

УДК 620.175

М.П. Третьяков, В.Э ВильдеманПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ДЕФОРМАЦИОННОЕ РАЗУПРОЧНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ
В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ**

Рассматриваются вопросы экспериментального изучения механического поведения материалов на стадии закритического деформирования (деформационного разупрочнения). Учет данной стадии деформирования важен для оценки живучести конструкций. Приведены диаграммы деформирования конструкционных сталей при одноосном растяжении, кручении и пропорциональном растяжении с кручением тонкостенных трубчатых образцов. Испытания выполнены на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850.

Ключевые слова: деформационное разупрочнение, растяжение с кручением, плоское напряженное состояние, тонкостенный трубчатый образец.

M.P. Tretyakov, V.E. Vildeman

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**STRAIN-SOFTENING OF MATERIALS
IN THE PLANE STRESS STATE CONDITIONS**

Questions of experimental investigation of the mechanical behavior of materials on the postcritical deformation stage (strain-softening) are considered in the article. Taking into account of this deformation stage is important for construction survivability estimation. Deformation curves of structural steels under uniaxial tension, torsion and proportional tension with torsion of thin-walled tubular specimens are presented. The tests carried-out on universal biaxial servohydraulic test system Instron 8850.

Key words: strain-softening, tension and torsion, plane stress state, thin-walled tubular specimen.

Работа ответственных конструкций в условиях сложных термо-механических воздействий обуславливает актуальность проведения экспериментальных исследований закономерностей механического поведения материалов в условиях сложного напряженного состояния [1–3]. При этом важной особенностью неупругого поведения материалов, требующей специальных исследований, является закритическая стадия деформирования, или стадия деформационного разупрочнения [4–8]. Изучение этой стадии имеет значение для решения задач конструкци-

онной безопасности [5, 9]. Требуют внимания вопросы экспериментального исследования данной стадии деформирования [10, 11, 13], в частности, связанные с обеспечением условий реализации стадии разупрочнения, регистрацией и обработкой результатов испытаний в условиях локализации пластических деформаций [14–17].

В работе рассматриваются вопросы экспериментального изучения закономерностей механического поведения конструкционных сталей 20, 40X и 15X2ГМФ на стадии деформационного разупрочнения при различных видах напряженного состояния, а также некоторые методические вопросы проведения квазистатических испытаний на одноосное растяжение, кручение и совместное растяжение с кручением.

Испытания выполнены на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850¹, позволяющей проводить испытания на растяжение-сжатие с максимальной нагрузкой 100 кН, кручение с максимальным крутящим моментом 1000 Нм. В экспериментах использовались осевой динамический экстензометр Instron 2620-601 и двухосевой экстензометр Epsilon 3550-010M [12, 17–19].

В испытаниях на одноосное растяжение использовались сплошные цилиндрические образцы стандартных размеров и образцы с малой длиной рабочей части (отношение длины рабочей части к диаметру для сталей 20 и 40X – 1,6, для стали 15X2ГМФ – 5). В испытаниях на кручение и совместное растяжение с кручением использовались тонкостенные трубчатые образцы с малой длиной рабочей части, эскиз которых представлен на рис. 1.

Малая длина рабочей части образцов необходима для обеспечения достаточной жесткости нагружающей системы по отношению к области локализации деформаций и возможности реализации в эксперименте ниспадающего участка диаграммы деформирования материала [6, 13]. Геометрические параметры образцов (см. рис. 1, *a*) позволяют проводить испытания с использованием двухосевого экстензометра для измерения осевой деформации и угла сдвига в рабочей части образца. При испытаниях стали 15X2ГМФ сбор данных осуществлялся по встроенным датчикам испытательной системы. При этом выполнена корректировка экспериментальных данных, учитывающая упругие деформации частей испытательной машины. Для этого использованы

¹ Испытания выполнены в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета.

данные испытания образца стали 15Х2ГМФ в упругой области с использованием двухосевого экстензометра [18, 19].

