



DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-4-372-385

EDN: WMEUPV

УДК 624.04:004

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Усиление свойств демпфирования после начального пластического деформирования: статические и динамические испытания

В.Б. Зылев , П.О. Платнов  

Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация

 manuntdfan@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 мая 2023 г.

Доработана: 18 августа 2023 г.

Принята к публикации: 22 августа 2023 г.

Для цитирования

Зылев В.Б., Платнов П.О. Усиление свойств демпфирования после начального пластического деформирования: статические и динамические испытания // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 4. С. 372–385. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-4-372-385>

Аннотация. Экспериментально изучался эффект влияния начальной пластической деформации на свойства демпфирования малоуглеродистой стали, что соответствует изменению диаграммы деформирования. Под диаграммой деформирования понимаются также гистерезисные петли, которые расширяются после начальной пластической деформации, называемой в работе «пластическая экзекуция». При построении петель гистерезиса и при записи затухающих колебаний рассмотрены амплитудные значения циклов загрузки, не превышающие 200 МПа. В качестве образцов использовались стержни прямоугольного коробчатого поперечного сечения. Дано описание статической и динамической лабораторных установок, которые реализуют схему чистого изгиба образца. Замеры производились тензометрическими датчиками с фиксацией отсчетов в памяти компьютера с частотой 100 Гц. При колебаниях в образце возникали циклические симметричные загрузки с частотой 2,62 Гц. В ходе испытаний был обнаружен и количественно обследован эффект сильного увеличения петель гистерезиса после сообщения образцу начальной пластической деформации. Получены параметры петель в зависимости от значения амплитудного напряжения. Записанные графики убывания амплитуд со временем (до 1000 периодов) хорошо согласуются с полученными при статических испытаниях гистерезисными петлями. Начальная пластическая деформация также была циклической с амплитудами деформаций, на 17 % превышающими предел текучести материала. Обнаружен эффект восстановления пластической деформации образца после колебаний с амплитудами напряжений 200 МПа. Колебания вызывают восстановление пластической деформации более чем на 40 %.

Ключевые слова: отступления от закона Гука, гистерезисные петли, начальная пластическая деформация, пластическая экзекуция, деградация приобретенных демпфирующих свойств, восстановление пластической деформации после колебаний, лабораторная установка, затухающие колебания, внутреннее трение

Зылев Владимир Борисович, доктор технических наук, заведующий кафедрой строительной механики, Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-5160-0389; E-mail: zylevzb@ya.ru

Платнов Павел Олегович, аспирант кафедры строительной механики, Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация; ORCID: 0000-0002-9765-7417; E-mail: manuntdfan@mail.ru

© Зылев В.Б., Платнов П.О., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Strengthening of damping properties after initial plastic deformation: static and dynamic tests

Vladimir B. Zylev^{ID}, Pavel O. Platnov^{ID}✉

Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

✉ manuntdfan@mail.ru

Article history

Received: May 12, 2023

Revised: August 18, 2023

Accepted: August 22, 2023

For citation

Zylev V.B., Platnov P.O. Strengthening of damping properties after initial plastic deformation: static and dynamic tests. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023;19(4):372–385. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-4-372-385>

Abstract. The effect of the initial plastic deformation on the damping properties of low-carbon steel is experimentally studied, which corresponds to a change in the deformation diagram. The deformation diagram also refers to hysteresis loops that expand after the initial plastic deformation, called “plastic execution” in the work. When constructing hysteresis loops and recording damped oscillations, the amplitude values of loading cycles not exceeding 200 MPa are considered. Rods of rectangular box-shaped cross-section were used as samples. A description of static and dynamic laboratory installations that implement a pure bending scheme of the sample is given. Measurements are made by load cells with the fixation of counts in the computer memory with a frequency of 100 Hz. Cyclic symmetrical loads with a frequency of 2,62 Hz occur during oscillations in the sample. During the tests, the effect of a strong increase in hysteresis loops after the initial plastic deformation was reported to the sample was detected and quantitatively explored. The parameters of the loops are obtained depending on the value of the amplitude stress. The recorded graphs of decreasing amplitudes over time (up to 1000 periods) are in good agreement with the hysteresis loops obtained during static tests. The initial plastic deformation was also cyclic with deformation amplitudes 17% higher than the yield strength of the material. The effect of restoring the plastic deformation obtained by the sample after oscillations with stress amplitudes of 200 MPa was found. The oscillations cause the plastic deformation to be restored by more than 40%.

Keywords: deviations from Hooke’s law, hysteresis loops, initial plastic deformation, plastic execution, strengthening of damping properties, degradation of acquired damping properties, restoration of plastic deformation after oscillations, laboratory installation, damping oscillations, internal friction

1. Введение

Проблема правильного учета внутреннего трения при колебаниях по-прежнему остается актуальной, однако до сих пор является мало изученной. Многие работы затрагивают математическую сторону вопроса и посвящены различным модификациям дифференциальных уравнений движения [1–6] с точки зрения учета внутреннего трения в материале. Однако следует отметить, что установившихся подходов к учету внутреннего трения в материале, имеющих достаточно полное экспериментальное подтверждение, в настоящее время еще не получено. Общепринятым положением в настоящее время является утверждение о том, что в реальном материале закон Гука не идеально выполняется, что и приводит к рассеянию энергии [7–10]. В связи с этим экспериментальное изучение отклонений от закона остается актуальным.

В предыдущих работах авторов [11–13] демпфирование изучалось путем рассмотрения записей убывания амплитуд при свободных колебаниях. В соответствии с мнением многих специалистов силы внутреннего трения не зависят от скорости деформаций [14–16], а также являются зависимыми от амплитуды цикла колебаний [17–19], и для их изучения можно привлекать статические методы испытаний. Статические методы заключаются прежде всего в построении диаграмм деформирования материала, включающих участки нагружения и разгрузки, с построением соответствующих петель гистерезиса, которые дают потерю энергии за один цикл колебаний и, соответственно, характеризуют демпфирование. В настоящей работе приведены результаты, как статических, так и динамических испытаний для оценки отступлений от закона Гука и, соответственно, внутреннего трения в материале.

Vladimir B. Zylev, Doctor of Science (Technical), Head of Department of Structural Mechanics, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-5160-0389; E-mail: zylevzb@ya.ru

Pavel O. Platnov, PhD student, Department of Structural Mechanics, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9765-7417; E-mail: manuntdfan@mail.ru

К сожалению для специалистов по внутреннему трению, диаграмма деформирования (петля гистерезиса) не является чем-то стабильным для конкретного материала и даже для конкретного образца. Очертание гистерезисной петли зависит от множества разнообразных факторов, среди которых отметим лишь некоторые: уровень амплитуд напряжений в цикле деформирования; параметры асимметрии цикла нагружений; установившаяся петля, или неустойчивая и др.

Настоящая работа посвящена исследованию относительно небольших деформаций с рассмотрением лишь одноосного напряженного состояния. И даже в этой очень узкой области исследования возникают сложности полного описания диаграммы деформирования, которые представляются в настоящий момент труднопреодолимыми. В данной работе авторы воспользовались упрощенной характеристикой гистерезисных петель, а именно относительной шириной петли b/c , где b есть остаточная деформация в образце после снятия нагрузки, а c есть амплитуда упругой деформации (рис. 1, б).

