

### 3. Теоретическая оценка предела выносливости углеродистой стали, используя физическую теорию и структурно-энергетические молярные параметры материала, учет влияния температуры, частоты, амплитуды нагрузки.

**Цель.** Расчет количества циклов до разрушения  $N_*$  углеродистой стали двумя алгоритмами используя численные методы решения уравнения состояния деформированного твердого тела физической структурно-энергетической теории прочности (кратко СЭТ). На примере стали Ст45 выполнить теоретический расчет предела выносливости, оценить влияние различных механических параметров циклической нагрузки на усталость стали. Теоретически определить влияние частоты циклов нагрузки и температуры на число циклов до разрушения. Сравнение теоретического расчета предела выносливости со справочными данными стандартных испытаний углеродистой стали. Показать, на примере теоретических расчетов усталостных характеристик углеродистой стали, возможности физического теоретического метода оценки параметров усталости и долговечности твердых тел при переменных нагрузках.

#### Расчет предела выносливости.

Используя основное физическое уравнение теории для структурной функции материала [1, 2] выполним расчет долговечности материала при циклической нагрузке. Рассмотрим алгоритм численного решения уравнения состояния деформированного твердого тела (ДТТ) для случая циклической нагрузки и аналитический метод определения предельного значения структурного параметра (в момент разрушения) с помощью формул физической теории. Используем два метода оценки числа циклов гармоничной (синусоидальной) нагрузки до разрушения материала -  $N_*$ .

Первый метод представляет прямой расчет долговечности (числа циклов до разрушения), используя основное физическое уравнение структурно-энергетической теории прочности и полученные ранее начальные физические молярные параметры материала (см. Ч.1,2).

Второй метод, (условно обозначен как энергетический) построен на сравнении приращения структурного параметра за цикл нагрузки и предельного роста - максимального приращения структурного параметра до разрушения при постоянной статической нагрузке  $\sigma = \text{const}$  равной амплитуде цикла.

Результаты расчетов числа циклов до разрушения, сопоставим со справочными данными предела выносливости  $\sigma_{-1p}$  стали 45.

В каждом из методов необходимо решать основное уравнения состояния ДТТ (1) для расчета времени хрупкого разрушения материала, оно рассмотрено в 1й части данной статьи.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{RT}{\sigma(t)\tau_0} \exp \frac{\gamma(t)\sigma(t) - U_0}{RT}. \quad (1)$$

Из уравнения (1), интегрируя, можем находить функцию  $\gamma(t, \sigma, \dots)$ . Для этого задаем функцию  $\sigma(t)$ , Ра,  $|\sigma| > 0$ , граничные условия  $\gamma_0 = \gamma(t = 0)$ , определяем время до состояния

неустойчивости процесса – время разрушения  $t_*$ . Применим численный метод решения уравнения (1), используя стандартные программы MatLab, численный многошаговый метод решения Рунге-Кутты, переменный 1-го и 5-го порядка. Дополнительные алгоритмы программы для персонального компьютера позволяют вычислять физические параметры процесса деформирования, до момента разрушения. Формулы теории, использованные в программе, позволяют так же определить скорость необратимых условных деформаций материала, накопленные условные деформации в момент разрушения. Расчет выполняется для заданной функции  $\sigma(t)$ . По долговечности  $t_*$  определим число циклов до разрушения, зная постоянный период цикла нагрузки  $T_\sigma$ . Таким образом, мы аналитически моделируем усталостные испытания образца материала до разрушения. Задаем граничные условия (1), синусоидальный цикл растягивающих напряжений  $\sigma(t)$ , выполним расчет на различные параметры данной гармоничной нагрузки (частота, температура), с постоянной амплитудой размаха  $A_0$  напряжений. Определяем число циклов до разрушения материала  $N_*$  при разных амплитудах размаха напряжений. По полученным точкам строим кривые усталости  $A_0(N_*)$ , для постоянных значений периода  $T_\sigma$ , температуры циклической нагрузки. Если число циклов до разрушения превышает  $N_* > 1 \cdot 10^{6 \div 7}$ , полученное значение размаха напряжений рассматривается как предел выносливости  $\sigma_{-1p}$ . Рассмотрим подробнее методы оценки числа циклов до разрушения.

**Первый метод.** Структурный параметр материала  $\gamma(t, \sigma)$  является объективной физической и количественной мерой накопленных повреждений в материале, возникающих под действием переменных напряжений [2,3]. В первом методе мы используем прямой расчет долговечности  $t_*$  до хрупкого разрушения, через уравнение состояния (1), а затем определяем число циклов  $N_*$ . Используем для этого программу, разработанную для расчетов физических параметров деформирования и разрушения материалов на ПК, зависимости физической теории прочности [3]. В основе метода стандартная программа MatLab решения дифференциальных уравнений. Число циклов до разрушения  $N_*$  находим по формуле:

$$N_* = \frac{t_*}{T_\sigma}$$

Где,  $T_\sigma$  - период синусоидального цикла, Рис. 1, размах  $A_0=2B_0$ ,  $P_a$ ,  $B_0$ - амплитуда пульсации гармоничного цикла нагрузки истинных напряжений от 0 до  $\sigma_0$