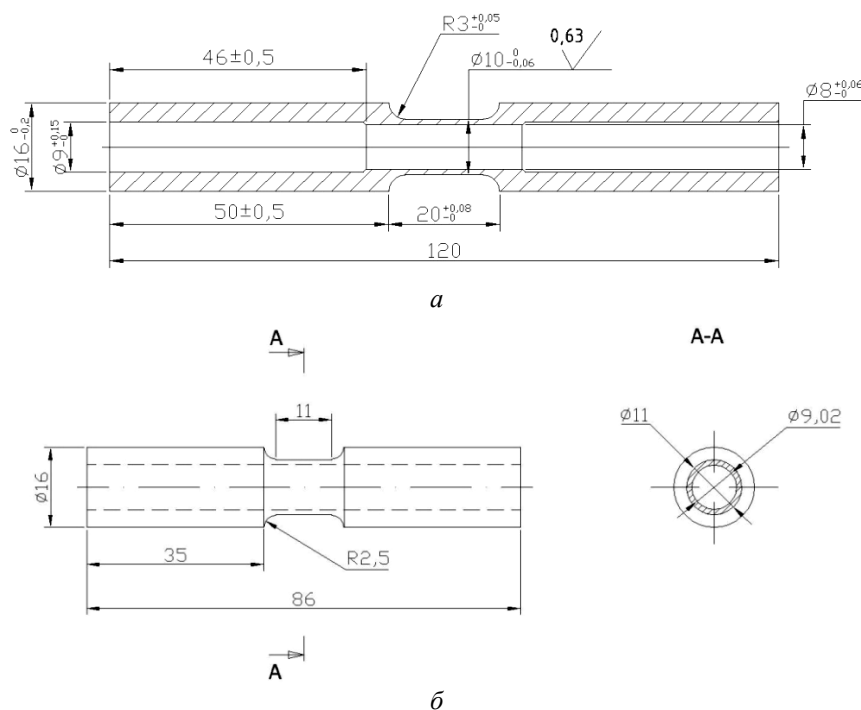


Рис. 1. Эскизы тонкостенных трубчатых образцов с малой длиной рабочей части для испытаний на кручение и растяжение с кручением сталей 20 и 40Х (а), стали 15Х2ГМФ (б)

Исследование поведения материалов на закритической стадии деформирования при плоском напряженном состоянии выполнено для двух траекторий нагружения, представляющих в пространстве деформаций прямые линии. Траектории деформирования стали 20 и 40Х в пространстве деформаций соответствуют пропорциональному растяжению с кручением с соотношением осевой деформации и угла сдвига 1,6 и 0,8, для стали 15Х2ГМФ – 0,30 и 0,57.

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости деформирования стали 20.

При сопоставлении полученных данных зависимости касательных напряжений от угла сдвига в случае испытаний на чистый сдвиг используется лишь начальный участок диаграммы неупругого деформирования. Это связано с тем, что при дальнейшем деформировании

тонкостенного трубчатого образца происходит потеря устойчивости рабочей части, что приводит к смятию образца. В связи с этим получение экспериментальных зависимостей деформирования материала при чистом сдвиге на стадии деформационного разупрочнения является технически сложной задачей.

