

# Механика

УДК 620.172.24:534.6

doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-3-13

## Особенности поведения продольных волновых пакетов в среднем сечении образца при его ступенчатом растяжении

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

Сибирский государственный индустриальный университет

## Specifics in longitudinal wave packets behavior in the sample middle section during its stepwise tension

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

Siberian State Industrial University

Синергетический эмиссионный процесс на основе дислокаций материалов обеспечивают два механизма — накачка энергии в дислокационные структуры металла и совместный выход части этой энергии в виде мощной акустической эмиссии. Один из вариантов реализации этого процесса выполняется путем мелкоступенчатого нагружения образца. Такой вид нагрузки позволяет реализовать два процесса одновременно: одну группу дислокаций заряжать энергией, переводя ее в крайне возбужденное состояние, а другая группа дислокаций, достигнув при этом энергетического порога, выходит на поверхность кристаллической структуры металла и излучает акустический сигнал. В результате формируется синхронная мощная периодическая эмиссионная волна, характеризующая напряженно-деформационное состояние кристаллов металла на наноуровне. Синхронность эмиссионного излучения обеспечивает другая волна — деформационная, возникающая в процессе растяжения образца и распространяющаяся вдоль него. Волна многократно проходит вдоль образца, образуя в его сечении сложную структуру напряжений. Эта структура важна тем, что определяет интенсивность эмиссионного сигнала. Для выявления особенностей протекания нагрузки от волновой части этого процесса во времени при многоступенчатом нагружении использована математическая модель. Разработанное на ее основе программное обеспечение позволяет оценить поведение многократно возникающей группы таких волн в рассматриваемом сечении образца. С помощью указанного программного обеспечения проведен численный эксперимент по исследованию изменения волновой нагрузки в среднем сечении образца при ее ступенчатом возрастании. Анализ результатов эксперимента показал, что варьирование видом тахограммы нагружения образца позволяет изменять в нем волновую нагрузку для достижения ее желаемого вида на определенном временном участке. Выбранный режим изменения напряжения в рассматриваемом сечении образца дает возможность управлять формой возникающего при этом эмиссионного сигнала.

**Ключевые слова:** мелкоступенчатое растяжение, образец материала, суммарная волновая функция, сечение образца, разрывная машина, циклограмма нагружения

Synergistic emission process based on the material dislocations is ensured by two mechanisms, i.e. energy pumping into the metal dislocation structures and combined release of this energy portion in the form of a powerful acoustic emission. One of the options in implementing this process is performed by the sample small-step loading. This type of load makes it possible to implement two processes simultaneously: one group of dislocations is charged with the energy transferring it to the extremely excited state, and the other group of dislocations reaches the energy threshold, appears on the metal crystalline structure surface and emits an acoustic signal. As a result, a powerful synchronous periodic emission wave is formed characterizing the metal crystal stress-strain state at the nano-level. The emission radiation synchronicity is ensured by another wave, i.e. the deformation wave arising during the sample stretching and propagating along this sample. The wave propagates repeatedly along the sample and forms a complex stress structure in its cross-section. This structure is important, because it determines the emission signal intensity. To identify characteristics of the load flowing from this process wave part over time under the multi-stage loading, a mathematical model was introduced. Software developed on its basis makes it possible to evaluate behavior of the repeatedly appearing group of such waves in the sample cross-section under consideration. The specified software assisted in a numerical experiment to study the wave load alteration in the sample middle section with its stepwise increase. Analysis of the experiment results showed that varying the sample loading tachogram type makes it possible to change the wave load in it to achieve its desired form over a certain time period. The selected mode of load alteration in the sample cross-section under consideration makes it possible to control the shape of the emission signal arising in this case.

**Keywords:** small-step tension, material sample, total wave function, sample cross-section, tensile testing machine, loading cyclogram

В работах [1–3] предложен метод синергетически организованной эмиссии, позволяющий оценивать характер протекания процессов в металлах во время их нагружения на наноструктурном (дислокационном) уровне.

Суть этого метода заключается в следующем. В момент очередного шага мелкоступенчатого растяжения 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 начинают синхронно двигаться. Выходя на поверхность кристалла дислокации, они испускают эмиссионный сигнал, соответствующий энергии движения данной группы дислокаций [4–8].

Синхронно испускаемый сигнал обладает мощностью, позволяющей устойчиво фиксировать его параметры существующими приборами. Таким образом, появляется возможность оценить энергетическое состояние наноструктурного уровня нагруженного до определенно напряженного состояния металла.

Сложность реализации этого метода заключается в том, что в зоне фиксации эмиссионного сигнала существует еще один процесс — волновой, который зависит не только от внешнего мелкоступенчатого силового воздействия

на образец, но и от продолжительности последнего. С одной стороны, он должен обеспечивать коллективный дислокационный эмиссионный сигнал, а с другой — не мешать регистрации этого сигнала.

Цель работы — оценка возможности управлять видом волновой составляющей напряжения в материале путем подбора характера циклограммы и тахограммы его мелкоступенчатого нагружения.

Для оценки характера изменения волновой нагрузки в образце проведен численный эксперимент, основой которого являлась математическая модель волнового процесса. С помощью математической модели определен характер протекания волнового процесса в течение нескольких циклов нагружения материала. Выявлен характер влияния формы циклограммы на картину суммарной упругой волны в средней части образца. Показана возможность изменения формы волнового процесса в зависимости от вида циклограммы и тахограммы. Определены пределы изменения напряжения и продолжительности его протекания в продольных волнах при возбуждении в металле синергетического эмиссионного сигнала.

