

ОЦЕНКА СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ

*М.Г. ПЕТРОВ, канд. техн. наук
(ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»,
г. Новосибирск)*

Поступила 03 сентября 2014
Рецензирование 18 сентября 2014
Принята к печати 25 сентября 2014

Петров М.Г – 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21,
ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина»,
e-mail: markp@risp.ru

Исследована кинетика разрушения однонаправленного стеклопластика при циклическом продольном изгибе. В процессе разрушения структурное состояние композита определяется по изменениям его жесткости и неупругости. Изменения жесткости свидетельствуют о появляющихся повреждениях как на стадии расслоения композита, так и во время разрыва волокон. Амплитудная зависимость неупругости связана с распределением внутренних напряжений по объему материала. Она характеризует состояние структуры материала по мере развития в нем повреждений. По изменениям этих характеристик делается вывод о стадиях процесса разрушения композита и возможностях прогнозирования его долговечности.

Ключевые слова: композиционный материал, продольный изгиб, жесткость, неупругие деформации, разрушение, долговечность.

Введение

Любой материал является структурно-неоднородной средой. Структурное состояние материала можно количественно отобразить в виде поля внутренних напряжений. При нагружении материала в результате высоких внутренних напряжений, возникающих в структуре материала под нагрузкой, происходят локальные пластические деформации, в результате которых появляется неупругость. Амплитудная зависимость неупругости связана, таким образом, с неоднородностью структуры материала и тем самым является характеристикой его структурного состояния.

В композиционных материалах (КМ), как и в металлических сплавах или полимерах, наблюдаются те же типы неупругих деформаций. При малых амплитудах нагружения всегда присутствует неупругость релаксационного типа, проявляющаяся в виде отставания деформации

от напряжений во времени и связанная с вязким течением материала в локальных объемах. При увеличении амплитуды нагружения появляется гистерезисный тип неупругости, вызванный пластическим течением в локальных объемах твердого тела. Каждый тип неупругости имеет свои амплитудные, частотные и температурные зависимости, по которым можно установить их природу. На рис. 1–3 приведены амплитудные зависимости раскрытия петли неупругости для стали, полиметилметакрилата (ПММА) и боропластика, иллюстрирующие сходство этих характеристик у материалов различного вида.

Вязкое и пластическое течения отличаются тем, что энергия активации процесса в первом случае не зависит [1], а во втором зависит [2] от напряжений. Каждый тип неупругости может быть воспроизведен в расчетах соответствующими реологическими моделями, содержащими соответственно тела вязкого или пластического течения [1, 3].

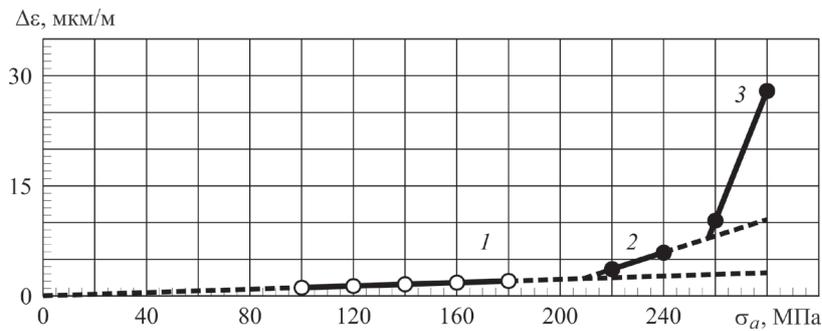


Рис. 1. Амплитудная зависимость раскрытия петли неупругости стали 09Г2С, вычисленная по тепловому эффекту циклического деформирования:

1 – при неупругости релаксационного типа; 2, 3 – при добавлении неупругих деформаций, связанных с локальным пластическим течением