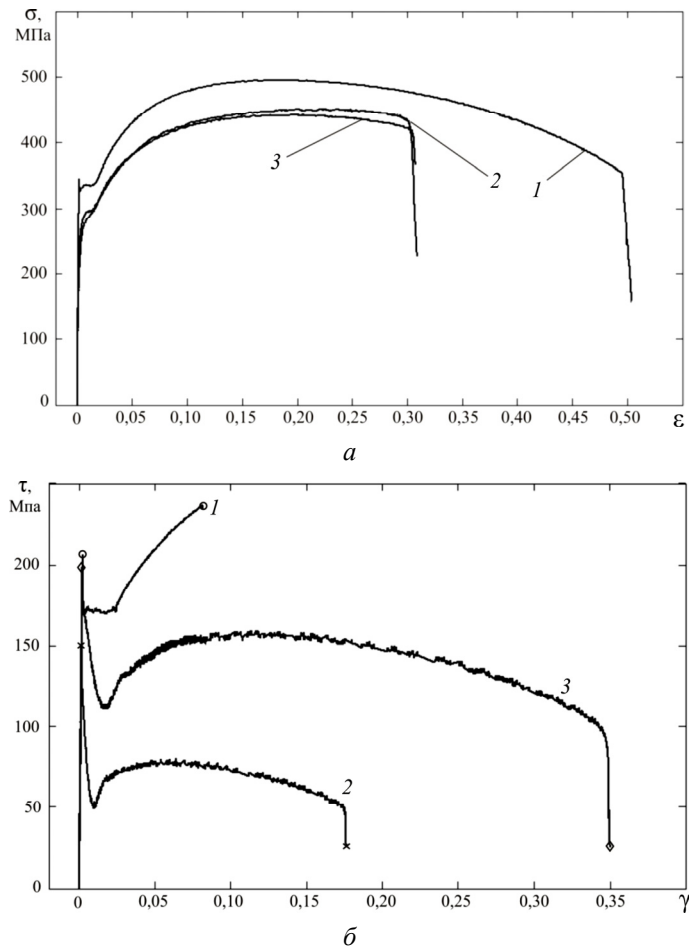


Рис. 2. Диаграммы деформирования стали 20: *a* – зависимости осевого напряжения от осевой деформации, 1 – одноосное растяжение, 2 и 3 – пропорциональное растяжение с кручением $\epsilon/\gamma=1,6$ и $\epsilon/\gamma=0,8$; *б* – зависимости касательного напряжения от угла сдвига, 1 – испытание на кручение, 2 и 3 – пропорциональное растяжение с кручением $\epsilon/\gamma=1,6$ и $\epsilon/\gamma=0,8$

В то же время при наличии осевых напряжений, соответствующих растяжению материала (пропорциональное растяжение с кручением), потери устойчивости рабочей части тонкостенного трубчатого об-

разца не происходит при пластическом деформировании и деформационном разупрочнении материала. В литературе рассматриваются методики интерпретации результатов по испытаниям толстостенных трубчатых образцов. В частности, в работе [20] авторы отмечают, что при определении сдвиговых характеристик высокотемпературной ползучести в экспериментах на кручение трубчатых образцов можно использовать толстостенные трубчатые образцы.

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости стали 40Х. При пропорциональном растяжении с кручением здесь и далее испытания представлены по двум образцам для каждой траектории деформирования.

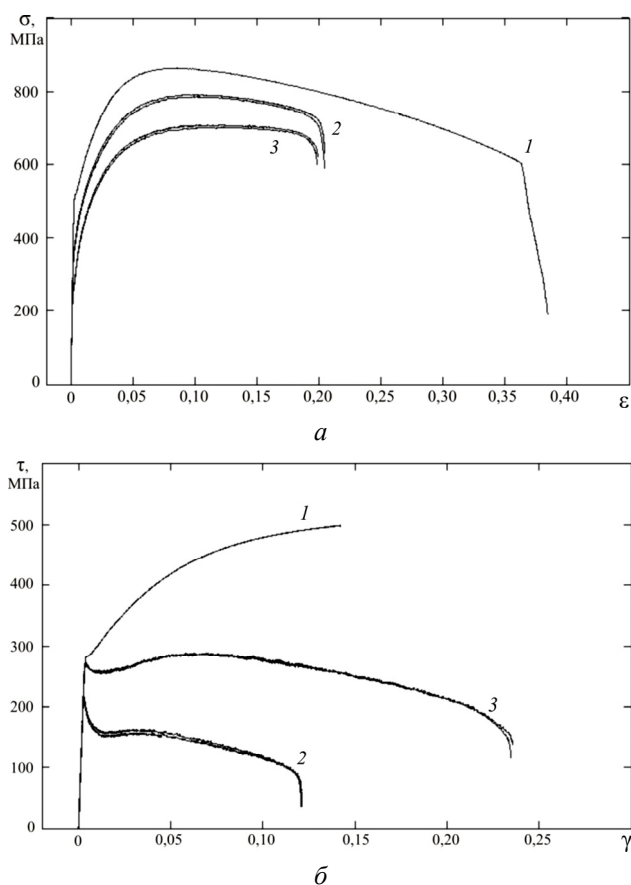


Рис. 3. Диаграммы деформирования стали 40Х: а – зависимости осевого напряжения от осевой деформации, 1 – одноосное растяжение, 2 и 3 – пропорциональное растяжение с кручением $\epsilon/\gamma=1,6$ и $\epsilon/\gamma=0,8$; б – зависимости касательного напряжения от угла сдвига, 1 – испытание на кручение, 2 и 3 – пропорциональное растяжение с кручением $\epsilon/\gamma=1,6$ и $\epsilon/\gamma=0,8$

На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости деформирования стали 15Х2ГМФ.