$$\sigma(t) = \sigma_0(1.001 - \cos B_s t) , \quad B_s = 2\pi\nu , \quad (2)$$

Где,  $\nu$ , Гц - частота,  $\nu = \frac{1}{T_\sigma}$ ,  $s^{-1}$

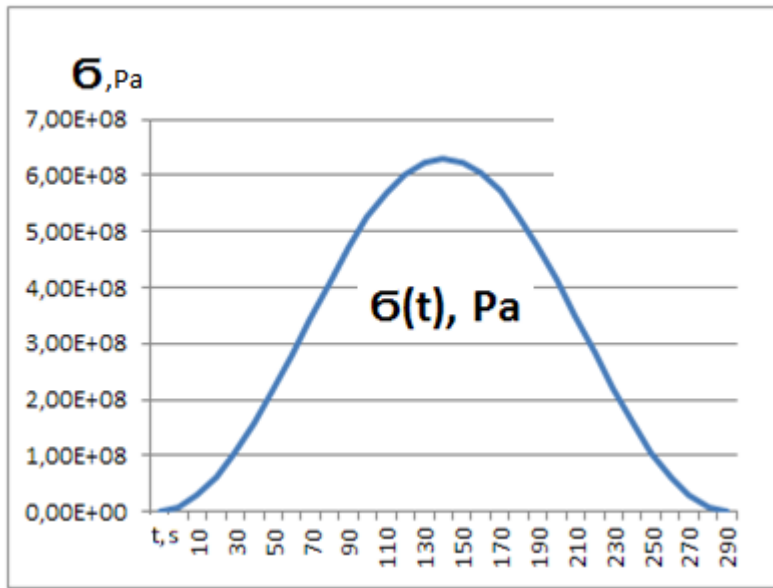


Рис.1. Пример  $\sigma(t)$  пульсации напряжений растяжения,  $A_0$  - размах напряжений  $A_0 = 2B_0$ ,  $B_0$  – амплитуда цикла:  $A_0 = 6,3E+6$ ,  $B_0 = 315.0E+6$ , Pa,  $\nu = 0,00333, 1/s$  – частота.  $t$ , s - время процесса.  $T_\sigma = 300$  s.

Пример расчета циклов до разрушения  $N_*$ , показан на Рис.2., с использованием программы разработанной для разных видов нагрузки. На интерфейс выводятся исходные параметры материала и основные результаты расчетов, графики результатов. В программе решается уравнение (1), определяется деформация и др., показаны графики функций молярной энергии  $W(t)$  и накопленной пластической деформации  $\epsilon_r(t)$ .

Первый метод простой в реализации, но в ряде случаев неудачных сочетаний начальных параметров, шага (аргумента) и выбранного периода вычислений бывает неустойчив. В алгоритм нашей универсальной программы, для решения дифференциального уравнения, были заложены различные стандартные математические процедуры программы «MatLab», их нужно выбрать в начале расчета. Эти требования связаны с особенностью поведения функции  $\gamma(t, \sigma, \epsilon)$  у точки  $t_*$ , вблизи которой возникает стремительный рост функции и процесс становится неустойчивым для расчета. На Рис.2 показан пример интерфейса исходных данных и вывод результата на ПК. При малых значениях циклов  $N_*$  (до 10000) и удачном соотношении параметров и требований к точности вычисления получаем устойчивый процесс. Значения числа циклов  $N_*$  по порядку величины согласуются с результатами вычислений вторым, энергетическим методом расчета, который изложен далее. В верхней части окна интерфейса показаны исходные параметры расчетов времени до разрушения материала H1 для

уравнения (1). В центре отображение процесса изменения молярной энергии, график синусоида, ступенчатой график - рост относительных необратимых деформаций. Расчет выполнен в рамках идеализированной физической модели однокомпонентного (моно молярного) материала.