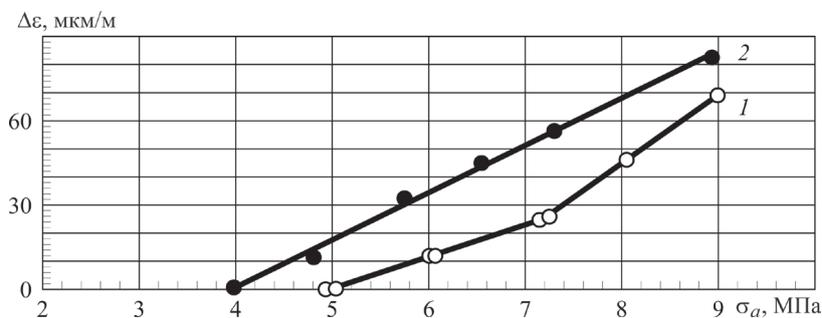


Рис. 2. Амплитудная зависимость гистерезисной части раскрытия петли неупругости ПММА, вычисленная по тепловому эффекту циклического деформирования:

1 – в исходном состоянии материала; 2 – после термомеханического нагружения при испытаниях изделия

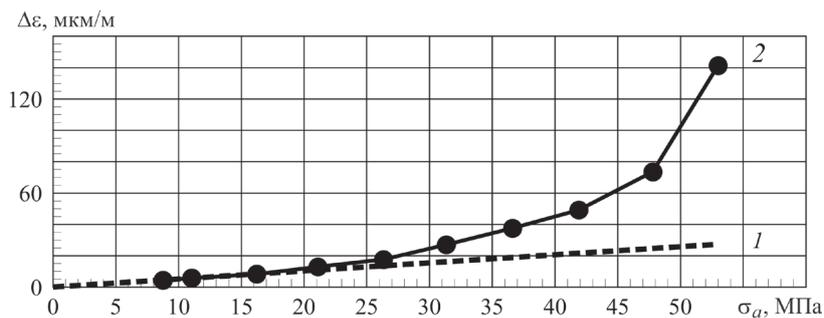


Рис. 3. Амплитудная зависимость раскрытия петли неупругости боропластика:

1 – при неупругости релаксационного типа; 2 – при добавлении неупругих деформаций гистерезисного типа

В процессе разрушения материала неупругие деформации изменяются, так как развивающиеся повреждения становятся объектами его структуры. Величина этих изменений зависит от концентрации и вида повреждений, что, в свою очередь, связано с величиной напряжений,

температурой, длительностью и характером нагружения. Кроме того, и исходная структура материала в зависимости от условий нагружения может претерпевать изменения. Например, пластическая деформация приводит к увеличению неупругости обоих типов при тех же амплитудах

напряжений и снижению амплитуды появления пластического гистерезиса (сталь 30Х, [4]). Такая же картина наблюдается и у ПММА после термомеханического нагружения (рис. 2). Это снижение свидетельствует об увеличении внутренних напряжений, от которых возникают микропластические деформации, приводящие к усталостному разрушению [5, 6]. Появление повреждений снижает и жесткость материала, по изменению которой можно судить об их накоплении [7]. При усталостном же разрушении, когда концентрация повреждений не столь велика, изменение неупругих деформаций, например металлических сплавов, в результате приобретаемых повреждений трудно отделить от других причин [8]. В этом случае, а также во всех других, когда требуется разделить изменение структурного состояния материала и долю израсходованного материалом ресурса долговечности, только с помощью испытаний на остаточную долговечность со специальной процедурой обработки полученных данных можно получить однозначную оценку произошедших изменений [7].

Разрушение КМ как конструкции, состоящей из различных материалов и дополнительно характеризующейся прочностными свойствами адгезионных контактов между ними, имеет свои особенности. В процессе разрушения в нем сначала появляются расслоения, а позднее – разрывы волокон [9]. Это заметно изменяет жесткость КМ и величину его неупругих деформаций. Кроме увеличения раскрытия петель неупругости наблюдаются также их искривления, не симметричные относительно средних значений напряжений. Искривления тем больше, чем меньше уровень напряжений. Анализ кинетики деформирования свидетельствует об участии сил трения при относительных перемещениях разорванных пучков волокон. Степень поврежденности КМ как переход в некоторое другое структурное состояние можно, таким образом, оценивать по изменению его неупругих характеристик, а долговечность – по скорости изменения жесткости, связанной с началом разрывов волокон.

