

Установка для испытаний материалов с построением полных диаграмм деформирования

Н. Г. Чаусов^а, Д. Г. Войтюк^а, А. П. Пилипенко^а, А. М. Кузьменко^б

^а Национальный аграрный университет Украины, Киев, Украина

^б АНТК им. О. А. Антонова, Киев, Украина

Описана установка для проведения испытаний материалов и обработки результатов с построением полных диаграмм деформирования, созданная с учетом предыдущего опыта авторов и новых идей в области испытаний материалов разных классов в условиях равновесного деформирования, а также современных компьютерных технологий. Эффективность использования разработанной установки проиллюстрирована на примере испытаний мартенситно-старяющей стали при равновесном деформировании с построением полных диаграмм.

Ключевые слова: полная диаграмма деформирования, поврежденность, разрушение.

Основные характеристики статической прочности твердых тел получают путем обработки диаграмм деформирования, учитывая в основном восходящую ветвь, хотя сопротивление материала на стадии разупрочнения (ниспадающий участок диаграммы) также несет дополнительную информацию, в частности, об особенностях структуры поврежденного материала в период, предшествующий окончательному разделению тела на части. Полные диаграммы деформирования, т.е. диаграммы, включающие второй, ниспадающий до оси абсцисс участок, могут быть получены только на испытательных машинах большой жесткости или на высокоточных машинах, снабженных быстродействующими устройствами обратной связи [1–3].

Для проведения подобного рода испытаний в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины разработан комплекс испытательных средств и методик определения физико-механических свойств конструкционных материалов в условиях жесткого нагружения, в том числе на стадии макроразрушения. При построении полных диаграмм деформирования необходимо учитывать один принципиальный момент. Для каждого материала существует критическая длина образца, запас упругой энергии на базе которой в момент старта макротрещины равен работе разрушения. В зависимости от микромеханизмов развития трещины (вязкий отрыв, вязкий срез, смешанное разрушение) эта работа существенно изменяется [4]. Таким образом, имеется ограничение на допустимые размеры применяемых образцов в опытах на равновесное деформирование. При использовании образцов, длина которых больше критической, обеспечить равновесное состояние материала на стадии макроразрушения нельзя.

В последнее время достигнут значительный прогресс в исследовании актуальных проблем разрушения пластичных материалов с использованием метода полных диаграмм деформирования. Это свидетельствует о необхо-

димости более решительного внедрения данного метода в практику механических испытаний для определения параметров поврежденности и трещиностойкости материалов, а также для оценки деградации механических свойств металла, включая и трещиностойкость, ответственного оборудования в процессе эксплуатации [5–8].

Известные эксперименты показали, что метод превентивных разгрузок, используемый при построении полных диаграмм деформирования на испытательных установках с быстродействующей обратной связью, малоприменим для анализа особенностей микромеханизмов образования и роста макротрещины в материалах [9]. Это обусловлено тем, что многочисленные разгрузки приводят к существенному искажению геометрии и формы ниспадающих ветвей полных диаграмм деформирования и поэтому достоверно определить энергетические затраты на образование и рост макротрещины в пластичных материалах невозможно.

Традиционные методы построения полных диаграмм деформирования на испытательных машинах большой жесткости [2] представляются более предпочтительными, так как позволяют получать без искажения полные диаграммы деформирования материалов. На основе этих экспериментов можно сформулировать некоторые постулаты и построить физически адекватные модели процесса накопления повреждений и разрушения пластичных материалов для определенных классов явлений, поскольку известно [10], что ниспадающие ветви полных диаграмм деформирования отражают закон, по которому изменяются разрушающие напряжения материала при данной схеме нагружения.

Заметим, что метод полных диаграмм деформирования оказался весьма эффективным для изучения влияния предварительного силового нагружения на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость материала при последующем статическом растяжении [11, 12]. При этом удается удачно совмещать все операции силового нагружения на одном и том же стандартном образце, а в качестве параметров, оценивающих предельную поврежденность и статическую трещиностойкость материала, предложено принимать удельную работу разрушения A_p [5] и параметр трещиностойкости K_λ [4, 5, 7, 13].

