



КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

Н. Г. ЧАУСОВ, С. А. НЕДОСЕКА, А. П. ПИЛИПЕНКО

Показаны преимущества метода полных диаграмм деформирования материалов для исследования влияния динамических перегрузок на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость материалов при последующем статическом растяжении. Опыты проводили на образцах из реакторной стали в двух состояниях. На основе новых экспериментальных данных предложена и апробирована схема кинетики процесса накопления повреждений в материале для рассматриваемого случая нагружения. Результаты механических испытаний подтверждаются данными АЭ сканирования.

Advantages of the method of complete diagrams of material deformation are demonstrated for investigation of the influence of dynamic overloads on the kinetics of damage accumulation and crack resistance of materials at subsequent static tension. Experiments were conducted on samples of reactor steel in two conditions. New experimental data were the basis for suggesting and verifying the schematic of the kinetics of the process of damage accumulation in the material for the considered case of loading. Results of mechanical testing are confirmed by the data of AE scanning.

Введение. В работах [1, 2] сформулирована концепция поверхности предельной поврежденности материала, которая может быть положена в основу мониторинга остаточного ресурса конструкций. В соответствии с этой концепцией изменение режимов нагружения конструкций в сторону их ужесточения и эксплуатационная наработка приводят к снижению уровня предельной поврежденности пластичного материала. Для полностью охрупченного материала этот уровень становится минимальным, соответственно и способность материала сопротивляться росту трещин становится минимальной.

Очевидно, что любое изменение в истории нагружения конструкции приводит к изменению кинетики накопления повреждений в материале и их предельных значений [3].

Особую опасность для конструкций могут вызывать динамические перегрузки, так как по мнению многих исследователей они существенно повышают склонность материалов к охрупчиванию.

Однако даже в простейшей статически неопределимой конструкции, когда одновременно нагружаются три параллельных элемента в различных структурных состояниях, в случае внезапного хрупкого разрушения одного из элементов в материале соседнего элемента, который находится в упруго-пластическом состоянии, за счет динамического перераспределения нагрузки в системе могут протекать такие процессы деформирования, которые однозначно можно отнести к неисследованным [4].

Для изучения влияния указанных режимов нагружения на кинетику разрушения и трещиностойкость материала при последующем статическом растяжении очень эффективен метод полных диаграмм деформирования. При этом удается удачно совмещать все операции силового нагружения на одном и том же стандартном малогабаритном образце, а в качестве параметров, оценивающих предельную поврежденность и статическую трещиностойкость материала, целесообразно принимать удельную ра-

боту разрушения A_p [5] и параметр трещиностойкости K_{λ} [6].

Методика испытаний и исследуемые материалы. В настоящей работе приводятся данные по комплексной оценке поврежденности реакторной стали 12ХНЗМФА после двух специальных режимов термообработки при статическом растяжении и при сложных режимах нагружения (статическое растяжение–динамическая перегрузка–статическое растяжение) с использованием метода полных диаграмм деформирования.

Для проведения испытаний при сложных режимах нагружения на кафедре сопротивления материалов Национального аграрного университета Украины на базе испытательной машины ZD-100Pc разработана установка для испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования, которая по всем параметрам выгодно отличается от известных [7]. Установка оборудована приспособлением, позволяющим реализовать сложные режимы нагружения (статическое нагружение–динамическая перегрузка–статическое нагружение) с записью полных диаграмм. В момент достижения заданной нагрузки на испытуемых образцах их подвергают динамическим перегрузкам за счет и хрупкого разрыва проб металла, устанавливаемых параллельно с образцом, на величину силового импульса $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_{\max}$, где предельная величина ΔP_{\max} соответствует разнице между максимальной и задаваемой нагрузкой.

Схема конструкции 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 перемещаемой жесткости нагружающей системы 6, приспособление для реализации сложных режимов нагружения 7 и компьютеризированную измерительную систему (КИС) 8 для проведения и обработки результатов испытаний.

