

УДК 539.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Р. А. Васин

Научно-исследовательский институт механики Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, 119192 Москва, Россия  
E-mail: ra.vasin@yandex.ru

Представлены результаты экспериментального исследования упруго- и вязкопластических свойств сплавов в рамках теории упругопластических процессов. Отмечается необходимость изучения сложного нагружения материалов, учета эволюции микроструктуры в процессе их деформирования, создания соответствующей теории эксперимента и построения адекватных определяющих соотношений.

Ключевые слова: пластичность, вязкость, сверхпластичность, определяющие соотношения, теория эксперимента.

DOI: 10.15372/PMTF20160504

1. Как известно, к началу 40-х гг. XX в. существовало несколько вариантов определяющих соотношений (ОС) теории пластичности, была предложена достаточно общая формулировка теории течения для упрочняющихся материалов, проводились эксперименты по одноосному и неоднородному (в том числе непропорциональному) нагружению, выполнялось сравнение экспериментальных данных и результатов расчетов по известным вариантам ОС. На основе экспериментальных данных строились начальные поверхности нагружения и поверхности (условия) разрушения, определялись универсальные зависимости между инвариантами тензоров напряжений и деформаций. Было установлено, что результаты расчетов, проведенных с использованием одного и того же варианта ОС, достаточно хорошо соответствовали данным одних экспериментов и не соответствовали данным других экспериментов. Данная ситуация была объяснена А. А. Ильюшиным, который ввел понятия простого и сложного нагружений (см. [1]), а затем сформулировал теорию упругопластических процессов [2, 3], которая оказала существенное влияние на развитие экспериментальных исследований пластических свойств материалов. С использованием введенного в [2] понятия следа запаздывания векторных свойств  $\lambda$  А. А. Ильюшин предложил классифицировать траектории деформаций по степени их сложности путем сравнения характерных значений кривизны траектории деформаций с величиной  $\lambda^{-1}$ . Такая классификация позволила, с одной стороны, четко формализовать понятие области применимости (области адекватности) ОС, с другой — планировать программы экспериментов с учетом вида траекторий деформаций и создавать соответствующие банки экспериментальных данных. Такие банки данных можно использовать как для аттестации ОС, так и для решения задач генезиса начального состояния материала [3]. С учетом сказанного

выше можно утверждать, что предложенная в [2] классификация процессов деформирования является одним из важнейших результатов в теории пластичности, полученных во второй половине XX в. Важным вкладом в теорию эксперимента является следствие из предложенного А. А. Ильюшиным постулата изотропии [2], позволившее существенно уменьшить количество экспериментов, проводимых при исследовании сложного нагружения. Кроме того, в рамках теории упругопластических процессов А. А. Ильюшин предложил оригинальный экспериментально-вычислительный метод СН-ЭВМ решения существенно нелинейных краевых задач теории пластичности в том случае, когда конкретный вид ОС материала неизвестен [3]. Идея этого метода положена в основу идеологии численного решения краевых задач, в которых ОС содержат функционалы [4, 5]. Более того, метод СН-ЭВМ можно использовать для идентификации ОС. Преимуществом этого метода является его устойчивость, поскольку в нем используется информация о свойствах материала в области, в то время как стандартные методы идентификации неустойчивы, так как в них требуется восстановить функции в области по их следам на границе [5]. Реализация метода СН-ЭВМ в полном объеме весьма трудоемка и требует разработки эффективных методов классификации процессов деформирования, применения мощных вычислительных ресурсов, использования специальной экспериментальной техники (установки для проведения экспериментов при сложном нагружении) (см., например, [6]). В настоящее время разработан новый подход к классификации процессов деформирования, основанный на расширенных формулировках постулата изотропии и принципа запаздывания векторных свойств [7]; при решении частных задач установки для проведения экспериментов при сложном нагружении были заменены более простыми экспериментальными стендами [6]. Метод СН-ЭВМ применяется также при решении краевых задач динамической прочности (см. работу [6] и библиографию к ней). При этом вместо установки для проведения экспериментов при сложном нагружении использовались стенд для динамических испытаний по методу Кольского и стенд для испытаний преграды на пробиваемость. Для проведения таких испытаний требуется разработать теорию эксперимента.

