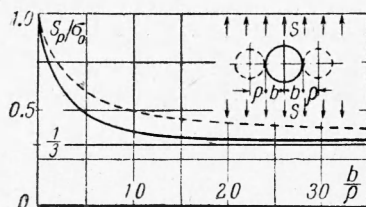


поверхностей трещины по ступенчатому закону [6]. Приводим некоторые значения δ_1 и δ_2 отклонений в процентах предельных нагрузок согласно макроскопической гипотезе от предельных нагрузок, вычисленных при $\nu = 0.3$ по соответствующим формулам работы [6] для случаев растяжения пластинки с малой прямолинейной щелью δ_2 (обобщенная задача Гриффитса) и тела с малой круговой щелью δ_1 (обобщенная задача Сака) для различных значений b/ρ

$b/\rho =$	0	1	2	3	5	10	15	25
$\delta_1 = 0$	4.36	11.8	14.1	11.8	7.43	5.36	3.44	
$\delta_2 = 0$	8.93	7.99	6.55	4.68	2.69	1.84	1.16	

Аналогичные вычисления проделаны для случая одноосного растяжения пластинки с круглым отверстием. При этом оказалось, что предельная нагрузка практически зависит только от отношения радиуса отверстия b



Фиг. 2

к структурному параметру ρ . Эта зависимость представлена на фиг. 2 сплошной линией. Пунктиром здесь изображена аналогичная зависимость, полученная для модели хрупкого тела, упрощенно учитывающей притяжение поверхностей трещины [7].

Близость результатов, полученных на основе предлагаемой макроскопической гипотезы хрупкого разрушения, к результатам, вытекающим из модели хрупкого тела, предложенной в работе [6], является обоснованием применения указанной гипотезы как для макроскопических, так и для микроскопических трещин, в том числе и для

определения условий возникновения зачаточных трещин. Таким образом, достигается простое решение основной задачи статики хрупкого тела, так как она сводится к обычной задаче теории упругости при полностью заданных граничных условиях.

Поступила 5 IV 1961

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков С. Д. Статистическая теория прочности. Машгиз, 1960.
2. Леонов М. Я. Некоторые задачи и приложения теории потенциала. ПММ, 1940, т. 4, вып. 5, 6.
3. Ужик Г. В. Сопротивление отрыву и прочность металлов. АН УССР, 1950.
4. Снеддон И. Преобразование Фурье. М., ИЛ, 1955.
5. Баренблатт Г. И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении, ПМТФ, 1961, № 4.
6. Леонов М. Я. Элементы теории хрупкого разрушения. ПМТФ, 1961, № 3.
7. Витвицкий П. М., Леонов М. Я. Растяжение за пределом упругости пластинки с круговым отверстием. ПМТФ, 1962, № 1.

ОЦЕНКА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛИТЕЛЬНОМУ РАЗРУШЕНИЮ И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

И. И. Трунин

(Москва)

Приводятся некоторые результаты испытаний на длительную прочность при кручении и растяжении трубчатых образцов, изготовленных из пароперегревательных труб стали перлитного класса (15X1M1Ф) и стали аустенитного класса (1X18H12T).

Рассматривается возможность оценки сопротивления длительному разрушению при сложном напряженном состоянии по результатам соответствующих испытаний в условиях одноосного растяжения, при этом анализируются наиболее опробованные предложения других исследователей: Джонсона, который предложил в качестве критерия длительной прочности использовать величину наибольшего нормального напряжения [1]; В. П. Сдобырева [2, 3], который на основании обработки большого экспериментального материала предложил использовать в качестве такого критерия полусумму интенсивности напряжения σ_2 и первого главного нормального напряжения σ_1 .

Испытания на длительную прочность проводились на машине ИП-4М с конструктивными изменениями, разработанными ранее [4].

Из каждой стали испытывались по три серии трубчатых образцов: 1) одноосное растяжение ($\sigma_x = \sigma$, $\tau_{xy} = 0$); 2) чистое кручение ($\sigma_x = 0$, $\tau_{xy} = \tau$); 3) совместное действие растягивающей и скручивающей сил ($\sigma_x = \sigma$, $\tau_{xy} = 1/2 \sigma$).