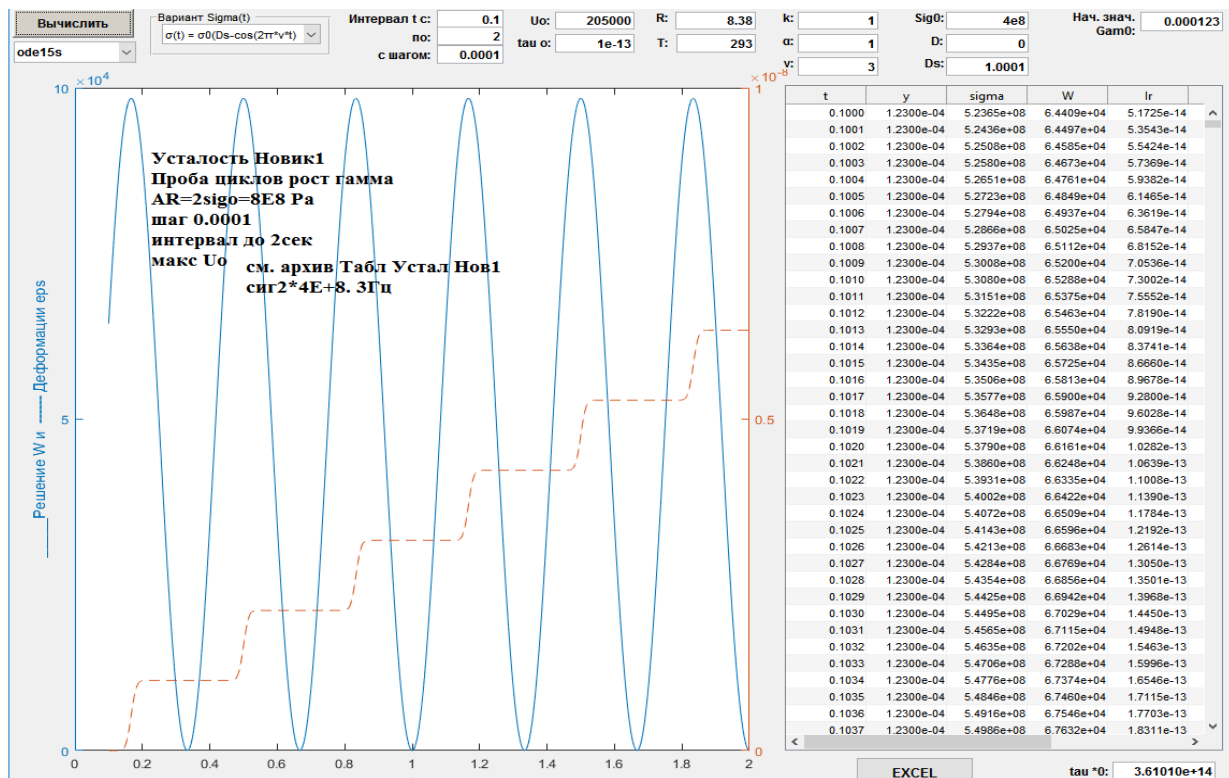


Рис.2. Интерфейс программы с исходными параметрами и результатами численного решения основного уравнения состояния (1) при циклических напряжениях. В правой части физические параметры состояния ДТТ по шагам вычислений.

Первый прямой метод расчетов числа циклов до разрушения по долговечности имеет очевидные достоинства: учитывается влияние истории процессов изменений напряжений и рост структурного параметра (физическая характеристика поврежденности), можно учитывать изменение температуры во времени, относительная простота вычислений. Алгоритм позволяет проводить расчеты произвольной формы функции напряжений заданной в аналитической или табличной форме. Этот алгоритм решения уравнения на основе модифицированного метода Эйлера, применялся ранее на ЭВМ серии ЕС, был устойчивым и надежным. Численный метод решения уравнения (1) позволяет интегрировать (решать основное уравнение) используя непосредственно запись (оцифрованную) реологической осциллограммы  $\sigma(t)$  действующих напряжений или упругих деформаций  $\varepsilon(t)$  в элементе конструкции, возможен процесс расчетов параметров прочности в режиме “on-lain”.

Поскольку в первом прямом численном методе, имеет место потеря устойчивости решения, был предложен второй, упрощенный энергетический метод расчета усталости.

**Второй метод (энергетический).** Этот метод оценки усталостных показателей стали использует непосредственно физическое свойство параметра  $\gamma(t, \sigma, \epsilon)$  количественно отображать поврежденность и изменение объемной (удельной) мощности разрушительного процесса, через скорость изменения плотности молярной энергии (молярная мощность). Макроскопический параметр  $\gamma(t, \sigma, \epsilon)$  характеризует процесс, происходящий на уровне микроскопического взаимодействия структурных единиц материала. На первом шаге выполним расчет накопленного физического повреждения материала  $\Delta\gamma(T, \sigma)$  на отрезке времени продолжительностью первого периода циклической нагрузки  $t = T_\sigma, s$ . Для этого используем численное решение (1), определим накопленные повреждения за один цикл. Вычисления по данному алгоритму устойчивы при разных формах циклической нагрузки и при различном заданном программой шаге приращения времени (он влияет на точность).

Структурный параметр Журкова, функция физических параметров ДТТ, напряжения и времени  $\gamma(\sigma, T, U_o, t)$  [1,3], через формулы теории он определяет значения молярной энергии объема деформированного твердого тела:

$$W_L = \gamma(t)\sigma \cdot \epsilon \cdot Gr(t) = \frac{\sigma Gr(t)}{E} \cdot J / \text{mol}$$

Где,  $\epsilon$  - упругие деформации,  $Gr(t) = 0,5E\gamma$  - структурно-энергетический потенциал материала.

Величина молярной энергии обусловлена напряжением, температурным полем и разрушающими флуктуациями, которые создают потоки энергии волн-квазичастиц прочности. Пространственная картина микроскопических потоков молярной энергии передает картину пространственных «связей» атомарного уровня в ДТТ. Поле напряжений и свойства параметра  $\gamma(t, \sigma, \epsilon)$  вместе формируют структурные энергетические конструкции материала. Поля потоков энергии волн-квазичастиц прочности, отображают особенности структурных микроскопических взаимодействий в объеме ДТТ. Если необратимые флуктуации разрушительного процесса высвобождают достаточное количество энергии, наблюдается изменение квазиравновесного состояния в относительно большом объеме ДТТ. Возникает измененный макроскопический процесс элементарных разрушений, наделенный новыми молярными энергетическими параметрами мощности, частоты, вектора потока работы и др. В объеме макросистемы конечных размеров, например испытуемом образце даже с постоянными термомеханическими параметрами (температура, напряжение), происходит такой непрерывный процесс, структурно-энергетических разрушений. Через определенный период времени, при постоянных термомеханических параметрах, всегда наступает состояние спонтанного хрупкого

разрушения материала, в теле конечных размеров. Это время является физическим параметром предельного состояния термомеханической системы  $t_*$  – долговечность.