Необходимость построения полных диаграмм деформирования при сложных режимах силового нагружения обусловлена тем, что характер любого предварительного нагружения может существенно влиять на механические свойства материалов при последующем статическом растяжении [14].

С использованием предыдущего опыта и новых идей в области испытаний материалов разных классов в условиях равновесного деформирования, а также современных компьютерных технологий для проведения и обработки результатов испытаний на кафедре сопротивления материалов Национального аграрного университета Украины на базе испытательной машины ZD-100Pu разработана установка для испытаний материалов с построением полных диаграмм [15], которая по всем параметрам выгодно отличается от известных.

Кроме того, установка оборудована приспособлением, позволяющим реализовать сложные режимы нагружения (статическое нагружение – динамическое нагружение – статическое нагружение) с записью полных диаграмм. Подобная схема импульсного подгружения образца была реализована также в работе [16]. В момент достижения заданной нагрузки на испытуемых образцах их подвергают динамическим перегрузкам за счет хрупкого разрыва проб металла, устанавливаемых параллельно с образцом, на величину силового импульса $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_{\max}$, где ΔP_{\max} – предельная величина, соответствующая разнице между максимальной нагрузкой и задаваемой.

Схема установки показана на рис. 1. Установка содержит неподвижную 1 и подвижную 2 траверсы, связанные с ними захваты 3 и 4, образец 5, устройство для обеспечения переменной жесткости нагружающей системы 6, приспособление для реализации сложных режимов нагружения 7 и компьютеризированную измерительную систему 8 для проведения и обработки результатов испытаний.

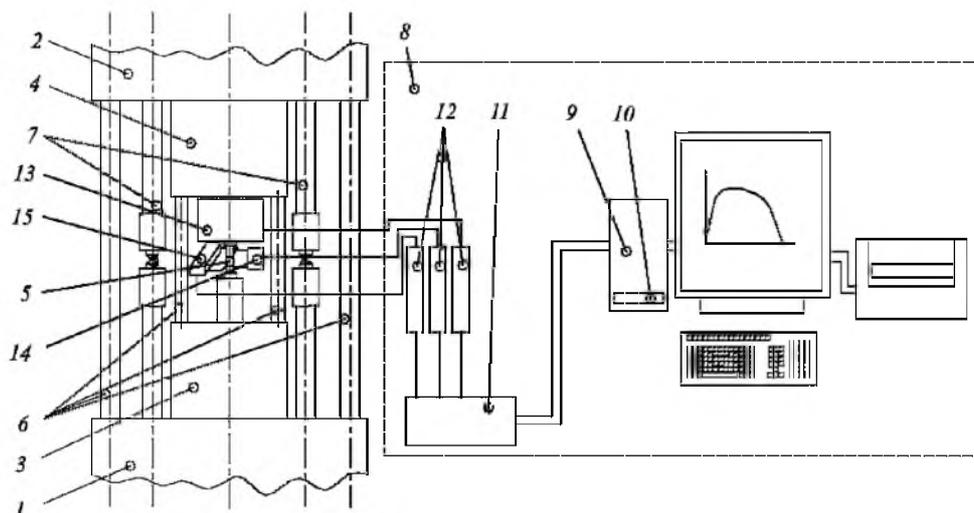
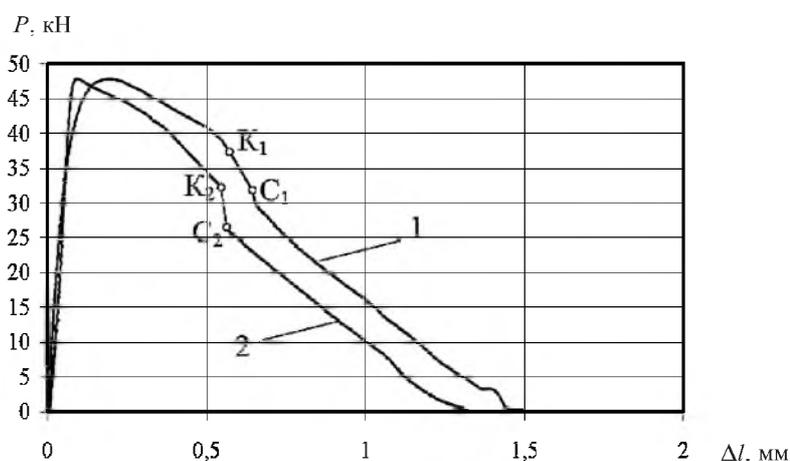


