

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ В МАТЕРИАЛЕ ПРИ МЕЛКОСТУПЕНЧАТОМ НАГРУЖЕНИИ ОБРАЗЦА НА РАСТЯЖЕНИЕ

Савельев А.Н., Макаров А.В., Анисимов Д.О.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк

Ключевые слова: мелкоступенчатое нагружение, растяжение образца, волновая нагрузка, разрывная установка, математическая модель волнового процесса, управление эмиссионным процессом.

Аннотация. Для получения синергетического эмиссионного сигнала на основе дислокаций необходимо обеспечить с одной стороны процесс накачки в дислокационные структуры металла энергии, а с другой – совместный выход этой энергии в виде акустической эмиссии. Это может быть достигнуто путем ступенчатого нагружения металлического образца. При таком нагружении одна группа дислокаций заряжается энергией, а другая, достигнув энергетического порога, выходит на поверхность кристаллической структуры металла и излучает акустический сигнал. Дислокации, получившие потенциальную энергию на предшествующей ступени нагружения данного образца, реализуют эту энергию на последующем шаге в виде синергетической эмиссии. В результате формируется синхронная в силу этого, мощная периодическая акустическая волна, характеризующая напряженно-деформационное состояние кристаллов металла.

Синхронность эмиссионного излучения обеспечивает другая волна – деформационная, формируемая в процессе растяжения образца и распространяющаяся вдоль этого образца. Для оценки волновой части этого процесса разработана математическая модель и создано программное обеспечение, позволяющее оценить при мелкоступенчатом нагружении параметры волновой нагрузки в среднем сечении образца. Используя программу, в работе проведен численный эксперимент. Данный эксперимент показал, что путем варьирования ряда факторов можно менять величину волновой нагрузки в образце больше, чем на два порядка. Такой диапазон регулирования напряжений в продольной волне дает возможность обеспечить необходимый волновой процесс при реализации синергетически организованной акустической эмиссии.

EVALUATION OF THE DYNAMIC COMPONENT OF THE STRESS IN THE MATERIAL UNDER SMALL-STEP LOADING OF THE SPECIMEN IN TENSION

Saveliev A.N., Makarov A.V., Anisimov D.O.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Keywords: small-step loading, sample tension, wave loading, discontinuous installation, mathematical model of the wave process, control of the emission process.

Abstract. To obtain a synergistic emission signal based on dislocations, it is necessary to ensure, on the one hand, the process of pumping energy into the dislocation structures of the metal, and, on the other hand, the joint output of this energy in the form of acoustic emission. This can be achieved by stepwise loading of a metal sample. Under such loading, one group of dislocations is charged with energy, and the other, having reached the energy threshold, comes to the surface of the metal crystal structure and emits an acoustic signal. The dislocations that have received potential energy at the previous stage of loading of the given sample realize this energy at the next step in the form of synergistic emission. As a result, a synchronous, therefore, powerful periodic acoustic wave is formed, which characterizes the stress-strain state of metal crystals. The synchronism of the emission radiation is provided by another wave, a deformation wave, which is formed in the process of sample stretching and propagates along this sample. To evaluate the wave part of this process, a mathematical model has been developed and software has been created that makes it possible to estimate the parameters of the wave load in the middle section of the sample under small-step loading. Using the program in the work, a numerical experiment was carried out. This experiment showed that by varying a number of factors, it is possible to change the magnitude of the wave load in the sample by more than two orders of magnitude. Such a range of voltage regulation in a longitudinal wave makes it possible to provide the necessary wave process in the implementation of synergistically organized acoustic emission.

Предложенный в работах [1-3] метод оценки прочностных характеристик материалов, основанный на синергетически организованной акустической эмиссии, является одним из наиболее простых и доступных с точки зрения его реализации в производственных условиях. Основа этого метода заключается в следующем процессе. Во время ступенчатого нагружения

образца материала на его подвижном конце происходит приращение потенциальной энергии и формируется упругая волна. Возбужденные во время предшествующего шага нагружения дислокации под действием этой волны синхронно начинают свое движения. При выходе на поверхность кристалла дислокации формируют эмиссионный сигнал [4-8]. Синхронно испускаемый эмиссионный сигнал имеет достаточно высокую энергию, что позволяет фиксировать его параметры существующими на сегодняшний день приборами. Сложность реализации данного метода заключается в том, что в зоне фиксации эмиссионного сигнала существует еще один волновой процесс. Этот процесс определяется внешним мелкоступенчатым силовым воздействием на образец и, с одной стороны, должен обеспечивать коллективный дислокационный эмиссионный сигнал, а с другой – не мешать регистрации этого сигнала.