В физической теории прочности молярный корневой объем квазичастиц прочности материала  $\gamma$ ,  $m^3/mol$ , представляет объективную энергетическую характеристику *термодинамической системы*, которую условно можно разделить на три составляющих: материал, как нано структурная конструкция, образец – макро конструкция (тело и границы поверхности), обобщенный механизм нагрузки разной природы. Элементы данной упрощенной физической системы, в совокупности представляют ДТТ, свойства которого непрерывно взаимосвязано эволюционируют во времени. Изменение свойств молярной энергии, в механике это разрушение «связей» структурных единиц ДТТ (атомов, ионов и др.) количественно отражается в статистическом термодинамическом параметре системы  $Gr$ . Проведенный анализ экспериментальных исследований позволил выделить некоторые основные, измеряемые физико-механические характеристики, объективно связанные с величиной  $Gr$ . В частности, рассмотрим такие параметры: формоизменение (относительные деформации), образование свободной поверхности ДТТ, время, напряжение, температура. Мы рассмотрим упрощенную модель системы. В общем случае, образование свободных поверхностей происходит на нескольких геометрических размерных уровнях (внешняя макро поверхность, внутренние поверхности структурных единиц, зерно, субзерно, кластеры, молекулы, дислокации, вакансии и др.). В нашей простой модели рассматривается необратимое изменение только внешней поверхности, таким образом, выполняется гипотеза непрерывности. Молярные физические параметры ДТТ позволяют определять скорость деформирования-формоизменения, локальное ускорение формоизменения (частная производная скорости относительных деформаций), скорость необратимого изменения плотности молярной энергии, молярный потенциал ( $j/mol$ ), молярную мощность и др. [1,2,3]. Важная роль в физической теории отводится физическим свойствам границ структурных состояний твердых тел, исходные физико-механические понятия о их свойствах изложены например в [8]. Физическое состояние границ структурных единиц связано с анизотропией потоков волновых микропроцессов, плотностью энергии, мощностью потока молярной энергии и др. в конгломерате структурных единиц твердого тела. Эти свойства влияют на прочность, долговечность, пластичность, трещинообразование, количество дислокаций и т.п.

Структурно-энергетический параметр  $\gamma$  представляет не формальную характеристику, как это имеет место в феноменологических методах и расчетах усталости, разрушения материалов, теперь имеем физическую меру поврежденности. Для неповрежденных чистых металлов, полимеров и др. относительно простых структурно стабильных материалов, в

кинетической концепции прочности Журкова, были определены экспериментально начальные значения параметра  $\gamma_0 = \gamma(0, \sigma)$ , при испытаниях на долговечность образца для постоянных напряжений. Однако этот метод в общем случае неприменим для сложных (композитов и др.) и нестабильных конструкционных материалов [9]. В Ч. 2 рассмотрен приближенный метод оценки начального значения параметра  $\gamma_0$ , построенный на физической теории и экспериментальных данных о пластичности металлов [2.3]. Для расчета текущего значения параметра  $\gamma(\sigma, t)$  используем зависимость, см. часть 1:

$$\gamma(t) = \frac{1}{\sigma} \left[ U_0 - RT \ln\left(\frac{\tau_* - t}{\tau_0}\right) \right] \text{ J/mol, } \sigma = \text{const.} \quad (4)$$

$$\text{Где, } \tau_* = \tau_0 e^{\frac{U_0 - W_{L0}}{RT}}, \quad W_{L0} = \gamma_0 \sigma, \quad \sigma = \text{const}, \quad T = \text{const} \quad (4a)$$

Метод построен на сравнении величин необратимого роста физического структурно-энергетического параметра материала  $\gamma(t)$ ,  $\text{m}^3/\text{mol}$ , под действием одинаковых по максимальному уровню напряжений, но разных по продолжительности их воздействия на материал. Для расчета числа циклов до разрушения  $N_*$  по энергетическому методу, сравниваем изменение структурного параметра  $\Delta\gamma$ , для двух видов нагрузки.

Первый вид нагрузки – постоянные напряжения  $\sigma = A_0 = \text{const}$ . По формуле (4) находим предельное значение структурного параметра  $\gamma_*(t_*)$ , в момент разрушения  $t_*$ , при действии постоянного напряжения  $\sigma = A_0 = 2\sigma_0 = \text{const}$ .

Вычислим максимальное приращение структурного параметра  $\Delta\Gamma = \gamma_*(\sigma, t_*) - \gamma_0$ , достигаемое при хрупком разрушении образца материала в момент времени  $t_*$  постоянными напряжениями, равными по величине размаху постоянного заданного цикла гармонической нагрузки  $\sigma = A_0 = \text{const}$ .  $\gamma_*(t_*)$  - предельный параметр хрупкого разрушения данного материала (методика Журкова [10]).

Вторая нагрузка один цикл  $t = T_\sigma$  заданной формы Рис. 1, амплитуда-максимум цикла (размах) равна постоянным напряжения в первом случае  $\sigma = A_0$ .

