

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

**Зубчанинов В.Г.¹, д.т.н., проф., Гульяев В.И.¹, д.т.н., проф.,
Алексеев А.А.¹, к.т.н., доц., Алексеева Е.Г.², к.т.н., доц.**

¹Тверской государственной технической университет,
г. Тверь, Российская Федерация

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Российская Федерация

Реферат. В статье дается описание ряда экспериментальных исследований упругопластического деформирования конструкционных материалов при сложном напряженно-деформированном состоянии и сложном нагружении, проводимых на испытательном комплексе СН-ЭВМ в лаборатории механических испытаний кафедры СМТУИП Тверского государственного технического университета.

Ключевые слова: пластичность, физический эксперимент, сложное нагружение, испытательный комплекс СН-ЭВМ.

Современные конструкции и их элементы работают в условиях комбинированного нагружения и деформирования при сложном напряженном состоянии. Достижению предельных состояний и разрушению конструкций неизбежно предшествуют процессы их сложного упругопластического деформирования. Поэтому одной из важнейших актуальных задач экспериментальной механики деформируемого твердого тела является исследование механических свойств конструкционных материалов, а также разработка математических моделей, достоверно описывающих закономерности их сложного неупругого поведения.

В лаборатории кафедры «Сопrotивление материалов, теория упругости и пластичности» Тверского государственного технического университета на автоматизированном расчетно-экспериментальном комплексе СН-ЭВМ имени А.А. Ильюшина [1] проводятся систематические экспериментальные исследования неупругого поведения материалов при комбинированном воздействии осевой силы, крутящего момента и внутреннего давления. В качестве физических моделей для исследования используются тонкостенные образцы цилиндрической формы из начально-изотропных поликристаллических металлов и сплавов, в стенках которых при достаточно большом отношении радиуса к толщине реализуется плоское напряженное состояние. Методика проведения экспериментальных исследований базируется на подходе теории упругопластических процессов А.А. Ильюшина [2–3], в которой история изменения напряжений и деформаций с течением времени представляется соответствующими траекториями в пятимерных векторных пространствах. При этом связь между напряжениями и деформациями описывается скалярными свойствами, характеризующими связь между инвариантами девиаторов напряжений и деформаций, и векторными свойствами, характеризующими несоосность девиаторов напряжений, деформаций и их приращений. В каждом из проведенных экспериментов исследуются особенности и закономерности поведения скалярных и векторных свойств материалов и строятся экспериментальные зависимости между исследуемыми величинами.

Базовые опыты в теории процессов пластического деформирования включают необходимый минимум программ экспериментов, необходимый для установления влияния каждого из параметров сложного нагружения на процесс деформирования [3]. Базовые опыты позволяют определить все материальные параметры конструкционного материала для описания процесса его деформирования по произвольной неаналитической траектории. К числу таких опытов относятся экспериментальные траектории деформирования типа центрального веера прямолинейных траекторий, используемые для установления первоначальной изотропии материалов и построения аппроксимации универсальной диаграммы деформирования материалов Одквиста-Ильюшина. Траектории знакопеременного нагружения-разгружения позволяют исследовать эффект Баушингера и границы поверхности текучести [4], которая в большинстве математических моделей теории пластического течения принимается сферической формы.

Экспериментальные исследования типа «смещенного веера» двузвенных ломаных прямолинейных траекторий [5, 6] позволяют обнаружить влияние углов излома траектории

на «нырки» напряжений, на которых реализуется сложная разгрузка материала, и установить их влияние на величины вторичных пределов текучести (минимумов напряжений на нырке). Также эти траектории позволяют изучить свойства запаздывания векторных и скалярных свойств исследуемых материалов. Практическую значимость представляют многозвенные прямолинейные траектории [7, 8], имеющие различные углы излома траектории, в том числе более 90 градусов. Такие траектории позволяют оценить зависимость нырков напряжений от углов излома и направлений излома.

Испытания по типу плоских траекторий деформирования постоянной кривизны (центральные [9] и смещенные [10] относительно начала координат окружные траектории) позволяют установить влияние кривизны траектории на процессы деформирования и свойство запаздывания векторных свойств материалов.

Особый интерес представляют испытания по винтовым пространственным траекториям постоянной кривизны и кручения [11], которые дают возможность выявить влияние параметров кривизны и кручения траектории на сложность процессов их упругопластического деформирования. Испытания по плоским траекториям переменной кривизны типа логарифмических спиралей или спиралей Архимеда [12], например, скручивающихся в начало координат, показывают, что сложное разгружение материалов существенно отличается от простого (пропорционального) разгружения. Такие опыты используются для оценки влияния параметров сложного нагружения и аттестации построенных математических моделей. Большое количество проведенных экспериментальных исследований было посвящено проверке достоверности основного закона теории процессов упругопластического деформирования материалов – постулата изотропии, который проверялся при ортогональных преобразованиях вращения и отражения траекторий деформирования в векторном пространстве деформаций [4, 13–14].