В данной статье ставится цель оценить возможности управления величиной динамической составляющей напряжения в материале от ряда факторов, определяющих реализацию метода синергетически организованной эмиссии волн напряжений. Для этого была создана математическая модель волнового процесса, на базе которой решены следующие задачи. Оценена степень влияния факторов на величину напряжения, создаваемого в процессе движения вдоль образца волны. В локальной зоне испытуемого образца установлен характер протекания волнового процесса. Оценено влияние факторов на движение волны и создаваемые деформации. Показаны пределы возможностей изменения напряжения в продольных волнах при возбуждении в металле синергетического эмиссионного сигнала.

Для решения поставленных задач в работе был рассмотрен режим нагружения образца (рис. 1) и сформировано математическое представление волнового процесса. Образец при составлении математической модели представлен в виде стержня. Один конец стержня жестко закреплен в зажиме прессы. На второй конец стержня действует импульсная нагрузка, нарастающая со скоростью v и обеспечивающая таким образом возникновение в образце упругой волны.

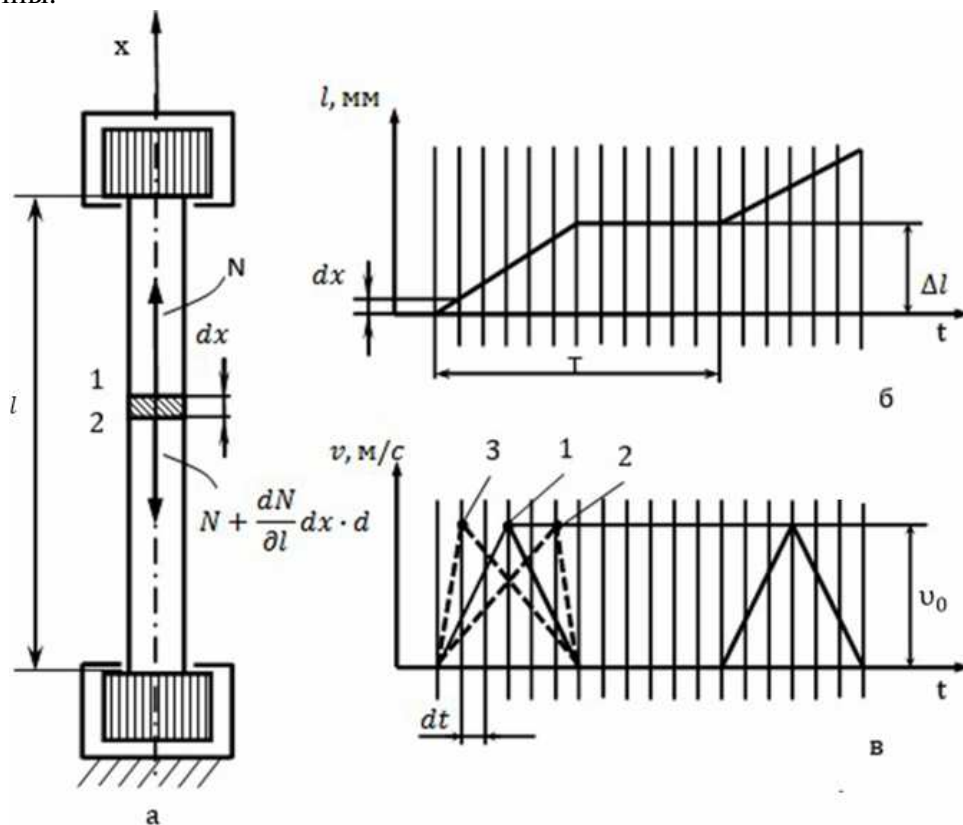


Рис. 1. Модель нагружения образца при мелкоступенчатом нагружении: а – характер приложения нагрузки; б – циклограмма нагружения; в – тахограмма нагружения образца

Для снижения влияния одной волновой нагрузки на последующую цикл реализации одной ступени нагружения T разбит на две части. В первой из частей происходит процесс возрастания нагрузки, во второй части нагрузка не изменяется

Режим реализации мелкоступенчатого процесса воздействия зажима на образец может иметь различные варианты. В данной работе рассмотрены три варианта процесса нагружения образца. Данные варианты представлены циклограммами и тахограммами, изображенными на рисунке 1,б,в. Характер изменения скорости растяжения в пределах одного цикла может иметь сложную форму. Для описания этой скорости цикл T разбивается на m составляющих с временной продолжительностью dt . В этом случае $T = dt \cdot m$, где m – количество временных отрезков, на которые разбивается период ступенчатого нагружения образца.