Используя уравнение (1), находим приращение структурного параметра за период первого цикла  $t = T_\sigma$ . Величина приращения структурного параметра  $\Delta\gamma(T_\sigma)$  - накопленные разрушения, определяется изменение молярного корневого термодинамического потенциала

за один цикл  $\Delta Gr(T_\sigma) = \Delta\gamma(T_\sigma) \cdot E$ . Получаем меру количественного изменения внутренней энергии, как физической поврежденности материала  $\Delta Gr(T_\sigma)$  за один *первый* цикл  $t = T_\sigma$  нагрузки первоначально неповрежденного материала. Предполагая постоянным значение приращения молярного корневого потенциала  $\Delta Gr(T_\sigma)$  при постоянной амплитуде гармоничной нагрузки, до предельного состояния  $\gamma_*(t_*)$ , находим количество циклов нагрузки необходимое для достижения уровня предельного роста при разрушении:

$$\Delta\Gamma = \gamma_*(N_*, t_*) = \Delta\gamma(T_\sigma) \cdot N_*$$

По существу рассмотрен энергетический метод [3], поскольку из (4) следует, что необратимое изменение параметра  $\gamma(t)$ , однозначно связано с изменением молярного энергетического корневого потенциала  $Gr$ . Накопленные повреждения необратимо изменяют величину плотности молярной энергии, коревой молярный потенциал ДТТ.

Рассмотрим расчет детально, по шагам на примере стали 45.

Предельное значение структурного параметра  $\gamma_*(t_*)$ , позволяет определить величину запаса молярного корневого потенциала неповрежденного материала (запас энергии прочности), поскольку  $\Delta\Gamma$  (мЗ/mol) - количественная мера необратимых структурных, физических изменений ДТТ в результате деформирования и разрушения. Эта величина количественно определяет необратимые изменения в материале (точнее всей термодинамической системы), в т.ч. необратимое рассеяние молярной энергии при разрушении ассоциированных связей атомов между структурными единицами. Эта величина однозначно связана с другими физико-механическими параметрами ДТТ, в частности абсолютной температурой, энтропией, необратимым формоизменением и др.

Определим число циклов до разрушения по формуле

$$N_* = \frac{\Delta\Gamma}{\Delta\gamma(A_0, T_\sigma)}$$

В таблице 1 показан пример расчета одного значения числа циклов до разрушения  $N_*$  для заданного значения размаха напряжений растяжения  $4,40E+08$ , Па, частоты циклов 3,Гц, температуры тела 293, К, ( $20^\circ C$ ).

Вычисления происходят в три этапа:

А). Расчет повреждения, приращения  $\gamma(t)$  за первый цикл нагрузки  $\Delta\gamma(T_\sigma)$ .



В). Расчет максимального приращения структурного параметра  $\Delta\Gamma(\sigma, t^*)$  для заданного постоянного напряжения  $\sigma = \text{const}$ , равного амплитуде размаха гармонического синусоидального цикла напряжения  $\sigma = A_0 = 2\sigma_i$ ,  $\rho_a$ ,  $\sigma_i$  – амплитуда цикла синусоиды напряжений  $\sigma(t)$ , Рис1.

С). Расчет циклов до разрушения  $N^* = \Delta\Gamma / \Delta\gamma(T\sigma)$ .

Таблица.1

Но.	$U_0$ , J/mol	$\gamma_0$ , 	T, K	$\tau^*$ , s	$\gamma^*(0,98^*\tau^*)$ , m3/mol	$\beta_i = \gamma^* - \gamma_0$ , m3/mol
1,40E+08	,38E+05	23E-04	3E+02	16E+01	6,73E+01	00014483032107

Частота, $\nu$ Гц	$\gamma^*(T=t)$ , m3/mol.	$\Delta\gamma = \gamma^* - \gamma_0$	$N^*(\beta_i) = \Delta\Gamma / \Delta\gamma$
3,00	0,0001230034491186	0000034491186	6,33E+03

В Таблице 2 даны результаты расчетов количества циклов до разрушения материала при пульсирующей нагрузке растяжением (12). Расчеты выполнены для трех значений частоты нагрузки 3, 70, 500 Гц, температуры 293 (20), 323(50), 343 (70) T°K, в скобках температура C°.

Полученные теоретически физические параметры сплава Н1 и последующее моделирование стандартных испытаний сплава на растяжение и усталостную прочность, удовлетворительно согласуются с величиной предела выносливости  $\sigma_{-1p}$  при циклическом растяжении материала. Для изгиба расчет не производился.

Механические и усталостные характеристики материала, которые получены нами теоретически, используя физические параметры и зависимости теории, близки по значениям параметрам стали 45. Фактически мы в расчетах использовали реологические диаграммы испытаний растяжением стали 45, предоставленные НИИ ПП им. В.Г. Писаренко НАН Украины (см.Ч.2).

Ранее мы установили путем сравнения параметров прочности, что исследуемый материал сплав Н1 близок по характеристикам стали 45. Справочная характеристика предела выносливости стали 45 (ГОСТ 1497-84)  $\sigma_{-1p} = 190-250$  МПа (пульсации растяжения) [4].