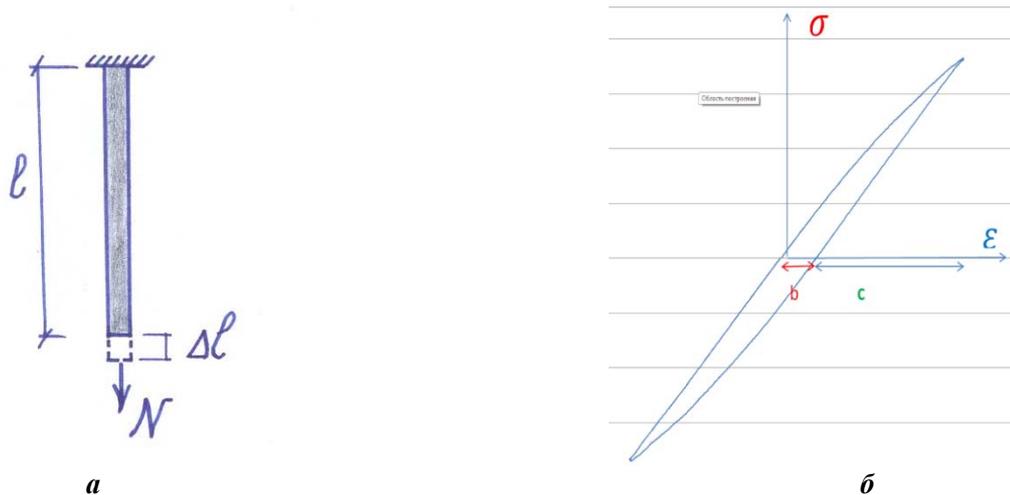


Рис. 1. Испытание стержня на растяжение-сжатие:
 b/c — отношение остаточного удлинения к упругому — характеристика ширины петли гистерезиса;
 а — идеализированная схема растяжения-сжатия образца;
 б — петля гистерезиса с указанием ее относительной ширины

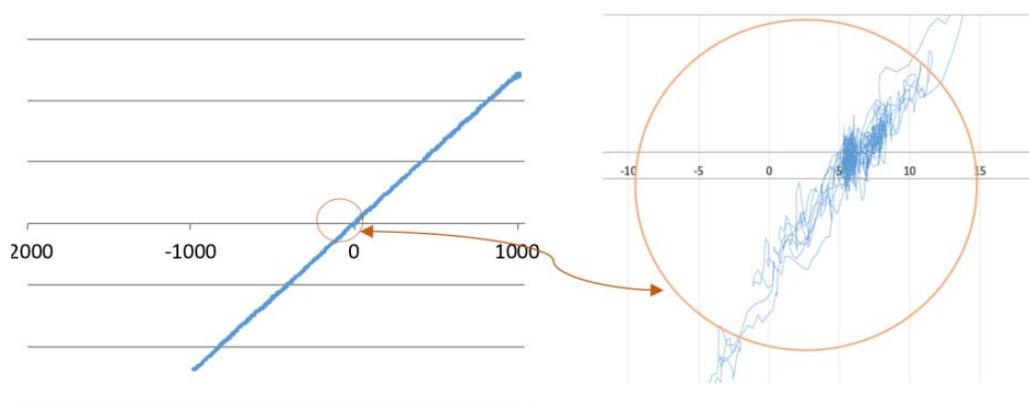
Figure 1. Rod tension-compression test:
 b/c — the ratio of residual elongation to elastic — characteristic of the width of the hysteresis loop;
 а — idealized tension-compression scheme of the sample;
 б — hysteresis loop with indication of its relative width

В соответствии с целями работы величина отношения b/c является достаточно малой, например, $b/c = 0,04$ будет для нас уже весьма существенной величиной. Отметим, что петля, изображенная на рис. 1, б, хотя и представляет инструментальную запись для исследуемого в работе стального образца, но получена при создании принудительной начальной деформации с напряжениями, превышающими предел текучести материала на 17 %.

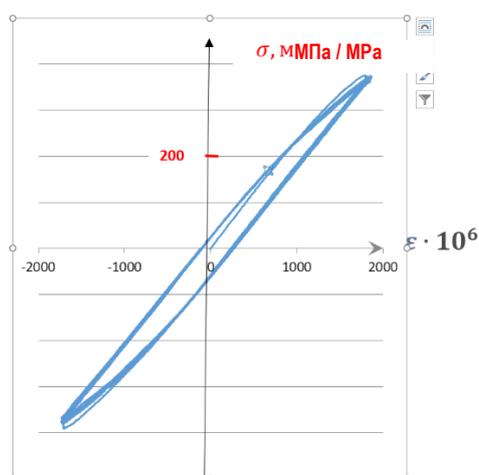
Рассмотрим рис. 2, который приведен для пояснения целей работы и одновременно демонстрирует основные ее результаты.

На рис. 2, а, показана гистерезисная петля для малоуглеродистой стали, когда амплитуда симметричного цикла деформаций составляла $\varepsilon = 1000 \cdot 10^{-6}$, соответственно напряжения достигали 200 МПа. Последнее значение обычно принято считать пределом пропорциональности для малоуглеродистой стали. Образец до этого испытания не был подвержен никаким нагрузкам. Мало того, после поставки образец был выдержан в течение полутора лет без напряжений. Последнее условие также является весьма существенным.

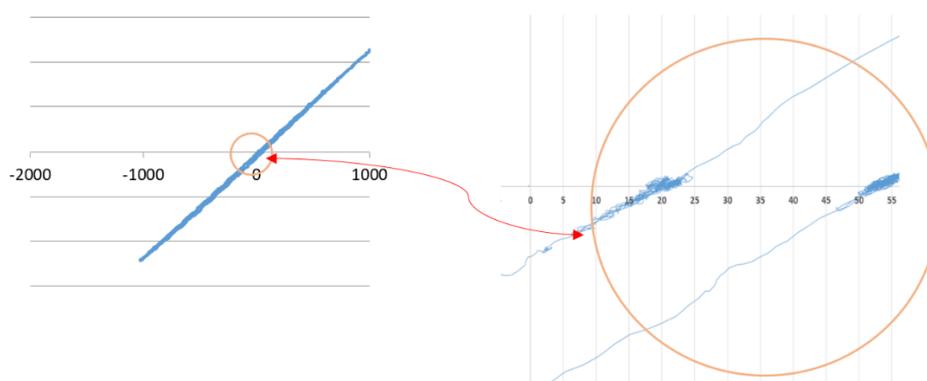
Тензометрическая аппаратура, которой пользовались авторы, позволяет выдавать минимальное цифровое значение для деформации $1 \cdot 10^{-6}$, что соответствует значению напряжения 0,2 МПа. Петля на рис. 2, а смотрится как идеальная прямая и свидетельствует о хорошем выполнении закона Гука в данном случае. Здесь трудно говорить о ширине петли, так как точности и стабильности тензометрической аппаратуры в данном случае не хватает (см. увеличенный фрагмент петли на рис. 2, а). Ее относительная ширина $b/c \approx 0,002$. Это настолько малая величина, что она становится практически неуловимой как в



a



б



в

Рис. 2. Гистерезисные петли, полученные экспериментальным путем:

