

УДК 539.4:629.7.015.4:669

## ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРЕДЕЛОВ УПРУГОСТИ ПО ДИССИПАТИВНОМУ РАЗОГРЕВУ МАТЕРИАЛОВ

В. И. Капустин, В. П. Гилета, Е. А. Терешин\*

Новосибирский государственный технический университет, 630092 Новосибирск

\* Новосибирский филиал Института физики полупроводников СО РАН

“Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники”,

630090 Новосибирск

E-mail: macler06@mail.ru

Приводятся методика определения условного предела упругости по диссипативному разогреву материала и результаты экспериментальных исследований этой характеристики при асимметричных периодических нагружениях сталей и сплавов.

Ключевые слова: напряжение, деформация, упругость, диссипативный разогрев, усталость.

**Введение.** При изучении процессов деформирования, разрушения, накопления повреждений в процессе усталости важно знать закономерности изменения напряжения предела упругости при асимметричном циклическом нагружении реальных металлов. Напряжение, при котором происходит переход от идеально упругого деформирования к неупругому, характеризуется условным пределом упругости. Как правило, условные пределы упругости определяются с использованием методов, основанных на измерении деформаций. Точность таких методов ограничена разрешающей способностью приборов, используемых для измерения максимальной разности полных деформаций при нагружении и разгрузке (равной  $10^{-5}$ ), которая зависит от величины неупругой деформации и ширины петли гистерезиса [1]. В экспериментах [1] предел упругости определялся как номинальная амплитуда напряжений симметричного цикла, при котором величина неупругой деформации за цикл равна разрешающей способности метода.

При определении предельных значений отдельных компонент тензора напряжений и соотношений между их предельными значениями, при превышении которых работа за цикл деформирования исследуемого материала не равна нулю, используются результаты косвенных измерений.

В данной работе условный предел упругости определялся по диссипативному разогреву материала при его циклическом нагружении. В качестве условного предела упругости принималась амплитуда напряжений цикла, при которой, например, в случае ступенчатого увеличения амплитуды напряжения цикла деформируемый материал рабочей части образца разогревался до заданной температуры. Очевидно, что при использовании этого метода изменение температуры рабочей части образца зависит от величины приращения амплитуды напряжения цикла и должно задаваться до начала эксперимента с учетом требуемой точности и чувствительности приборов, с помощью которых измеряется температура.

Целью данной работы является изучение влияния характеристики цикла напряжений  $\sigma_m$  (среднее напряжение) на условный предел упругости  $\sigma_a$  (амплитуда напряжений цикла) сталей и сплавов при одноосном напряженном состоянии.

При определении условных пределов упругости по диссипативному разогреву материала должно выполняться следующее условие: частота периодического нагружения такова, что при напряжениях ниже предела упругости имеет место адиабатическое упругое деформирование и справедливы соотношения [2]

$$\Delta T = \frac{E\alpha_L T}{\rho c_\varepsilon(1-2\nu)} \sum_{i=1,2,3} \varepsilon_{ii}, \quad \Delta T = -\frac{\alpha_L T}{\rho c_p} \sum_{i=1,2,3} \sigma_{ii}.$$

Здесь  $E$  — модуль упругости;  $\nu$  — коэффициент Пуассона;  $\alpha_L$  — температурный коэффициент линейного расширения материала;  $\rho$  — плотность материала;  $T$  — абсолютная температура в точке измерения;  $c_\varepsilon$ ,  $c_p$  — удельные теплоемкости материала при постоянных деформации и напряжении соответственно. В этом случае изменение температуры  $\Delta T$  элементарного объема материала линейно зависит от суммы изменений трех главных деформаций  $\sum_{i=1,2,3} \varepsilon_{ii}$  или напряжений  $\sum_{i=1,2,3} \sigma_{ii}$  и равно нулю за период циклического нагружения.

Если при нагружении предел упругости будет превышен, произойдет увеличение средней за цикл температуры образца. Таким образом, измеряя в эксперименте напряжение, вызывающее изменение средней температуры образца на заданную величину, можно определить условный предел упругости. Изменяя условные пределы упругости для различных соотношений амплитуд и средних значений каждой компоненты тензора напряжений, в пространстве главных напряжений можно построить поверхности, отделяющие область упругого деформирования реального материала от области, в которой имеют место эффекты неупругого деформирования, не проводя непосредственное измерение деформаций.