Характер влияния различной частоты и температуры на значение предела выносливости стали можно видеть на Рис. 3 и Табл.1. Расчет показал, что наблюдается рост предела выносливости при увеличении частоты с 3 до 500Гц, приблизительно на 10%. В доступных источниках отмечается различный, иногда противоречивый характер влияния частоты на предел выносливости при испытаниях, в частности в обзорной статье [11]. В большинстве случаев, с ростом частоты предел выносливости растет. Например, для сплава 2024Т3 установлен рост предела выносливости на 5-12%, при увеличении частоты с 8 до 1000Гц. В нашем случае, Рис.3, Табл.1, расчеты показали увеличение предела выносливости стали 45

приблизительно на 10% при увеличении частоты с 3 до 500Гц. Такой результат можно считать удовлетворительным.

**Таблица1 результатов теоретического расчета усталостных показателей сплав Н1 (ст45)**

Энергия активации разрушения $U_0, \text{J/mol}$	Структурный параметр $\gamma_0, \text{m}^3/\text{mol}$	Температура $T, \text{K}$	Частота циклов $\nu, \text{Гц}$	Размах $A_0=2\sigma_0, \text{Pa}$	$N^*(\sigma_i)$ циклы	$\lg N^*(\sigma_i)$ циклы
138000	0,000123	293	3	4,40E+08	6329,246	3,80E+00
138000	0,000123	293	3	3,30E+08	1356039	6,13E+00
138000	0,000123	293	3	2,20E+08	2,31E+08	8,36E+00
138000	0,000123	343	3	4,40E+08	39,02716929	1,59E+00
138000	0,000123	343	3	3,30E+08	3807,378806	3,58E+00
138000	0,000123	343	3	2,20E+08	530000,07	5,72E+00
138000	0,000123	293	70	4,40E+08	151735,7	5,18E+00
138000	0,000123	293	70	3,30E+08	31859917	7,50E+00
138000	0,000123	293	70	2,20E+08	5,71E+09	9,75E+00
138000	0,000123	323	70	4,40E+08	6009,984	3,78E+00
138000	0,000123	323	70	3,30E+08	755534,6	5,87E+00
138000	0,000123	323	70	2,20E+08	71290341	7,85E+00
138000	0,000123	343	70	4,40E+08	952,2224	2,98E+00
138000	0,000123	343	70	3,30E+08	89296,45	4,95E+00
138000	0,000123	343	70	2,20E+08	5519048	6,74E+00
138000	0,000123	343	500	4,40E+08	5829,235	3,76E+00
138000	0,000123	343	500	3,30E+08	545967,4	5,73E+00
138000	0,000123	343	500	2,20E+08	377375	5,73E+00
138000	0,000123	343	500	2,20E+08	85	7,57E+00

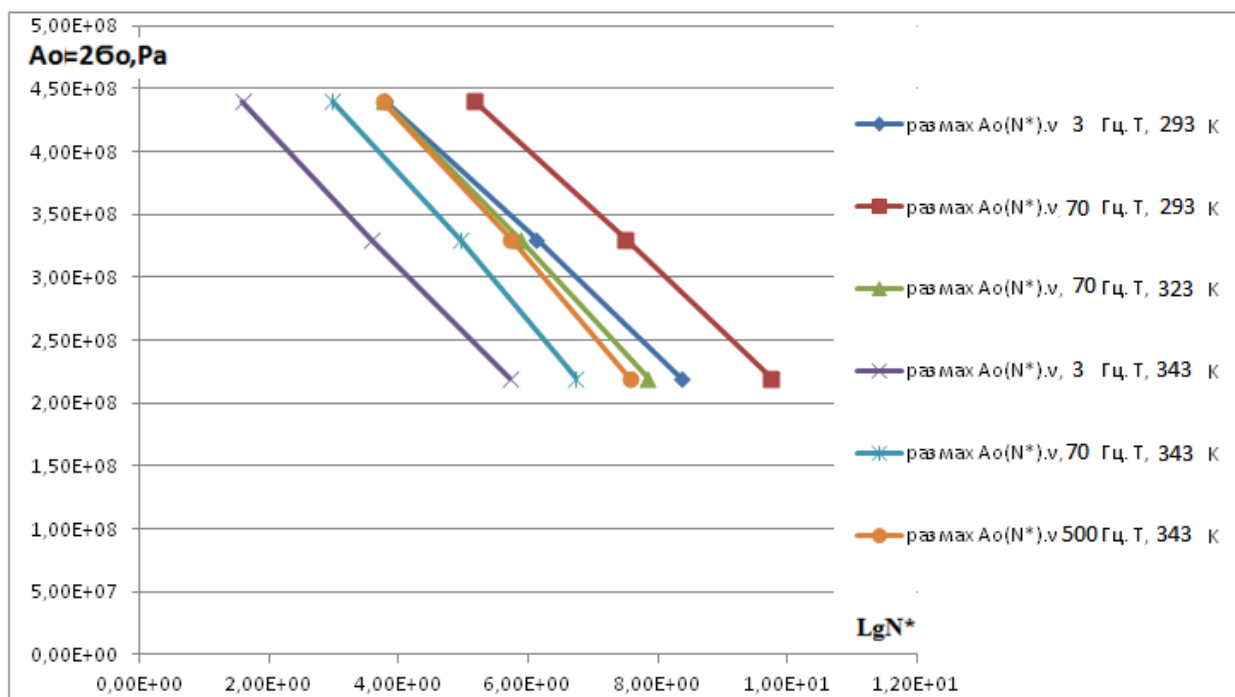


Рис.3. Зависимости амплитуды размаха циклических напряжений растяжения  $A_0$  от числа циклов до разрушения материала -  $A_0(N_*)$ , по данным расчета из Таблицы: 1. Частоты 3, 70, 500 Гц.