- a* — петля для стали образца после поставки от производителя и выдержки в течение 1,5 лет;
- б* — петля гистерезиса, соответствующая интенсивной пластической циклической деформации образца с пятикратным выходом за пределы текучести материала при растяжении и сжатии;
- в* — расширенная петля гистерезиса (отношение b/c увеличилось в 17 раз по сравнению с исходным состоянием образца)

Figure 2. Hysteresis loops obtained experimentally:

- a* — loop for sample steel after delivery from the manufacturer and exposure for 1,5 years;
- б* — a hysteresis loop corresponding to intense plastic cyclic deformation of the sample with five-time exceeding of the yield strength of the material during tension and compression;
- в* — extended hysteresis loop (the b/c ratio increased 17 times compared to the initial state of the sample)

статическом, так и в динамическом испытании. В определенном смысле здесь можно утверждать, что закон Гука идеален, и гистерезис отсутствует. При выполнении статического эксперимента выполнялись и медленные загрузки, когда время одного цикла доходило до 20 минут. Ожидаемого уширения петли гистерезиса при этом однако не наблюдалось.

На рис. 2, б, показаны гистерезисные петли при больших амплитудах циклических деформаций. При внимательном рассмотрении рисунка можно увидеть первую петлю, которая отличается от остальных установившихся петель. Амплитудные значения относительной деформации при растяжении и сжатии по модулю составляли $1,17 \cdot \varepsilon_T = 1750 \cdot 10^{-6}$. Таким образом, при 5 циклах загрузок напряжения в материале выходили за предел текучести.

Целью этой стадии загрузки являлось не изучение формы петли гистерезиса, а внесение во внутреннюю структуру образца существенных изменений. Этому циклу загрузок в данной статье дается условное наименование «пластическая экзекуция». Как видно по результатам испытаний, «пластическая экзекуция» вызывает существенные нарушения закона Гука в области малых деформаций. Под малыми деформациями здесь понимаются деформации, не превышающие стандартное значение предела пропорциональности. Конкретно в данном случае $\varepsilon_{\text{пц}} = 1000 \cdot 10^{-6}$, что соответствует $\sigma_{\text{пц}} = 200$ МПа, т.е. традиционная область действия закона Гука для малоуглеродистой стали.

На рис. 2, в, показана петля гистерезиса уже после «пластической экзекуции». Отметим, что внешне она выглядит почти так же, как и первоначальная петля на рис. 2, а, однако ее относительная ширина увеличилась в 17 раз. Различие можно видеть на увеличенном фрагменте петли (см. рис. 2, в, справа). Такое нарушение упругих характеристик материала является наиболее важным принципиальным результатом настоящей работы. Отметим, что при $b/c \approx 0,0339$ гистерезисная петля зрительно остается достаточно узкой, однако этой петле будет соответствовать существенное демпфирование (подробнее об этом далее).

2. Методика исследований

Остановимся на способах выполнения экспериментов достаточно подробно, так как только подробное описание позволит давать оценку достоверности полученных инструментальных замеров и сделанных при их обработке допущений.



Рис. 3. Образец с коробчатым прямоугольным сечением:
а — фото; б — некоторые характеристики сечения

Figure 3. Sample with box-shaped rectangular cross-section:
а — photo; б — some characteristics of cross-section

Отметим, что по многим соображениям обычная испытательная машина, предназначенная для построения диаграмм растяжения, здесь не может быть использована. Перемещения, соответствующие небольшим пластическим деформациям, существенно меньше, чем необратимые смещения и подвижки в стандартных захватах образца. Вообще схема, где образец подвергается растяжению и сжатию, реально очень сложна в использовании, поскольку при сжатии образец будет терять устойчивость. Использовать

короткие образцы также невозможно, так как неравномерное напряженное состояние у областей закрепления будет искажать получаемые результаты.

По указанным соображениям приходится отказаться от идеализированной схемы растяжения-сжатия. Фактически выполнялись испытания образцов коробчатого сечения (рис. 3, а) на чистый изгиб. На рис. 3, б, дано поперечное сечение образца и приведены некоторые его характеристики. Преимущество такого типа образца заключается в том, что его сечение при изгибе относительно горизонтальной оси близко к идеальному двутавру. В пределах данной работы будет с некоторым приближением принято, что сечение образца есть идеальный двутавр.

Испытательная установка, которая была запроектирована и изготовлена в лаборатории имени Л.Д. Проскуракова кафедры строительной механики РУТ (МИИТ), показана на рис. 4. Эта установка предназначена для статических испытаний.

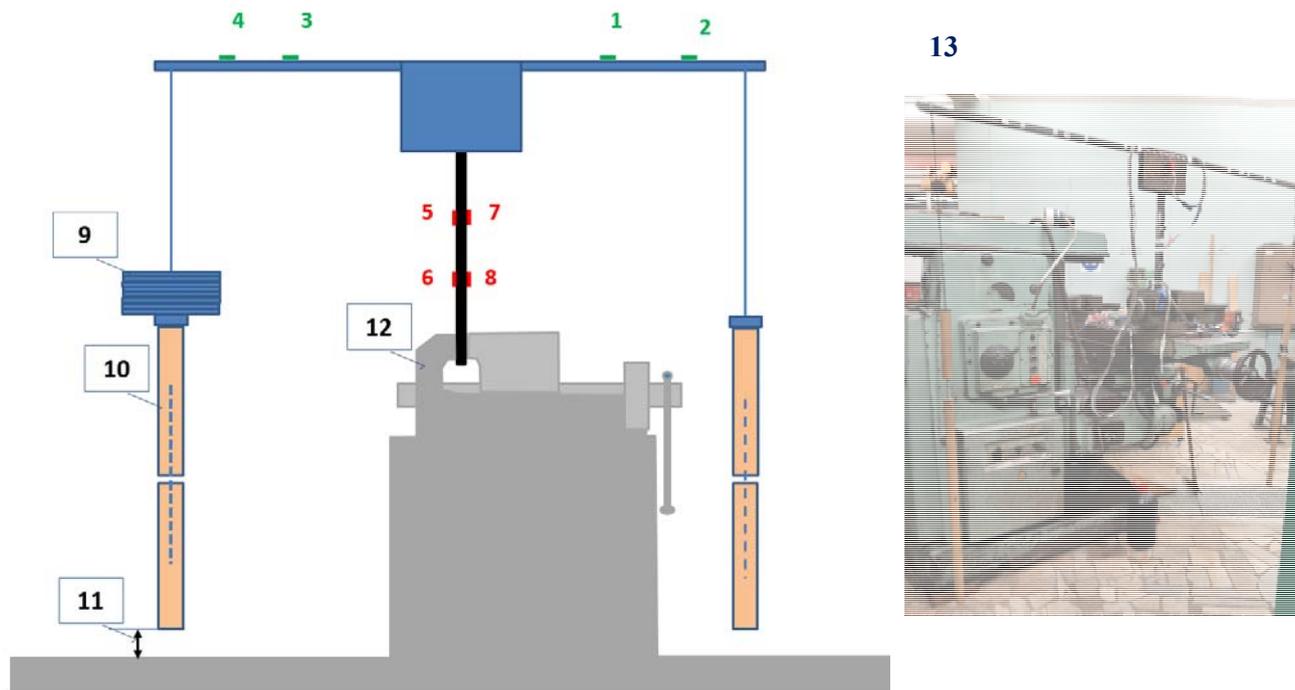


Рис. 4. Установка для статических испытаний:

1–4 — тензодатчики-силоизмерители; 5–8 — тензодатчики, измерители деформаций на образце (образцом является вертикальный стержень); 9 — тарированные грузы по 1 кг; 10 — штанги регулируемой длины; 11 — выставяемый зазор до пола; 12 — штатные большие тиски фрезерного станка; 13 — фото установки

Figure 4. Installation for static tests:

1–4 — load cells-dynamometers; 5–8 — load cells, deformation gauges on the sample (the sample is a vertical rod); 9 — rated loads of 1 kg; 10 — adjustable length rods; 11 — exhibited clearance to the floor; 12 — regular large milling machine vise; 13 — installation photo

Укладывая грузы 9 (см. рис. 4), можно вызвать в правой полке вертикально расположенного образца растяжение. Плечи в Т-образной установке равны 1 м. Положив любое удобное количество грузов (в данном случае грузы варьировались от 1 до 20 кг), можно выставить нужный зазор (см. рис. 4) под штангами. Таким образом, желательный изгибающий момент можно будет получить, опустив штангу до касания с полом. Последний способ позволяет увеличить скорость загрузки по сравнению с укладкой тарированных грузов.

Кроме изгибающего момента в образце возникает небольшая продольная сила. Напряжение от нее составляет менее одного процента от напряжения изгиба. В рамках настоящей статьи эти напряжения не учитывались. Датчики 1–4 служат силоизмерителями. Фактически использовались показания датчиков 2 и 4, которые пропорциональны действующему в образце изгибающему моменту. Сечения, в которых наклеены датчики 2 и 4, испытывают изгибающий момент, в четыре раза меньший, чем в образце, поэтому здесь для измерения нагрузки можно пользоваться законом Гука.

Показания всех тензодатчиков записываются в память компьютера с частотой 100 Гц (при необходимости до 1000 Гц), что позволяет строить соответствующие графики, определяющие характер приложения нагрузки во времени. Консоли установки изготовлены из того же профиля, что и образец (см. рис. 4). Заделка осуществляется при помощи крупногабаритных тисков фрезерного станка. На уровне губок тисков в образец вставляется стальной вкладыш, воспринимающий усилие затяжки, так что заделка получается качественной. Все тензодатчики имели рабочую длину 70 мм.

Тензодатчики 7 и 8, измеряющие деформацию, удалены от заделки, напряженное состояние в месте их установки близко к равномерному растяжению (или сжатию). Укладывая грузы на правую штангу установки, в этих же точках можно получить равномерное сжатие. При проектировании установки был выполнен конечно-элементный анализ устойчивости равновесия прямоугольного профиля при чистом изгибе как коробчатой пластинчатой системы [20]. Этот анализ показал, что образец имеет 8-кратный запас по устойчивости, выпучивание полок образца не будет иметь место.

2.1. План статических испытаний

1. Получение гистерезисных петель при циклическом нагружении (5 симметричных циклов). Уровень амплитудных напряжений в порядке возрастания составляет 50, 100, 150 и 200 МПа. Образец был взят от поставщика с выдержкой 1,5 года. Загружение осуществлялось по ускоренной схеме с использованием выставленных зазоров под штангами.

2. Сильное пластическое циклическое нагружение до уровня $1,17\varepsilon_T$, где $\varepsilon_T = 0,0015$. По результатам ранее выполненных испытаний материала образца предел текучести оказался близок к 300 МПа. На рис. 5 показана инструментальная запись деформации во времени при «пластической экзекуции». Материал образца получает интенсивную пластическую деформацию, составляющую более 20 % от упругой. Но подчеркнем здесь, что это не те остаточные деформации, которые являются основной целью данных исследований. В данной работе изучаются отступления от закона Гука при сравнительно небольших напряжениях ($\sigma < 200$ МПа).

3. Далее снова выполняется получение гистерезисных петель по пункту 1.

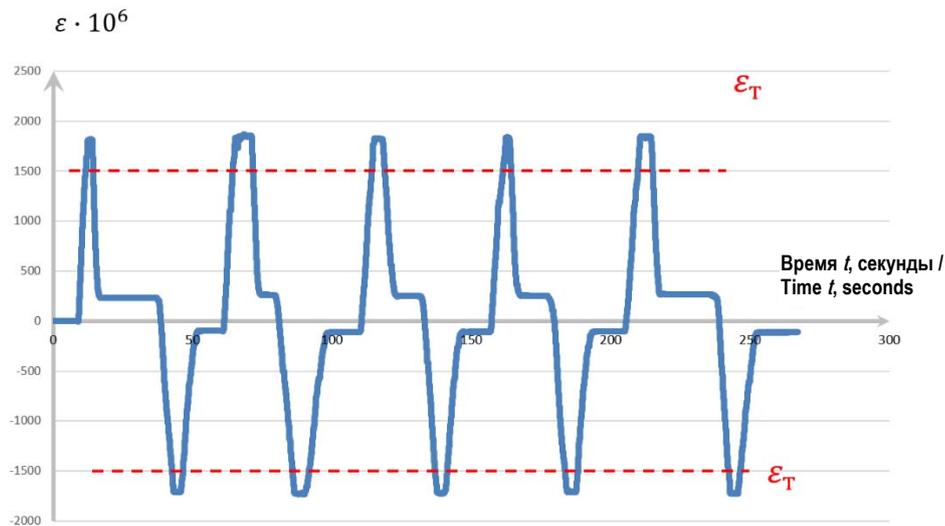


Рис. 5. Изменение деформаций на поверхности образца при интенсивной «пластической экзекуции»

Figure 5. Change of deformations on the sample surface during intensive “plastic execution”

2.2. Результаты статических испытаний

На рис. 5 показан график «пластической экзекуции» по записи датчика № 8. Остальные датчики, наклеенные на образец, дают практически тождественные результаты. Как видно из рис. 5, пять циклов нагружения при «пластической экзекуции» заняли около 5 минут. Соответствующая «экзекуции» петля гистерезиса показана на рис. 2, б. При построении петель гистерезиса характер изменения деформаций во времени был примерно таким же, а амплитуды были, естественно, меньше.

На рис. 6 представлены характеристики ширины петель при различных значениях амплитуд циклов. Здесь следует констатировать, что свойства физической нелинейности после «пластической экзекуции» принципиально изменились. Действительно, относительная ширина петли для всех исследованных значений амплитуд увеличилась *более чем в 10 раз*. Заметим, что и после «пластической экзекуции» гистерезисная петля остается все же достаточно узкой (см. рис. 2, в), остаточные деформации составляют максимум 3,8 % от упругой, однако до «экзекуции» петля практически отсутствовала.