**1. Образцы и оборудование, используемые в эксперименте.** В настоящей работе определялись условные пределы упругости при асимметричном периодическом одноосном нагружении образцов из различных сталей и сплавов. В эксперименте использовались образцы разных форм и размеров. Форма рабочих частей и точность изготовления образцов были такими же, как и у образцов, используемых при определении предела выносливости материала.

Исследования усталостных характеристик и неупругих свойств материала выполнялись на сервогидравлической испытательной машине фирмы “MTS” (максимальное усилие равно 100 кН), позволяющей проводить эксперименты в диапазоне частот нагружения от 0,1 до 20 Гц и обеспечивающей деформирование образцов без кинематических ограничений при мягком режиме и гармоническом цикле периодического нагружения. Деформации образцов измерялись с помощью экстензометра фирмы “MTS” с базой 25 мм.

Для измерения температуры образца использовалась тепловизионная камера с матричным болометрическим приемником фирмы “Indigo” (США). Температурное разрешение, характеризуемое минимальной разностью определяемых радиационных температур абсолютно черных тел при комнатной температуре, равно 80 мК.

Применение тепловизора обусловлено его преимуществами по сравнению с другими приборами и возможностью бесконтактного постоянного наблюдения и регистрации температурных процессов на относительно больших площадях.

При определении приращения температуры рабочей части образца с помощью тепловизора выполнялись действия, обеспечивающие необходимое линейное разрешение и исключающие случайные ошибки, обусловленные влиянием заранее неизвестных отражающей и преломляющей способностей материала образца, учитывающие и устраняющие влияние неоднородности теплового поля на точность измерения температуры образца.

Температура измерялась в центре рабочей части образца — месте ее наибольшего изменения.

**2. Методика определения условного предела упругости.** Для определения условных пределов упругости материала при асимметричном периодическом нагружении образцов использовался способ, предложенный в работе [3]. В качестве условного предела упругости материала принималась амплитуда номинального напряжения, измеренная в тот момент, когда при заданном среднем напряжении цикла и ступенчатом увеличении амплитуды напряжения приращение температуры рабочей части образца составляло 0,2 К.

Величина условного приращения температуры (0,2 К) превышала разрешающую способность тепловизора в 2,5 раза и была постоянной в серии экспериментов.

Зависимость условного предела упругости от характеристики цикла напряжений в эксперименте определялась в следующей последовательности:

1. В образце создавалось среднее напряжение путем квазистатического нагружения.
2. Образец нагружался периодической нагрузкой. Амплитуда нагрузки увеличивалась ступенчато от нуля до значения, при котором начинался разогрев рабочей части образца.
3. После того как рабочая часть образца разогревалась до заданной температуры, измерялись максимальная и минимальная нагрузки на образец, определялось значение номинального напряжения в образце — условного предела упругости.
4. Амплитуда нагрузки уменьшалась до нуля.
5. В образце создавалось более высокое среднее напряжение цикла (принадлежащее заданному интервалу значений) путем нагружения статической нагрузкой. Затем образец нагружался периодической нагрузкой в соответствии с п. 2, и определялся предел упругости материала в соответствии с п. 3. Таким образом исследовался весь заданный интервал средних напряжений асимметричных циклов.

**3. Результаты испытаний.** На рис. 1 в координатах Смита, принятых при построении диаграмм предельных напряжений усталости, представлена диаграмма условных пределов упругости, полученная для сплава Д16АТ с использованием изложенной выше