**Особенности модели.** Для реализации поставленной цели использована модель, описанная

в работе [9]. Модель построена на многоплановом рассмотрении процесса многократного нагружения образца и разработке на этой основе математического описания волнового процесса.

Растягиваемый образец представлен в виде стержня, один конец которого жестко закреплен в зажиме пресса. На второй конец стержня действует импульсная нагрузка, нарастающая периодически со скоростью  $v$ , что обеспечивает возникновение в образце упругой волны. Процесс перемещения подвижного конца стержня описывается циклограммой и тахограммой его движения.

Цикл реализации одной ступени нагружения  $T$  разбит на две части. В первой происходит процесс возрастания нагрузки и формирование продольной упругой волны. Вторая часть нагрузки не изменяется и предназначена для возможности регистрации в этот период нагружения образца сигнала эмиссии волн напряжений от дислокационных структур материала.

Для реализации мелкоступенчатого процесса воздействия зажима на образец можно использовать различные варианты. Выбран вариант нагружения с помощью гидропривода испытательной машиной. Для описания скорости цикл  $T$  разбивают на  $m$  составляющих с временной продолжительностью  $dt$ . Тогда

$$T = dtm,$$

где  $m$  — количество временных отрезков, на которые разбит период ступенчатого нагружения образца.

Для оценки процесса нагружения использованы две характеристики — шаг деформации образца  $\Delta l$  и продолжительность возрастания деформации  $dt_n$ , где  $n$  — количество временных отрезков  $dt$  из  $m$  временных отрезков цикла  $T$ , в течение которых существует ненулевая скорость деформации образца. Эти две величины определяют характер скоростного режима нагружения образца и формирование в нем упругой волны напряжений.

При настройке разрывной машины подача жидкости плунжерного насоса в рабочий цилиндр зависит от смещения зажима разрывной машины  $\Delta l$  и вида тахограммы. На каждом шаге растяжения образца скорость движения зажима сначала возрастает до величины  $v_0$ , а затем возвращается в нулевое положение и до конца цикла  $T$  остается нулевой. При этом участки возрастания скорости движения зажима и ее

убывания при растяжении образца могут быть разными.

Изменение скорости растяжения образца задано набором промежуточных скоростей  $dk$ , каждая из которых определяется как

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

Одним из основных параметров режима работы разрывной машины является частота нагружения образца  $\omega$  или, что одно и то же, период ступеней нагружения образца  $T$ . Значение частотной характеристики было взято на основе рекомендаций, приведенных в статье [10].

В сформированной в работе [9] модели протекания волнового процесса в образце использована гипотеза плоских сечений [11–13], не учитывающая перпендикулярное к оси стержня движение частиц. Каждая из волн возникает в результате взаимодействия верхнего зажима разрывной машины и стержня, которые перемещаются со скоростями  $v_{mi}$  и  $v_{ci}$ .

При очередном акте воздействия зажима на образец с относительной скоростью  $v = v_m - v_c$  по телу образца начинает двигаться упругая волна напряжений. Волновая нагрузка, в сечении стержня с учетом того, что площадь его поперечного сечения принята постоянной величиной, определяется уравнением продольных колебаний Сен-Венана [14]

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

где  $\xi$  — осевое перемещение поперечного сечения стержня;  $x$  — координата, характеризующая начальное положение этого сечения;  $a$  — скорость движения упругой волны деформации вдоль образца в направлении оси  $x$ ;  $t$  — время.

Для решения уравнения Сан-Венана [15–17] использован метод разрывных функций [18]:

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

Физический смысл этого уравнения заключается в следующем. Первое слагаемое уравнения  $f(at - x)$  определяет движение упругой волны деформации вдоль образца в направлении оси  $x$  со скоростью  $a = \sqrt{E/\rho}$ , где  $E$  — модуль упругости первого рода;  $\rho$  — плотность материала, из которого изготовлен образец. Второе слагаемое уравнения  $\varphi(at + x)$  описывает движение упругой волны в обратном направлении. Метод разрывных функций состоит

в выборе функций  $f$  и  $\varphi$ , обеспечивающих выполнение начальных и граничных условий волнового процесса.

**Описание алгоритма.** На основе подхода к определению параметров волнового процесса, описанного в работах [9, 18], составлен алгоритм вычисления напряжения в зависимости от волновой нагрузки при многократном режиме ступенчатого нагружения. В блок-схеме этого алгоритма есть принципиальные моменты, определяющие режим движения упругих волн в образце.

Первый шаг алгоритма — ввод исходных данных (рис. 1, а) и вычисление постоянных составляющих волновых функций (рис. 1, б), чтобы уменьшить объем дальнейшего расчета волнового процесса.

Для описания волнового процесса использован набор десяти волновых функций на каждом участке движения упругой волны:  $0 < z < 2l$ ,  $2l < z < 4l$ ,  $4l < z < 6l$  и т. д. Здесь  $z$  — координата движения волны;  $l$  — длина образца. Постоянные составляющие этих функций (см. рис. 1, б) соответствуют своим участкам движения упругой волны.

Следующий шаг — ввод значений скорости движения зажима образца. Согласно работе [10], при выборе характера воздействия последовательных мелкоступенчатых нагружений на испытуемый образец его рациональная частота лежит в пределах 10 Гц. Тогда продолжительность каждой из ступеней таких воздействий  $dtm = 0,1$  с.