Чтобы получить однородное напряженное состояние по толщине стенки трубчатого образца, практически требуется, чтобы отношение среднего радиуса рабочей части R к толщине стенки образца δ было не меньше десяти. В этом случае отклонение напряжений на поверхности рабочей части

образца от среднего значения не превышает $\pm 5\%$. Однако, чем тоньше стенка образца, тем раньше он может потерять устойчивость в условиях длительного разрыва, т. е. тем большую часть времени испытание будет проводиться при неконтролируемом напряженном состоянии и отклонение напряжения от расчетного значительно превысит 5%. Кроме того, уменьшение толщин стенки приводит к повышению роли поверхностных явлений, развивающихся при длительных испытаниях. Из этих соображений образцы изготавливались толщиной стенки $\delta = 2$ мм при наружном диаметре $D = 26$ мм. При таких размерах максимальное отклонение величины напряжений в крайних волокнах от среднего значения достигало $\Delta\tau/\tau \leq \pm 7.7\%$ в момент приложения нагрузки. Можно предполагать, что в процессе длительных испытаний происходит выравнивание напряжений, некоторое снижение градиента по толщине стенки образца.

В процессе испытаний на длительную прочность во всех случаях за исключением растяжения образцов стали 15X1M1Ф производились измерения удлинения и угла закручивания для определения относительной деформации в осевом направлении и относительной деформации сдвига при кручении.

Результаты испытаний приведены в таблице: в верхней части таблицы для перлитной стали (C=0.09%, Cr=1.1%, Mo=0.9%, V=0.2%) при температуре 570°, в нижней части для аустенитной стали (C=0.12%, Cr=17.5%, Ni=12%, Ti=0.7%) при температуре 610°; в таблице приняты обозначения: σ_x и τ_{xy} — напряжения от осевой силы и крутящего момента, σ_1 и σ_2 — главные нормальные напряжения, σ_i — интенсивность напряжений, $\eta = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ в кг/мм², θ — время до разрушения в часах.

При оценке длительной прочности материала, предназначенного для изготовления деталей стационарных энергетических установок с большим сроком службы (100000 час) исследователям приходится сталкиваться еще с одной сложной проблемой. Длительность опытов не может превышать нескольких тысяч часов, а при конструировании необходимо иметь сведения о свойствах материала при полном сроке службы: поэтому возникает необходимость экстраполяции экспериментальных данных с использованием приближенных уравнений. В случае оценки длительной прочности наиболее широкое распространение имеют две зависимости между временем до разрушения и приложенным напряжением (при постоянной температуре): степенная и экспоненциальная.

Однако ошибка в оценке длительной прочности с использованием экспоненциальной зависимости особенно возрастает при экстраполяции на большие сроки службы (до двух порядков по шкале времени). Определение длительной прочности с исполь-

Таблица

σ_x	τ_{xy}	θ	σ_1	σ_2	σ_i	η
25	—	142	25	0	25	25
23	—	220	23	0	23	23
21	—	319	21	0	21	21
19	—	583	19	0	19	19
17	—	1610	17	0	17	17
15	—	5269	15	0	15	15
	15	330	15	-15	26.0	20.5
	14	541	14	-14	24.2	19.1
	13	1342	13	-12	22.5	17.8
	12	2174 *	12	-12	20.8	16.4
19	9.5	242	22.9	-3.9	25.1	24.0
18	9	294	21.7	-3.7	23.8	22.8
16	8	890	19.3	-3.3	21.2	20.2
14	7	2900 *	16.9	-2.9	18.5	17.8
13	6.5	1504	15.7	-2.7	17.3	16.5
26	—	5	26	0	26	26
22	—	32	22	0	22	22
17	—	246	17	0	17	17
14	—	1037	14	0	14	14
12	—	3405	12	0	12	12
	15	59	15	-15	26.0	20.5
	11.4	395	11.4	-11.4	19.7	15.6
	11.4	284	11.4	-11.4	19.7	15.6
	11	400 *	11.0	-11.0	19.0	15.0
	10	500	11.0	-11.0	17.3	13.7
	8	3867	8	-8	13.8	11.0
16	8	62	19.3	-3.3	20.9	20.1
16	8	123	19.3	-3.3	20.9	20.1
14	7	276	16.9	-2.9	18.7	17.8
13	6.5	510	15.7	-2.7	17.3	16.6
12	6	446	14.5	-2.5	16.1	15.3
12	6	430	14.5	-2.5	16.1	15.3
12	6	480	14.5	-2.5	16.1	15.3
10	5	1161	12.0	-2.0	13.1	12.6
10	5	1190	12.0	-2.0	13.1	12.6
9	4.5	2250 *	10.8	-1.8	11.8	11.3

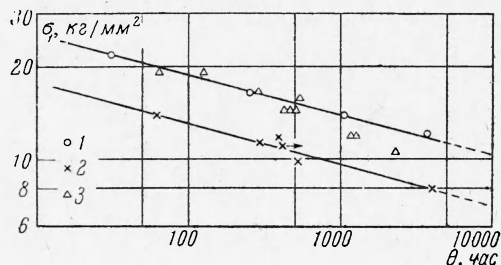
* Испытание прекращено на третьем участке ползучести.