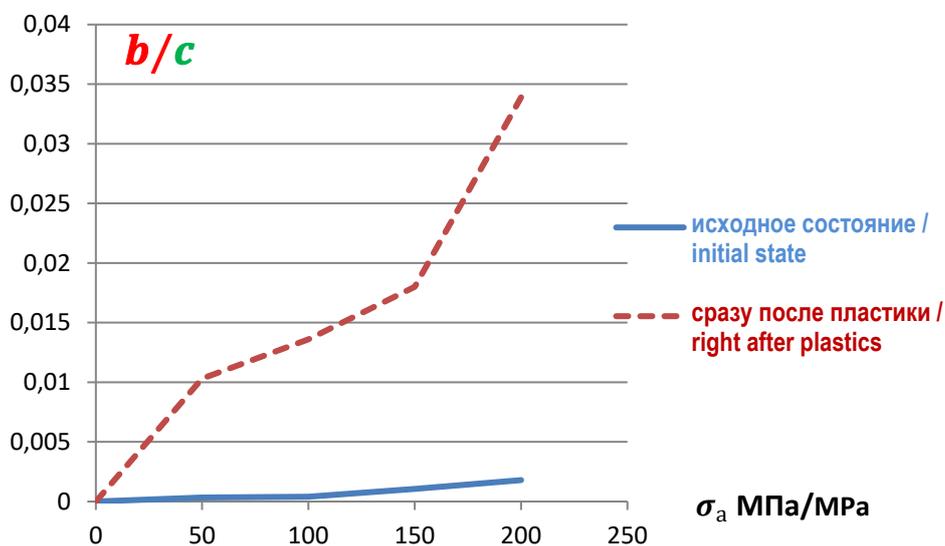


Рис. 6. Характеристики ширины петель гистерезиса до и после «пластической экзекуции»
Figure 6. Characteristics of the width of hysteresis loops before and after “plastic execution”

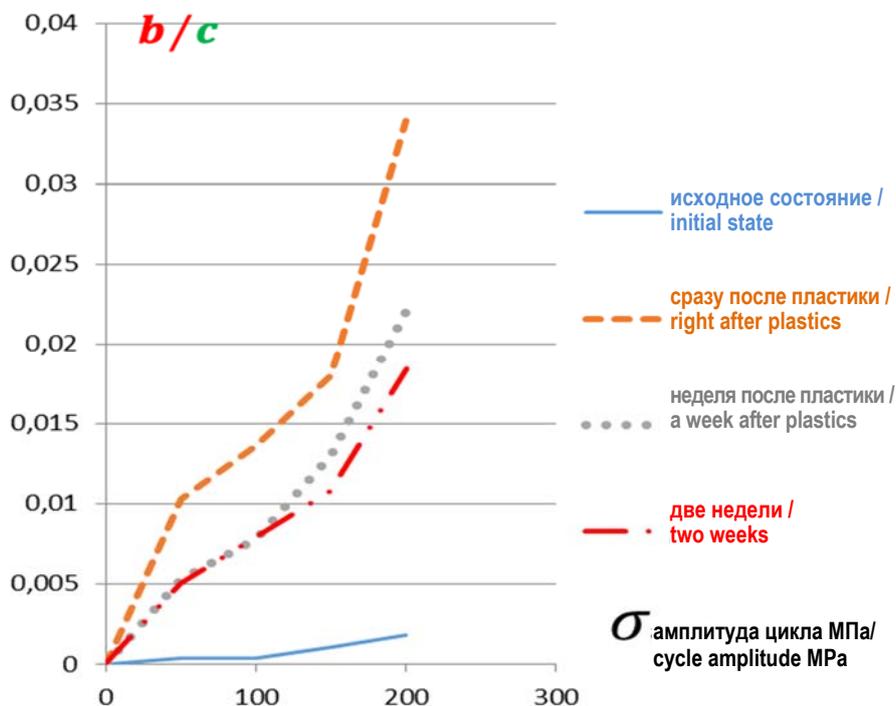


Рис. 7. Дegradация свойств, приобретенных после «пластической экзекуции»
Figure 7. Degradation of properties acquired after “plastic execution”

Также был исследован вопрос о деградации свойств пластичности, приобретенных после «экзакуции» (см. рис. 7). С этой целью были построены гистерезисные петли через неделю и две недели после «экзакуции». Рассматривая рис. 7, можно убедиться, что приобретенные свойства малой пластичности довольно быстро теряются. В незагруженном стальном образце происходят некоторые необратимые процессы, и последствия «пластической экзакуции» залечиваются. Отметим, что этот эффект был уже отмечен в работе авторов [12], однако там это было сделано на основании динамических испытаний.

2.3. Динамические испытания

Из того же стержня прямоугольного профиля, который использовался для статических испытаний, был вырезан образец длиной 180 см, динамические испытания которого рассмотрены далее (см. рис. 8). Этот образец уже ранее был испытан на колебания с амплитудами напряжений около 300 МПа. Подробное описание конструктивных особенностей лабораторной установки, разработанной авторами для динамических испытаний, дано в [11–13]. Также установка была доукомплектована оснасткой для производства «пластической экзакуции», которая также контролировалась при помощи тензодатчиков, наклеенных на образец.



Рис. 8. Затухающие свободные колебания динамической установки, подвешенной на подшипниках качения в точках покоя
Figure 8. Damped free oscillations of a dynamic installation suspended on rolling bearings at fixed points

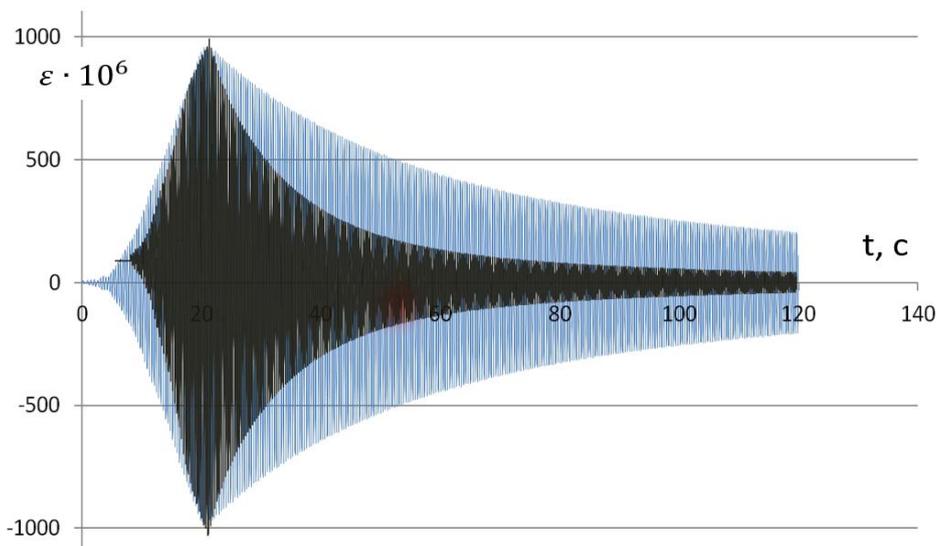


Рис 9. Запись деформации на поверхности полки образца при свободных колебаниях (включая участки разгона): голубой график — исходный образец динамической установки; черный график — образец после «пластической экзакуции»
Figure 9. Graph of deformation of the sample shelf surface under free oscillations (including acceleration sections): blue graph — the initial sample of a dynamic installation; black graph — sample after «plastic execution»

Сначала путем раскачки вручную в установке вызывалась форма колебаний, показанная на рис. 8. Амплитуда колебаний устанавливалась такой, чтобы напряжения в полках образца составляли 200 МПа, далее система совершала затухающие колебания. На рис. 9 голубым цветом показан график изменения деформации на поверхности полки образца. Показания тензодатчика снимались с частотой 100 Гц. График

на рис. 9 содержит 314 периодов (включая участок разгона, когда амплитуда нарастает). На рисунке приведена запись для 120 секунд динамического процесса. Экспериментальное значение технической частоты оказалось равным 2,62 Гц.