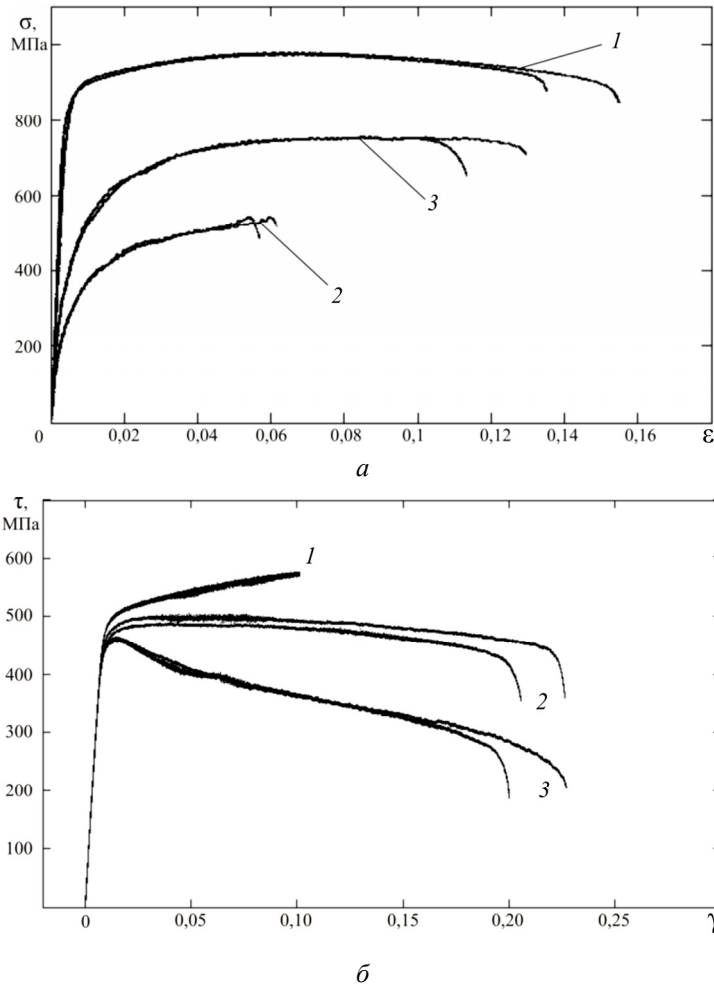


Рис. 4. Диаграммы деформирования стали 15Х2ГМФ: *a* – зависимости осевого напряжения от осевой деформации, 1 – одноосное растяжение, 2 и 3 – пропорциональное растяжение с кручением $\epsilon/\gamma=0,30$ и $\epsilon/\gamma=0,57$; *б* – зависимости касательного напряжения от угла сдвига, 1 – чистое кручение, 2 и 3 – пропорциональное растяжение с кручением $\epsilon/\gamma=0,30$ и $\epsilon/\gamma=0,57$

Для сопоставления экспериментальных данных неупругого деформирования материалов, полученных при различных видах напряженного состояния, построим экспериментальные зависимости в координатах интенсивности напряжений σ_i и интенсивности деформаций ϵ_i . В случае одноосного растяжения имеем $\sigma_i = \sigma_{11}$ и $\epsilon_i = \epsilon_{11}$ (в предполо-

жении величины коэффициента Пуассона 0,5), при чистом сдвиге и пропорциональном растяжении с кручением соответственно формулы принимают вид

$$\sigma_i = \sqrt{3}\tau_{12}, \quad \varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{3}}\gamma_{12}$$

и

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{11}^2 + 3\tau_{12}^2}, \quad \varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{2\varepsilon_{11}^2 (1+\nu)^2 + \frac{3}{2}\gamma_{12}^2}.$$

На рис. 5–7 приведены диаграммы деформирования сталей 20, 40Х и 15Х2ГМФ соответственно в координатах интенсивность напряжений – интенсивность деформаций, полученные в испытаниях при различных видах напряженного деформированного состояния.