Все данные, которые регистрируются и визуализируются системой КИС в процессе экспери-

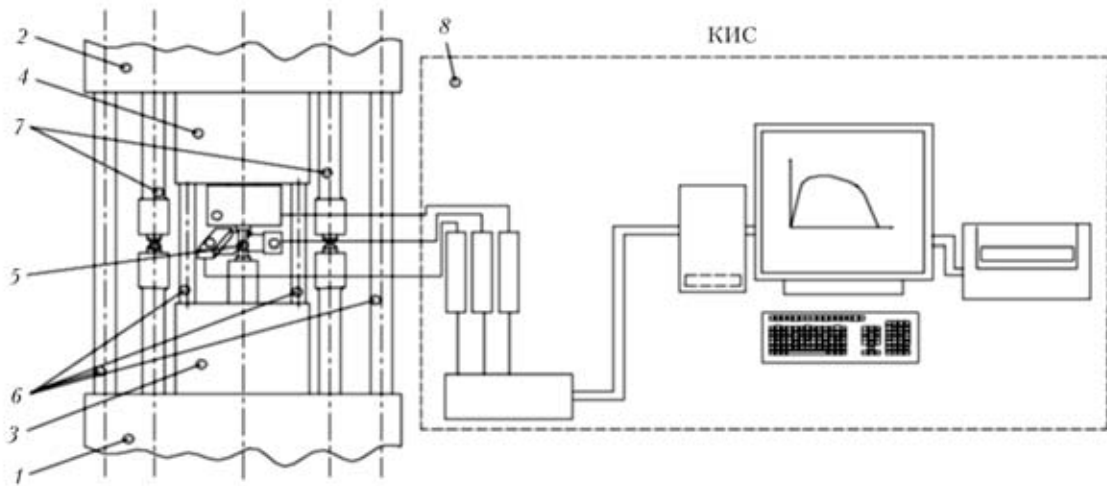


Рис. 1. Схема установки

мента, приводятся в физической размерности и с учетом тарировочных коэффициентов и нуля каналов. Разработанная система способна отображать в реальном масштабе времени график деформирования «нагрузка–удлинение», а после окончания эксперимента автоматически рисовать другие варианты графиков. Имеется возможность масштабирования любой части графика.

Для испытаний использовались гладкие цилиндрические образцы диаметром 8 мм и длиной рабочей части 25 мм.

На рис. 2 показаны участки диаграмм деформирования образцов из реакторной стали после первого режима термообработки, испытанных в условиях «статическое растяжение–динамическая перегрузка» с перегрузкой на зубе текучести (цифрами указаны номера испытанных образцов). Сразу после динамической перегрузки образцы разгружали для дальнейших металлофизических исследований. Здесь же для сравнения приведены стадии деформирования образцов из той же стали, испытанных при статическом растяжении и разгруженных при тех же степенях деформации, что и с учетом динамических перегрузок.

Как видно из рис. 2, динамические перегрузки существенно влияют на процесс деформирования стали. Для изучения особенностей структурного состояния стали после различных режимов на-

ружения использовалась феноменологическая модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении, в соответствии с которой степень повреждения (разрыхления) связана с деформацией соотношением [8]:

$$\epsilon_p = [1 - 2\mu(\epsilon)]\epsilon, \quad (1)$$

где $\mu(\epsilon)$ — текущее значение коэффициента поперечной деформации.

Деформация разрыхления ϵ_p имеет устойчивую корреляцию с поврежденностью материала [9].

