УДК 539.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОСТУЛАТА ИЗОТРОПИИ

доц. А.Г. ЩЕРБО, канд. техн. наук, доц. В.Э. ЗАВИСТОВСКИЙ (Полоцкий государственный университет)

Представлены результаты экспериментального исследования одного из основных положений общей математической теории пластичности А.А. Ильюшина – постулата изотропии для траекторий нагружения с разгрузками. Рассматриваются траектории нагружения одинаковой геометрии, различно ориентированные в пространстве напряжений. Эксперименты проведены на установке P-M опытов, выполненной по типу «мертвой нагрузки», на трубчатых образцах из латуни Л-68. На основе экспериментальных данных создан образ процесса упругопластического деформирования, приведены результаты сравнительного анализа траекторий в виде графиков и таблиц, отражающих векторные и скалярные свойства процесса. Экспериментальные результаты, полученные в данной работе, подтверждают положения постулата изотропии для траекторий нагружения с разгрузками. Результаты хорошо согласуются с результатами работ, выполненных на образцах из сталей 20, 45, 30ХГСА, X18H10T для траекторий с разгрузками, и дополняют результаты, подтверждающие постулат изотропии при активном нагружении, указывая на универсальность этого теоретического положения.

Введение. Проектирование и расчет конструкций, работающих в условиях исчерпания несущей способности, необходимость повышения их надежности и долговечности требуют углубленного изучения закономерностей нелинейного упругопластического деформирования материалов при сложном нагружении и процессов их разрушения. Современные испытательные системы позволяют получить достоверные экспериментальные данные об упругопластических процессах при весьма сложных пространственных траекториях нагружения, изучить такие тонкие вопросы, как, например, влияние времени или изменение упругих свойств на развитие упругопластических деформаций. Имеющиеся экспериментальные данные служат хорошей основой для анализа существующих и разработки новых теорий пластичности. Исследование процессов упругопластического деформирования производится на основе теоретических моделей, которые достаточно многочисленны и зачастую вступают в противоречие друг с другом [1]. Практический интерес представляют лишь те теории, которые дают надежные результаты, подкрепленные экспериментально, например, общая математическая теория пластичности А.А. Ильюшина [2 – 7].

Экспериментальная проверка постулата изотропии при активном нагружении выполнялась неоднократно и подтверждает состоятельность для траекторий данного класса этого теоретического положения, лежащего в основе теории Ильюшина. Ниже приводятся результаты экспериментальной проверки постулата изотропии для траекторий нагружения с разгрузками на образцах из латуни Л68 (химический состав по ГОСТ 15527-70).

Методика проверки постулата изотропии заключалась в следующем. Осуществлялась некоторая траектория нагружения, содержащая промежуточную разгрузку, и создавался образ процесса, соответствующий данной траектории нагружения, т.е. в точках траектории вычислялись модули соответствующих векторов деформации и определялась их ориентация относительно траектории нагружения. Затем осуществлялась подобная траектория нагружения, иначе, ориентированная в пространстве напряжений с последующим сравнением образов процесса.

Установка и образцы. Установка, на которой проводились испытания, спроектирована таким образом, что на ней возможно создание плоского напряженного состояния, путем растяжения и закручивания трубчатого тонкостенного образца, и осуществление траекторий деформирования практически любой геометрии за исключением траекторий с составляющими, определяемыми сжатием [8].

Установка, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1, смонтирована на П-образной раме, выполненной из прокатного стального двутавра № 14 (ГОСТ 8239-89). Все соединения рамы сварные, в основании соединение ужесточено стальными косынками. С помощью винтов основания стойки рамы приводятся в вертикальное положение. Основание верхнего захвата крепится в отверстии ригеля рамы с помощью шаровой опоры и гайки. Фиксирующие винты 6 позволяют устанавливать основание верхнего захвата с закрепленным образцом в строго вертикальное положение. Вертикальность образца *1* контролируется с помощью двух отвесов с гидравлическими демпферами в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Верхний захват 2 представляет собой цанговый зажим, в котором верхний конец трубчатого образца, заглушенный предварительно стальной пробкой, укрепляется с помощью гайки и стальных клиновидных сухарей, имеющих на внутренних поверхностях насечку для предохранения образца от проскальзывания в окружном и продольном направлениях. Во избежание нарушения формы сечения трубчатого образца высота цилиндрической пробки на 2...3 мм больше высоты сухарей. Нижний захват *3* выполнен аналогично.