К характеристикам, которыми оценивается процесс нагружения, относятся продолжительность возрастания деформации $dt \cdot n$, где n количество временных отрезков dt из m временных отрезков цикла T , в течение которых существует не нулевая скорость деформации образца, и величина шага деформации образца Δl . Характер скоростного режима нагружения образца и формирование вида упругой волны напряжений в образце определяются этими двумя величинами.

Зона упругой деформации металла, в которой находится и предел выносливости материала, вписывается в значение относительной деформации $\varepsilon = 0,002$. Отсюда количество шагов при заданной величине абсолютной деформации образца в одном шаге нагружения будет определяться как $kh = 0,002 \cdot \frac{l}{\Delta l}$, что дает понимание о максимально возможном количестве силовых воздействий на образец в одном расчете. Одновременно, она позволяет определять время реализации одного опыта $t = T \cdot kh$.

При настройке разрывной машины величина подачи жидкости плунжерного насоса в рабочий цилиндр определяется смещением зажима разрывной машины Δl . На каждом шаге растяжения образца скорость движения зажима сначала возрастает, а затем возвращается в нулевое положение. Происходит растяжение образца на каждом из участков в первый момент с возрастанием скорости до величины v_0 , а затем скорость снижается до нуля. До конца цикла T скорость зажимов остается нулевой (рис. 1,в). При этом участки возрастания скорости и ее убывания при растяжении образца могут быть разными. В работе характер изменения скорости растяжения образца задается набором промежуточных скоростей dk , каждая из которых определяется в расчете, как

$$rv = \frac{v_{i+1} - v_i}{dk}.$$

Одной из основ режима работы разрывной машины является частота нагружения образца ω , или, что одно и то же, период ступеней нагружения образца T . Значение частотной характеристики было взято на основе рекомендаций, приведенных в работе [9].

При оценке величины волнового процесса в образце используется гипотеза плоских сечений, в которой пренебрегают перпендикулярным к оси стержня движением частиц [10-12]. В этом случае рассматривается выделенный на образце участок dx , по которому движется волна упругих напряжений ограниченная двумя поперечными сечениями 1 и 2. Данная волна возникла в результате взаимодействия верхнего зажима разрывной машины и стержня, которые перемещались со скоростями v_{mi} и v_{ci} . Считается, что произведен один акт взаимодействия зажима образца с образцом с относительной скоростью $v_0 = V_m - V_c$. Рассматривая нагрузки, действующие на выделенный участок стержня и применяя принцип Даламбера, получим уравнение

$$\frac{\partial N}{\partial l} \cdot dx - \rho \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0,$$

где ρ – плотность материала образца, S – площадь поперечного сечения образца, ξ – смещение рассматриваемого участка вдоль оси x .

После ряда преобразований данного уравнение, при учете того, что площадь поперечного сечения стержня считается постоянной, примет вид формулы продольных колебаний Сен-Венана: Эта формула и является основой математической модели [13]

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где ξ – осевое перемещение поперечного сечения стержня; x – координата, характеризующая начальное положение этого сечения, t – время.

Из существующих способов решения уравнения Сан-Венана [14-16], в данной ситуации наиболее удобнее использовать метод разрывных функций [17]. Решается данное уравнение следующей функцией

$$\xi = f(at - x) + \varphi(at + x). \quad (2)$$

Уравнение (2) несет в себе следующую смысловую нагрузку физического процесса, протекающего в образце. Уравнение $\xi_1 = f(at - x)$ определяет движение упругой волны деформации вдоль образца, в направлении оси x со скоростью

$$a = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E – модуль упругости первого рода, ρ – плотность материала, из которого изготовлен образец.

Второй составляющей уравнения $\xi_2 = \varphi(at + x)$ описывается процесс движения упругой волны в обратном направлении. Метод разрывных функций заключается в том, что нужно выбрать функции f и φ , обеспечивающие выполнение начальных и граничных условий волнового процесса.