На рис. 3 приведены фрагменты графиков в момент динамической перегрузки образцов из реакторной стали с возрастающим силовым импульсом, свидетельствующие о том, что в момент динамической перегрузки изменяется плотность материала в волнах разрежения и сжатия. Причем, в зависимости от степени деформации, при которой проводилась динамическая перегрузка на зубе текучести, отмечаются некоторые различия в кинетике накопления повреждений. Однозначно можно утверждать, что динамическая перегрузка скачком увеличивает степень разрыхления материала, в результате чего отмечается существенное разупрочнение материала по сравнению с деформационными процессами, проходящими в материале при статическом растяжении. В то же время, особенности деформирования материала на зубе текучести проявляются в том, что в случае динамической перегрузки материала образцов 4, 5 деформация разрыхления ϵ_p последовательно возрастает в волнах разрежения и сжатия. В случае же динамической перегрузки материала образца 7 деформация разрыхления резко возрастает в волне разрежения и падает в волне сжатия.

Следует отметить, что величина скачка ϵ_p зависит не только от величины силового динамического импульса, но также и от стадии деформирования, на которой этот импульс осуществляется. Анализ результатов испытаний свидетельствует также о том, что кинетика процесса разрыхления в волнах разрежения и сжатия неоднозначна. Для понимания этих тонких процессов требуются дополнительные исследования.

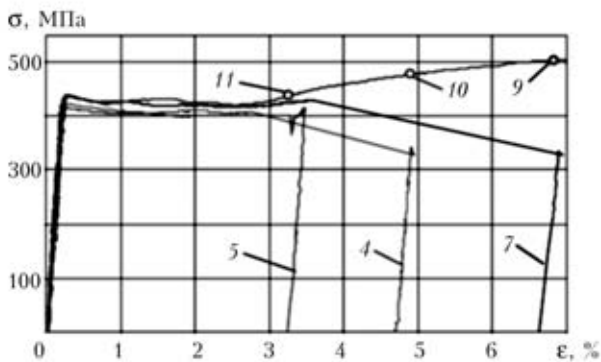


Рис. 2. Участки диаграмм деформирования образцов из реакторной стали после первого режима термообработки при различных режимах нагружения

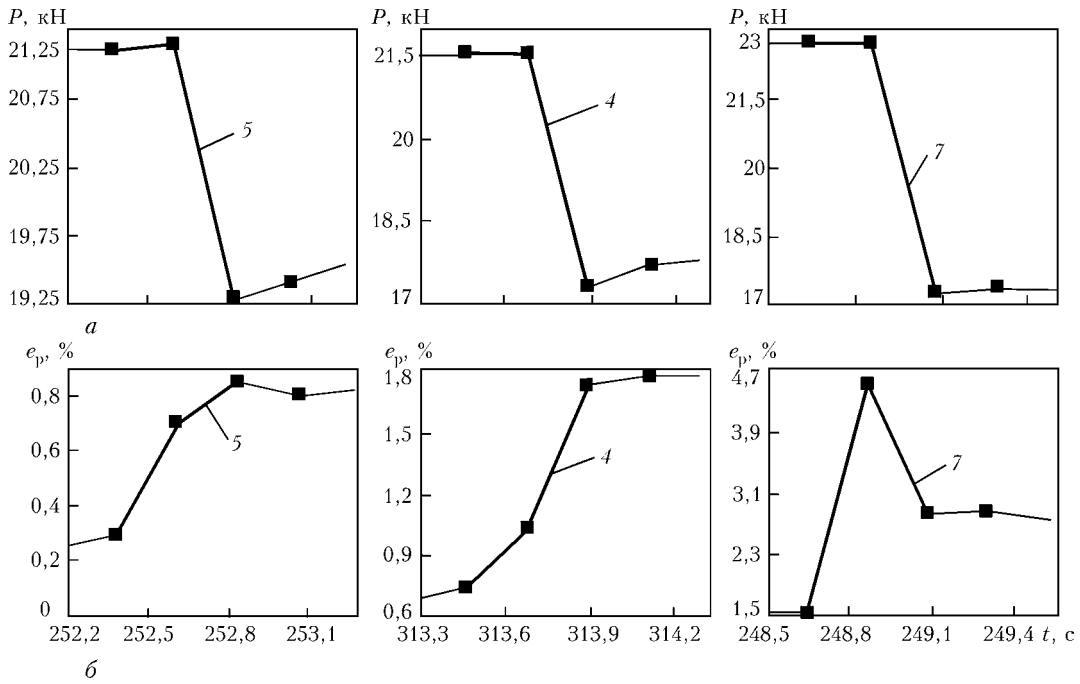


Рис. 3. Фрагменты графиков в момент динамической перегрузки образцов из реакторной стали после первого режима термообработки: а — изменение нагрузки; б — изменение деформации разрыхления (нумерация образцов соответствует рис. 2)