Методика экспериментального исследования

Изменение структурного состояния КМ в процессе разрушения в большей мере обнаруживает себя при изгибных деформациях или дефор-

мациях кручения, поскольку в этом случае свойства связующего и его адгезионного контакта с волокном играют основную роль. Такие схемы нагружения КМ предпочтительны для процедур диагностики их поврежденности. Поэтому для экспериментального исследования был выбран метод продольного изгиба, при котором небольшими усилиями можно получить значительную величину изгибающего момента, не создавая контактных напряжений в зонах его разрушения. Усилия и перемещения при этом могут быть измерены с весьма малыми погрешностями. А имея теоретическое решение задачи продольного изгиба упругого стержня [10] и сопоставляя с ним экспериментальные данные реального КМ, можно анализировать кинетику его разрушения.

Проведены испытания стержней однонаправленного стеклопластика диаметром 5,5 (длина 350 мм) и 7,5 мм (длина 400 мм) циклическим продольным изгибом на машине MTS-10. Стержни устанавливались на шарнирные опоры, оси поворота которых совпадали с торцевыми поверхностями стержней. Для измерения сил на неподвижный захват испытательной машины устанавливался датчик силы, откалиброванный образцовыми грузами в диапазоне 0...100 кгс. Подвижный захват крепился к штоку гидроцилиндра испытательной машины. Нагружение осуществлялось по перемещению с погрешностью 0,01 мм.

Испытания проводились при постоянном среднем значении перемещения подвижной опоры относительно неподвижной и нескольких значениях амплитуды перемещения с частотой 1 Гц. Во время испытаний измерялись максимальные и минимальные значения силы сжатия стержней, величина которой пропорциональна их усредненной изгибной жесткости. Неупругие деформации периодически оценивались по наибольшей разности между значениями сил в цикле нагружение – разгрузка. Измерение неупругости проводилось при постоянном минимальном значении перемещения 2 мм на частоте 0,1 Гц, чтобы избежать динамических эффектов.

Результаты и обсуждение

Пробные испытания стержней $\varnothing 7,5 \times 400$ мм показали, что изменение жесткости в процессе наработки циклическим изгибом имеет харак-

терные периоды. Исследования были продолжены, и на рис. 4 в качестве примера показаны изменения усилия сжатия стержней, нагружаемых по перемещению при относительном сближении их концов 30 ± 25 мм.

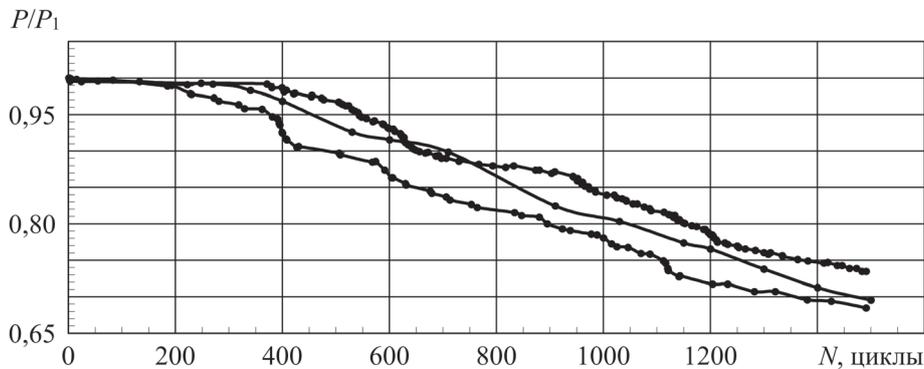


Рис. 4. Изменение максимального усилия сжатия стержней $\varnothing 7,5 \times 400$ мм относительно первого цикла при нагружении их продольным изгибом с постоянным размахом перемещений $\Delta h = 30 \pm 25$ мм (частота 1 Гц)