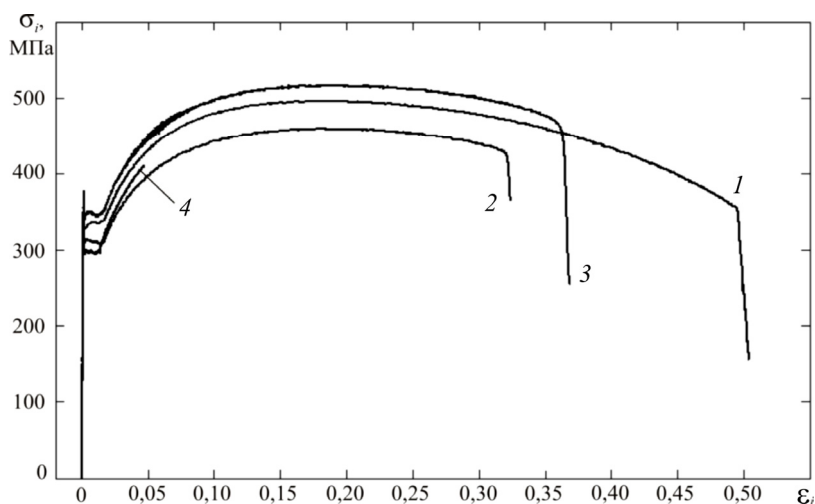


Рис. 5. Графики зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформаций стали 20: 1 – одноосное растяжение, 2 и 3 – пропорциональное растяжение с кручением $\varepsilon/\gamma=1,6$ и $\varepsilon/\gamma=0,8$ соответственно, 4 – кручение

На рис. 5–6: 1 – диаграммы деформирования при одноосном растяжении, 2 – диаграммы деформирования при пропорциональном растяжении с кручением с отношением $\varepsilon/\gamma=1,6$, 3 – диаграммы деформирования при пропорциональном растяжении с кручением с отношением $\varepsilon/\gamma=0,8$, 4 – диаграммы деформирования при чистом сдвиге.

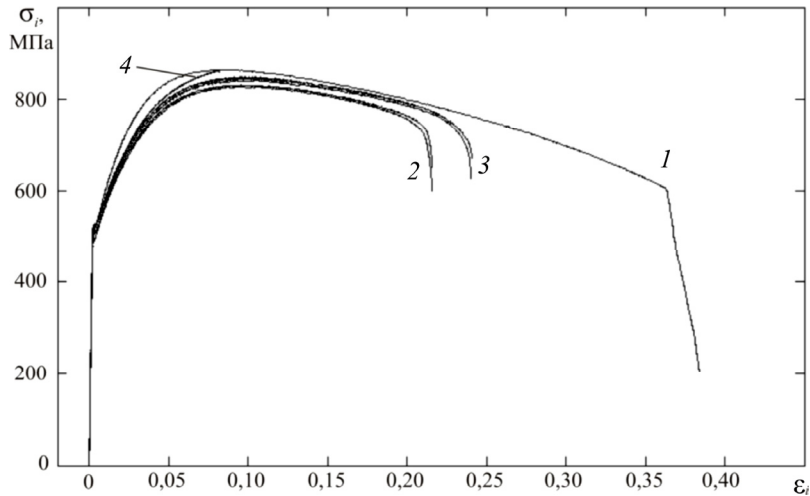


Рис. 6. Графики зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформаций стали 40X: 1 – одноосное растяжение, 2 и 3 – пропорциональное растяжение с кручением $\varepsilon/\gamma=1,6$ и $\varepsilon/\gamma=0,8$ соответственно, 4 – кручение

На рис. 7 приведены диаграммы деформирования стали 15X2ГМФ в координатах интенсивность напряжение – интенсивность деформаций при одноосном растяжении (1), пропорциональном растяжении с кручением с отношением $\varepsilon/\gamma=0,30$ (2), $\varepsilon/\gamma=0,57$ (3), кручение (4).