В результате, для $0 < z < 2l$ получается дифференциальное уравнение, которое в начальный момент движения волны равно нулю. Таким образом, при $0 < z < 2l$ функция $f'(z)$ определяется выражением

$$f'(z) = \frac{v_0}{a} e^{-\frac{xz}{l}}. \quad (3)$$

При знании функции $f(z)$ для значения $z < 2l$, появляется возможность определить изменение усилий и скоростей в любом сечении стержня. При $at < 2l - x$ функция $f(at + x - 2l) = 0$ имеет вид

$$\xi = f(at - x), \quad (4)$$

соответственно скорости и деформации в любом сечении равны

$$v = \frac{\partial \xi}{\partial t} = af'(at - x), \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\partial \xi}{\partial x} = -f'(at - x). \quad (6)$$

При подстановке сюда значение $f'(z)$ получается, что при $x < at < 2l$

$$\left. \begin{aligned} v &= v_0 e^{-\frac{x}{l}(at-x)}, \\ \varepsilon &= -\frac{v_0}{a} e^{-\frac{x}{l}(at-x)}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Простое соотношение определяет скорость деформации материала до того момента, пока волна деформации не дошла до опоры. Таким образом, скорость ступенчатого перемещения зажима полностью определяет деформацию стержня в первый момент взаимодействия с зажимом и не зависит от массы этого зажима.

Далее, строится функция $f(z)$ для последующих интервалов изменения аргумента. В результате:

при $0 < z < 2l$

$$f(z) = \frac{v_0}{a} \frac{l}{x} \left(1 - e^{-\frac{x}{l}z} \right), \quad (8)$$

при $2l < z < 4l$

$$f(z) = \frac{v_0}{a} \frac{l}{x} \left[e^{-\frac{x}{l}z} + \left(1 + 2x \frac{z - 2l}{l} \right) e^{-\frac{x}{l}(z-2l)} \right], \quad (9)$$

при $4l < z < 6l$

$$f(z) = \frac{v_0}{a} \frac{l}{x} \left\{ 1 - e^{-\frac{x}{l}z} + \left(1 + 2x \frac{z - 2l}{l} \right) e^{-\frac{x}{l}(z-2l)} + \left[1 + 2 \left(x \frac{z - 4l}{l} \right)^2 \right] e^{-\frac{x}{l}(z-4l)} \right\}$$

и т.д.

Опираясь на вышеописанный подход определения параметров волнового процесса, был составлен алгоритм вычисления напряжения от волновой нагрузки при различных входных параметрах в виде блок-схемы, показанной на рисунке 2.



Рис. 2. Блок-схема программы реализации математической модели волнового процесса в образце при мелкоступенчатом его нагружении методом разрывных функций

Представленный алгоритм позволяет определять характер изменения набора функций $f(z)$, обозначаемого в дальнейшем ff , в заданном сечении образца, напряжение и деформацию образца в том же сечении. В рамках данной работы для определения параметров волнового процесса при мелкоступенчатом растяжении образца была разработана программа на базе среды MathCad. Использование написанной по алгоритму программы показано на примере оценки характера волнового процесса при воздействии на испытываемый образец одного ступенчатого импульса (рис. 3).