Далее выполнялась интенсивная «пластическая экзекуция», параметры которой были тождественны «экзекуции», создаваемой в статической установке. На рис. 10 представлена запись относительной деформации на поверхности полки образца во время этого процесса.

Данная «экзекуция» была реализована подобно выполненной в статической установке, но она заняла существенно большее время (см. рис. 10).

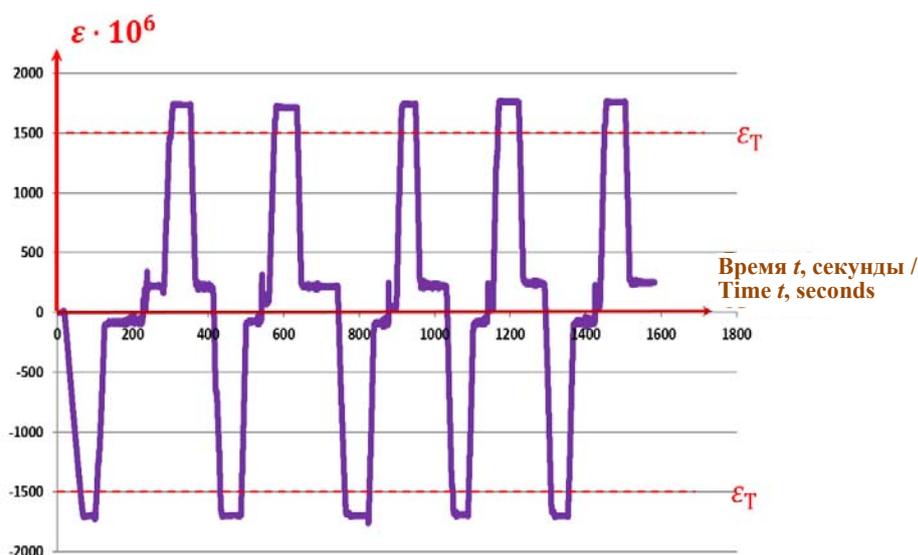


Рис. 10. «Пластическая экзекуция» образца в динамической установке

Figure 10. «Plastic execution» of a sample in a dynamic installation

Непосредственно после выполнения «экзекуции» с установки демонтировалась необходимая для этого оснастка. Путем раскачки вручную установка вновь выводилась из равновесия до колебаний с амплитудными напряжениями 200 МПа. Черный график на рис. 9 показывает, как в этом случае нарастали и убывали амплитуды при свободных затухающих колебаниях. Для удобства сравнения графики затухающих колебаний до и после «экзекуции» наложены друг на друга, причем черный график пришлось сместить по горизонтали и по вертикали. Смещение по горизонтали обеспечивало совпадение максимальных амплитуд. Смещение по вертикали обеспечивало совпадение графиков в момент выхода системы на положение равновесия. Прежде всего, обсудим необходимость смещения черного графика по вертикали. Оно связано с некоторым физическим эффектом, который представляет самостоятельный интерес. Авторами не было найдено его описание в опубликованных работах.

Полка образца, на которую наклеен датчик, фиксирующий переменную деформацию, непосредственно перед рассматриваемыми колебаниями получила большое остаточное удлинение, которое, как можно видеть на рис. 10, составляет $252 \cdot 10^{-6}$. Если образец оставить ненагруженным, эта остаточная деформация будет очень незначительно уменьшаться за счет известного явления упругого последствия. Как видно, колебания с амплитудой 200 МПа резко ускоряют этот процесс, и свежеполученная пластическая деформация уменьшается до значения $81,5 \cdot 10^{-6}$. На рис. 11, а, график затухания после «экзекуции» показан отдельно, на нем отчетливо видно его смещение вниз. Кроме того, на этом графике показано большее количество колебаний (1000 периодов), что также может представлять интерес. На рис. 11, б, представлен график логарифмического декремента колебаний. Ни о каком постоянстве этой величины во времени говорить не приходится. При уменьшении амплитуды в процессе рассматриваемого колебательного процесса логарифмический декремент колебаний уменьшается более чем в 10 раз.

Рис. 9 отчетливо показывает, какое существенное влияние оказывает начальная пластическая деформация на затухание колебаний, обусловленное внутренним трением. Как было отмечено выше, образец, использованный нами для динамических испытаний, ранее уже испытывался на колебания с амплитудой

порядка 300 МПа. Если бы образец имел нетронутую начальную структуру, синий график на рис. 9 показывал бы еще меньшее затухание.

Явление усиления демпфирующих свойств стали после начальной пластической деформации было ранее отмечено авторами [12]. С точки зрения живучести конструкций этот эффект является положительным, так как гашение колебаний усиливается с нарастанием динамических напряжений. Если говорить о задаче создания адекватных моделей внутреннего трения в материале, то эту задачу он очевидно усложняет, так как недостаточным становится точное определение материала, необходимо знать еще предварительную историю его нагружений. С этой точки зрения любая теория внутреннего трения, игнорирующая этот эффект, является всегда уязвимой.

Уровень предварительной деформации (уровень «пластической экзекуции»), рассматриваемый в данной работе, является достаточно высоким, однако следует отметить, что реальная конструкция всегда имеет достаточное количество областей с концентраторами напряжений, в которых рассматриваемый уровень может достигаться. В этом случае потребуются учет неоднородности свойств демпфирования по объему конструкции.