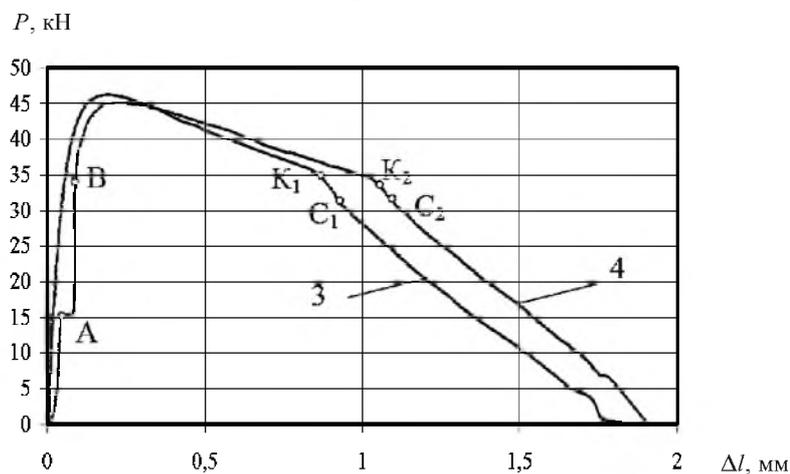
Рис. 1. Схема установки для испытания материалов.

Компьютеризированная измерительная система включает следующие элементы: ПК 9; АЦП с шестнадцатью дифференциальными каналами 10; терминальную плату для подсоединения дифференциальных каналов 11; модуль аналогового тензоусилителя постоянного тока для мостовых схем ADAM 3016 12; тензодинамометр 13; экстензометр для продольной деформации 14; экстензометр для поперечной деформации 15. После установки датчиков и прогрева усилителей имеется возможность обнулить показания каналов программно без регулировок усилителей. При обнулении производится многократный опрос показаний, вычисление среднего значения и их запись в параметры каналов. Все регистрируемые и визуализируемые данные приводятся в физической размерности с учетом тарифовочных коэффициентов и ноля каналов.

На рис. 2 в качестве примера приведены полные диаграммы деформирования образцов с исходными концентраторами $R2$, $R4$ из мартенситно-старееющей стали, полученные на описанной установке при статическом нагружении и в режиме статическое нагружение – динамическое нагружение – статическое нагружение. Минимальный диаметр образцов составлял 6,5 мм. Относительно большое время нарастания силовых и деформационных параметров во фронте упругого предвестника (на рис. 2,б участок AB) связано с инерционностью измерений при динамическом нагружении. Геометрия участка AB (рис. 2,б) полностью совпадает с профилем экспериментально измеренных продольных напряжений $\sigma_x(t)$ для металлов, а также с результатами численного моделирования на основе простых реологических моделей для упругопластического тела с упрочнением [17].