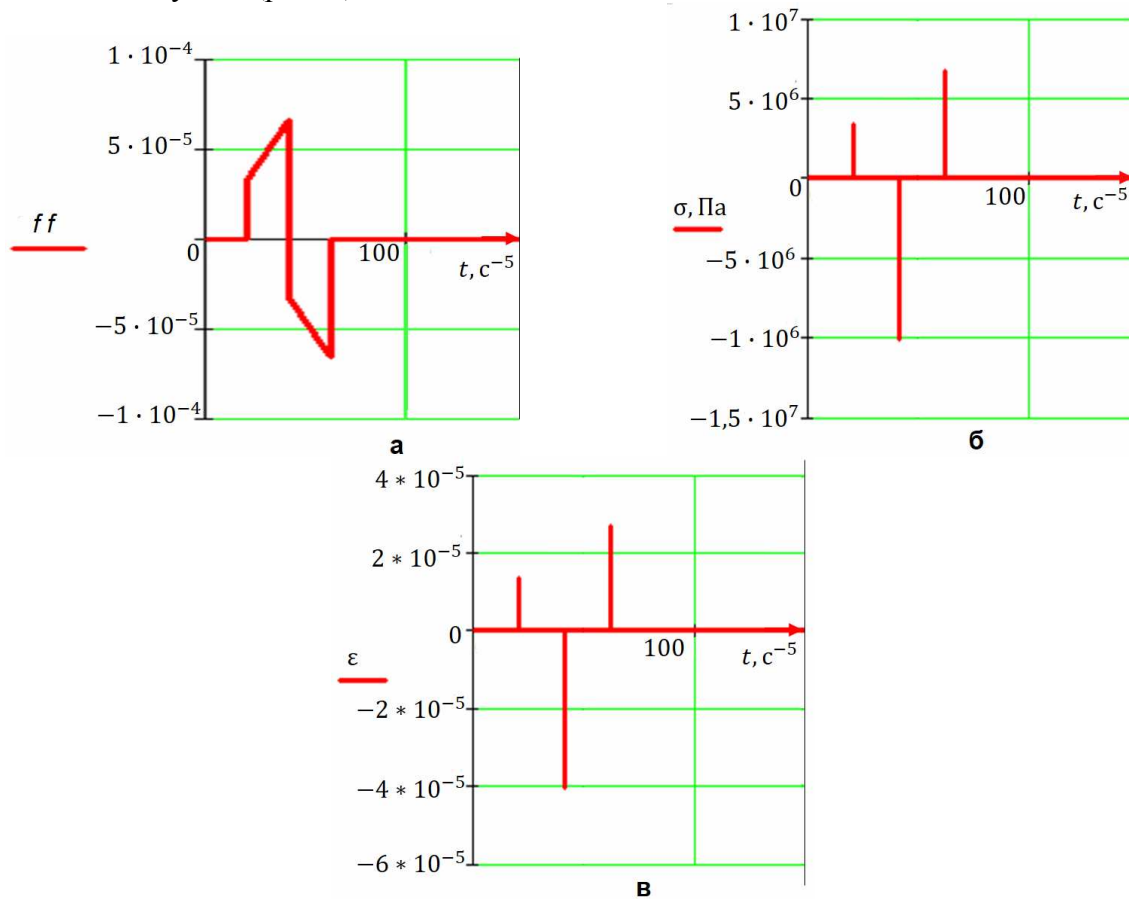


Рис. 3. Характеристики волнового процесса в средней части образца для случая, когда продолжительность шага нагружения 0,1 с, максимальная скорость растяжения образца $V_{max} = 0,0571$ м/с: а – характер изменения функции ff в среднем сечении образца, б – напряжение в том же сечении образца, в – деформация в том же сечении образца

Продолжительность импульса определяется частотой воздействий на металл образца в данном примере равной 10 Гц. Один волновой процесс от воздействия зажима на образец в этом случае будет длиться $dt = 0,1$ с. Характер протекания волнового процесса показан на рисунке 3. На рисунке 3,а приведен график изменения суммарной функции ff для случая, когда соотношение взаимодействующих через образец масс $x = 0,5$, значение максимальной скорости движения взаимодействующего с образцом зажима $V_0 = 0,01$ м/с, длина образца $l = 0,1$ м. Тахограмма нагружения образца симметричная с одинаковой продолжительностью участков увеличения и уменьшения скорости. Рисунки 3,б,в демонстрируют характер изменения напряжения в среднем сечении образца и относительной в этом сечении деформации по мере изменения скорости его нагружения.

Изучение изменения волновой нагрузки от различных факторов основано на применении написанной в среде MathCad программы. Для этого было проведено три блока численных экспериментов. В каждой из трех групп опытов выявлялось влияние на величину напряжения в средней части образца в процессе протекания волнового процесса следующих факторов. Определялась степень влияния частотной составляющей шага нагружения, которая

менялась от 1 до 12 Гц с интервалом увеличения частоты в 1 Гц. Оценивалась влияние скорости растяжения образца в интервале от 0,005 до 0,06 м/с с шагом изменения в 0,005 м/с. Оценивалось, также влияние вида асимметрии тахограммы нагружения образца.

В исследовании каждая из трех групп опытов имеет свой характер нагружения образца. Первая группа опытов оценивала характер влияния факторов при режиме нагружения образца с одинаковым временем нарастания скорости и таким же временем уменьшения скорости изменения нагрузки до нулевого значения (рис. 1,в, тахограмма 1). При таком виде организации шага нагружения образца напряжение в средней его части от волновой нагрузки меняется в пределах от 0,06 МПа до 8,7 МПа. Графическая картина изменения напряжения в образце, вычисленная при одинаковом времени увеличения и уменьшения нагрузки, представлена на рисунке 4.

Во второй группе опытов скорость нагружения образца носит ассиметричный характер. Скорость увеличения нагрузки занимает временной период в два раза больший по отношению ко времени уменьшения скорости нагружения (рис. 1,в, тахограмма 2). Более плавное увеличение скорости в начальной части нагружения образца и, соответственно, более резкое снижение скорости при завершении цикла нагружения несколько увеличивает максимальное в образце напряжение упругой волны. В рамках области изменения факторов во второй группе экспериментов напряжение от волновой нагрузки в средней части образца меняется от 0,14 МПа до 11,1 МПа. Графическое изображение характера изменения напряжения в образце от воздействия упругой волны во второй группе опытов показано на рисунке 5.