Температура: 293 (20), 323 (50), 343(70) °К, в скобках температура по Цельсию. Циклическое одноосное растяжение. Форма напряжений цикла  $\sigma(t) = \sigma_0(1.001 - \cos B_s t)$

При росте температуры с 20 °С до 70 °С расчет показал снижение предела выносливости стали 45, приблизительно на 45%, для частоты 3Гц, Рис. 3, Табл.1. Характер понижения предела выносливости сталей и сплавов с увеличением температуры в целом согласуется с экспериментально наблюдаемыми свойствами [8,11]. Но подходящих достоверных данных, соответствующих нашему материалу, диапазону температуры, частотам нагрузки, автор данной статьи не нашел.

### **Выводы.**

Используя подход физической структурно-энергетической теории прочности и начальные молярные физические параметры деформированного твердого тела, аналитически моделируя усталостные испытания материала, определен предел выносливости  $\sigma_{-1p}$  углеродистой стали 45. Выполнена оценка влияния частоты нагрузки, температуры на предел выносливости. Результаты расчетов согласуются со справочными характеристиками материала, подтверждают адекватность предложенной физической модели.

Располагая произвольной формой записи значений истинных напряжений  $\sigma(t)$  реологической диаграммы растяжения образца материала (осциллограммой, таблицей и др.), а так же данными деформаций  $\varepsilon(t)$ , процесса деформирования до разрушения, можно расчетом определить стандартные характеристики по ГОСТ (ISO).

**Данная статья завершает обзор результатов рассмотренных в Ч.1,2,3, посвященных общей теме. Поэтому можно подвести некоторый итог.**

Располагая исходными механическими характеристиками материала по ГОСТ (ISO), можно определить расчетом, измененные параметры прочности  $\sigma_B, \sigma_{02}, \sigma_{-1}$ , материала, которые учитывают влияние накопленных повреждений, историю нагрузки, на стандартные показатели прочности, усталости, долговечность, для этого достаточно использовать полученные зависимости, программы и алгоритмы расчета на ПК.

Подобным образом, располагая в любой форме записью пошаговых значений истинных напряжений  $s(t)$ , действовавших до данного момента времени в материале, теоретически возможно определить его фактические достигнутые физические параметры прочности, далее определить новые стандартные значения механических предельных параметров поврежденного материала.

Исследуя область элемента конструкции (очаг), оценивая зависимость истинных напряжений  $s(t)$  в ней, можно оценить прогнозируемую долговечность  $t_*$ , найти напряжения хрупкого разрушения, скорость и величину пластических деформаций в рассмотренной очаге, другие физические параметры.

Исходя из обобщения результатов, данный физический подход можно применить для приближенного теоретического определения начальных физических молярных параметров материала по реологическим диаграммам, полученным в *стандартных испытаниях* на предел

пропорциональности (текучести) и предел прочности. Для этого необходимо одновременно с обычной диаграммой  $\sigma(\varepsilon)$  построить реологические функции процесса: истинные напряжения от времени  $S(t)$ , истинные деформации  $\varepsilon(t)$  до момента разрушения при растяжении. Для этого следует иметь точные данные, которые в литературе противоречивы, не систематизированы, о физических параметрах: модуль упругости, коэффициент поперечных деформаций. В случаях существенного влияния процесса разогревания – теплообразования ожидаемой области разрушения, следует учесть изменение температуры материала.

Анализ экспериментальных реологических диаграмм показал, что точность полученных значений физических параметров в значительной степени зависит от качества диаграммы на первом этапе процесса (до уровня предела пропорциональности). Используемые экспериментальные данные, в виде таблиц контролируемых параметров, характеризуются большими отклонениями относительно некоторого среднего значения, возрастают погрешности измерений. В дальнейшем необходимы более устойчивые методы контроля деформационных параметров и большой объем статистического материала.

Результаты работы, изложенные в 1, 2, 3 пунктах статьи, позволяет предположить, что, используя метод построения обобщенной реологической диаграммы стандартных испытаний на растяжение, дополнив их справочными характеристиками, предел пропорциональности (текучести) и предел прочности, можно выполнить приближенную оценку молярных начальных параметров выбранного материала, без специальных реологических диаграмм. Стандартная процедура нагрузочного периода испытаний занимает 3-10 секунд, для обычных сталей. В нашем случае рассмотрена диаграмма растяжения до разрушения длительностью около 900 секунд. Далее, используя полученные начальные молярные параметры и разработанную нами программу ПК, можно выполнить приближенный расчет параметров усталостной прочности, долговечности материала при произвольной температуре, произвольной форме функции напряжений растяжения  $S(t)$ .