Выбрав одну из тахограмм мелкоступенчатого нагружения металла, для каждого из рас-

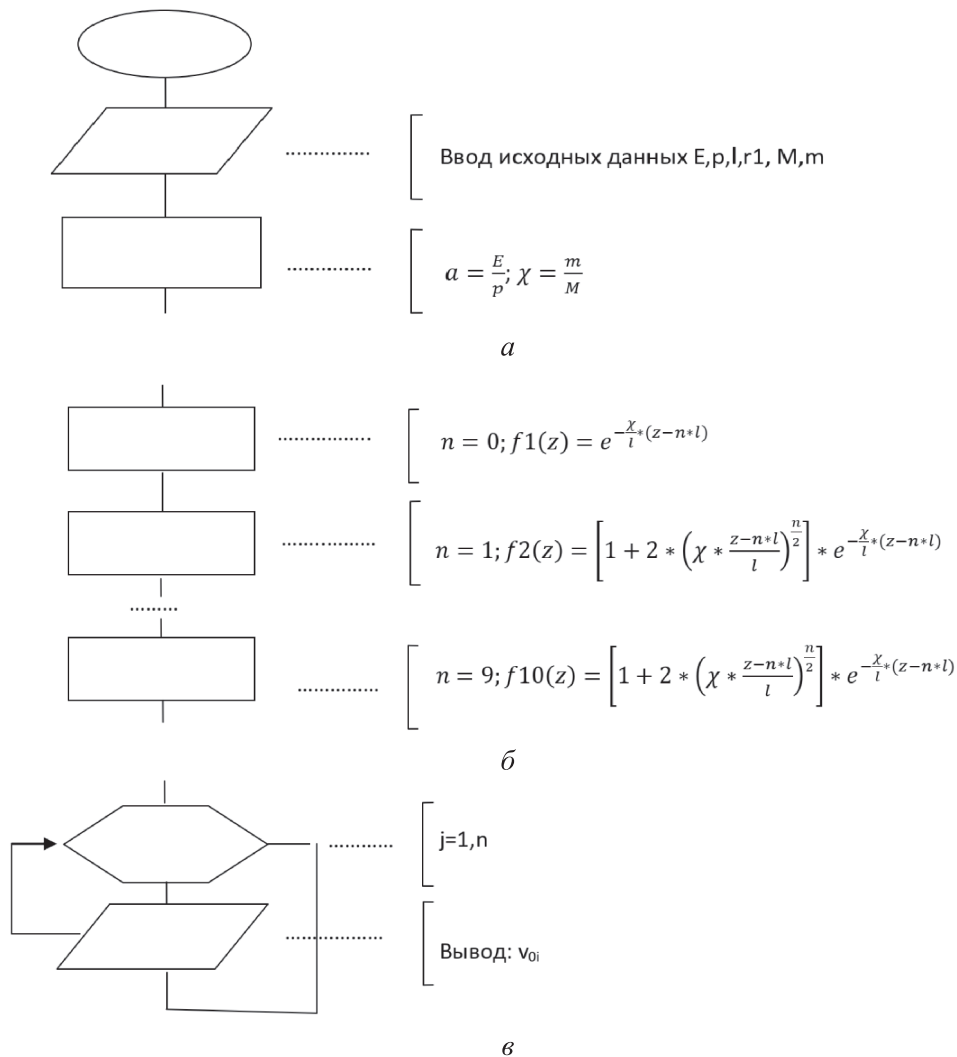


Рис. 1. Блок-схемы ввода данных:

а — ввод исходных данных объекта; б — вычисление постоянных составляющих волновых функций; в — ввод значений тахограммы процесса нагружения образца

сматриваемых циклов нагружения образца (см. рис. 1, б) записывают набор значений скорости, определяющий характер скоростного режима процесса перемещения верхнего зажима образца. Выполняют пересчет значений матрицы скоростей до количества, обеспечивающего учет скорости движения упругой волны по стержню. Для определения промежуточных скоростей растяжения образца использован стандартный метод бисекций (рис. 1, в).

Следующий шаг — расчет волновых функций (рис. 2) при условии, что каждая из составляющих упругой волны, возникающая на очередном приращении скорости движения подвижного края образца, совершает десять проходов вдоль стержня. После десятого прохода она полностью теряет энергию и в дальнейшем расчете не учитывается.

Одновременно с движением первой волны в образце по мере изменения скорости движения верхнего зажима появляются параллельные волны. Таким образом, в сечении образца действует пакет движущихся в разных направле-

ниях волн напряжений. Они складываются друг с другом, образуя сложную волновую картину (рис. 3), характер которой является важным параметром при организации синергетического процесса на базе дислокационных структур материала.

Аналогичным образом определяют набор волновых функций для нахождения деформации образца в заданной точке (рис. 4, а).

Последний шаг алгоритма — вычисления для построения графиков относительной деформации и напряжения в среднем сечении образца (рис. 4, б).

Изучение волнового процесса мелкоступенчатого нагружения образца, выполненное на основе описанного алгоритма, позволило проанализировать влияние различных видов скоростного режима (тахограмм) на напряженное состояние в средней части длины образца.