В начальный период нагружения наблюдается медленное падение жесткости. У отдельных образцов она может на некоторое время даже несколько возрасти. Далее следует более быстрое падение жесткости, индивидуально проявляющееся у каждого образца. Такое поведение КМ согласуется с данными исследования кинетики разрушения композита – полагают, что начальный период разрушения связан с накоплением расслоений [9]. Для однонаправленного стеклопластика это не вызывает существенных изменений демпфирующих характеристик, так как повреждения ориентированы вдоль действующих напряжений. Измерения же раскрытия петли неупругости, проведенные после каждого резкого изменения жесткости образца, показывают очередную прирост неупругих деформаций.

Для образцов $\varnothing 5,5 \times 350$ мм были получены и проанализированы амплитудные зависимости раскрытия петли неупругости. Испытания проведены со ступенчатым нарастанием размаха перемещений от 6 мм до максимального 48 мм при постоянном минимальном значении перемещения 2 мм. Такой режим выбран потому, что неупругие деформации более выражены

при малых значениях изгибающего момента. Измерения выполнялись в начале испытаний и после наработки 4000 циклов при $\Delta h = 26 \pm 20$ мм на частоте 1 Гц, когда скорость падения жесткости увеличилась. На рис. 5 показаны полученные зависимости как максимумы разности усилий сжатия при нагружении и разгрузке от максимумов размаха изгибных деформаций, демонстрирующие существенное изменение неупругости в период прогрессирующего разрушения. Изменился и характер амплитудной зависимости неупругости. Для удаления погрешностей измерений, связанных с закреплением стержней, зависимости смещены по оси ординат на величину сил

трения в шарнирных опорах. Все испытания и измерения проведены при температуре 290 ± 2 К. В исходном состоянии наблюдается обычная амплитудная зависимость неупругих деформаций материала с прогрессирующим их нарастанием. Она изменяется незначительно в период от начала нагружения до момента перелома в скорости снижения изгибной жесткости образца. Далее при более быстром снижении жесткости, периодически сопровождающемся резкими (иногда скачкообразными) ее изменениями, происходит увеличение неупругих деформаций образца и изменяется вид их амплитудной зависимости. При больших амплитудах нагружения неупругость практически не изменяется. Причиной этого, по-видимому, являются силы трения, возникающие при относительном перемещении

в шарнирных опорах. Все испытания и измерения проведены при температуре 290 ± 2 К.

В исходном состоянии наблюдается обычная амплитудная зависимость неупругих деформаций материала с прогрессирующим их нарастанием. Она изменяется незначительно в период от начала нагружения до момента перелома в скорости снижения изгибной жесткости образца. Далее при более быстром снижении жесткости, периодически сопровождающемся резкими (иногда скачкообразными) ее изменениями, происходит увеличение неупругих деформаций образца и изменяется вид их амплитудной зависимости. При больших амплитудах нагружения неупругость практически не изменяется. Причиной этого, по-видимому, являются силы трения, возникающие при относительном перемещении