Для расчета хрупкого разрушения в условиях сложного напряженного состояния, с учетом истории изменений структурных параметров материала, необходимо ввести дополнительные уравнения связи молярных характеристик. Если главные напряжения или плотность упругой энергии превысили уровень соответствующий пределу пропорциональности, следует учесть так же влияние шарового тензора напряжений на скорость необратимых процессов разрушения (необратимых деформаций формоизменения)

Для учета влияния на деформирование и разрушение напряжений сжатия (отрицательные значения, шаровой тензор) необходимо использовать соответствующие дополнительные уравнения, учитывающие изменение молярных параметров состояния ДТТ по трем компонентам тензора главных напряжений, деформаций, в ряде случаев следует решить задачу по определению эффективной температуры процесса в активированном объеме.

Для разработки инженерной методики расчетов прочности и долговечности на основе предлагаемого физического теоретического подхода и методов численного решения задач, необходимо исследовать возможности данного метода на разных конструкционных материалах, усовершенствовать программу расчетов и методику обработки результатов накопленных статистических данных о физических и механических параметрах деформированного твердого тела.

Общепризнанные феноменологические теории прочности, обращаются к безразмерным величинам и формальным критериям, в отличие от них наш подход рассматривает физические параметры и свойства ДТТ. Материал образца при испытаниях представляется как идеализированная модель термодинамической корпускулярно-волновой макро системы, с определяемыми физическими параметрами. Новые кинетические параметры имеют связь с механическими характеристиками ДТТ и физическими свойствами материала, конструкции. Кинетические физические молярные параметры материала характеризуют процессы, накопления повреждений (дислокации, микродефекты), образование макроскопической свободной поверхности или внешней границы тела, необратимые деформации, скорость и мощность процессов разрушения и теплообразования. Рассматриваются объективные новые удельные физические энергетические параметры разрушительных процессов. Физические термомеханические статистические макропараметры материала характеризуют прочность и разрушение на уровне ассоциированных (коллективных) атомных взаимодействий структурных составляющих единиц (электрон, атом, решетка, молекула, кластер и др.). Посредством уравнений, формул теории можно решать обычные и углубленные теплофизические и др. прикладные задачи физики и механики ДТТ. Физические критерии и параметры, используя экспериментальные и теоретические методы, открывают возможность учитывать теоретически различные факторы (время процесса, сложное напряженное состояние, температуру, вибрации, радиации, и др. факторы), влияющие на свойства прочности, пластичности, долговечности материалов как физической среды, при переменных и сложнапряженных нагрузках разной природы. Такая возможность обоснована корпускулярно-волновой природой практически всех известных факторов (физических нагрузок) влияющих на прочность и долговечность. Некоторые физические факторы, влияющие на прочность материала конструкции: химические, коррозионные, электрические, структурно-физические, удалось моделировать, применяя обобщенные молярные энергетические характеристики термомеханической системы. Сама термомеханическая система условно может быть разделена на три составляющие. 1 - нано конструкции атомов, ионов, молекул и др. 2 – макроскопическое тело или конструкция, 3 – внешние нагрузки поля температуры, напряжений и др. В физическом методе можно обходиться без понятий предел текучести, прочности и т.п. Такой метод использован в работах М.Г. Петрова. Дальнейшая разработка и практическое применение физической модели ДТТ и теории в целом, задача этой статьи.

Автор этой статьи предлагает читателям совместное выполнение работ по развитию теории и методов решения практических задач. Предложения можно направить на адрес: [nasht@ukr.net](mailto:nasht@ukr.net)

## Литература

1. *Штырёв Н. А.* Деформирование и разрушение твердых тел с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности. // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Збірник наукових праць 5-ї Міжнародної конференції під заг. ред. В.В. Панасюка. 2014, Львів. ФМІ, Україна, с 63-70.
2. *Штырёв Н. А.* Деформирование и разрушение твердых тел при нестационарных нагрузках с позиций кинетической структурно-энергетической теории прочности.

- «Вибрации в технике и технологиях» ИПП им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, №1(77) 2015г, с.55-61.
3. Штырёв Н.А. Физические параметры и свойства деформированного твердого тела в структурно – энергетической кинетической теории прочности. Примеры решения задач прочности и усталости / Н.А. Штырёв «Энергия долговечности». №5. 2013г <http://energydurability.com>
  4. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов. «Наукова думка», Киев, 1975г, 704с.
  5. ГОСТ 1497-84. Государственный стандарт СССР, МЕТАЛЛЫ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ.
  6. ГОСТ 25.502-79 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
  7. Штырёв Н.А. Определение физических условий разрушения поликристаллических тел при нестационарном циклическом растяжении. Сборник научных трудов. Строительная механика корабля. г. Николаев, НКИ. 1987г., с. 74-84.
  8. Лариков Л.Н. Юрченко Ю.Ф. Структурные свойства металлов и сплавов. Тепловые свойства металлов и сплавов. Справочник. Киев. Наукова думка. 1985г. 457с.
  9. Петров М.Г. О деформировании и разрушении алюминиевых сплавов с позиций кинетической концепции прочности / М.Г. Петров, А.И. Равикович // ПМТФ. 2004г. Т.45. №1. 151-161 с.
  10. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Г. Томашевский. Наука. Москва , 1974г. 560с.
  11. Мыльников В.В. О ВЛИЯНИИ ЧАСТОТЫ ПРИЛОЖЕНИЯ НАГРУЗКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6 (часть 2) – С. 202-205