Для этого была написана программа расчета на базе языка программирования MathCAD, которая позволила выявить характер изменения волновой функции, деформации и напря-

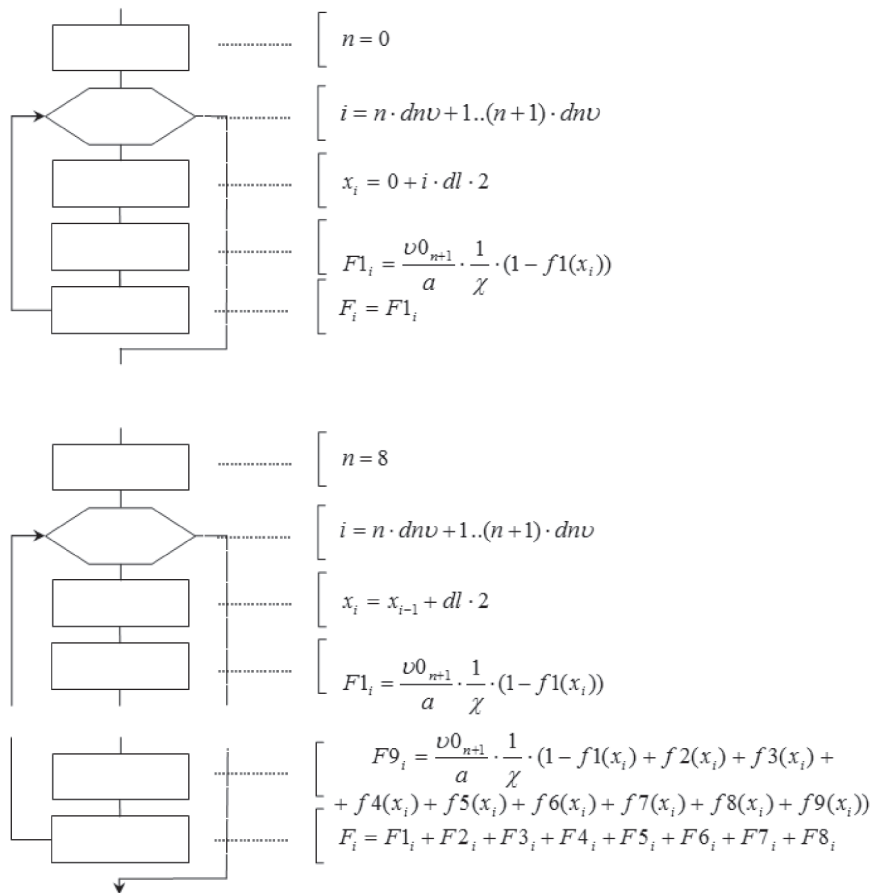


Рис. 2. Блок-схемы расчета волновой функции  $F(z)$

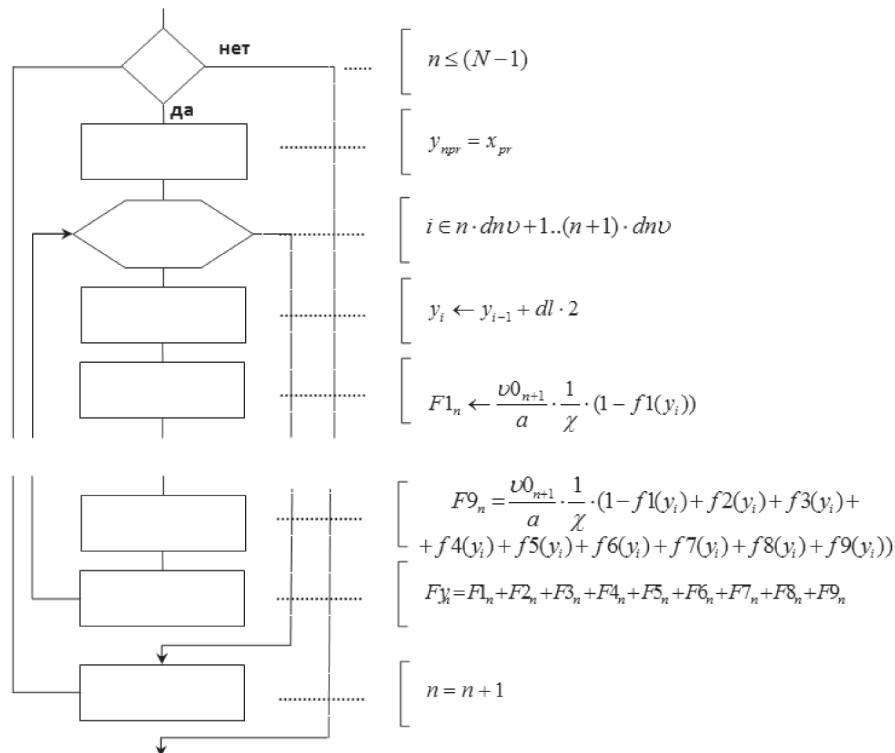


Рис. 3. Блок-схема объединения массивов  $f(r)$  в конкретной точке расчета ( $z$ ) для построения графика суммарных функций в этой точке  $ff$

жения в среднем сечении образца при его многократном нагружении. Результаты применения этой программы для двух последовательно действующих ступеней нагружения образца при различных видах тахограмм нагружения приведены на рис. 5–7.

Для всех вариантов нагружения образца продолжительность импульса составляла 0,1 с. Соотношение взаимодействующих масс также остается постоянным и соответствует  $\chi = 0,5$ . Максимальная скорость движения захвата  $v_0 = 0,05$  м/с, длина образца  $l = 0,1$  м. Характер движения верхнего зажима образца в разрывной машине может меняться от формы, близкой к прямоугольной, до гиперболической. Чтобы охватить весь возможный диапазон изменения скоростей тахограмм, рассмотрены три варианта.

В первом варианте тахограмма нагружения образца близка к прямоугольной. Во втором варианте скорость движения образца изменяется по параболическому закону, в третьем — по гиперболическому. Все скоростные режимы показаны на рис. 5–7. Там же приведены графики изменения во времени суммарных волновых функций  $\xi\xi$ , напряжений  $\sigma$  и относитель-

ных деформаций  $\epsilon$  для рассмотренных случаев нагружения образца.