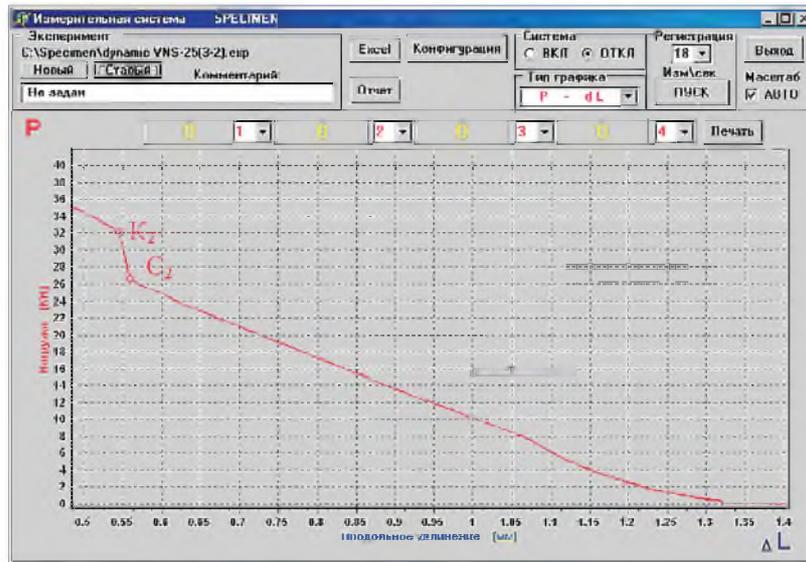
а



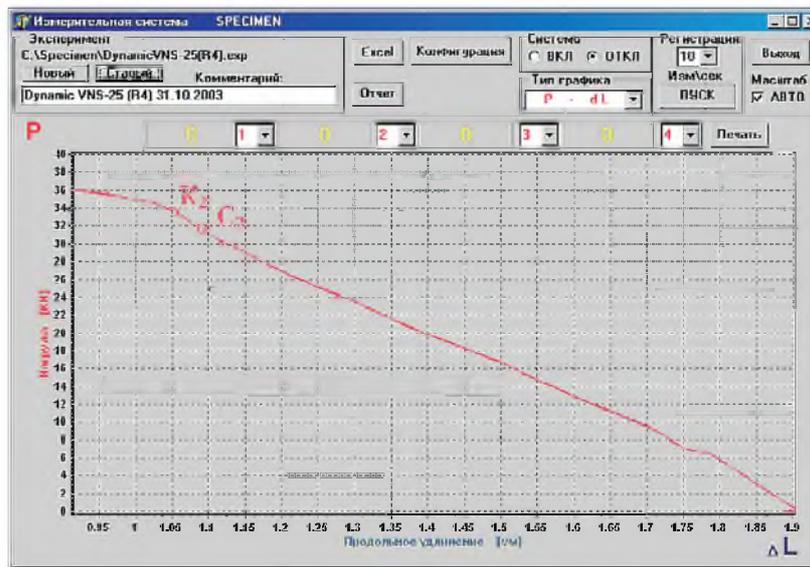
б

Рис. 2. Полные диаграммы деформирования образцов из мартенситно-старееющей стали с исходными радиусами $R2$ (а) и $R4$ (б), полученные при статическом растяжении (1, 3) и в режиме статическое нагружение – динамическое нагружение – статическое нагружение (2, 4). (Диаграмма 2 записана после динамического нагружения силовым импульсом от 21 до 41 кН и полной разгрузки.)

На рис. 3 приведены в увеличенном масштабе ниспадающие ветви диаграмм деформирования. Анализ результатов испытаний показал, что изменение конфигурации исходного концентратора и режима нагружения существенно влияют на геометрию диаграмм деформирования, в частности на наклон начального практически прямолинейного ниспадающего участка K_2C_2 (рис. 2, 3), который, как известно, соответствует образованию в центральной зоне образцов отрывной макротрещины [18].



а



б

Рис. 3. Ниспадающие ветви полных диаграмм деформирования образцов из мартенситно-старееющей стали с исходными радиусами $R2$ (а) и $R4$ (б): а – соответствует кривой 2 на рис. 2, б – кривой 4 на рис. 2, б.

Так, при действии динамического силового импульса проявляется эффект “размягчения” материала, понижается сопротивление деформированию на ниспадающей ветви диаграмм (рис. 2, 3). Однако, с другой стороны, динамическая перегрузка на образцах с исходным радиусом R_2 заметно охрупчивает материал, наклон ниспадающего участка K_2C_2 (рис. 2,а) существенно увеличивается. Поэтому трещиностойкость мартенситно-старееющей стали при “чистом” статическом растяжении, оцениваемая по параметру K_λ [4, 5, 7, 13], превышает трещиностойкость той же стали, претерпевшей предварительную динамическую перегрузку.

Эти выводы полностью согласуются с концепцией авторов [5, 19] о необходимости использования дополнительной информации о механических свойствах материалов при расчете конструкций по критериям поврежденности и трещиностойкости. В частности, речь идет о зависимости предельной поврежденности и трещиностойкости материалов от вида напряженного состояния, наработки и предыстории нагружения. В данном случае использование метода полных диаграмм для подобного рода исследований представляется весьма перспективным и полезным.