Начиная с середины XX в. проводятся эксперименты по сложному нагружению по разнообразным плоским и трехмерным траекториям деформаций, имеющим форму двузвенных и многозвенных ломаных, окружностей, винтовых линий и т. д. Некоторое представление о разнообразии программ, методик и целей таких экспериментов позволяют получить работы [8–10]. При этом ставились следующие цели: наполнение банка данных, используемого для аттестации ОС; выявление свойств функционалов пластичности, характерных для конкретного класса траекторий деформаций (для последующей формулировки или уточнения ОС, соответствующих этому классу); проверка справедливости основных гипотез (постулатов), используемых при построении определенного вида ОС (для теории упругопластических процессов — постулат изотропии и принцип запаздывания векторных свойств; для теории течения — вид поверхности нагружения (форма, размеры и положение) и закон градиентальности). Были проведены проверки гипотез указанных выше видов ОС. Установлено, что постулат изотропии и принцип запаздывания векторных свойств, используемые в теории упругопластических процессов, подтверждаются экспериментальными данными для различных материалов. Обнаружена сильная зависимость формы поверхности нагружения от допуска на пластическую деформацию и скорости нагружения. Поэтому построение поверхностей нагружения с использованием экспериментальных данных нецелесообразно. В настоящее время верификация любого варианта теории течения проводится путем сравнения результатов расчета напряженно-деформированного состояния и экспериментальных данных (поверхность нагружения экспериментально не строится).

Для проведения экспериментов с нестандартными образцами или с образцами, в которых реализуется неоднородное напряженно-деформированное состояние, необходимо разработать теорию эксперимента, позволяющую “расшифровать” напряженно-деформированное состояние в образце при известных внешних воздействиях на него. Решение этой обратной задачи существенно зависит от типа (вида) ОС материала, которые неизвестны. Для стандартного цилиндрического образца с круговым сечением, нагружаемого крутящим моментом, известное решение указанной задачи для склерономного упругопластического материала обобщено на случай, когда свойства материала зависят от скорости деформации и температуры [11]. В работе [12] на основе теории упругопластических процессов сформулирована теория эксперимента по сложному нагружению сплошного или толстостенного трубчатого образца (а также условно-тонкостенной трубки) из склерономного материала. В последние годы большой интерес вызывают исследования, в которых идентификация ОС (или определение некоторых механических характеристик материала) осуществляется в ходе технологического эксперимента (см., например, [13]). Для решения обратных задач такого типа необходимо разработать соответствующую теорию эксперимента, специальные алгоритмы и ввести в постановку краевой задачи некоторые упрощения. Преимуществом такого способа идентификации ОС является возможность корректировать ОС таким образом, чтобы их можно было использовать при математическом моделировании технологических процессов, “близких” к используемому технологическому эксперименту.

Другим широко используемым в теории пластичности подходом к получению адекватных ОС является введение в ОС внутренних переменных, которые ассоциируются с теми или иными характеристиками структурного состояния материала. Появление внутренних переменных в ОС существенно усложняет идентификацию ОС и требует грамотного применения алгоритмов.

**2.** В теории пластичности склерономных материалов внутренние переменные, входящие в ОС, обычно связаны с параметрами структуры опосредованно, в то время как при описании горячего деформирования сплавов необходимо учитывать влияние термомеханических условий деформирования материала на эволюцию его микроструктуры и как следствие на сопротивление материала. В процессах горячего деформирования выделяется структурная сверхпластичность — состояние сплава (реализующееся при определенных температурно-скоростных условиях деформирования и при наличии ультрамелкозернистой структуры сплава), при котором его поведение подобно поведению нелинейно-вязкой жидкости. На использовании явления сверхпластичности основаны высокоэффективные технологии получения изделий с регламентированными свойствами. Однако реализация таких технологий в случае ультрамелкозернистой исходной структуры заготовки, при постоянной температуре и при скорости деформирования, изменяющейся в узком диапазоне, существенно затруднена.