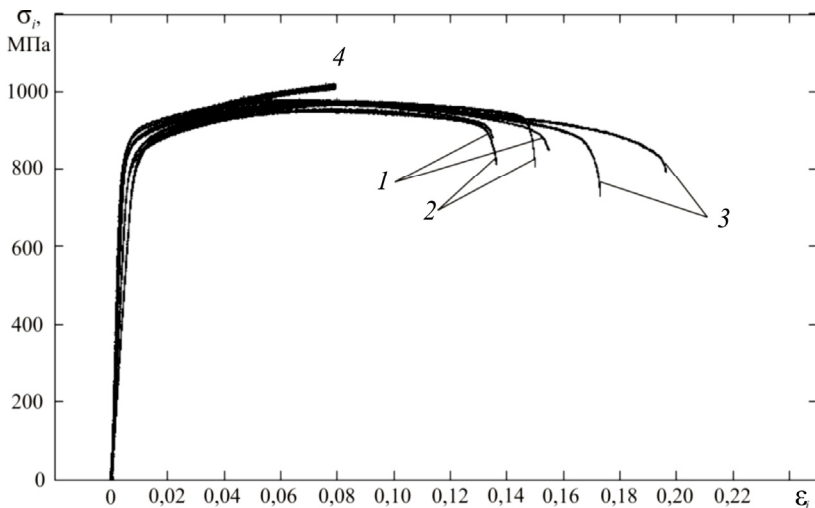


Рис. 7. Графики зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформации для стали 15X2ГМФ: 1 – одноосное растяжение, 2 – пропорциональное растяжение с кручением с отношением $\varepsilon/\gamma=0,30$ и 3 – $\varepsilon/\gamma=0,57$, 4 – кручение

В результате выполненных испытаний получены экспериментальные диаграммы деформирования сталей 20, 40Х и 15Х2ГМФ с развитыми участками разупрочнения при различных видах напряженного деформированного состояния: одноосное растяжение, чистый сдвиг и плоское напряженное состояние при растяжении с кручением тонкостенных трубчатых образцов. Это демонстрирует возможность деформационного разупрочнения материалов и наличия ниспадающих участков диаграмм деформирования при сложных видах напряженного деформированного состояния.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках государственного контракта № 13.G25.31.0093 от 25 октября 2010 г.

Библиографический список

1. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А.А. Лебедев, Б.И. Ковальчук, Ф.Ф. Гигиняк, В.П. Ламашевский. – Киев: Ин Юре, 2003. – 540 с.
2. Анин Б.Д., Жигалкин В.М. Поведение материалов в условиях сложного нагружения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 342 с.
3. Ковальчук Б.И., Лебедев А.А., Уманский С.Э. Механика неупругого деформирования материалов и элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1987. – 280 с.
4. Экспериментальные функции сопротивления легированной стали при растяжении с кручением / С.Д. Волков, Ю.П. Гуськов, В.И. Кривоспицкая [и др.] // Проблемы прочности. – 1979. – Т. 11, № 1. – С. 3–6.
5. Стружанов В.В., Миронов В.И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций; УрО РАН. – Екатеринбург, 1995. – 191 с.
6. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. – М.: Наука, 1997. – 288 с.
7. Вильдеман В.Э. О решениях упругопластических задач с граничными условиями контактного типа для тел с зонами разупрочнения // Прикладная математика и механика. – 1998. – Т. 62, № 2. – С. 304–312.
8. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Краевая задача механики деформирования и разрушения поврежденных тел с зона-

ми разупрочнения // Прикладная механика и техническая физика. – 1995. – № 6. – С. 122–132.

9. Вильдеман В.Э. Механика закритического деформирования и вопросы прочностного анализа // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering / Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – 2008. – Т. 4, № 2. – С. 43–44.

10. Особенности деформирования пластичных материалов при динамических неравновесных процессах / Н.Г. Чаусов, Е.Э. Засимчук, Л.И. Маркашова, В.Э. Вильдеман, Т.В. Турчак, А.П. Пилипенко, В.М. Параца // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2009. – Т. 75, № 6. – С. 52–59.

11. Чаусов Н.Г. Полная диаграмма деформирования как источник информации о кинетике накопления повреждений и трещиностойкости материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 7. – С. 42–49.

12. Вильдеман В.Э., Санникова Т.В., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов при плоском напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 5. – С. 106–111.

13. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В.Э. Вильдеман, М.П. Третьяков, Т.В. Третьякова [и др.] / под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: Физматлит, 2012. – 212 с.

14. Вильдеман В.Э., Чаусов Н.Г. Условия деформационного разупрочнения материала при растяжении образца специальной конфигурации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 10. – С. 55–59.

15. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Методика экспериментального исследования закритического деформирования на образцах специальной усложненной конфигурации с применением метода корреляции цифровых изображений // Вестник ПГТУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – № 4. – С. 15–28.

16. Установка для испытаний материалов с построением полных диаграмм деформирования / Н.Г. Чаусов, Д.Г. Войтюк, А.П. Пилипенко, А.М. Кузьменко // Проблемы прочности. – 2004. – № 5. – С. 117–123.

17. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник ПГТУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 2. – С. 92–100.

18. Исследование закономерностей упругопластического деформирования стали 15Х2ГМФ при сложном напряженном состоянии / Н.Н. Вассерман, В.Э. Вильдеман, А.А. Крюков, М.П. Третьяков // Вестник ПГТУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – № 2. – С. 34–47.

19. Исследование поведения конструкционной стали при простых видах нагружения / А.А. Крюков, В.Е. Калугин, М.П. Третьяков, Н.Н. Вассерман // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – Т. 14, № 1. – С. 41–50.

20. Соснин О.В., Любашевская И.В. Приближенные оценки высокотемпературной ползучести элементов конструкций // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42, № 6. – С. 124–135.

References

1. Lebedev A.A., Kovalchuk B.I., Gignyak F.F., Lamashevskiy V.P. Mekhanicheskie svoystva konstruktsionnykh materialov pri slozhnom napryazhenom sostoyanii [Mechanical properties of structural materials under combined stress state]. Kiev: Izdatelskiy Dom «In Yure», 2003, 540 p.

2. Anin B.D., Jigalkin V.M. Povedenie materialov v usloviyakh slozhnogo nagruzheniya [Behavior of materials in complex loading conditions]. Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN, 1999, 342 p.

3. Kovalchuk B.I., Lebedev A.A., Umanskiy S.E. Mekhanika neuprugogo deformirovaniya materialov i elementov konstruktsiy [Mechanics of inelastic deformation of materials and construction elements]. Kiev: Nauk. dumka, 1987, 280 p.

4. Volkov S.D., Guskov Y.P., Krivospitskaya V.I. [et al.] Eksperimentalnye funktsii soprotivleniya legirovannoy stali pri rastyazhenii s krucheniem [Experimental function of alloy steel resistant at tension with torsion]. *Problemy prochnosti*, 1979, Vol. 11, no. 1, pp. 3–6.

5. Struzhanov V.V., Mironov V.I. Deformatsionnoe razuprochnenie materiala v elementakh konstruktsiy [Deformation softening of materials in elements of construction]. Yekaterinburg: UrO RAN, 1995, 191 p.

6. Vildeman V.E., Sokolkin Y.V., Tashkinov A.A. Mekhanika neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya kompozitsionnykh materialov [Mechanics of inelastic deformation and fracture of composite materials]. Moscow: Nauka, 1997, 288 p.

7. Vildemann V.E. O resheniyakh uprugoplasticheskikh zadach s granichnymi usloviyami kontaktного tipa dlya tel s zonami razuprochneniya [On the solutions of elastic-plastic problems with contact-type boundary conditions for solids with loss-of-strength zones]. Prikladnaya matematika i mekhanika, 1998, Vol. 62, no. 2, pp. 304–312

8. Vildeman V.E., Sokolkin Y.V., Tashkinov A.A. Kraevaya zadacha mekhaniki deformirovaniya i razrusheniya povrezhdennykh tel s zonami razuprochneniya [The boundary value problem of mechanics of deformation and fracture of damaged bodies with softening zones]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika, 1995, no. 6, pp. 122–132.

9. Vildeman V.E., Mekhanika zakriticheskogo deformirovaniya i voprosy prochnostnogo analiza [Mechanics of postcritical deformation and questions of strength analysis]. Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitelnykh konstruktsiy, 2008, Vol. 4, no. 2, pp. 43–44.

10. Chausov N.G., Z asimchuk E.E., Markashova L.I., Vildeman V.E., Turchak T.V., Pilipenko A.P., Paratsa V.M. Osobennosti deformirovaniya plastichnykh materialov pri dinamicheskikh neravnovesnykh protsessakh [Features of the deformation of ductile materials under dynamic non-equilibrium processes]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2009, Vol. 75, no. 6, pp. 52–59.