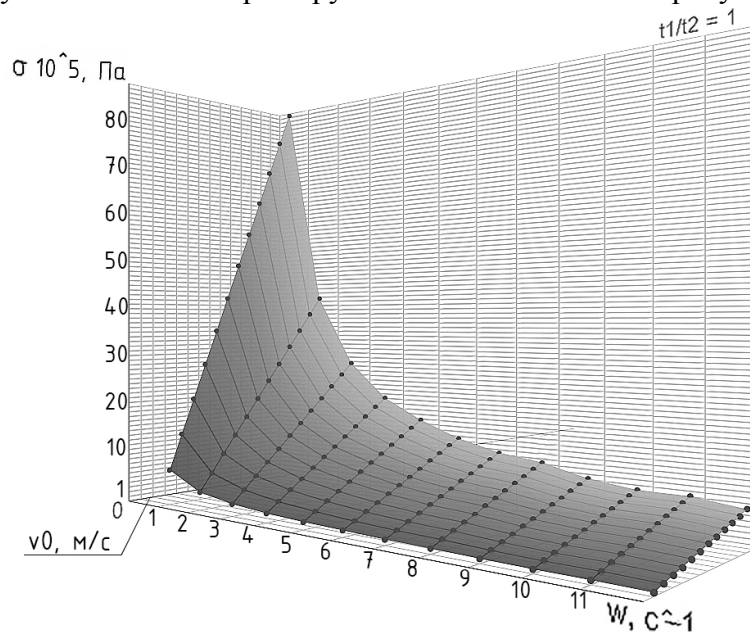


Рис. 4. Результаты расчета напряжения при соотношении времени нагружения и торможения 1/1

Третья группа опытов посвящена ситуации, когда скорость нагружения образца возрастает в два раза быстрее, чем происходит снижение скорости нагружения образца (рис. 1,в, тахограмма 3). Изменение факторов в эксперименте при таком виде тахограммы нагружения обеспечивает диапазон изменения напряжения в образце от волновой нагрузки в пределах от 0,23 МПа до 13 МПа. Особенность изменения нагрузки при изменении рассматриваемых в третьей части эксперимента факторов показана графически на рисунке 6.

Весь диапазон изменения напряжения в средней части образца при его ступенчатом нагружении, полученный во всех трех сериях опытов, начинается от 0,14 МПа и заканчивается 13 МПа. Данный диапазон варьирования напряжения, которое определяет эмиссионный эффект при синергетически организованном процессе эмиссионного отклика дислокаций на характер нагружения материала вполне достаточен для того, чтобы подобрать рациональный в каждом конкретном случае вариант.

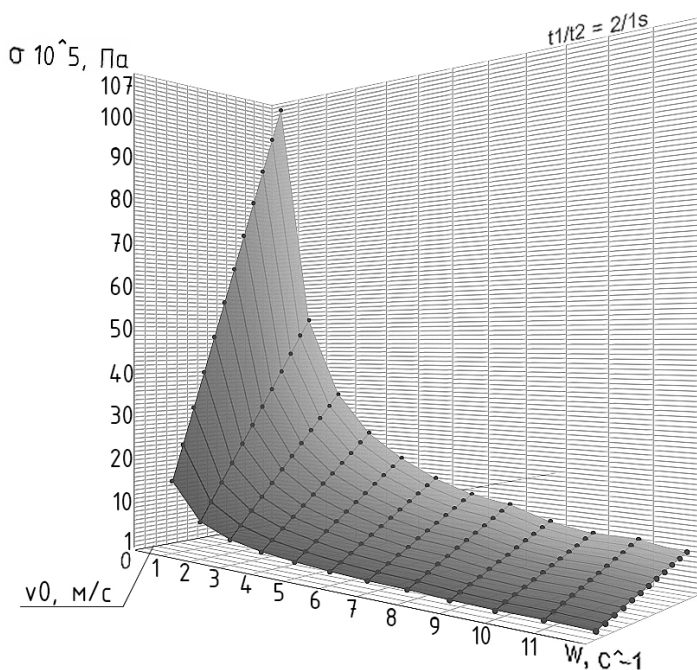


Рис. 5. Результаты расчета напряжения при соотношении времени нагружения и торможения 2/1