Не менее интересными оказались данные по оценке степени разрыхления материала в результате динамической перегрузки с использованием метода АЭ сканирования [10]. Этот метод аналогичен методу ультразвуковой дефектоскопии, отличаясь тем, что для излучения и приема сигналов используется АЭ аппарата, а анализ принятых сигналов аналогичен анализу сигналов при обычных АЭ испытаниях.

Полученные данные весьма интересны еще по одной причине. В данной работе впервые для прозвучивания материала применяли аппаратуру нового поколения ЕМА-3. Несмотря на сходство технологий, заложенных в основу системы ЕМА-3 и используемой ранее ЕМА-2, между ними имеются различия, и важно было подтвердить, что с помощью новой аппаратуры также можно получать устойчивые зависимости между поврежденностью материала и параметрами акустических сигналов.

В целом технология сканирования аналогична используемой в работах [8, 10]. На торцах разгруженных образцов прикрепляли два датчика АЭ, один из которых служил имитатором сигналов АЭ, другой — приемником сигналов. Встроенный в систему ЕМА-3 генератор сигналов АЭ позволяет при необходимости использовать датчик в качестве излучателя. Серии одинаковых сигналов прямоугольной формы, амплитудой 4 В и длительностью 2 мкс подавали на датчик с интервалом 1 с. Параметры акустических сигналов, воспринимаемых датчиком, регистрировала АЭ аппарата. В результате обработки опытных данных установлено, что по мере возрастания динамического силового импульса на образце амплитуда воспринимаемых акустических сигналов затухает, а время возрастания сигнала до максимального значения амплитуды, т. е. длительность события АЭ, наоборот, увеличивается.

В качестве параметра, позволяющего оценить степень поврежденности материала в результате динамической перегрузки, принимают характеристику, имеющую смысл скорости нарастания акустического сигнала до максимума $V_i = A_{\max i} / R_{\max i}$. Критерий оценки опасности накопленных в металле образца повреждений принимают в виде

$$\Delta W_i = 1 - \frac{V_{\text{повр.}i}}{V_{\text{исх.}i}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{исх.}i}$ — скорость нарастания сигнала до максимума в неповрежденном образце.

На рис. 4 приведены данные сопоставления степени поврежденности материала образцов после динамических перегрузок с использованием двух приведенных выше методов.

Оценку поврежденности материала методом АЭ сканирования проводили при двух из наиболее высоких уровней чувствительности аппаратуры (коэффициенты усиления 80 и 100 дБ). Как видно, имеется устойчивая корреляционная зависимость между двумя методами исследований. При более высокой чувствительности аппаратуры полученные

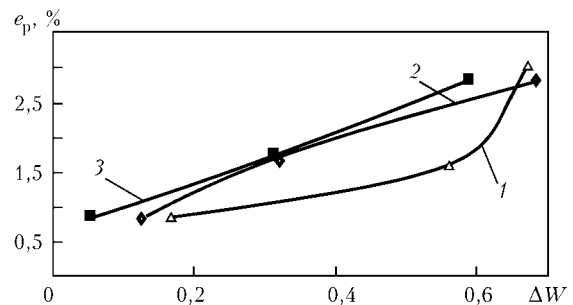


Рис. 4. Поврежденность образцов из реакторной стали после первого режима термообработки при различных режимах нагружения: 1 — при статическом растяжении (чувствительность аппаратуры 100 дБ); 2, 3 — с учетом динамических перегрузок (чувствительность аппаратуры соответственно 100 и 80 дБ)