Перед механикой сверхпластичности, которая оформляется как раздел механики деформируемого твердого тела сравнительно недавно, стоят следующие задачи: построение ОС, описывающих поведение материала в состояниях, близких к сверхпластическому; формулировка и экспериментальное обоснование условия сверхпластичности (определение границы между состоянием “оптимальной сверхпластичности” и состоянием, близким к сверхпластическому); экспериментальное исследование зависимости механических свойств от структуры сплавов. Приведем результаты исследований, выполненных в последнее время, которые могут способствовать решению перечисленных задач: сформулирована концепция построения банка данных о структурно-механических свойствах сплавов, что позволит оптимизировать технологические процессы получения изделий с регламентированными механическими свойствами; проведены эксперименты в режиме сверхпластичности

при изменении скорости деформации в несколько раз [14], в которых обнаружены различные режимы “запаздывания”, зависящие от исходной структуры сплава и истории деформирования. Наряду с изучением поведения сплавов при больших скачках скорости деформации проведен анализ переходных участков диаграмм деформирования при малых (10–20 %) изменениях скорости деформации, результаты которого показали, что вид (форма) этих участков зависит от того, насколько текущее состояние сплава “удалено” от состояния сверхпластичности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Ильюшин А. А.** Пластичность. Ч. 1. Упругопластические деформации. М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1948.
2. **Ильюшин А. А.** О связи между напряжениями и малыми деформациями в механике сплошных сред // Прикл. математика и механика. 1954. Т. 18, вып. 6. С. 641–666.
3. **Ильюшин А. А.** Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
4. **Васин Р. А., Моссаковский П. А.** Теория упругопластических процессов А. А. Ильюшина как идеология и алгоритм решения существенно нелинейных краевых задач // Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Тр. Междунар. конф., Санкт-Петербург, 17–20 июня 2008 г. СПб.: Изд-во С.-Петербур. политехн. ун-та, 2008. Т. 2. С. 48–50.
5. **Кравчук А. С.** Метод А. А. Ильюшина для расчета конструкций из материалов с функциональными определяющими соотношениями // Упругость и неупругость: Материалы Междунар. науч. симп. по проблемам механики деформируемых тел, посвящ. 100-летию со дня рожд. А. А. Ильюшина, Москва, 20–21 янв. 2011 г. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2011. С. 165–171.
6. **Моссаковский П. А., Васин Р. А., Антонов Ф. К.** Развитие метода СН-ЭВМ Ильюшина применительно к краевым задачам динамической прочности // Упругость и неупругость: Материалы Междунар. науч. симп. по проблемам механики деформируемых тел, посвящ. 100-летию со дня рожд. А. А. Ильюшина, Москва, 20–21 янв. 2011 г. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2011. С. 210–216.
7. **Моссаковский П. А.** Расширенные постулаты теории упругопластических процессов и их следствия // Упругость и неупругость: Материалы Междунар. науч. симп. по проблемам механики деформируемых тел, Москва, 22–23 янв. 2001 г. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2001. С. 219–223.
8. **Аннин Б. Д.** Поведение материалов в условиях сложного нагружения / Б. Д. Аннин, В. М. Жигалкин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.
9. **Зубчанинов В. Г.** Экспериментальная пластичность: В 2 кн. Кн. 1. Процессы сложного деформирования / В. Г. Зубчанинов, Н. Л. Охлопков, В. В. Гараников. Тверь: Твер. гос. техн. ун-т, 2003.
10. **Экспериментальные** исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / Под ред. В. Э. Вильдемана. М.: Физматлит, 2012.
11. **Муравлев А. В.** Экспериментальные методики исследования механических свойств термо-вязкопластических материалов при сложном нагружении и конечных деформациях // Упругость и неупругость: Материалы Междунар. науч. симп. по проблемам механики деформируемых тел, посвящ. 100-летию со дня рожд. А. А. Ильюшина, Москва, 20–21 янв. 2011 г. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2011. С. 216–220.

12. **Васин Р. А., Ильюшин А. А., Моссаковский П. А.** Исследование определяющих соотношений и критериев разрушения на сплошных и толстостенных трубчатых образцах // Изв. РАН. Механика твердого тела. 1994. № 2. С. 177–184.
13. **Aksenov S. A., Zakhariev I. Y., Osipov S. A., Kolesnikov A. V.** Characterization of superplastic materials by results of free bulging tests // Materials Sci. Forum. 2016. V. 838/839. P. 552–556.
14. **Bylya O. I., Vasin R. A., Chistyakov P. V., Muravlev A. V.** Experimental study of the mechanical behavior of materials under transient regimes of superplastic deforming // Materials Sci. Forum. 2013. V. 735. P. 232–239.

*Поступила в редакцию 28/IX 2016 г.*

---