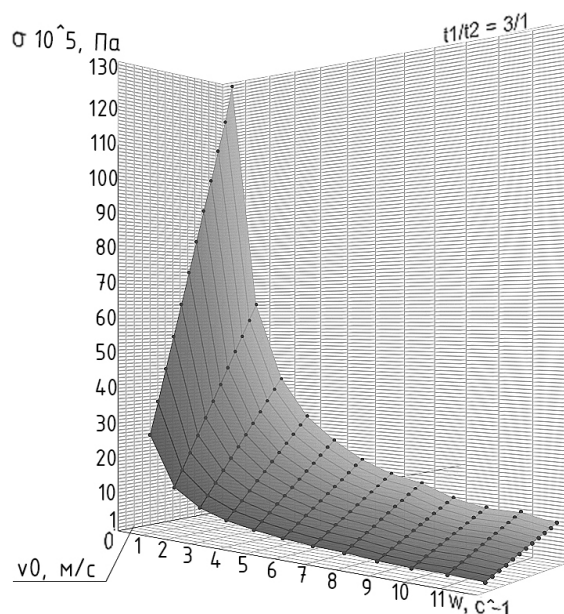


Рис. 6. Результаты расчета напряжения при соотношении времени нагружения и торможения

Выводы. Сформированная в работе математическая модель волнового процесса в ступенчато нагружаемом образце и созданная на основе этой модели программа дают возможность оценить волновую в теле образца нагрузку при мелкоступенчатом его нагружении.

Основанный на математической модели численный эксперимент позволил определить диапазон изменения напряжения в средней части образца, обеспечиваемый варьированием используемых в эксперименте факторов. Этот диапазон охватывает изменение величины напряжения в образце больше чем на два порядка и обеспечивает тем самым широкие возможности регулирования волновой нагрузки в образце.

Графические зависимости величины напряжения в образце при мелкоступенчатом его нагружении позволяют определить рациональное сочетание рассматриваемых в работе факторов для эффективной реализации мелкоступенчатого нагружения образца.

Список литературы

1. Савельев А.Н., Савельева Е.А., Локтева Н.А. Оценка прочностных свойств материалов элементов технологических машин на основе синергетически организованных сигналов акустической эмиссии // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60, №6. – С. 443-450.
2. Патент №2555506 РФ. Способ регистрации сигналов акустической эмиссии / Е.А. Савельева, А.Н. Савельев. – Заявка №2014111709/28 от 26.03.2014; опубл. 10.07.2015, Бюл. №19.
3. Saveliev A.N., Savelieva E.A., Anisimov D.O., Prohorenko O.D. Determining the Fatigue Characteristics of Material on the Basis of Stress-Wave Emission // Steel in Translation. 2019, vol. 49, no. 2, pp. 91-96.
4. Болотин Ю.И., Грешников В.А., Гусаков А.А., Дробот Ю.Б. Использование эмиссии волн напряжений для неразрушающего контроля материалов // Дефектоскопия. – 1971. – №6. – С. 5-25.
5. Грешников В.А., Дробот Ю.В. Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий. – М: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
6. Терентьев В.Ф., Пойда И.В. Образование малых трещин при усталости // Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка. – 1991. – Т. 25. – С. 60-94.
7. Нацик В.Д., Бурканов А.Н. Излучение релеевских волн краевой дислокацией, выходящей на поверхность кристалла // Физика твердого тела. – 1972. – Т. 14, вып. 5. – С.1 289-1206.
8. Бойко В.С., Гарбер Р.И., Кривенко Л.Ф. Звуковая эмиссия при аннигиляции дислокационного скопления // Физика твердого тела. – 1974. – Т. 16, №4. – С. 1233-1235.
9. Савельев А.Н., Савельева Е.А. Выявление рациональной частоты ступенчатого нагружения образца при его испытании на выносливость на основе синергетически организованной акустической эмиссии // Известия вузов. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62, №6. – С. 467-474.
10. Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. – 220 с.

11. Адищев В.В., Вдовин В.Е. Кардаков В.Б. Формирование волн напряжений при ударе по стержню с учетом дисперсии // Известие вузов. Строительство и архитектура. – 1990. – №6. – С. 35-40.
12. Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. Теория колебаний: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. – 272 с.
13. Рабинович М.И., Трубников Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. – М.: Наука, 1984. – 432 с.
14. Корень В.И. Интегрирование уравнений Сен-Венана без инерционных членов и некоторые вопросы их линеаризации // Труды Гидрометцентра. – 1968. – Вып. 25. – С. 13-23.
15. Баклановская В.Ф. Исследование метода сеток решения первой краевой задачи для уравнений типа нестационарной фильтрации // Численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений и квадратурные формулы. – М.: Наука, 1964. – С. 228-243.
16. Савельев А.Н., Козлов С.В., Живаго Э.Я., Прохоренко О.Д. Формирование математической модели продольных колебаний, возникающих в многодвигательном гидроприводе холодильников МНЛЗ // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2018. – №2(24). – С. 58-64.
17. Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К., Макушин В.М., Малинин Н.Н., Феодосьев В.И. Расчеты на прочность в машиностроении. Т. 3.– М.: Машгиз, 1959. – 1118 с.