в кг/мм², θ — время до разрушения

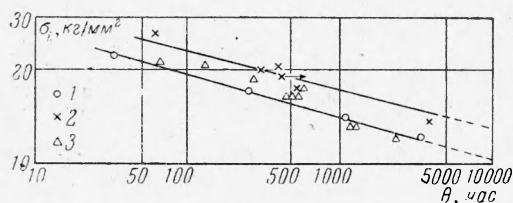
зованием степенной зависимости в случае межзеренного характера разрушения дает более правильную оценку жаропрочности.

В данной работе отдано предпочтение степенной зависимости, поэтому графики длительной прочности строились в логарифмических координатах: логарифмы напряжения — логарифм времени до разрушения.

Обработка экспериментальных данных, приведенных в таблице, показала, что раздельно ни первое главное напряжение σ_1 , ни интенсивность напряжения σ_i не могут



Фиг. 1, а



Фиг. 1, б

быть использованы в качестве критерия длительной прочности при сложном напряженном состоянии.

На фиг. 1 даны соответствующие графики длительной прочности в логарифмических координатах (здесь и в дальнейшем: 1 — одноосное растяжение, 2 — чистое кручение, 3 — кручение с растяжением) стали 1X18N12T при температуре 610°, из которых видно, что при использовании σ_1 точки, соответствующие чистому кручению, располагаются ниже точек для одноосного растяжения (фиг. 1, а). Если за характеристику напряженного состояния принять интенсивность напряжения σ_i , то точки, соответствующие чистому кручению, находятся выше точек для одноосного растяжения (фиг. 1, б).

Аналогичный результат получен при обработке экспериментальных данных для стали перлитного класса 15X1MФ.

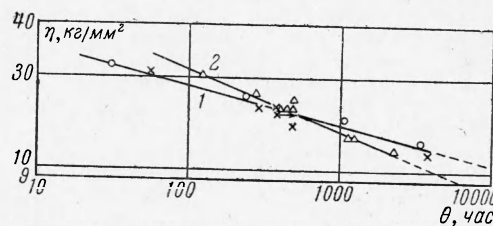
Построение графиков длительной прочности в координатах $\lg \eta$ и $\lg \theta$, где θ — время до разрушения в часах,

показало, что точки, соответствующие испытаниям при разном напряженном состоянии, располагаются вблизи одной общей прямой (фиг. 2)

Уравнение прямой длительной прочности в плоскости координат $\log \eta$, $\log \theta$ определялись дважды: по результатам испытаний при одноосном растяжении и по данным опытов при совместном действии растяжения и кручения. По полученным уравнениям вычислялись значения пределов длительной прочности при сроке службы 10000 и 100000 часов (σ_{10^4} и σ_{10^5}).

В результате расчетов для стали 15X1MФ при одноосном растяжении было получено $\sigma_{10^4} = 13.3 \text{ кг/мм}^2$ и $\sigma_{10^5} = 9.6 \text{ кг/мм}^2$, а при сложном напряженном состоянии оказалось $\sigma_{10^4} = 13.7 \text{ кг/мм}^2$ и $\sigma_{10^5} = 9.7 \text{ кг/мм}^2$.

Для аустенитной стали 1X18N12T было получено соответственно 10.4 и 7.7 кг/мм², 8.6 и 5.5 кг/мм².



Фиг. 2

Таким образом, полусумма $\eta = 1/2 (\sigma_1 + \sigma_i)$ может быть критерием, который дает некоторую возможность оценивать сопротивление длительному разрушению в условиях сложного напряженного состояния по результатам испытаний на одноосное растяжение с ошибкой, не превышающей 30%, что согласуется с данными В. П. Сдобырева [3].