Результаты экспериментальных исследований деформирования материалов при сложном нагружении используются для построения новых и аттестации существующих математических моделей теории пластичности. В частности, на анализе полученных экспериментальных данных предложены математические модели процессов сложного упругопластического деформирования материалов по плоским траекториям. В этих моделях применяются аппроксимации функционалов процессов, содержащие все основные параметры сложного нагружения и полностью характеризующие геометрию траектории нагружения. Построенные модели и ее частные варианты позволяют проводить математическое моделирование по программам сложного деформирования материалов с использованием численного метода Рунге-Кутты четвертого порядка точности для решения основных определяющих соотношений, сведенных к задаче Коши. Используемая математическая модель процессов упругопластического деформирования материалов позволяет как частный случай получить численные решения для ряда других вариантов теорий пластичности путем вариации параметров сложного нагружения в аппроксимациях функционалов. Проведенные численные расчеты с использованием математической модели теории процессов [3, 5–10, 13, 14] для плоских траекторий дают результаты (модельные данные), хорошо соответствующие физическому эксперименту, и подтверждают истинность теоретических положений модели. Таким образом, проводимые в ТвГТУ систематические экспериментальные исследования упругопластического поведения материалов по изучению эффектов сложного нагружения являются важными и направлены на накопление банка экспериментальных данных, а также разработку, верификацию и аттестацию математических моделей теории пластичности.

Список использованных источников

1. Автоматизированный комплекс для исследования упруговязкопластических свойств материалов при сложном нагружении: решение о выдаче свидетельства на полезную модель / В. Г. Зубчанинов., Н. Л. Охлопков, А. В. Акимов. – М.: ВНИИГПЭ, 1997. – № 97108023/20 (008702).
2. Ильюшин, А. А. Пластичность. Основы общей математической теории / А. А. Ильюшин. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 271 с.
3. Зубчанинов, В. Г. Механика процессов пластических сред / В. Г. Зубчанинов. М.: Физматлит, 2010. – 352 с.
4. Zubchaninov, V. G. About drawing the yield surface for steel 45 and verifying the postulate of isotropy on straight-line paths under repeated sign-variable loadings / V. G. Zubchaninov, A. A. Alekseev, V. I. Gulyaev // PNRPU Mechanics Bulletin, vol. 3. – 2014. – P. 71–88. DOI: 10.15593/perm.mech/2014.3.05.

5. Зубчанинов, В. Г. Численное моделирование процессов сложного упругопластического деформирования стали по двузвенным ломаным траекториям / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев // Проблемы прочности и пластичности. – 2014. – Т. 76. – № 1. – С. 18–25.
6. Zubchaninov, V. G. Modeling of elastoplastic steel deformation in two-link broken trajectories and delaying of vector and scalar material properties / V. G. Zubchaninov, E. G. Alekseeva, A. A. Alekseev, V. I. Gultiaev // Materials Physics and Mechanics. No 4. – Vol. 42. – 2019. – P. 436-444. DOI: 10.18720/MPM.4242019_8.
7. Зубчанинов, В. Г. Процессы сложного нагружения конструкционной стали по пятизвенной кусочно-ломаной траектории деформирования / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев, Е. Г. Алексеева // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2019. – № 61. – С. 32–44. DOI: 10.17223/19988621/61/4.
8. Зубчанинов, В. Г. Моделирование процессов упругопластического деформирования материалов по многозвенным кусочно-ломаным прямолинейным траекториям / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 3. – С. 203–215. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.3.12.
9. Зубчанинов, В. Г. Моделирование процессов сложного упругопластического деформирования материалов по плоским криволинейным траекториям / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев // Проблемы прочности и пластичности. – 2015. – Т. 77. – Ч 2. – С. 113–123.
10. Zubchaninov, V. G. Modeling of elastoplastic deformation of structural steel by a trajectory containing three circles touching internally / V. G. Zubchaninov, A. A. Alekseev, V. I. Gultiaev, E. G. Alekseeva // Materials Physics and Mechanics. No 5. – Vol. 42. – 2019. – P. 528–534. DOI: 10.18720/MPM.4252019_6.
11. Zubchaninov, V. G. Testing of steel 45 under complex loading along the cylindrical screw trajectories of deformation / V. G. Zubchaninov, V. I. Gultiaev, A. A. Alekseev, V. V. Garanikov, S. L. Subbotin // Materials Physics and Mechanics. – 2017. – Vol. 32. – № 3. – P. 305–311.
12. Зубчанинов, В. Г. Испытание стали 45 при упругопластическом деформировании по сложным траекториям постоянной и переменной кривизны / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, В. И. Гулятьев // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 9. – С. 14–19.
13. Зубчанинов, В. Г. Проверка постулата изотропии и численное моделирование процессов деформирования материалов на сложных гладких траекториях / В. Г. Зубчанинов, А. А. Алексеев, Е. Г. Алексеева // Materials Physics and Mechanics. – 2016. – Т. 29. – № 2. – С. 150–157.
14. Zubchaninov, V. G. Experimental verification of postulate of isotropy and mathematical modeling of elastoplastic deformation processes following the complex angled nonanalytic trajectories / V. G. Zubchaninov, A. A. Alekseev, E. G. Alekseeva, V. I. Gultiaev // Materials Physics and Mechanics. – 2017. – Vol. 32. – № 3. – P. 298–304. DOI: 10.18720/MPM.3232017_10