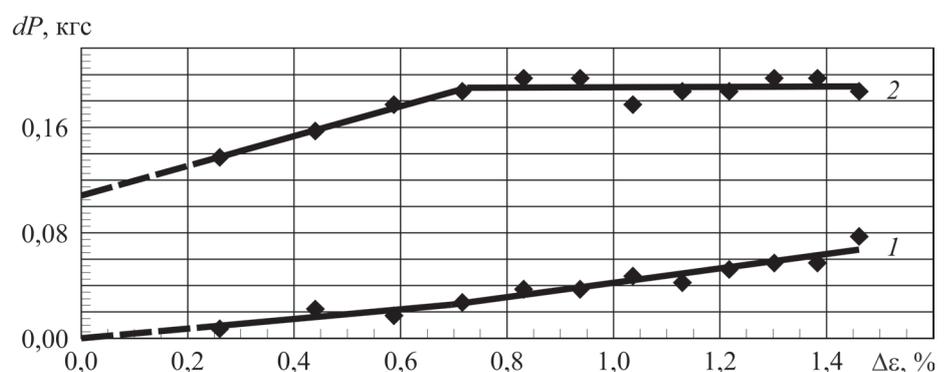


Рис. 5. Амплитудная зависимость неупругости стержней $\varnothing 5,5 \times 350$ мм в начальный период (1) и после 4000 циклов нагружения их продольным изгибом с постоянным размахом перемещений $\Delta h = 26 \pm 20$ мм (2)

разорванных пучков волокон, на фоне которых оставшая часть неупругих деформаций не выявляется. В момент деформирования стержня этот процесс можно наблюдать оптическими средствами при небольших увеличениях.

Особенности поведения КМ как конструкции, долговечность которой определяется последовательностью разрушения ее элементов, требуют для таких материалов сформулировать принципы решения задач прогнозирования их долговечности. При прогнозировании долговечности металлических сплавов, зная неупругие деформации, измеренные в цикле нагружения, и число циклов, прошедшее за время разрушения, можно связать во времени деформационные процессы с накоплением в материале повреждений. Определив эту связь в базовом эксперименте, через реологические модели твердого тела можно перейти затем к произвольному температурно-силовому нагружению [11]. При этом под долговечностью понимается время от начала приложения нагрузки до появления трещины. Далее требуется специальный расчет периода ее распространения.

Приведенные экспериментальные данные испытаний стеклопластика позволяют использовать подобные же принципы для прогнозирования долговечности КМ. Если за долговечность принять момент времени, когда начинаются разрывы волокон, то аналогичным образом, связывая неупругие деформации КМ со временем обнаружения этих разрывов, получаем ту же методологию прогнозирования долговечности. Время обнаружения разрывов волокон определяем по характерным изменениям скорости падения жесткости КМ или его неупругих деформаций.

Также проведены испытания на долговечность стержней $\varnothing 7,5 \times 400$ мм при различных амплитудах перемещений с частотой 1 Гц и постоянным средним значением перемещения 30 мм. Во время испытаний регистрировались максимумы и минимумы усилий сжатия стержней в каждом цикле нагружения. По характерным переломам в их зависимостях от числа циклов наработки (см. рис. 4) определялась долговечность каждого образца. В результате получилась зави-

симость долговечности от максимальных значений размаха изгибных деформаций на контуре сечения образцов. Деформации вычислялись на основании зависимости прогиба и усилия сжатия от величины перемещения свободного конца образца как идеально упругого стержня [10]. При этом максимум изгибной деформации на контуре стержня примерно пропорционален корню квадратному из величины относительно перемещения: $\varepsilon \sim (\Delta h/L)^{0,5}$, где L – длина стержня [2]. На рис. 6 изображены полученные данные о долговечности стеклопластика в этих условиях.