Отметим, что этот критерий длительного разрушения, по-видимому, не лишен физического смысла: величина интенсивности напряжения σ_i характеризует энергию сдвиговой деформации, которая предшествует разрушению и создает благоприятные условия для разрыхления металла [5], т. е. приводит к ослаблению межатомных сил связи; первое главное нормальное напряжение σ_1 ответственно за нарушение указанных связей, т. е. под действием наибольшего растягивающего напряжения происходит разрыв сплошности и появление очагов разрушения.

Однако в рассмотренном критерии не оправдан выбор сочетания σ_i и σ_1 и не ясна роль коэффициента 0.5. Применение этого критерия не решает полностью вопроса оценки жаропрочных свойств при сложном напряженном состоянии.

Анализ результатов испытаний в условиях сложного напряженного состояния позволяет высказать предположение, что обнаруженное совпадение результатов расчета по η может не всегда иметь место при испытании различных материалов. Действительно, сопоставление данных испытаний при одноосном растяжении с соответствующими результатами опытов при сложном напряженном состоянии показало следующее. Переход к сложному напряженному состоянию для одних материалов (или одних условий опыта) повышает сопротивление ползучести, для других материалов (или других условий опыта) — понижает (см., например, [6]).

Отмеченное разнообразие в поведении реальных материалов не может быть предсказано критерием $\eta = 1/2 (\sigma_1 + \sigma_2)$.

Из обзора многих опубликованных работ по изучению ползучести в сложном напряженном состоянии вытекает, что при действии только одного скручивающего момента, по-видимому, отсутствует осевая ползучесть.

В то же время расчетами напряженного упругого цилиндра установлено, что при больших углах крутки происходит сжатие его по оси: при этом плоские поперечные сечения цилиндра искажаются, так как слои, расположенные вблизи оси и у поверхности цилиндра, имеют деформацию разных знаков [7,8]. Кроме того, кратковременные испытания при нормальной температуре показали, что при значительном пластическом скручивании цилиндрических стержней имеет место осевое удлинение, достигающее нескольких процентов [9, 10].

Следовательно, в условиях ползучести также можно ожидать осевую деформацию скрученных стержней. В связи с этим в данном исследовании производили измерение деформации в осевом направлении во всех случаях даже, когда испытания проходили в условиях приложения одного крутящего момента. Необходимо отметить, что в машине ИП-2 и ИП-4М при всех испытаниях на кручение образцы испытывали небольшое растяжение ($\sigma \leq 0,3 \text{ кг/мм}^2$) от веса нижнего захвата и нагружающего узла. Однако в условиях одноосного растяжения при напряжениях $1-2 \text{ кг/мм}^2$ в исследуемых сталях при рассматриваемых температурах испытания и длительности опыта 1000—4000 час., не обнаружено явления ползучести. Кроме того, при испытаниях на ползучесть (с малыми нагрузками) скручивающей силой на тех же машинах не удалось обнаружить заметного осевого удлинения. Следовательно, следует считать, что наличие растягивающего напряжения $\sigma \leq 0,3 \text{ кг/мм}^2$ не может вызвать осевой ползучести.

Вместе с тем при испытании на длительную прочность в условиях чистого кручения, когда имели место большие углы закручивания ($\gamma \geq 10\%$), осевая ползучесть наблюдалась.

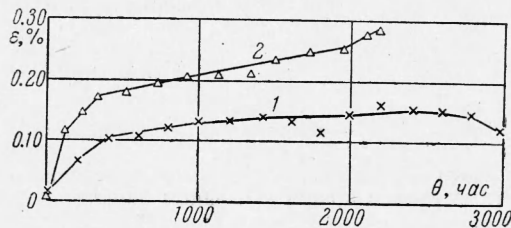
На фиг. 3 приведены первичные кривые осевой ползучести в случае приложения к образцу одного крутящего момента: 1 — аустенитная сталь при $\tau_{xy} = 8 \text{ кг/мм}^2$, $\theta = 3867 \text{ час}$; 2 — перлитная сталь при $\tau_{xy} = 12 \text{ кг/мм}^2$, $\theta > 2174 \text{ час}$.

По виду первичных кривых можно предположить, что при чистом кручении в процессе испытания на длительную прочность происходит потеря устойчивости трубчатых образцов. Потеря устойчивости при локальном скручивании приводит к сокращению длины рабочей части трубчатого образца, что перекрывает удлинение от осевой ползучести, в связи с чем на первичных кривых (фиг. 3) появляется перегиб и наблюдается кажущееся затухание осевой ползучести.