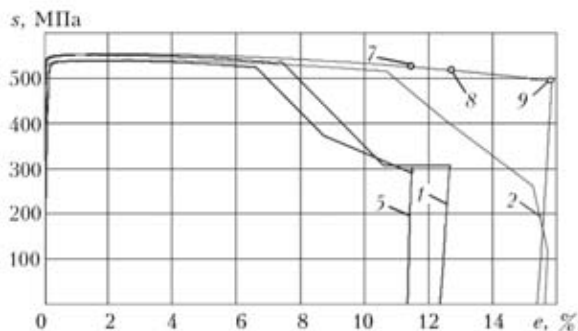
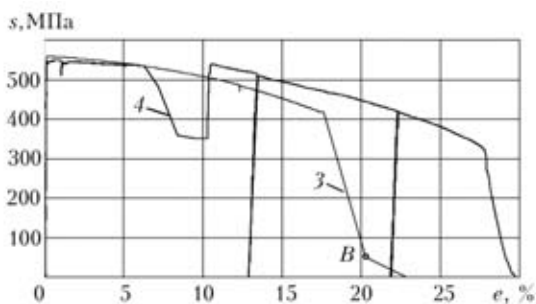


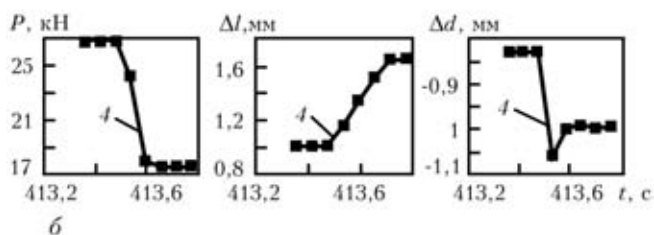
Рис. 5. Участки диаграмм деформирования образцов из реакторной стали после второго режима термообработки при различных режимах нагружения

физические зависимости наиболее адекватны. Здесь же на рис. 4 приведена зависимость исследованных параметров для случаев чисто статического растяжения образцов из реакторной стали при тех же конечных уровнях деформаций. Отмечаются существенные различия в их форме. Однако пока не представляется возможным однозначно говорить о том, что по совокупности описанных методов исследования структурного состояния металла можно предсказать историю нагружения материала.

На рис. 5 показаны участки диаграмм деформирования образцов из реакторной стали после второго режима термообработки, испытанных в условиях «статическое растяжение–динамическая перегрузка» с перегрузками на ниспадающей ветви диаграмм деформирования (цифрами указаны номера испытанных образцов). Сразу после динамической перегрузки образцы разгружали для дальнейших металлофизических исследований. Здесь же, для сравнения, приведены стадии деформирования образцов из той же стали, испы-



а



б

Рис. 6. Полные диаграммы деформаций образцов из реакторной стали после второго режима термообработки с учетом динамических перегрузок: а — образец 3 — регистрация при 18 измерениях в секунду и при усреднении 50; 4 — регистрация при 18 измерениях в секунду и при усреднении 1; б — развертка во времени изменения нагрузки и деформаций образца 4 в процессе динамической перегрузки

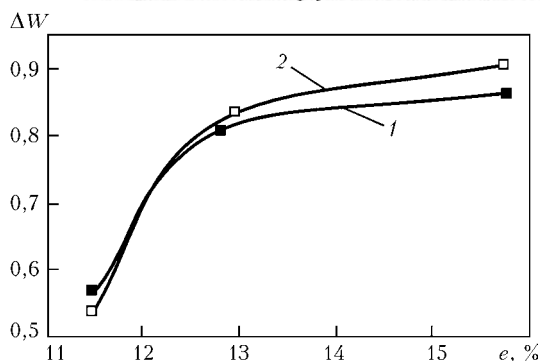


Рис. 7. Поврежденность образцов из реакторной стали после второго режима термообработки при различных режимах нагружения: 1 — при статическом растяжении; 2 — с учетом динамических перегрузок

танных при статическом растяжении и разгруженных при тех же степенях деформации, что и с учетом динамических перегрузок.