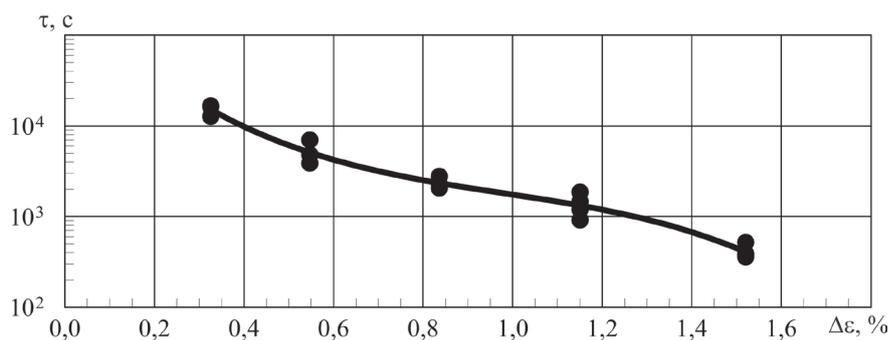


Рис. 6. Зависимость долговечности стержней $\varnothing 7,5 \times 400$ мм от максимума размаха изгибных деформаций при нагружении их продольным изгибом с постоянным средним значением перемещения $\Delta h = 30$ мм ($\varepsilon = 1,57$ %). Частота нагружения 1 Гц, температура 290 ± 2 К

Вид изображенной кривой аналогичен кривым усталостной долговечности, получаемым для металлических сплавов. Когда размах деформаций при циклическом нагружении стремится к нулю, долговечность определяется средним значением деформации, которая может быть пересчитана в условные напряжения [2]. При этом модуль упругости может быть определен по кривой статического нагружения на продольный изгиб, принимая в расчет его максимальную установившуюся величину, вычисленную по изгибной жесткости на основе теоретического решения [10].

Выводы

Амплитудная зависимость раскрытия петли неупругости является отражением поля внутренних напряжений, возникающих при нагружении твердого тела, и характеризует его структурное состояние. Изменения неупругости в процессе разрушения КМ свидетельствуют о кинетике процесса и позволяют оценить особенности его протекания.

Оценивая долговечность КМ по началу прироста его неупругости или изменению скорости снижения жесткости, можно применять те же методы прогнозирования их долговечности, которые используются для металлических материалов при определении времени появления трещины. Дальнейшее описание хода процесса разрушения КМ является самостоятельной задачей, аналогичной задаче прогнозирования периода распространения трещины в металлах и сплавах.

Список литературы

1. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах: пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.
2. Петров М.Г. Анализ прочности и долговечности однонаправленного стеклопластика с позиций кинетической концепции разрушения // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2003. – Т. 9, № 3. – С. 376–397.
3. Петров М.Г. Некоторые структурные модели для описания реологических свойств материалов // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т. 13, № 2. – С. 191–208.
4. Petrov M.G. Some methods of analysis and diagnostics of structure and properties of materials produced under various technological processes // XIV International conference on the methods of aerophysical research: Proceedings of Section V “Interdisciplinary problems and advanced technologies” (Novosibirsk, June 30–July 06, 2008). – Novosibirsk, 2008. – Paper N 24. – P. 1–9.
5. О причинах снижения долговечности полимеров при циклическом нагружении / В.А. Степанов, Ю.А. Никонов, Л.А. Беляева, А.С. Власов // Механика полимеров. – 1976. – № 2. – С. 279–283.
6. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
7. Петров М.Г., Равикович А.И. Накопление повреждений при пластическом деформировании и ползучести алюминиевых сплавов // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 1. – С. 172–182.
8. Троценко В.Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев: Наукова думка, 1971. – 268 с.
9. Регель В.Р., Лексовский А.М., Поздняков О.Ф. Изучение кинетики разрушения композиционных материалов // Механика композитных материалов. – 1979. – № 2. – С. 211–216.
10. Kuznetsov V.V., Levyakov S.V. Complete solution of the stability problem for elastica of Euler’s column // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2002. – Vol. 37, iss. 6. – P. 1003–1009. – doi: 10.1016/S0020-7462(00)00114-1.
11. Петров М.Г. Моделирование процесса неупругого деформирования материалов и прогнозирование усталостного разрушения // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сборник материалов Третьей международной конференции (Москва, 12–15 октября 2009 г.). – М., 2009. – Т. 2. – С. 365–366.

OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 4(65), October – December 2014, Pages 61–67

Evaluation of the composite materials structural condition during fracture

Petrov M.G., Ph.D. (Engineering), e-mail: markp@risp.ru

Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin, 21, Polzunov st., Novosibirsk, 630051, Russian Federation

Abstract

The fracture kinetics of the unidirectional fiberglass under cyclic lateral deflection is studied. During fracture process the composite structural state is determined by the changes in its rigidity and inelasticity. Changes in rigidity indicate the breakages both on the stage of the composite layering, and during a break of the fibers. Amplitude dependence of the inelasticity is related to the distribution of internal stresses in the material volume. It characterizes the state of the material structure as the breakages advances. Changes in these characteristics give opportunity to make a conclusion about the stages of the composite fracture process and predictability of its durability.

Keywords:

composite material, lateral deflection, rigidity, inelastic strains, failure, durability.

References

1. Nowick A.S., Berry B.S. Anelastic relaxation in crystalline solids. New York and London, Academic Press, 1972. 677 p. (Russ. ed.: Novik A., Berri B. *Relaksatsionnye yavleniya v kristallakh*. Moscow, Atomizdat Publ., 1975. 472 p.).
2. Petrov M.G. Analiz prochnosti i dolgovechnosti odnonapravlenogo stekloplastika s pozitsii kineticheskoi kontseptsii razrusheniya [Study of strength and durability of uni-directional fiberglass plastics by using the kinetic concept of fracture]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii – Composite Mechanics and Design*, 2003, vol. 9, no. 3, pp. 376–397. (In Russian)
3. Petrov M.G. Nekotorye strukturnye modeli dlya opisaniya reologicheskikh svoistv materialov [Some structural models for description of rheological properties of materials]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii – Composite Mechanics and Design*, 2007, vol. 13, no. 2, pp. 191–208. (In Russian)
4. Petrov M.G. Some methods of analysis and diagnostics of structure and properties of materials produced under various technological processes. XIV International conference on the methods of aerophysical research: Proceedings of Section V “Interdisciplinary problems and advanced technologies” (ICMAR 2008). Novosibirsk, 2008, paper no. 24, pp. 1–9.
5. Stepanov V.A., Nikonov Yu.A., Belyaeva L.A., Vlasov A.S. O prichinakh snizheniya dolgovechnosti polimerov pri tsiklicheskom nagruzhenii [Reasons for the lowering of the lifetime of polymers under cyclic loading]. *Mekhanika polimerov – Polymer Mechanics*, 1976, no. 2, pp. 279–283. (In Russian)
6. Golovin S.A., Pushkar A. *Mikroplastichnost' i ustalost' metallov* [Microplasticity and fatigue of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 240 p.
7. Petrov M.G., Ravikovich A.I. Nakoplenie povrezhdenii pri plasticheskom deformirovanii i polzuchesti alyuminievykh splavov [Damage accumulation in aluminum alloys under plastic deformation and creep]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2006, vol. 47, no. 1, pp. 172–182. (In Russian)
8. Troshchenko V.T. *Ustalost' i neuprugost' metallov* [Fatigue and inelasticity of metals]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971. 268 p.
9. Regel' V.R., Leksovskii A.M., Pozdnyakov O.F. Izuchenie kinetiki razrusheniya kompozitsionnykh materialov [Fracture kinetics of composite materials]. *Mekhanika kompozitnykh materialov – Composite Mechanics and Design*, 1979, no. 2, pp. 211–216. (In Russian)
10. Kuznetsov V.V., Levyakov S.V. Complete solution of the stability problem for elastica of Euler's column. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2002, vol. 37, iss. 6, pp. 1003–1009. doi: 10.1016/S0020-7462(00)00114-1
11. Petrov M.G. [Modeling the process of inelastic deformation of materials and prediction of fatigue failure]. *Sbornik materialov Tre't'ei mezhdunarodnoi konferentsii “Deformatsiya i razrushenie materialov i nanomaterialov”* [Proceedings of the III International Conference “Deformation and fracture of materials and nanomaterials”]. Moscow, 2009, vol. 2, pp. 365–366.

Received 03 September 2014

Revised 18 September 2014

Accepted 25 September 2014