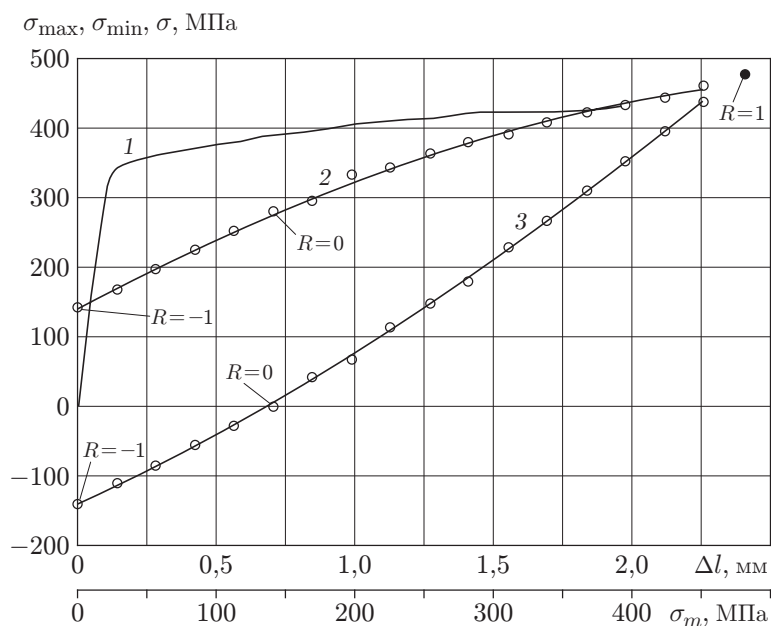


Рис. 1. Диаграммы деформирования  $\sigma(\Delta l)$  (1) и условных пределов упругости  $\sigma_{\max}(\sigma_m)$  (2),  $\sigma_{\min}(\sigma_m)$  (3) для образцов из сплава Д16АТ: темная точка — напряжение временного сопротивления разрыву образца

методики. По оси абсцисс отложены значения среднего напряжения  $\sigma_m$ , по оси ординат — значения максимального  $\sigma_{\max}$  и минимального  $\sigma_{\min}$  напряжений цикла, соответствующие амплитуде условного предела упругости  $\sigma_a$  и среднему напряжению  $\sigma_m$  в образце. Значения напряжений  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  вычислялись по формулам  $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ ,  $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$ . На рис. 1 условные пределы упругости обозначены точками. Экспериментальные зависимости аппроксимированы линиями регрессии. На рис. 1 представлена также диаграмма деформирования  $\sigma(\Delta l)$  при одноосном растяжении образца из того же сплава ( $\sigma$  — номинальное напряжение;  $\Delta l$  — приращение длины образца).

Сравнение диаграмм деформирования и условных пределов упругости на рис. 1 показывает, что при увеличении коэффициента асимметрии цикла напряжений  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  ( $R \in [-1; 1]$ ) характеристики условного предельного цикла упругости  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  стремятся к значению напряжения временного сопротивления материала  $\sigma_B = 480$  МПа.

Кроме того, на диаграмме условных пределов упругости можно выделить два участка. Первый участок  $R \in [-1; 0]$  характеризуется постоянной амплитудой условного предела упругости. На втором участке  $R \in (0; 1)$  амплитуда монотонно уменьшается и происходит накопление остаточных деформаций.

Из результатов сравнения диаграмм деформирования и условного предела упругости в случае симметричного цикла нагружения (точки  $R = -1$  на рис. 1) следует, что условный предел упругости значительно меньше предела текучести материала. При циклическом нагружении в случае  $R = 0$  разрушение образцов из сплава Д16АТ происходит при среднем количестве циклов, равном  $5,6 \cdot 10^4$ .

На рис. 2 в координатах Хейя, принятых при построении диаграмм предельных амплитуд напряжений усталости, представлены диаграммы условных пределов упругости сплавов на основе меди и алюминия и сталей. Видно, что при  $R > 0$  для всех исследованных материалов условные пределы упругости уменьшаются и при увеличении среднего напряжения цикла стремятся к нулю. Из рис. 2 следует, что стали 40Х2Н4МА и 18ХН4МА,