Как видно из рис. 5, динамические перегрузки на ниспадающей ветви диаграмм так же существенно влияют на процесс деформирования стали. Учитывая, что сталь 12ХНЗМФА после второго режима термообработки проявляет анизотропию пластических свойств, модель, приведенная в работе [8], не пригодна для описания кинетики накопления повреждений. В данном случае, для оценки степени разрыхления материала после разных режимов нагружения использовали только метод АЭ сканирования.

Для того, чтобы подтвердить достоверность экспериментально фиксируемого факта падения нагрузки на образце в процессе динамической перегрузки и отсутствие осцилляции сигнала нагрузки был проведен специальный опыт.

В базовых опытах диаграмма деформирования материала записывается при 18 измерениях в секунду и усреднении результатов эксперимента по 50 измерениям. В специальном опыте диаграмма деформирования точно так же записывалась при 18 измерениях в секунду, но фактически без усреднения (коэффициент усреднения равнялся 1).

На рис. 6, а приведены результаты эксперимента: на рис. 6, б показаны развертки во времени нагрузки, продольного удлинения и поперечного сужения образца 4 в процессе динамической перегрузки. Таким образом, дополнительно экспериментально подтверждено, что нагрузка в процессе динамической перегрузки падает и при данной скорости измерений не осциллирует. То, что нагрузка на образце падает в процессе динамической перегрузки легко проверяется экспериментально и другим способом, необходимо только сразу после динамической перегрузки нагрузить (или разгрузить) образец. Повторная нагрузка (или разгрузка) начинается именно с той точки диаграммы деформирования, до которой упала нагрузка после динамической перегрузки.

На рис. 7 приведены данные по оценке степени разрыхления образцов 5, 1, 2 (см. рис. 5) из реакторной стали после динами-

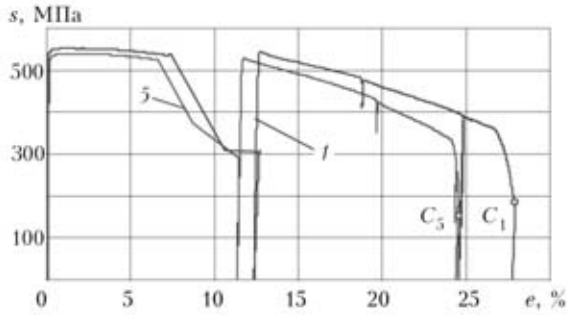


Рис. 8. Полные диаграммы деформаций образцов из реакторной стали после второго режима термообработки с учетом динамических перегрузок (нумерация кривых согласно рис. 5)

ческих перегрузок с использованием метода АЭ сканирования при чувствительности аппаратуры 100 дБ. Здесь же приведена зависимость исследованного параметра $\Delta W(\epsilon)$ для случаев чисто статического нагружения образцов 7, 8, 9 (см. рис. 5) при тех же конечных уровнях деформаций. Отмечается, с одной стороны, качественное подобие кривых, а с другой, и некоторые различия в их форме, обусловленные сменой режима нагружения. Принимая в расчет устойчивую корреляционную зависимость между параметрами ΔW и ϵ_p (см. рис. 4), можно по изменению параметра $\Delta W(\epsilon)$ судить о степени поврежденности материала на ниспадающей ветви диаграмм деформирования.

Следует обратить внимание на тот факт, что для исследованной стали удалось установить ту степень деформирования металла, при которой динамическая перегрузка заданной величины привела практически к полному равновесному разделению образца на части (срыв нагрузки произошел только в точке В, см. рис. 6, кривая 3).