**Обсуждение полученных результатов.** Установлено, что вид тахограммы значительно влияет на значение и характер напряжений в среднем сечении образца. При прямоугольной тахограмме (см. рис. 5) во время прохождения упругой волны через среднее сечение образца в нем возникают четыре пика напряжений. Два из них являются напряжениями растяжения, а два других — напряжениями сжатия. При этом значения всех четырех напряжений разные. Картина возникновения напряжений полностью соответствует таковой для деформаций.

При параболической тахограмме нагружения образца (см. рис. 6) наблюдается другая картина возникновения напряжений и деформирования среднего сечения образца. В сечении возникает ряд пиков напряжений небольшой величины с завершающим ступень пиком, значение которого в 2 раза превышает все остальные.

При гиперболической тахограмме нагружения образца (см. рис. 7) картина напряжений

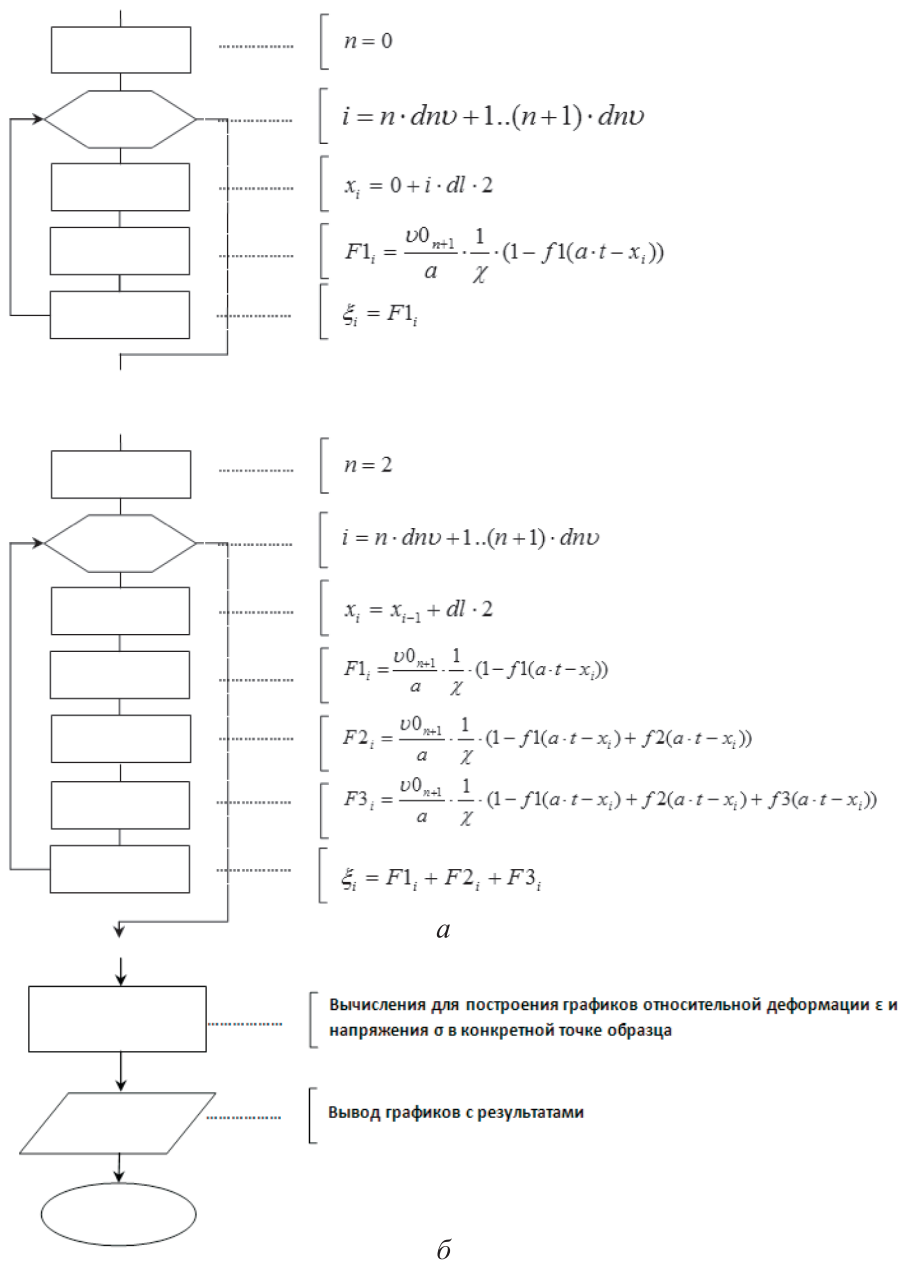


Рис. 4. Блок-схемы:

*a* — объединение массивов деформаций для построения графика относительной деформации в конкретной точке образца; *б* — вычисления для построения и выводы графиков

в среднем сечении образца значительно отличается от двух предыдущих вариантов. Пики напряжений в среднем сечении образца сначала постепенно возрастают и являются напряжениями сжатия. Затем в момент перехода скорости нагружения от участка ее увеличения к участку снижения напряжение меняет режим сжатия на режим растяжения, приобретая самое большое в среднем сечении значение. Далее напряжение растяжения меняется на напряжение сжатия, и его пики постепенно приближаются к нулю.

Максимальные значения напряжений растяжения–сжатия  $\sigma_{max}$  и относительных деформаций  $\epsilon_{max}$  в среднем сечении образца при разных видах тахограммы приведены в таблице.