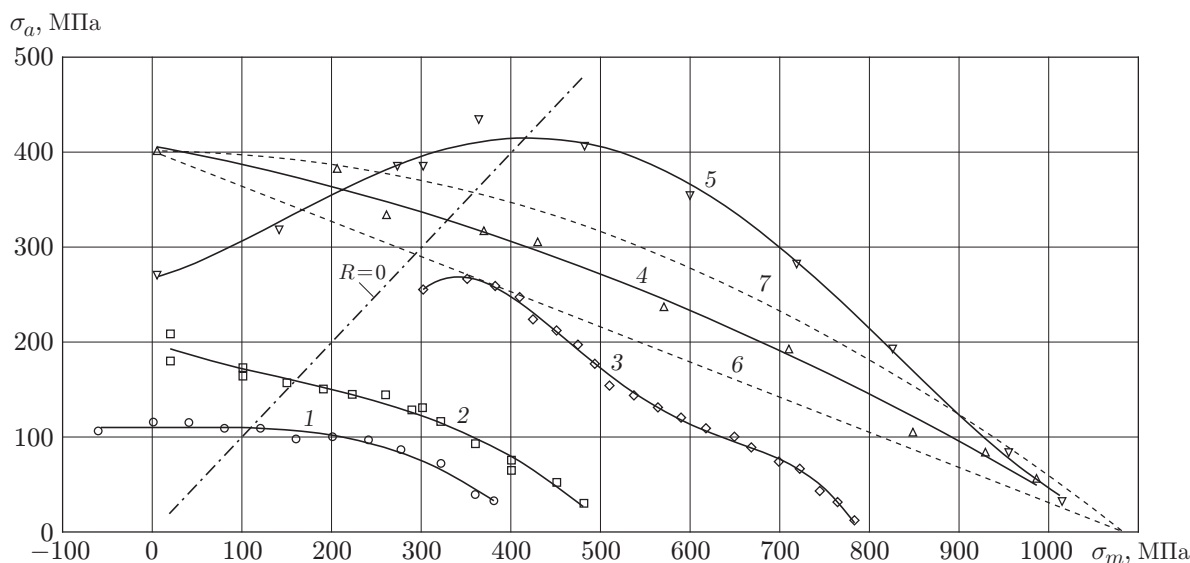


Рис. 2. Диаграммы пределов упругости для различных сплавов и сталей: точки — экспериментальные данные, сплошные линии — их аппроксимации; 1 — алюминиевый сплав Д16Т, 2 — медный сплав ЛС59, 3 — сталь 30ХГСА, 4 — сталь 40Х2Н4МА, 5 — сталь 18ХН4МА, 6, 7 — зависимости  $\sigma_a(\sigma_m)$ , полученные с использованием уравнений (6 — Гудмана, 7 — Герберга)

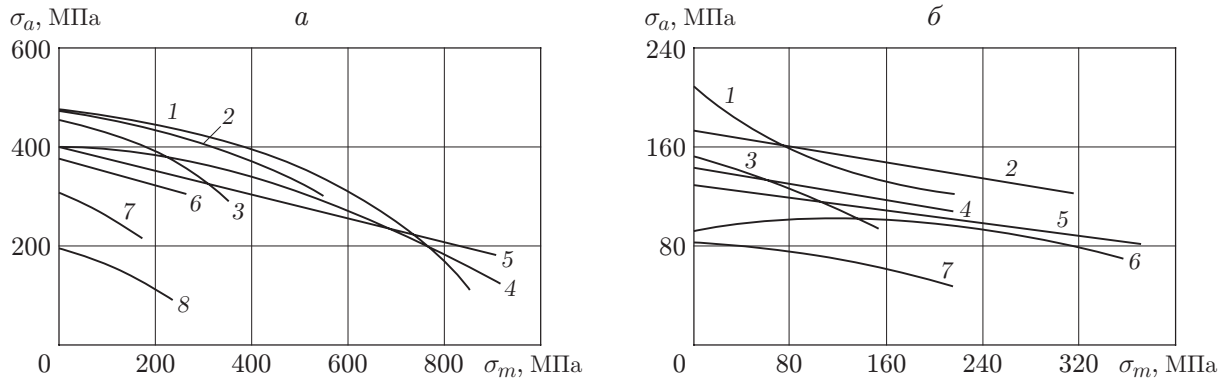


Рис. 3. Диаграммы предельных амплитуд напряжений:

*a* — сталей (1 — SAE4340; 2 — хромоникельмолибденовая сталь; 3 — сталь ( $\sigma_e = 890$  МПа); 4 — 18ХМВА; 5 — 40ХНМА; 6 — сталь ( $\sigma_e = 800$  МПа); 7 — сталь ( $\sigma_e = 650$  МПа); 8 — мягкая сталь); *б* — алюминиевых сплавов (1 — 755-T6; 2 — BS1476; 3 — ВД-17; 4 — 24S-T3; 5 — 7075-T6; 6 — 2014-T6; 7 — 6061-T6)

близкие по своим механическим свойствам при квазистатическом нагружении, имеют разные пределы упругости при циклических нагружениях с различной степенью асимметрии. Например, при симметричном цикле больший предел упругости имеет сталь 40X2H4MA, а при отнулевом (пульсирующем) цикле — сталь 18XН4МА.

Анализ зависимостей условных пределов упругости от среднего напряжения, полученных в широком диапазоне значений коэффициента асимметрии цикла, позволяет выявлять области, в которых материал сопротивляется периодическому нагружению без существенного изменения упругих свойств; например, для сплава Д16Т это область  $R \in (0; 1)$ .