Повторное статическое растяжение образцов 5, 1, 2 после динамических перегрузок и образца 9 после предварительного статического растяжения с записью полных диаграмм деформаций (см. рис. 8, 9) показывает, насколько существенны эффекты, связанные с динамическими перегрузками. Для оценки дефекта модуля упругости материала в процессе деформирования выполнялись частичные разгрузки образцов (точками C_i на рис. 8, 9 обозначены значения деформаций, при которых выполнялись окончательные разгрузки образцов с макротрещинами для дальнейших металлофизических исследований).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о неоднозначном влиянии динамических перегрузок на предельную поврежденность и трещиностойкость сталей в разных структурных состояниях. Так, для реакторной стали после первого режима термообработки отмечается незначительное уменьшение параметров A_p и K_λ после динамических перегрузок на зубе текучести, что является предсказуемым эффектом.

Сравнение же предельной поврежденности и трещиностойкости реакторной стали после второго режима термообработки при статическом растяжении и с учетом динамических перегрузок на ниспадающей ветви диаграмм показало увеличение

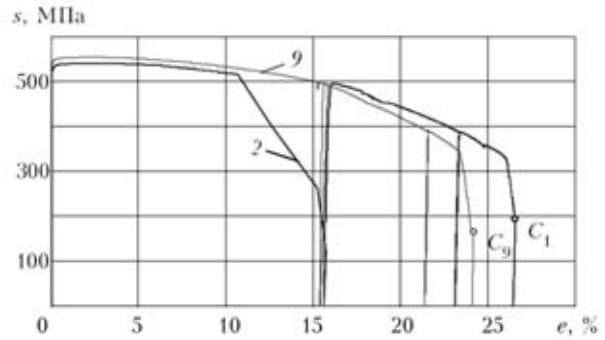


Рис. 9. Полные диаграммы деформаций образцов из реакторной стали после второго режима термообработки при чисто статическом растяжении и с учетом динамической перегрузки (нумерация кривых согласно рис. 5)

параметров A_p и K_λ после перегрузок. Если при статическом растяжении образца 9 — $A_p = 0,022 \text{ кН/мм}^3$ и $K_\lambda = 15,21 \text{ кН/мм}^{3/2}$, то для образцов 5, 1, 2 — A_p и K_λ соответственно, равны 0,028, 0,036, 0,025 и 17,34 $\text{кН/мм}^{3/2}$, 19,71 и 16,38 $\text{кН/мм}^{3/2}$.

Ранее установлено, что кривая, которая описывает закон накопления повреждений при статическом растяжении в соответствии с моделью [5], имеет S-образный характер с тремя ярко выраженными участками, которые отображают истинные физические процессы, протекающие в деформируемом материале (образование пор, их рост и слияние). Динамические перегрузки на стадиях образования и роста пор вносят существенные изменения в кинетику накопления повреждений, что, в первую очередь, влияет на стадию слияния пор и на предельную поврежденность материала (рис. 10). Здесь кривая 1 представляет зависимость $\epsilon_p(\epsilon)$ при статическом растяжении.

Следует учитывать, что именно от величины динамического импульса, который характеризуется производной $d\epsilon_p/d\epsilon$ и стадии деформирования, на которой производятся динамические перегрузки, зависит кинетика накопления повреждений и трещиностойкость материала при последующем статическом растяжении.

В пределе, при $d\epsilon_p/d\epsilon = 1$ реализуется хрупкое разрушение материала.

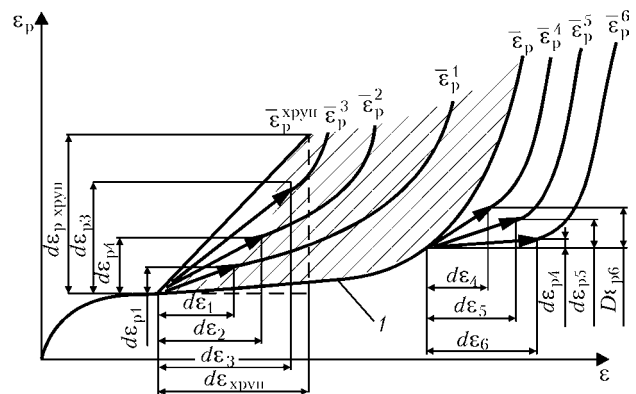


Рис. 10. Зависимость предельной поврежденности материала ϵ_p от величины приложенного динамического силового импульса и от стадии деформирования при динамических перегрузках