Максимальная скорость всех тахограмм одинаковая, поэтому на напряжения и деформации в среднем сечении образца влияет только их форма. С помощью формы образца можно изменить напряжение в среднем сечении образца от 3,2 до 2,0 МПа. Причем его можно выбрать в виде напряжения растяжения или сжатия материала.

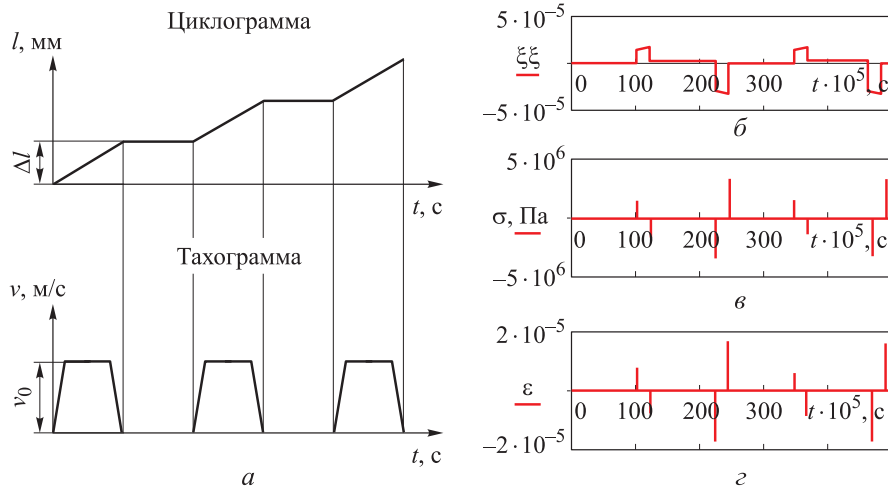


Рис. 5. Результаты исследования при прямоугольной тахограмме нагружения образца: а — циклограмма и тахограмма; б, в и г — изменение во времени  $t$  суммарной волновой функции  $\xi\xi$ , напряжения  $\sigma$  и относительной деформации  $\varepsilon$  соответственно

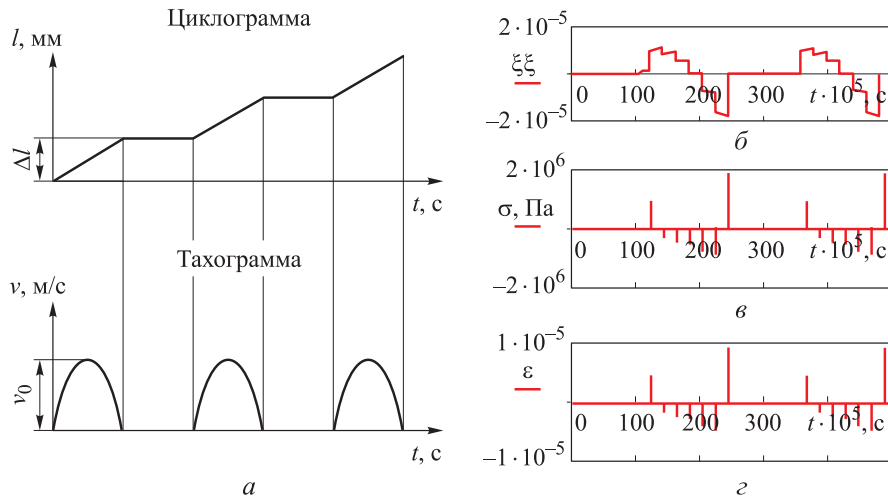


Рис. 6. Результаты исследования при параболической тахограмме нагружения образца: а — циклограмма и тахограмма; б, в и г — изменение во времени  $t$  суммарной волновой функции  $\xi\xi$ , напряжения  $\sigma$  и относительной деформации  $\varepsilon$  соответственно

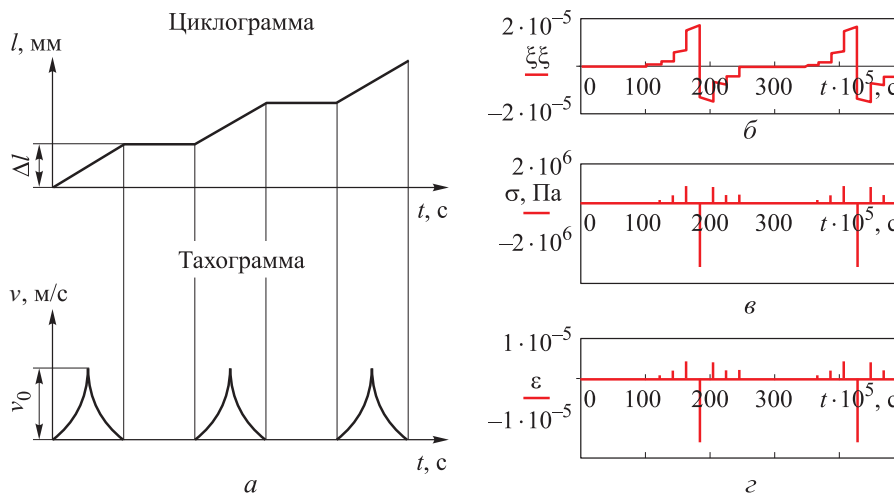


Рис. 7. Результаты исследования при гиперболической тахограмме нагружения образца: а — циклограмма и тахограмма; б, в и г — изменение во времени  $t$  суммарной волновой функции  $\xi\xi$ , напряжения  $\sigma$  и деформации  $\varepsilon$  соответственно



**Максимальные значения напряжений  
растяжения–сжатия и относительных  
деформаций в среднем сечении образца  
при разных видах тахограммы**

Вид тахограммы	$\sigma_{\max}$ , МПа	$\epsilon_{\max} \cdot 10^5$
Прямоугольная	3,2	1,8
Параболическая	2,0	1,0
Гиперболическая	3,0	1,5

Таким образом, в результате проведенного исследования выявлена зависимость между видом тахограммы и картиной напряжений и деформаций в среднем сечении образца, что позволяет использовать в каждом конкретном случае нужный вариант.