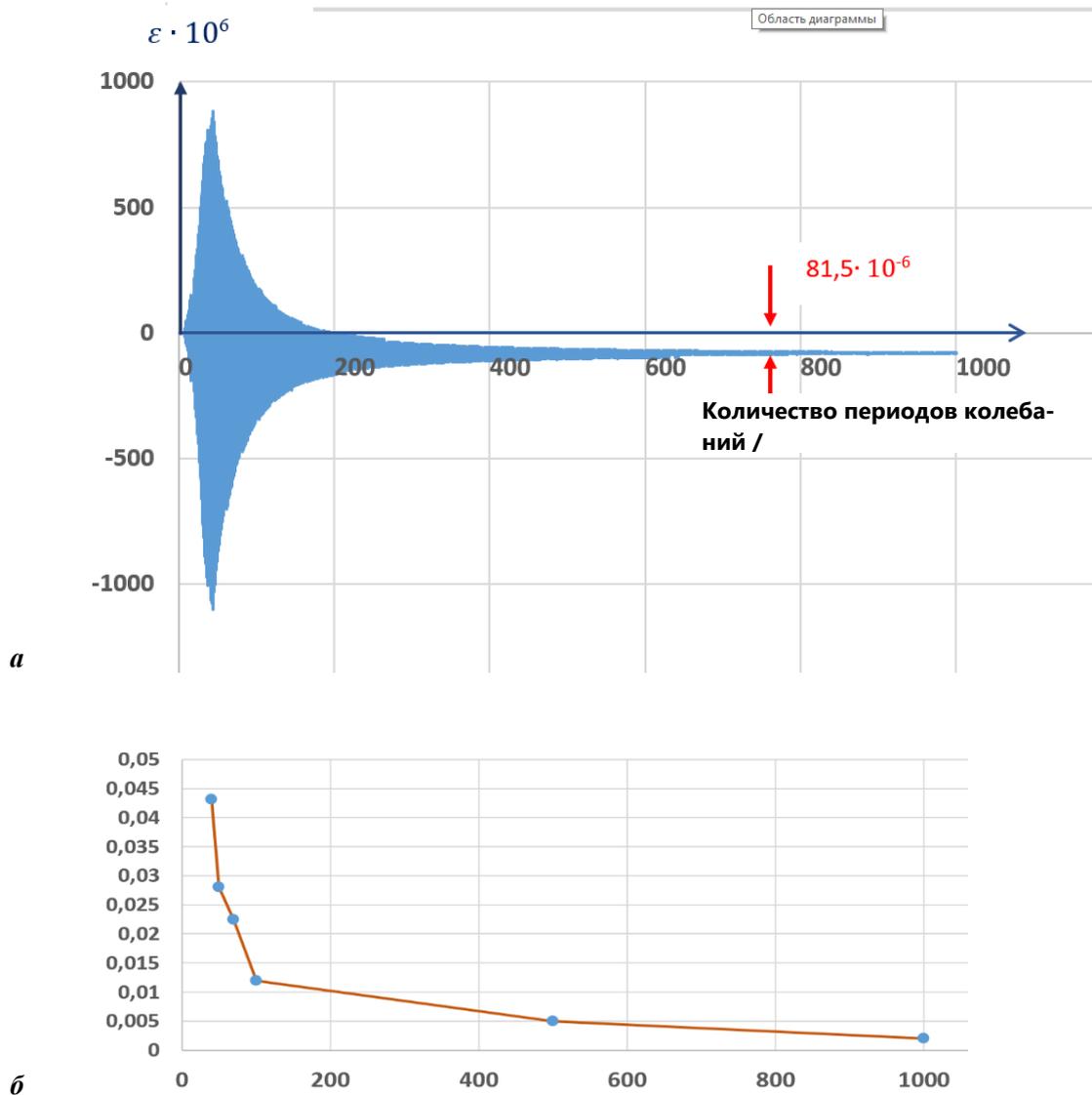


Рис. 11. Затухающие колебания после «пластической экзекуции»:
a — колебания, вызвавшие уменьшение начальной пластической деформации;
б — изменение логарифмического декремента колебаний с уменьшением амплитуды

Figure 11. Damping oscillations after «plastic execution»:
a — oscillations that caused a decrease in the initial plastic deformation;
б — change in the logarithmic decrement of oscillations with decreasing amplitude

Важно убедиться в том, что гистерезисные петли, которые были получены в первой части работы, соответствуют потерям амплитуд, которые представлены в динамических испытаниях второй части. Для сравнения будем рассматривать состояние образцов из статической и динамической установок после «пластической экзекуции».

При заполнении таблицы площади гистерезисных петель определялись в программе Excel по данным статических испытаний. После получения площадей петель вычислялась относительная потеря энергии за цикл $\Psi = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}}$, и далее, с учетом фактической малости потерь, относительная потеря амплитуды, $\frac{\Delta A}{A} = \frac{\Psi}{2}$. Данные о потере амплитуды за цикл колебаний при динамическом испытании определялись непосредственно по записанным показаниям датчиков.

Отношения потери амплитуды к текущей амплитуде за цикл колебаний на основании статических и динамических испытаний

Текущее значение амплитуды напряжений при колебаниях σ_a , МПа	Статические испытания	Динамические испытания
	$\frac{A_n - A_{n+1}}{A_n}$ на основании использования площади петли гистерезиса	$\frac{A_n - A_{n+1}}{A_n}$ по записи колебаний с графика с рис. 11, а
200	0,0431	0,0355
150	0,0280	0,0285
100	0,0224	0,0230
50	0,0160	0,0160
4	–	0,005

The ratio of the amplitude loss to the current amplitude per oscillation cycle based on static and dynamic tests

The current value of the stress amplitude during oscillations σ_a , МПа	Static tests	Dynamic tests
	$\frac{A_n - A_{n+1}}{A_n}$ based on the use of the hysteresis loop area	$\frac{A_n - A_{n+1}}{A_n}$ by recording oscillations from the graph from Figure 11, a
200	0.0431	0.0355
150	0.0280	0.0285
100	0.0224	0.0230
50	0.0160	0.0160
4	–	0.005

Как видно, результаты статических и динамических испытаний, несмотря на неизбежные погрешности в экспериментах, удовлетворительно согласуются. Это в очередной раз подтверждает гипотезу о частотной независимости внутреннего трения.

3. Заключение

1. В ходе лабораторных испытаний образцов из малоуглеродистой стали получен эффект сильного увеличения свойств демпфирования после начальной пластической деформации.

2. Полученная зависимость демпфирующих свойств от начальной пластической деформации позволяет сделать вывод о том, что теории внутреннего трения, игнорирующие этот эффект, уже по этой причине содержат в себе существенный недостаток.

3. Выполнено сравнение потери амплитуды за цикл при статических испытаниях с потерями при затухающих колебаниях. Это сравнение показало, что, выполнив статические испытания и получив таким образом площади соответствующих гистерезисных петель, можно определить и потери амплитуд при колебаниях. Таким образом, небольшие пластические деформации малоуглеродистой стали и соответствующие изменения в ее диаграмме деформирования и определяют демпфирующие свойства этого материала.

4. В ходе динамических испытаний обнаружен эффект частичного восстановления остаточных деформаций после колебаний с амплитудами, значение которых не превышает традиционного значения предела пропорциональности для стали.