References

1. Savelyev A.N., Savelyeva E.A., Lokteva N.A. Evaluation of the strength properties of materials for elements of technological machines based on synergistically organized acoustic emission signals // News of universities. Ferrous metallurgy. 2017, vol. 60, no. 6, pp. 443-450.
2. Patent No. 2555506 RU. Method of recording acoustic emission signals / E.A. Savelyeva, A.N. Savelyev. – Application no. 2014111709/28 from 26.03.2014; publ. 10.07.2015, Bul. No. 19.
3. Savelyev A.N., Savelieva E.A., Anisimov D.O., Prohorenko O.D. Determining the Fatigue Characteristics of Material on the Basis of Stress-Wave Emission // Steel in Translation. 2019, vol. 49, no. 2, pp. 91-96.
4. Bolotin Yu.I., Greshnikov V.A., Gusakov A.A., Drobot Yu.B. The use of stress wave emission for non-destructive testing of materials // Defectoscopy. 1971, no. 6, pp. 5-25.
5. Greshnikov V.A., Drobot Yu.V. Acoustic emission. Application for testing materials and products. – М.: Publ. house of Standards, 1976. – 272p.
6. Terentiev V.F., Poida I.V. Formation of small cracks during fatigue // Results of science and technology. Metal science and heat treatment. 1991, vol. 25, pp. 60-94.
7. Natsik V.D., Burkanov A.N. Radiation of Rayleigh waves by an edge dislocation emerging on the surface of a crystal // Physics of the Solid State. 1972, vol. 14, iss. 5, pp. 1289-1206.
8. Boyko V.S., Garber R.I., Krivenko L.F. Sound emission during the annihilation of a dislocation cluster // Solid State Physics. 1974, vol. 16, no. 4, pp. 1233-1235.
9. Savelyev A.N., Savelyeva E.A. Identification of the rational frequency of step loading of a sample during its endurance testing based on synergistically organized acoustic emission // News of universities. Ferrous metallurgy. 2019, vol. 62, no. 6, pp. 467-474.
10. Panovko Ya.G. Introduction to the theory of mechanical impact. – М.: Science, 1977. – 220p.
11. Adishchev V.V., Vdovin V.E. Kardakov V.B. Formation of stress waves upon impact on the rod, taking into account dispersion // News of universities. Construction and architecture. 1990, no. 6, pp. 35-40.
12. Ilyin M.M., Kolesnikov K.S., Saratov Yu.S. Theory of vibrations: textbook for universities. – М.: Publ. house of MSTU n.a. N.E. Bauman, 2003. – 272p.
13. Rabinovich M.I., Trubnikov D.I. Introduction to the theory of oscillations and waves. – М.: Science. 1984. – 432 p.
14. Koren V.I. Integration of the Saint-Venant equations without inertial terms and some questions of their linearization // Proceedings of Hydrometeorological Center. 1968, no. 25, pp. 13-23.
15. Baklanovskaya V. F. Investigation of the grid method for solving the first boundary value problem for equations of the type of non-stationary filtration // Numerical methods for solving differential and integral equations and quadrature formulas. – М.: Nauka, 1964. – P. 228-243.
16. Savelyev A.N., Kozlov S.V., Zhivago E.Ya., Prokhorenko O.D. Formation of a mathematical model of longitudinal oscillations arising in a multi-engine hydraulic drive of CCM refrigerators // Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2018, no. 2(24), pp. 58-64.
17. Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likharev K.K., Makushin V.M., Malinin N.N., Feodosiev V.I. Strength calculations in mechanical engineering. Vol. 3. – М.: MASHGIZ, 1959. – 1118 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Савельев Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент	Savelyev Alexander Nikolaevich – candidate of technical sciences, associate professor
Макаров Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент	Makarov Aleksey Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor
Анисимов Данила Олегович – аспирант makarov_sibsiu@mail.ru	Anisimov Danila Olegovich – postgraduate student

Получена 20.06.2022