11. Chausov N.G. Polnaya diagramma deformirovaniya kak istochnik informatsii o kinetike nakopleniya povrezhdeniy i treshchinostoykosti materialov [Complete stress-strain diagram as a source of information on the kinetics of damage accumulation and crack resistance of materials]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2004, Vol. 70, no. 7, pp. 42–49.

12. Vildeman V.E., Sannikova T.V., Tretyakov M.P. Eksperimentalnoe issledovanie zakonomernostey deformirovaniya i razrusheniya materialov pri ploskom napryazhennom sostoyanii [Experimental study of the regularities of deformation and fracture of materials under a plane stress state through the use of biaxial testing machine and video analysis system of deformation fields]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2010, no. 5, pp. 106–111.

13. Vildeman V.E., Tretyakov M.P., Tretyakova T.V. [et. al.] Ed. by V.E. Vildeman Eksperimentalnye issledovaniya svoystv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeystviyakh [Experimental investigations of materials properties at combined thermo-mechanics influences]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 212 p.

14. Vildeman V.E., Chaousov N.G. Usloviya deformatsionnogo razuprochneniya materiala pri rastyazhenii obraztsa spetsialnoy konfiguratsii [Conditions of strain softening material at tensile of special configuration specimen]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2007, Vol. 73, no. 10, pp. 55–59.

15. Vildeman V.E., Tretyakova T.V., Lobanov D.S. Metodika eksperimentalnogo issledovaniya zakriticheskogo deformirovaniya na obraztsakh spetsialnoy uslozhnennoy konfiguratsii s primeneniem metoda korrelyatsii tsifrovyykh izobrazheniy [Technique of experimental investigation of post-critical deformation on test samples with special complicated configuration by using digital image correlation]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2011, no. 4, pp. 15–28.

16. Chaousov N.G., Voituk D.G., Pilipenko A.P., Kuzmenko A.M. Ustanovka dlya ispytaniy materialov s postroeniem polnykh diagramm deformirovaniya [The plant for test of materials with construction of complete deformation diagrams]. *Problemy prochnosti*, 2004, no. 5, pp. 117–123

17. Tretyakova T.V., Tretyakov M.P., Wildemann V.E. Otsenka tochnosti izmereniy s ispolzovaniem videosistemy analiza poley peremeshcheniy i deformatsiy [Estimate of measurements accuracy by using video-system of displacement and strain fields analysis]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2011, no. 2, pp. 92–100.

18. Wasserman N.N., Wildemann V.E., Kryukov A.A., Tretyakov M.P. Issledovanie zakonmernostey uprugoplasticheskogo deformirovaniya stali 15Kh2GMF pri slozhnom napryazhennom sostoyanii [Investigation of the elastoplastic deformation laws of steel 15X2ГМФ on a complex stress state]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2010, no. 2, pp. 34–47.

19. Kryukov A.A., Kalugin V.E., Tretyakov M.P., Wasserman N.N. Issledovanie povedeniya konstruktsionnoy stali pri prostykh vidakh nagruzheniya [Investigation of the behavior of structural steel for simple types of loading]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 1, pp. 10–14.

cheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie, 2012, Vol. 14, no. 1, pp. 41–50.

20. Sosnin O.V., Lubashevskaya I.V. Priblizhennyye otsenki vysokotemperaturnoy polzuchesti elementov konstruktsiy [Approximate estimates of high-temperature creep of structural elements]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2001, Vol. 42, no. 6, pp. 124–135.

Об авторах

Третьяков Михаил Павлович (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem_tretyakov@mail.ru).

Вильдеман Валерий Эрвинович (Пермь, Россия) – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций, директор Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29 E-mail: cem_tretyakov@mail.ru).

About the authors

Tretyakov Mikhail Pavlovich (Perm, Russian federation) – Junior Scientific Associate and Engineer of the Center of Experimental Mechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian federation, 29, Komsomolsky ave., e-mail: cem_tretyakov@mail.ru).

Vildeman Valery Ervinovich (Perm, Russian Federation) – Director of The Center of Experimental Mechanics, Professor of Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Russian Federation, 29, Komsomolsky av., e-mail: wildemann@pstu.ru).

Получено 15.05.2012