При закреплении образца в зажимах уделялось особое внимание равномерному расположению сухарей по окружности, так как при нарушении этого требования в зажиме образуется складка на стенке образца, провоцирующая в дальнейшем потерю устойчивости при его закручивании.



Рис. 1. Схема установки: 1 – образец; 2 – верхний захват; 3 – нижний захват; 4 – осевая нагрузка; 5 - крутящий момент; 6 - фиксирующие винты

По нижнему захвату образца крепится промежуточное звено – подвеска, представляющая поддон 4 для растягивающей нагрузки. Подвеска выполнена таким образом, что растягивающая нагрузка передается в точке соприкосновения стального конуса и стального цилиндра с конусовидной впадиной, предварительно закаленных во избежание смятия в точке контакта. Конструкция подвески позволяет приводить растягивающую нагрузку к оси образца и корректировать при необходимости ее положение в ходе эксперимента, а также не препятствует повороту нижнего захвата при закручивании образца. Для предотвращения колебаний поддона его нижняя часть крепится к основанию рамы с помощью упругих горизонтальных связей.

Крутящая нагрузка 5 передается на нижний конец образца системой тросов и блоков в виде пары сил с плечом 200 мм (диаметр шкива, укрепленного на нижнем захвате образца). Трос представляет собой прядь каната диаметром 3 мм, обладающую достаточно большой жесткостью.

Шкивы, передающие крутящий момент на нижний конец образца, укрепленного в захвате, установлены на осях жестких кронштейнов с подшипниками, обеспечивая таким образом передачу крутящего момента без потерь.

Длина образцов – 200 мм, наружный диаметр D = 16 мм, толщина стенки – 1 мм. Нагружение образцов производит-

Деформации измеряются с помощью зеркальных

Тарировка гирь произведена на рычажных весах с исполь-

зованием эталонных грузов. Толщина стенки трубчатого образца (рис. 2), измерялась специально сконструированным устройством на основе стандартного индикатора часо-

Кронштейны укрепляются на раме болтовым соединением, которое позволяет перемещать их в вертикальном направлении, что дает возможность исследовать образцы разной длины. При закручивании образца в результате нагружения и повороте шкивов, тросы, передающие крутящий момент, из-за различного рода неточностей в соединениях отклоняются от горизонтали на угол, не превышающий 3°, что соответствует ошибке по крутящей нагрузке 0,1 %. Вследствие малости ошибка в расчетах не учитывается.



Рис. 2. Схема измерения толщины стенки образца: 1 – трубчатый образец;

С целью большего удобства в работе отсчеты регистрируются на экране, выполненном на цилиндрической поверхности. Деформации растяжения регистрируются по 2 – индикатор часового типа; 3 – направляющая вертикали вдоль образующей цилиндра, углы закручивания

вого типа с ценой деления 0.01 мм.

тензометров Мартенса.

регистрируются по окружной шкале. Для улучшения видимости обеспечивается подсветка экрана направленным источником света, укрепленным на раме установки.

При используемых в работе базах тензометра регистрировались относительные деформации растяжения 0,0025 %, относительные деформации сдвига 0,0015 %. Погрешность с учетом неточностей при измерении размеров образца, оптического рычага не превышала 2...3 %, что следует признать удовлетворительным.

Техника измерений. Образ процесса деформирования создается путем регистрации деформации и соответствующего этой деформации напряжения. Под образом процесса понимается совокупность траекторий деформации с определенными в каждой точке траектории векторами напряжения. Установка позволяет создавать в элементах образца плоское напряженное состояние.

