эта теория не удовлетворительно предсказывает опытные данные. Одновременно последнее говорит, что принцип запаздывания векторных свойств для сплава Д16Т неприменим.

В табл. 1 образцы, потерявшие устойчивость, обозначены номерами со звездочкой. Всего потеряли устойчивость 6 образцов, а 5 образцов разрушились при наличии растягивающего образец усилия.

Обозначив индексом (b) приведенные напряжения при разрушении по трем ранее использованным критериям, а индексом (k) — при потере устойчивости, получим линии регрессии

$$\sigma_{mb} = 655 - 11,3\varphi, \quad \tau_{mb} = 286 - 1,55\varphi \quad \text{и} \quad \sigma_{ib} = 568 - 0,234\varphi \quad (0 \leq \varphi \leq 14,6^\circ)$$

$$\sigma_{mk} = 844 - 15,9\varphi, \quad \tau_{mk} = 354 - 3,72\varphi \quad \text{и} \quad \sigma_{ik} = 721 - 9,39\varphi \quad (18,5 \leq \varphi \leq 45^\circ)$$

Максимальное отклонение опытных точек от этих линий в первом случае составляет 12,4%, 8,1% и 7,9%, а во втором случае — 22%, 13,6% и 16,1%.

Одновременно условие разрушения и условие потери устойчивости трубчатых образцов из сплава Д16Т лучше двух других согласуется с опытом условия, основанного на критерии максимальных касательных напряжений. На фиг. 3 показаны линии регрессии по этому критерию, и расположение точек по отношению к ним.

Полученное условие потери устойчивости может быть использовано для проверки теории устойчивости анизотропной цилиндрической оболочки, подверженной действию растягивающего усилия и крутящего момента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков А. М. Прочность и пластичность сплава Д16Т при сложном напряженном состоянии//Изв. АН СССР. ОТН. 1954. № 6. С. 61—70.
2. Жуков А. М. Свойства сплава Д16Т при растяжении с кручением//Инж. сб. 1960. № 19. С. 55—62.
3. Жуков А. М. Пластические свойства и разрушение стали при двухосном напряженном состоянии//Инж. сб. 1954. Т. 20. С. 37—48.
4. Жуков А. М. К вопросу опытного определения механических свойств материалов//Механические и физико-химические свойства материалов. М.: Госстандарт, 1991. С. 12—24.
5. Лехницкий С. Г. Анизотропные пластинки. М. — Л.: Гостехиздат, 1947. 364 с.
6. Ильющин А. А. О связи между напряжениями и малыми деформациями в механике сплошных сред//ПММ. 1954. Т. 18. Вып. 6. С. 641—666.

Москва

Поступила в редакцию
11.I.1991