На рис. 3 представлены диаграммы предельных амплитуд напряжений для различных сталей и алюминиевых сплавов [4. С. 179]. Каждая из этих диаграмм соответствует некоторому базовому числу циклов до разрушения материала. Из рис. 2, 3 следует, что диаграммы условных пределов упругости металлов подобны диаграммам предельных амплитуд цикла напряжений. Для иллюстрации сходства указанных зависимостей в случае легированной стали 40X2H4MA через точки ( $\sigma_m = 0$ ,  $\sigma_a = 400$  МПа) и ( $\sigma_m = 1080$  МПа,  $\sigma_a = 0$ ) проведены кривые зависимостей, полученных с использованием уравнений Гудмана и Гербера [4. С. 177]. В случае когда количество экспериментальных данных ограничено, эти уравнения, используемые для аппроксимации диаграмм предельных амплитуд:

$$\sigma_a = \sigma_{-1}(1 - \sigma_m/\sigma_B), \quad \sigma_a = \sigma_{-1}[1 - (\sigma_m/\sigma_B)^2],$$

не описывают свойства каждого материала.

Сходство диаграмм условных пределов упругости и пределов выносливости подтверждено данными, полученными в экспериментах со сплавами с различными химическим составом, условиями термообработки, историей нагружения (всего испытано 24 марки сплавов и сталей).

Как известно, предел упругости материала может изменяться после его деформирования при напряжении, превышающем предел текучести. На рис. 4 представлены экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что после нагружения образца из стали 30ХГСА напряжениями, превышающими предел текучести, по мере увеличения средних напряжений цикла условный предел упругости может как увеличиваться, так и уменьшаться. Кривая 2 получена после деформирования образца при максимальном напряжении 550 МПа. Из рис. 4 следует, что после нагружения исходного образца материала напряжением, превышающим предел текучести, условные пределы упругости изменяются. В ин-

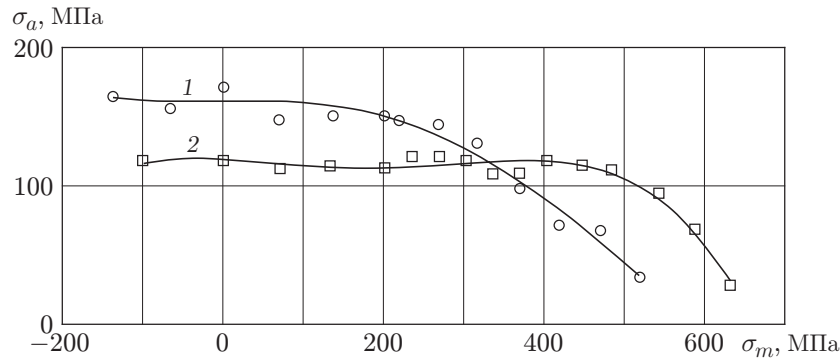


Рис. 4. Диаграммы условных пределов упругости при различной истории нагружения:

1 — нагружение напряжением, не превышающим предела текучести; 2 — нагружение напряжением, превышающим предел текучести

тервале изменения среднего напряжения цикла от 100 до 320 МПа амплитуда диаграммы условного предела упругости уменьшается, в интервале от 320 до 630 МПа — увеличивается. Такое изменение свойств материала, называемое разупрочнением и упрочнением, свидетельствует о сложности процесса деформирования материала в упругопластической области даже при одноосном нагружении.

**Заключение.** В работе приведены результаты испытаний на выносливость различных материалов при напряжениях, равных условному пределу упругости. Результаты испытаний свидетельствуют о том, что, несмотря на сходство диаграмм условных пределов упругости и диаграмм предельных напряжений, эти две характеристики различаются. Условные пределы упругости нельзя отождествлять не только с пределами выносливости, но и с пределами ограниченной выносливости металлов, так как при напряжениях, равных пределу упругости, во-первых, число циклов до разрушения оказывается зависящим от степени асимметрии цикла напряжений, во-вторых, сами условные пределы упругости (например, для стали 12Х18Н10Т) могут быть значительно (на 20 %) меньше пределов выносливости, полученных при числе циклов, равном  $10^8$ .

По-видимому, указанное несоответствие обусловлено тем, что амплитуда и среднее напряжение цикла оказывают различное влияние на кинетику повреждения материала при циклическом нагружении.

Условные пределы упругости могут быть использованы для получения приближенной оценки границ области применимости моделей упругого деформирования при периодическом деформировании реальных материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наук. думка, 1981.
2. Кобаяси А. Экспериментальная механика. М.: Мир, 1990. Кн. 2. С. 113–123.
3. Пат. 1821674 РФ, М. Кл G 01 N 3/32. Способ определения долговечности элементов конструкций / В. И. Капустин. Оpubл. 15.06.93, Бюл. № 22.
4. Троценко В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: Справ. / В. Т. Троценко, Л. А. Сосновский. Киев: Наук. думка, 1987. Ч. 1.