Исследованные стали имели различное сопротивление деформированию, что сказалось на величине суммарной деформации, предшествующей разрушению. Более хрупкой оказалась сталь перлитного класса 15X1M1Ф.

Образцы более хрупкой стали имеют большую устойчивость при длительном разрыве в условиях чистого кручения, чем образцы вязкой стали. Можно полагать, что потеря устойчивости образцов стали 15X1M1Ф имела место по истечении 80—90% времени до разрушения при данном режиме испытания, т. е. продолжительность испытания образцов с измененным сечением не превышала 10—20% всей длительности испытания. Потеря устойчивости образцов из аустенитной стали 1X18H12T, очевидно, имеет место по истечении 30—40% времени до разрушения, а иногда и раньше. Таким образом, ряд образцов значительную часть времени испытывался при неконтролируемых напряжениях, что снижает надежность оценки их долговечности.

Интересно отметить, что на более хрупкой перлитной стали величина пластической деформации осевой ползучести при чистом кручении больше, чем на пластичной стали аустенитного класса 1X18H12T (фиг. 3).



Фиг. 3

Проведенный анализ экспериментальных данных позволяет высказать предположение о том, что при испытании на длительную прочность под действием одного крутящего момента наблюдается заметное осевое удлинение рабочей части образца. Уточнение этого предположения требует постановки специальных опытов на ползучесть при сложном напряженном состоянии в установках, позволяющих осуществить чистое кручение без малых добавок растягивающей силы и исключающих возможность появления изгибающего момента. В опытах такого рода необходимо особое внимание уделить изучению анизотропии исследуемого материала в исходном состоянии. В качестве объекта исследования должны быть выбраны образцы из малопластичного материала, что позволит исключить влияние потери устойчивости.

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы.

1. Возможность использования критерия длительной прочности в виде полусуммы интенсивности напряжения и первого главного нормального напряжения $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ подтвердилась испытаниями на длительную прочность стали аустенитного класса 1X18N12T и стали перлитного класса 15X1M1Ф.

2. Определение времени до разрушения при сложном напряженном состоянии следует производить при помощи формулы

$$\theta = A \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^n$$

Здесь A , n — постоянные материала, определяемые по результатам испытания при одноосном растяжении.

Экстраполяция экспериментальных данных на большие сроки службы металла допустима только при межзеренном характере разрушения.

3. Испытаниями на длительную прочность при чистом кручении, когда разрушению предшествуют деформации $\gamma \geq 10\%$, обнаружено удлинение рабочей части образцов и построены соответствующие первичные кривые для первого и второго, а в одном случае частично для третьего этапов осевой ползучести.

Обнаруженный факт наличия осевой ползучести при действии одной скручивающей силы требует тщательной проверки путем проведения испытания различных материалов на усовершенствованных установках.

Поступила 5 VIII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Johnson A. S., Frost N. E. Note on the fracture under complex stress creep conditions of an 0.5% molybdenum steel at 550°C, and a commercially pure copper at 250°C, NPL, 1954, 31 May — 2 June.
2. Сдобырев В. П. Длительная прочность сплава ЭИ-437Б при сложном напряженном состоянии. Изв. АН СССР, ОТН, 1958, № 4.
3. Сдобырев В. П. Критерий длительной прочности для некоторых жаропрочных сплавов при сложном напряженном состоянии. Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1959, № 6.
4. Трунин Н. И., Митрофанов В. Г., Нистратов П. Д., Мариненко Л. С. Машина для испытания материалов на длительную прочность при кручении с растяжением. Филиал ВИНТИ, тема 32, 1957, № 17—57—87/8.
5. Трунин И. И., Миркин И. Л. Исследования разрушения стали при ползучести. Машгиз, Металловедение и обработка металлов, 1958, № 11.
6. Трунин И. И. Ползучесть жаропрочной стали при сложном напряженном состоянии. ПМТФ, 1962, № 5.
7. Ишлинский А. Ю. О напряженном состоянии упругого цилиндра при больших углах крутки. ПММ, 1943, т. VII, вып. 7.
8. Риз П. М. О некоторых вторичных явлениях при кручении круглого цилиндра. Тр. ЦАГИ, 1939, вып. 408.
9. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М., ИЛ, 1954.
10. Афондик Л. Г., Бессонов В. Г. О пластическом кручении цилиндрических стержней. Metallurgizdat, Заводская лаборатория, 1950, № 2.