Нормальные напряжения создаются растягивающей нагрузкой и определяются выражением:

$$\sigma = \frac{m_{\rm p}}{A},\tag{1}$$

где *P*_p – растягивающая нагрузка; *А* – площадь поперечного сечения образца.

ся гирями точного веса. Наибольшее отклонение в весе одной гири в 10 кг не превышает 0,6 %, гири 5 кг – 0,4 %. Отклонение в весе более мелких гирь не превышает 0,5 %.

2008

Регистрация растягивающей нагрузки производится путем суммирования веса приложенных тарированных грузов. Площадь поперечного сечения определяется следующим образом:

$$A = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4},$$
 (2)

где *D* – наружный диаметр трубчатого образца; *d* – внутренний диаметр.

Параметры образца измеряются до испытания. В ходе эксперимента изменения диаметров и толщины стенки не учитываются, а определяются условные напряжения. Анализ показал, что использование истинных напряжений в рабочем диапазоне уточняет результат весьма незначительно, в таких же пределах, как и погрешности, вызванные различными ошибками измерений [9].

Касательные напряжения получаем из выражения:

$$\tau = \frac{M_{\kappa}}{W_{p}},\tag{3}$$

где M_{κ} – крутящий момент; W_p – полярный момент сопротивления. Крутящий момент определяется по весу крутящей нагрузки:

$$M_{\kappa} = M_{\kappa} \frac{P_{\kappa p} d_{uu}}{2}, \qquad (4)$$

где *P_{кp}* – крутящая нагрузка; *d_{uu}* – диаметр шкива, передающего крутящий момент на нижний конец образца. Полярный момент сопротивления определяется, как обычно, для кольцевого сечения:

$$W_p = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{16D}.$$
 (5)

Когда процесс деформирования выходит за пределы упругости, пластические деформации распространяются на всю стенку трубчатого образца. Полярный момент сопротивления вычисляется из условия постоянства объема по формуле:

$$W_p = \frac{\pi (D^3 - d^3)}{12}.$$
 (6)

Регистрация деформаций осуществлялась описанным выше тензометром Мартенса. Использовались следующие базы прибора: при растяжении – 30 мм и 50 мм; при кручении – 50 и 70 мм.

В настоящем исследовании рассматривались такие процессы деформирования, в которых деформации растяжения не превышали 2 % или ненамного превышали эту величину. В этом случае разница между деформациями условными и истинными, учитывающими изменение базы тензометра в результате растяжения, не превышает 1,5 %, что позволило использовать условные продольные и сдвиговые деформации. Кроме этого база тензометра меняется при перестановке призмы тензометра по мере исчерпания диапазона (призма ложится гранью на грань шины тензометра). Эти изменения входят в указанные 1,5 %.

Для обоснования методики, учитывающей протяженность процесса деформирования во времени на каждом уровне напряжений, были поставлены специальные эксперименты, целью которых было выявление на характер деформирования уровня напряжений и величины приращения нагрузки на каждой степени нагружения.

Анализ показывает, что «мгновенная» деформация, т.е. деформация, определенная сразу после приложения нагрузки, составляет 1/8...1/10 часть доли деформации, выделяющейся на данном уровне напряжений. Деформирование на каждом уровне напряжений протекает длительно и длится тем дольше, чем выше уровень напряжений. На высоких уровнях напряжений скорость деформации снижалась до величины 10⁻⁵ мин⁻¹ по истечении 40...50 мин [10, 11].

Если выделить некоторый, одинаковый для всех уровней напряжения, промежуток времени (например, 10 первых минут), то из анализа приведенных результатов следует, что доля деформации, выделившейся за это время, изменяется. При растяжении и кручении с ростом величины приращения напряжения (скорости нагружения) доля деформации, выделившаяся за первые 10 минут деформирования на данном уровне, растет весьма значительно. С ростом же уровня напряжений при одинаковой скорости нагружения эта величина уменьшается.