## Выводы

1. Созданная на основе математической модели программа описания динамического процесса в образце при его мелкоступенчатом нагружении позволяет оценивать волновую

составляющую нагрузки в образце при его многократном нагружении. Основанный на математической модели численный эксперимент выявил общую картину волнового процесса при его продолжительном протекании. Показал стабильность поведения напряжения при мелкоступенчатом нагружении средней части образца. Выявил временной диапазон изменения напряжения в средней части образца, обеспечивающий разделение волнового процесса между ступенями нагружения. Указал на отсутствие наложения одного этапа возникновения волн в образце на последующий.

2. Графические зависимости напряжения в образце от времени при мелкоступенчатом нагружении позволили представить характер воздействия продольных волн в образце на его среднем участке. Это дает возможность выбрать режим многоступенчатого нагружения образца, выделив вид тахограммы, который обеспечивает требуемое значение и форму его напряженного состояния, необходимого для формирования эмиссионной волны наноструктур испытываемого материала.

## Литература

- [1] Savelev A.N., Saveleva E.A., Anisimov D.O. et al. Determining the fatigue characteristics of material on the basis of stress-wave emission. *Steel Transl.*, 2019, vol. 49, no. 2, pp. 91–96, doi: <https://doi.org/10.3103/S096709121902013X>
- [2] Савельев А.Н., Савельева Е.А., Локтева Н.А. Оценка прочностных свойств материалов элементов технологических машин на основе синергетически организованных сигналов акустической эмиссии. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2017, т. 60, № 6, с. 443–450, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-443-450>
- [3] Савельева Е.А., Савельев А.Н. *Способ регистрации сигналов акустической эмиссии*. Патент РФ 2555506. Заявл. 26.03.2014, опублик. 10.07.2015.
- [4] Грешников В.А., Дробот Ю.Б. *Акустическая эмиссия*. Москва, Изд-во стандартов, 1976. 271 с.
- [5] Терентьев В.Ф., Пойда И.В. Образование малых трещин при усталости. В: *Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка*. Т. 25. Москва, ВИНТИ, 1991, с. 60–94.
- [6] Нацик В.Д., Бурканов А.Н. Излучение релеевских волн краевой дислокацией, выходящей на поверхность кристалла. *Физика твердого тела*, 1972, т. 14, № 5, с. 1289–1296.
- [7] 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.
- [8] Болотин Ю.И., Грешников В.А., Гусаков А.А. и др. Применение эмиссии волн напряжений для неразрушающего контроля материалов. *Дефектоскопия*, 1971, № 6, с. 5–25.
- [9] Савельев А.Н., Макаров А.В., Анисимов Д.О. Оценка динамической составляющей напряжения в материале при мелкоступенчатом нагружении образца на растяжение. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*, 2022, № 16, с. 9–17, doi: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-16-9-17>
- [10] Савельев А.Н., Савельева Е.А. Выявление рациональной частоты ступенчатого нагружения образца при его испытании на выносливость на основе синергетически организованной акустической эмиссии. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 2019, т. 62, № 6, с. 467–474, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-6-467-474>

- [11] Пановко Я.Г. *Введение в теорию механического удара*. Москва, Наука, 1977. 220 с.
- [12] 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.
- [13] Ильин М.М., Колесников К.С., Саратов Ю.С. *Теория колебаний*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 272 с.
- [14] Рабинович М.И., Трубецков Д.И. *Введение в теорию колебаний и волн*. Москва, Наука, 1984. 432 с.
- [15] Баклановская В.Ф. Исследование метода сеток решения первой краевой задачи для уравнений типа нестационарной фильтрации. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 1964, т. 4, № 4, с. 228–243.
- [16] Савельев А.Н., Козлов С.В., Живаго Э.Я. и др. Формирование математической модели продольных колебаний, возникающих в многодвигательном гидроприводе холодильников МНЛЗ. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*, 2018, № 2, с. 57–63.
- [17] Корень В.И. Интегрирование уравнений Сен-Венана без инерционных членов и некоторые вопросы их линеаризации. *Труды Гидрометцентра*, 1968, № 25, с. 13–23.
- [18] Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К. и др. *Расчеты на прочность в машиностроении*. Т. 3. Москва, МАШГИЗ, 1959. 1118 с.