Резюме

Описано установку для проведения випробувань матеріалів і обробки результатів із побудовою повних діаграм деформування, в основу якої покладено попередній досвід авторів і нові ідеї в області випробувань матеріалів різних класів в умовах рівноважного деформування, а також сучасні комп’ютерні технології. Ефективність використання установки проілюстровано на прикладі випробувань мартенситно-старіючої сталі за умови рівноважного деформування з побудовою повних діаграм.

1. *Kreiskorte H. und Funk W.* Die Simulation linear “härten” Werkstoffprüfmaschine // Mater. Prüfung. – 1970. – **12**, No. 1. – S. 1 – 6.
2. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Установка для испытания материалов с построением полностью равновесных диаграмм деформирования // Пробл. прочности. – 1981. – № 12. – С. 104 – 106.
3. *Мионов В. И., Микушин В. И., Владимиров А. П. и др.* Установка для определения механических свойств материала на стадии разупрочнения // Завод. лаб. Техн. диагностика. – 2001. – **67**, № 3. – С. 47 – 51.
4. *Чаусов Н. Г.* Кинетика разрушения металлов на заключительных стадиях деформирования. – Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Киев, 1992. – 32 с.
5. *Лебедев А. А., Чаусов Н. Г.* Прогнозирование трещиностойкости сталей в зависимости от условий эксплуатации конструкций на малогабаритных образцах // Пробл. прочности. – 1992. – № 11. – С. 29 – 33.
6. *Чаусов Н. Г., Лебедев А. А., Богданович А. З.* О предельной поврежденности материала в зоне концентратора // Там же. – 2002. – № 6. – С. 17 – 21.

7. Чаусов Н. Г., Богданович А. З. Моделирование кинетики деформирования материала в зоне предразрушения // Там же. – 2003. – № 2. – С. 54 – 65.
8. Панько І. М. Теоретичні основи інженерних методів для оцінки тріщиностійкості матеріалів і елементів конструкцій. – Львів: Фіз.-мех. ин-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2000. – 280 с.
9. Вильдеман В. Э., Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / Под ред. Ю. В. Соколкина. – М.: Наука, 1997. – 288 с.
10. Чаусов Н. Г., Лебедев А. А. Особенности разрушения пластичных листовых материалов // Пробл. прочности. – 2003. – № 4. – С. 5 – 13.
11. Чаусов Н. Г., Богданович А. З. Влияние предварительного циклического нагружения на процесс разрушения пластичной стали при статическом растяжении // IV Междунар. симп. “Трибофатика” (Тернополь, сент. 2002 г.): Тез. докл. и сообщ. – Тернополь, 2002. – Т. 1. – С. 312 – 316.
12. А.с. 1572204 СССР, МКИ⁴ G 01 N 3/32. Способ оценки сопротивления материала распространению трещины / Н. Г. Чаусов, Ю. Л. Евецкий // Открытия. Изобретения. – 1990. – № 22. – С. 273.
13. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Экспресс-метод оценки трещиностойкости пластичных материалов. – Киев, 1988. – 43 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т пробл. прочности).
14. Ясній П. В. Пластично деформовані матеріали: втомі і тріщиноотривкість. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
15. Декларацийний патент України 61760А, МКИ⁷, G01N3/08. Установка с регулируемой жесткостью навантажувальної системи / М. Г. Чаусов, В. Ф. Ярошенко, А. П. Пилиненко. – Оубл. 17.11.03. Бюл. № 11.
16. Установка для виробування матеріалів на динамічний розтяг / Є. В. Воробйов, В. О. Стрижало // Патент України на винахід № 95073200. – Оубл. 01.07.97.
17. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортон В. Е. Исследования механических свойств материалов при ударно-волновом нагружении // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 1999. – № 5. – С. 173 – 188.
18. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Зайцева Л. В. Влияние вида напряженного состояния на кинетику разрушения и трещиностойкость мартенситно-старееющей стали. Сообщ. 2. Оценка трещиностойкости стали // Пробл. прочности. – 1991. – № 8. – С. 14 – 18.
19. Lebedev A. A., Chausov N. G., and Bogdanovich A. Z. Model for damage accumulation in a material under multiaxial loading // Proc. Sixth Int. Conf. on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture / Ed. Manuel Morlina de Freitas. – Lisboa. – 2001. – 2. – P. 1023 – 1029.

Поступила 19. 12. 2003