Данный эксперимент позволил выявить следующую особенность: независимо от скорости нагружения и уровня напряжений скорость деформирования по прошествии некоторого времени от приложения очередного груза уравнивается и далее деформирование продолжается в одинаковых условиях, т.е. деформации затухают одинаково. Конечно, время до начала этого процесса в зависимости от уровня напряжений и скорости нагружения разное. Учитывая эту особенность, была принята следующая методика регистрации деформаций. Отсчет на каждом уровне напряжений снимается при достижении скоростью деформации определенной величины. Таким образом, деформацию при пластическом деформировании целесообразно определять по допуску на ее скорость, тогда получаются адекватные результаты, т.е. на каждом уровне напряжений «отсекается» одинаковая доля деформации. С тем чтобы величина неучтенной деформации была минимальной, допуск на скорость должен быть как можно меньше.

Траектории нагружения строились в пространстве напряжений, где составляющие вектора напряжений

S

$$\vec{S} = S_1 \vec{i}_1 + S_3 \vec{i}_3 \tag{7}$$

определялись по формулам:

$$S_1 = \sigma; \ S_3 = \tau \sqrt{3}, \tag{8}$$

здесь σ и τ – соответственно осевое и касательное напряжения. Составляющие вектора деформации

$$\vec{\vartheta} = \Im_i \vec{i}_1 + \Im_i \vec{i}_3 \tag{9}$$

определялись по формулам:

$$\Theta_1 = \varepsilon; \ \Theta_3 = \frac{\gamma}{\sqrt{3}},$$
(10)

где є и у – соответственно осевые и сдвиговые деформации.

Траектории нагружения представляют собой двухзвенники с углом излома около 157°. Первая траектория получена следующим образом: начальное звено путем активного растяжения и закручивания до напряжения $S_1 = 52$ МПа, $S_3 = 263$ МПа ($S_i = 267$ МПа), затем при $S_1 = \text{const}$ уменьшение крутящей нагрузки до 0 с последующим реверсом. Достигнутая при этом начальная деформация \mathcal{P}_i составила 2,37 % (составляющие $\mathcal{P}_1 = 1,09$ % и $\mathcal{P}_3 = 2,1$ %). Начальное звено второй траектории получено путем закручивания образца до напряжения $S_3 = S_i = 267$ МПа, чему соответствует деформация $\mathcal{P} = 2,29$ % ($\mathcal{P}_1 = 1,06$ %,



Рис. 3. Траектории нагружения образцов: 1 – растяжение и закручивание; 2 – закручивание и растяжение

 $\mathcal{P}_3 = 2,03$ %), затем уменьшение крутящей нагрузки с одновременным увеличением растягивающей в пропорции, соответствующей углу излома траектории 157° (рис. 3).

Анализ образа процесса начального звена двухзвенника позволяет сделать заключение об идентичности процесса деформирования при активном нагружении. Отклонения по деформациям в точках одинакового нагружения не превышали 3,5 %, а в точке излома траектории после временной выдержки указанное отклонение составило 3,2 %, что следует признать удовлетворительным.

Временная выдержка в точках излома обеих траекторий предпринята с целью полного прекращения деформирования на начальном звене двухзвенника и составила 1 час для каждой траектории.

В каждой точке второго звена траекторий нагружения строились векторы напряжений *S*, и деформа-

ции $\hat{\mathcal{Y}}_i$. По мере удаления от точки излома угол α между указанными векторами изменялся, нарастая вначале и уменьшаясь в конце вторичного звена. Этим углом характеризуются векторные свойства процесса. Некоторые численные характеристики анализа изменения угла α следующие: первая траектория: $\alpha = 0$ в точке излома, наибольшее значение $\alpha = 124^{\circ}$ на удалении $\Delta S_i = 217$ МПа от точки излома, $\alpha = 45^{\circ}$ – на удалении 272 МПа; вторая траектория: $\alpha = 0$ в точке излома, наибольшее значение $\alpha = 119^{\circ}$ на удалении $\Delta S_i = 219$ МПа от точки излома и $\alpha = 41^{\circ}$ – на удалении 277 МПа. Здесь ΔS_i – участок второго звена траектории нагружения от точки излома до рассматриваемой точки.