Список литературы

1. Вешкин М.С., Гребенюк Г.И. Об использовании комплексной модели внутреннего трения в расчетах стержневых систем на импульсные воздействия // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 5. С. 5–17. EDN: JDRXJD
2. Гребенюк Г.И., Вешкин М.С. Расчет упругих стержневых систем на динамические воздействия с использованием модели «комплексной жесткости» для внутреннего трения в материалах // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020. № 5. С. 18–30. <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-737-5-18-30>
3. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Внутреннее трение при продольных колебаниях троса // Вестник Балтийского Федерального университета им. И. Канта. Серия: физико-математические и технические науки. 2017. № 3. С. 84–92. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnutrennee-trenie-pri-prodolnyh-kolebaniyah-trosa> (дата обращения: 12.02.2023)
4. Вронская Е.С. Динамический расчет призматических систем с учетом внутреннего трения // Градостроительство и архитектура. 2017. № 3. С. 24–27. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2017.03.5>
5. Воронай А.В., Гришакин В.Т. Моделирование внутреннего вязкого трения в материале пластины при ее нестационарном нагружении с помощью дифференциальных и интегральных операторов // Труды МАИ. 2019. № 109. С. 3. <https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-3>
6. Bielak J., Karaoglu H., Taborda R. Memory-efficient displacement-based internal friction for wave propagation simulation // Geophysics. 2011. Vol. 76. No. 6. P. 131–145. URL: <https://www.sceec.org/publication/1468> (дата обращения: 12.02.2023)
7. Писаренко Г.С. Колебания упругих систем с учетом рассеяния энергии в материале. Киев: Издательство Академии Наук Украинской ССР, 1955. 240 с.
8. Пановко Я.Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. 193 с. URL: <https://djvu.online/file/TWuQdyEARXlqh> (дата обращения: 12.02.2023)
9. Сорокин Е.С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания // Исследования по динамике сооружений. М.: Госстройиздат, 1951. С. 5–90.
10. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Госстройиздат, 1960. 154 с.
11. Зылев В.Б., Платнов П.О. Использование точек покоя при экспериментальном изучении внутреннего трения в материале // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. Т. 15. № 5. С. 399–404. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-399-404>
12. Зылев В.Б., Платнов П.О. Экспериментальное исследование зависимости параметров демпфирования от начальной пластической деформации, уровня напряжений и частоты // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли РФ в 2019 году: в 2 томах. 2020. Т. 2. С. 197–203.
13. Зылев В.Б., Платнов П.О. Модели, эквивалентные по демпфированию, в экспериментах по определению параметров внутреннего трения в материалах // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 1. С. 45–53. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-45-53>
14. Кочнева Л.Ф. Внутреннее трение в твердых телах при колебаниях. М.: Наука, 1979. 96 с.
15. Мальшев А.П. Построение модели частотно-независимого демпфирования по амплитудной характеристике коэффициента поглощения // Прикладная математика и механика. 2003. Т. 67. № 1. С. 134. EDN: OOMUEZ
16. Гребенюк Г.И., Роев В.И. О расчете диссипативных систем с частотно-независимым внутренним трением // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2002. № 7. С. 21–27.
17. Мальшев А.П. Моделирование интенсивного амплитудно-зависимого внутреннего демпфирования динамических процессов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2003. № 2. С. 103.
18. Malygin G.A. Amplitude-dependent internal friction and similarity of temperature dependences of microflow and macroflow stresses of a crystal // Physics of the Solid State. 2000. Vol. 42. Is. 4. P. 706–711. <https://doi.org/10.1134/1.1131276>
19. Nazarov V.E., Kiyashko S.B. Amplitude-dependent internal friction and harmonic generation in media with hysteresis nonlinearity and linear dissipation // Radiophysics and quantum electronics. 2014. Vol. 56. Is. 10. P. 686–696. <https://doi.org/10.1007/s11141-014-9473-1>
20. Зылев В.Б., Платнов П.О., Алферов И.В. Устойчивость прямоугольного тонкостенного профиля при нагружении по схеме чистого изгиба // Качество. Инновации. Образование. 2020. № 2 (166). С. 41–45. <http://doi.org/10.31145/1999-513x-2020-2-41-45>

References

1. Veshkin M.S., Grebenyuk G.I. On the use of the complex model of internal friction in calculations of rod systems on pulse impacts. *News of higher educational institutions. Construction*. 2019;(5):5–17. (In Russ.) EDN: JDRXJD

2. Grebenyuk G.I., Veshkin M.S. Calculation of elastic rod systems for dynamic influences using the complex rigidity model for internal friction in materials. *News of higher educational institutions. Construction*. 2020;(5):18–30. (In Russ.) <http://doi.org/10.32683/0536-1052-2020-737-5-18-30>
3. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. The internal friction in longitudinal oscillations of the wire rope. *Journal of I. Kant Baltic Federal University. Series: Physical, Mathematical and Technical Sciences*. 2017;(3):84–92. (In Russ.) Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/vnutrennee-trenie-pri-prodolnyh-kolebaniyah-trosa> (accessed: 12.02.2023)
4. Vronskaya E.S. Dynamic calculation of prismatic systems taking into account internal friction. *Urban construction and architecture*. 2017;(3):24–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2017.03.5>
5. Voropay A.V., Grishakin V.T. Viscous friction modelling in material of a plate under its non-stationary loading with differential and integral operators. *Trudy MAI [Works of MAI]*. 2019;(109):3. (In Russ.) <https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-3>
6. Bielak J., Karaoglu H., Taborda R. Memory-efficient displacement-based internal friction for wave propagation simulation. *Geophysics*. 2011;76(6):131–145. Available from: <https://www.scec.org/publication/1468> (accessed: 12.02.2023)
7. Pisarenko G.S. *Oscillations of elastic systems taking into account the energy dissipation in the material*. Kiev: Izdatel'stvo Akademii Nauk Ukrainskoj SSR Publ.; 1955. (In Russ.)
8. Panovko Ya.G. *The internal friction at oscillations of elastic systems*. Moscow: Izdatel'skij dom fiziko-matematicheskij literatury Publ.; 1960. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/TWuQdyEARXlqh> (accessed: 12.02.2023)
9. Sorokin E.S. Method of accounting for inelastic resistance of the material in the calculation of structures under vibrations. In: *Research on the Dynamics of Structures*. Moscow: Gosstroizdat Publ.; 1951. p. 5–90. (In Russ.)
10. Sorokin E.S. *On the theory of internal friction at oscillations of elastic systems*. Moscow: Gosstroyizdat Publ.; 1960. (In Russ.)
11. Zylev V.B., Platnov P.O. The use of fixed points in experimental research of the internal friction of material. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2019;15(5):399–404. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2019-15-5-399-404> (In Russ.)
12. Zylev V.B., Platnov P.O. Experimental research of the dependence of damping parameters on the initial plastic deformation, stress level and frequency. *Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and construction industry of the Russian Federation in 2019. In 2 volumes*. (Vol. 2). 2020;2:197–203. (In Russ.)
13. Zylev V.B., Platnov P.O. Models equivalent in damping in experiments for determining the parameters of internal friction in materials. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(1):45–53. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-1-45-53>
14. Kochneva L.F. *Internal friction in solids during vibrations*. Moscow: Nauka Publ.; 1979. (In Russ.)
15. Malyshev A.P. Modeling of frequency-independent damping based on the amplitude characteristic of absorption coefficient. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2003;67(1):134. (In Russ.) EDN: OOMUEZ
16. Grebenyuk G.I., Roev V.I. On the calculation of dissipative systems with frequency-independent internal friction. *News of higher educational institution. Construction*. 2002;(7):21–27. (In Russ.)
17. Malyshev A.P. Modeling of intensive amplitude-dependent internal damping of dynamic processes. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2003;(2):103. (In Russ.)
18. Malygin G.A. Amplitude-dependent internal friction and similarity of temperature dependences of microflow and macroflow stresses of a crystal. *Physics of the Solid State*. 2000;42(4):706–711. <https://doi.org/10.1134/1.1131276>
19. Nazarov V.E., Kiyashko S.B. Amplitude-dependent internal friction and harmonic generation in media with hysteresis nonlinearity and linear dissipation. *Radiophysics and quantum electronics*. 2014;56(10):686–696. <https://doi.org/10.1007/s11141-014-9473-1>
20. Zylev V.B., Platnov P.O., Alferov I.V. The stability of rectangular thin-walled profile with loading according to the scheme of pure bending. *Quality. Innovation. Education*. 2020;2(166):41–45. (In Russ.) <http://doi.org/10.31145/1999-513x-2020-2-41-45>