## References

- [1] Savelev A.N., Saveleva E.A., Anisimov D.O. et al. Determining the fatigue characteristics of material on the basis of stress-wave emission. *Steel Transl.*, 2019, vol. 49, no. 2, pp. 91–96, doi: <https://doi.org/10.3103/S096709121902013X>
- [2] Cavelyev A.N., Savelyeva E.A., Lokteva N.A. Strength properties evaluation of materials of technological machines elements based on the synergetically organized signals of acoustic emission. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2017, vol. 60, no. 6, pp. 443–450, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-6-443-450> (in Russ.).
- [3] Savelyeva E.A., Savelyev A.N. *Sposob registratsii signalov akusticheskoy emissii* [Method of registration of acoustic signal emission]. Patent RU 2555506. Appl. 26.03.2014, publ. 10.07.2015. (In Russ.).
- [4] Greshnikov V.A., Drobot Yu.B. *Akusticheskaya emissiya* [Acoustic emission]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1976. 271 p. (In Russ.).
- [5] Terentyev V.F., Poyda I.V. *Obrazovanie malykh treshchin pri ustalosti* [Formation of small cracks in fatigue]. V: *Itogi nauki i tekhniki. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka*. Т. 25 [In: Results of science and technology. Metal science and heat treatment. Vol. 25]. Moscow, VINITI Publ., 1991, pp. 60–94. (In Russ.).
- [6] Natsik V.D., Burkanov A.N. Radiation of Rayleigh waves by an edge dislocation coming out on a crystal surface. *Fizika tverdogo tela*, 1972, vol. 14, no. 5, pp. 1289–1296. (In Russ.).
- [7] Boyko V.S., Garber R.I., Krivenko L.F. Sound emission at annihilation of dislocation cluster. *Fizika tverdogo tela*, 1974, vol. 16, no. 4, pp. 1233–1235. (In Russ.).
- [8] Bolotin Yu.I., Greshnikov V.A., Gusakov A.A. et al. Application of stress wave emission for nondestructive testing of materials. *Defektoskopiya*, 1971, no. 6, pp. 5–25. (In Russ.).
- [9] Savelyev A.N., Makarov A.V., Anisimov D.O. Evaluation of the dynamic component of the stress in the material under small-step loading of the specimen in tension. *Transportnoe, gornoe i stroitelnoe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo* [Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production], 2022, no. 16, pp. 9–17, doi: <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2022-16-9-17> (in Russ.).
- [10] Savelyev A.N., Savelyeva E.A. Detection of rational frequency of the sample incremental loading during its tests for endurance on the basis of a synergetically organized acoustic emission. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 2019, vol. 62, no. 6, pp. 467–474, doi: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-6-467-474> (in Russ.).
- [11] Panovko Ya.G. *Vvedenie v teoriyu mekhanicheskogo udara* [Introduction to the theory of mechanical shock]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 220 p. (In Russ.).

- [12] Adishchev V.V., Vdovin V.E., Kardakov V.B. Formation of stress waves at impact on a rod with account of dispersion. *Izvestie VUZov. Stroitelstvo i arkhitektura*, 1990, no. 6, pp. 35–40. (In Russ.).
- [13] Ilin M.M., Kolesnikov K.S., Saratov Yu.S. *Teoriya kolebaniy* [Theory of vibrations]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2003. 272 p. (In Russ.).
- [14] Rabinovich M.I., Trubetskov D.I. *Vvedenie v teoriyu kolebaniy i voln* [Introduction to the theory of vibrations and waves]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 432 p. (In Russ.).
- [15] Baklanovskaya V.F. Investigation of the grid method for solving the first boundary value problem for the equations of nonstationary filtration type. V: *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*, 1964, vol. 4, no. 4, pp. 228–243. (In Russ.).
- [16] Savelyev A.N., Kozlov S.V., Zhivago E.Ya. et al. Formation of a mathematical model of longitudinal vibrations arising in a multi-engine hydraulic drive of ccm refrigerators. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta* [Bulletin of the Siberian State Industrial University], 2018, no. 2, pp. 57–63. (In Russ.).
- [17] Koren V.I. Integration of the Saint-Venant equations without inertial terms and some questions of their linearisation. *Trudy Gidromettsentra*, 1968, no. 25, pp. 13–23. (In Russ.).
- [18] Ponomarev S.D., Biderman V.L., Likharev K.K. et al. *Raschety na prochnost v mashinostroenii*. T. 3 [Strength calculations in mechanical engineering. Vol. 3]. Moscow, MASH-GIZ Publ., 1959. 1118 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.10.2023

## Информация об авторах

**САВЕЛЬЕВ Александр Николаевич** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и машиностроение». Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Новокузнецк, Российская Федерация, Центральный р-н, ул. Кирова, д. 42, e-mail: savelyev2000@mail.ru).

**МАКАРОВ Алексей Владимирович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и машиностроение». Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Новокузнецк, Российская Федерация, Центральный р-н, ул. Кирова, д. 42, e-mail: alex\_vlad\_makarov@mail.ru).

**АНИСИМОВ Данила Олегович** — аспирант кафедры «Механика и машиностроение». Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Новокузнецк, Российская Федерация, Центральный р-н, ул. Кирова, д. 42, e-mail: Danila.anisimov@evraz.com).

## Information about the authors

**SAVELYEV Alexander Nikolaevich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Mechanics and Mechanical Engineering Department. Siberian State Industrial University (654007, Novokuznetsk, Russian Federation, Kirov St., Bldg. 42, e-mail: savelyev2000@mail.ru).

**MAKAROV Aleksey Vladimirovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor. Mechanics and Mechanical Engineering Department. Siberian State Industrial University (654007, Novokuznetsk, Russian Federation, Kirov St., Bldg. 42, e-mail: alex\_vlad\_makarov@mail.ru).

**ANISIMOV Danila Olegovich** — Postgraduate, Mechanics and Mechanical Engineering Department. Siberian State Industrial University (654007, Novokuznetsk, Russian Federation, Kirov St., Bldg. 42, e-mail: Danila.anisimov@evraz.com).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Савельев А.Н., Макаров А.В., Анисимов Д.О. Особенности поведения продольных волновых пакетов в среднем сечении образца при его ступенчатом растяжении. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 12, с. 3–13, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-3-13

### Please cite this article in English as:

Savelyev A.N., Makarov A.V., Anisimov D.O. Specifics in longitudinal wave packets behavior in the sample middle section during its stepwise tension. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 12, pp. 3–13, doi: 10.18698/0536-1044-2023-12-3-13