Графики зависимости угла отставания вектора деформации от вектора напряжения показаны на рисунке 4, где ΔS – участок второго звена траектории от точки излома до рассматриваемой точки; сплошной линией показана аппроксимирующая зависимость, выраженная уравнением (11). Из графика рисунка 4 видно, что наибольшее «отставание» вектора деформации \vec{J} от вектора напряжения \vec{S} составляет угол 125...128° и приходится на точки траекторий 1 и 2, удаленные от точки излома на величину 210

и 205 МПа соответственно. Анализ графиков рисунка 4 показывает, что расхождение угла α в одинаково расположенных точках обеих траекторий не превышает 5...6 % на всем протяжении, за исключением точек, примыкающих к тыльной границе упругой поверхности. Это связано с нестабильностью процесса



Рис. 4. Зависимость угла между векторами напряжения \vec{S} и деформации $\vec{\mathcal{I}}$ от длины траектории нагружения



Рис. 5. зависимости интенсивности напряжения S от длины траектории деформации ΣЭ

деформирования в указанной части траектории и подтверждает выводы [10, 12], где это явление наблюдалось на примере другого материала.

Скалярные свойства анализировались путем сравнения диаграмм $|\vec{S_i}| - |\vec{\partial_i}|$ и диаграмм $\Delta S_i - \Delta \partial_i$, т.е. определялись: в первом случае длины векторов S_i и ∂_i , во втором – удаление $\Delta \partial_i$ по траектории деформирования при удалении ΔS_i по траектории нагружения. Сравнение $|\vec{S_i}| - |\vec{\partial_i}|$ показывает, что наибольшее отклонение данной зависимости составило 7 %, наибольшее отклонение зависимости $\Delta S_i - \Delta \partial_i$ составило 5 %. Участки, где указанные зависимости отклоняются на наибольшую величину, соответствуют выходу в пластическую область после прохождения тыльной границы текучести. Иллюстрируют скалярные свойств образа процесса нагружения рисунки 5 и 6.



Рис. 6. Взаимосвязь между приращением вектора деформации ΔЭ и напряжения ΔS при ступенчатом нагружении

На рисунке 5 изображена зависимость длины вектора напряжения S_i от длины траектории деформирования Σ 9 (сплошной линией показана аппроксимирующая зависимость, выраженная уравнением (12)). На участке кривых за точкой излома траекторий наблюдается резкое уменьшение длины вектора напряжения S_i и после достижения минимального значения, равного 51 и 47 МПа для траекторий 1 и 2 соответственно, имеет место рост этой величины. Кривые 1 и 2 на рисунке 5 идентичны, расхождение по напряжения не превышает 5 %, а по деформациям – 7 %. Траектории деформирования, полученные при простом нагружении, обозначены цифрами 3 и 4. Кривая 3 соответствует чистому кручению, кривая 4 – растяжению. Анализ взаимного расположения кривых 1 и 2 между собой и по отношению к кривым 3 и 4 показывает, что результаты опыта согласуются с выводами работы [11].

На рисунке 6 изображена зависимость $\Delta \mathcal{P} - \Delta S$, где $\Delta \mathcal{P} - длина дуги траектории деформации от точки излома до текущей точки, а <math>\Delta S - длина дуги траектории напряжения до соответствующей текущей точки. Из рисунка 6 видно, что кривые, соответствующие траекториям 1 и 2, разнятся незначительно. Наибольшее отклонение и здесь наблюдается в указанной ранее зоне нестабильности процесса упругопластического деформирования вблизи тыльной границы области упругой деформаций.$

Следующие две идентичные траектории нагружения 3 и 4 (табл. 1, 2) имели такие параметры. Начальное звено траектории 3 получено путем закручивания образца до напряжения 123 МПа, а начальное звено траектории 4 – пропорциональным нагружением растягивающей и крутящей нагрузкой до напряжения 118 МПа. Деформация при этом достигла следующих величин: первая траектория – 1,36 %,

вторая траектория – 1,44 %. Различия составляют: по напряжениям – 4,1 %, по деформациям – 5,6 %. Окончательно деформация в точках излома обеих траекторий регистрировалась после временной выдержки; после этого осуществлялось второе звено траектории. Для первой траектории второе звено получено приращением вектора напряжений на величину 5,5 МПа на каждом шаге нагружения; для второй траектории приращение вектора напряжений составило 5,06 МПа на каждом шаге нагружения. Составляющие векторов напряжений и деформаций для обеих траекторий приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Экспериментальные значения составляющих	векторов напряжений S _i и деформаций Э _i
после точки излома,	для траектории 3

<i>S</i> ₃ , МПа	$\mathcal{P}_1, \%$	<i>Э</i> 3, %
123,0	0,0	1,36
111,0	0,01	1,35
101,0	0,012	1,35
96,1	0,014	1,35
81,0	0,018	1,34
70,8	0,022	1,34
60,7	0,022	1,33
45,5	0,024	1,32
35,4	0,028	1,31
15,2	0,032	1,30
0,0	0,036	1,29
-10,1	0,038	1,28
-20,2	0,040	1,27
-30,4	0,046	1,26
-40,5	0,052	1,24
-50,6	0,060	1,21
-55,7	0,066	1,20
-60,7	0,070	1,19
-70,8	0,080	1,16
-81,0	0,150	1,08
-86,0	0,18	1,06
-91,1	0,24	0,98
-96,1	0,33	0,87
-101,2	0,44	0,74
-106,3	0,58	0,58
-111,3	0,73	0,41
-116,4	0,88	0,19
-121,4	1,14	-0,02
	$\begin{array}{r} S_{3}, M\Pi a \\ 123,0 \\ 111,0 \\ 101,0 \\ 96,1 \\ 81,0 \\ 70,8 \\ 60,7 \\ 45,5 \\ 35,4 \\ 15,2 \\ 0,0 \\ -10,1 \\ -20,2 \\ -30,4 \\ -40,5 \\ -50,6 \\ -55,7 \\ -60,7 \\ -70,8 \\ -81,0 \\ -86,0 \\ -91,1 \\ -96,1 \\ -101,2 \\ -106,3 \\ -111,3 \\ -116,4 \\ -121,4 \\ \end{array}$	$S_3, M\Pi a$ $\mathcal{P}_1, \%$ 123,00,0111,00,01101,00,01296,10,01481,00,01870,80,02260,70,02245,50,02435,40,02815,20,0320,00,036-10,10,038-20,20,040-30,40,046-40,50,052-50,60,060-55,70,066-60,70,070-70,80,080-81,00,150-86,00,18-91,10,24-96,10,33-101,20,44-106,30,58-111,30,73-116,40,88-121,41,14

Таблица 2

Экспериментальные значения составляющих векторов напряжений S_i и деформаций Э_i после точки излома для траектории 4

S_1 , M Π a	<i>S</i> ₃ , МПа	$\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{H}$	Э3, %
46,7	110,0	0,51	1,35
46,7	99,0	0,51	1,34
46,7	66,0	0,52	1,33
46,7	44,0	0,52	1,32
46,7	16,5	0,53	1,31
46,7	-23,4	0,53	1,30
46,7	-40,3	0,54	1,28
46,7	-57,2	0,55	1,25
46,7	-68,4	0,55	1,24
46,7	-85,2	0,55	1,22
46,7	-90,8	0,56	1,21
46,7	-102,0	0,59	1,16
46,7	-113,2	0,63	1,04
46,7	-118,8	0,67	0,86
46,7	-124,4	0,69	0,80

46,7	-130,0	0,78	0,66		

На основании экспериментальных данных [13, 14] получены аппроксимирующие зависимости, позволяющие теоретически описывать двухзвенные процессы, рассмотренные выше. Векторные свойства процесса описываются функцией:

$$\alpha(x) = (-4, 2x^3 + 1382x^2 - 41407x) \cdot 10^{-5} - 0,868, \tag{11}$$

где $x = \Delta S$.

Скалярные свойства процесса деформирования можно описать следующей функцией:

$$\mathcal{G}_i = 143, 5 - 134988 \cdot e^{-5y},\tag{12}$$

Где \mathcal{P}_i – интенсивность деформации; $y = \Sigma \mathcal{P}$.

Приведенные функции получены для участков траекторий после точки излома. Они могут быть использованы для описания образа процесса нагружения, имеющего идентичные параметры: длину начального звена и угол излома траектории.

Заключение. Приведенные результаты, полученные на латунных образцах, экспериментально подтверждают постулат изотропии в случаях нагружения по двухзвенным траекториям с разгрузками. Совпадение данного вывода с аналогичным, полученным на материалах сталь 20, 45, X18H10T, 30XГСА [10, 15, 16], позволяет сделать вывод об универсальности постулата изотропии – основы теории упругопластических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. М.: Мир, 1969. Т. 2. 863 с.
- 2. Ильюшин, А.А. Пластичность / А.А. Ильюшин. М.: ГИТТЛ, 1948. 376 с.
- Ильюшин, А.А. Сопротивление материалов / А.А. Ильюшин, В.С. Ленский. М.: Высш. шк., 1969. 476 с.
- 4. Андреев, Л.С. О проверке постулата изотропии / Л.С. Андреев // Прикладная механика. № 7. 1969. С. 122 125.
- 5. Елсуфьев, С.А. Экспериментальная проверка постулата изотропии и закона запаздывания общей теории пластичности / С.А. Елсуфьев // Гидротехника. № 2. 1964. С. 143 151.
- 6. Ленский, В.С. Экспериментальная проверка законов изотропии и запаздывания при сложном нагружении / В.С. Ленский // Изв. АН СССР. Серия механика и машиностроение. № 11. 1958. С. 15 24.
- 7. Ленский, В.С. Экспериментальная проверка основных постулатов общей теории упругопластических деформаций / В.С. Ленский // Вопросы теории пластичности. М.: Изд. АН СССР, 1961. С. 58 82.
- 8. Завистовский, В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями / В.Э. Завистовский. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – 144 с.
- Пригоровский, Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений / Н.И. Пригоровский. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
- 10. Щербо, А.Г. Экспериментальная проверка постулата изотропии для траекторий нагружения с разгрузками / А.Г. Щербо // Прикладная механика. – 1990. – Т. 26, № 1. – С. 72 – 77.
- 11. Шишмарев, О.А. Образ процесса нагружения для двузвенных ломаных траекторий деформации с углом излома более 90° / О.А. Шишмарев, А.Г. Щербо // Изв. АН СССР. Серия механика твердого тела. – 1982. – № 5. – С. 185 – 189.
- Щербо, А.Г. Методика испытания материалов за пределом упругости для построения равновесной модели процесса / А.Г. Щербо, В.К. Родионов // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин. – Новополоцк: ПГУ, 1999. – С. 83 – 85.
- Zawistowskey, W.E. Experimental study of postulate of isotropy for trajectories with the point of break with unloading / W.E. Zawistowskey, A.G. Scherbo // Extended abstracts VI International Symposium on CREEP and COUPLED PROCESSES. – Bialystok, 1998. – P. 117 – 120.
- 14. Завистовский, В.Э. Экспериментальное исследование образа процесса нагружения латунных образцов для траекторий одинаковой внутренней геометрии с разгрузками / В.Э. Завистовский, А.Г. Щербо // Материалы, технологии, инструменты. 1999. Т. 4, № 4. С. 14 17.
- Мохель, А.Н. Теоретическое описание запаздывания пластического деформирования сталей / А.Н. Мохель, Р.Л. Салганик, С.А. Христианович // Пластичность и разрушение твердых тел. – М.: Наука, 1988. – С. 145 – 157.
- Щербо, А.Г. Экспериментальное исследование поверхности текучести с учетом изменения упругих свойств / А.Г. Щербо // XLI Науч.-техн. конф. преподавателей и студентов Витебск. гос. технолог. ун-та: тез. докл. – Витебск, 2008. – С. 33.

Поступила 28.08.2008