Как уже отмечалось, модель, приведенная в работе [8], неприменима для анизотропных материалов и она также не учитывает возможности фазовых, полиморфных и других превращений. Поэтому для оценки предельной поврежденности материала целесообразно использовать удельную работу разрушения A_p и в данном случае предельные значения ϵ_p^i (см. рис. 10) будут соответствовать значениям A_p .

Выводы

Разработана эффективная методика исследования влияния динамических перегрузок на кинетику накопления повреждений и трещиностойкость сталей при последующем статическом растяжении с использованием метода полных диаграмм.

На примере испытаний реакторной стали в двух состояниях показано неоднозначное влияние динамических перегрузок на предельную поврежденность и статическую трещиностойкость сталей.

Показана перспективность использования метода АЭ сканирования для оценки текущего состояния сталей при сложных режимах нагружения, в том числе при наличии структурных превращений.

Для рассматриваемой стали в двух состояниях предложена и апробирована схема кинетики процесса накопления повреждений в материале при сложных режимах нагружения (статическое растяжение–динамическая перегрузка–статическое растяжение).

1. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г., Богданович А. З. Оценка предельных повреждений в материалах при статическом

- нагружении с учетом вида напряженного состояния // Пробл. прочности. — 2002. — № 2. — С. 35–40.
2. Lebedev A. A., Chaousov N. G., Bogdanovich A. Z. Model for Damage Accumulation in a Material under Multiaxial Loading // In Proc. of The Sixth Int. Conf. on Biaxial // Multiaxial Fatigue and Fracture. — Ed. Manuel Morlina de Freitas- Lisbon. — Portugal. — 2001. — № 2. — P. 1023–1029.
3. Проблемы обеспечения надежности, ресурса и безопасности ядерных энергетических установок // Ф. М. Митенков, Г. Ф. Городов, Ю. Г. Коротких, В. А. Панов, С. Н. Пичков // Пробл. машиностроения и надежности машин. — 2002. — № 2. — С. 106–112.
4. Чаусов Н. Г., Пилипенко А. П. Кинетика разрушения металлов при сложных режимах нагружения // Механика микроненородных материалов и разрушение // III Всерос. семинар им. С. Д. Волкова. Сб. тез. докл. — Россия, Екатеринбург, 25-26 марта 2004. — С. 70.
5. Чаусов Н. Г., Лебедев А. А., Богданович А. З. О предельной поврежденности материала в зоне концентратора // Пробл. прочности. — 2002. — № 6. — С. 17–21.
6. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Феноменологические основы оценки трещиностойкости материалов по параметрам спадающих участков диаграмм деформаций // Там же. — 1983. — № 2. — С. 6–10.
7. Патент Украины № 61760 / Чаусов М. Г., Ярошенко В. Ф., Пилипенко А. П. Установка с регулируемой жесткостью навантажувальной системы. — 17.11.2003. Бюл. № 11.
8. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, И. О. Богинич, С. А. Недосека // Пробл. прочности. — 1995. — № 7. — С. 31–40.
9. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. — Киев, Изд-ние Ин-та проблем прочности, 2004. — 133 с.
10. Оценка поврежденности металла действующих газопроводов методом АЭ-сканирования / А. А. Лебедев, А. Я. Недосека, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2001. — № 1. — С. 8–12.
11. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций. — Киев, Индпром, 2001. — 815 с.

Нац. аграрн. ун-т НАН Украины,
МГП ИНДПРОМ, г. Киев

Поступила в редакцию
15.06.2004



Украина, 83055,
г. Донецк,
ул. Горького, 158,
а/я 7934
(062) 345-00-82,
-83, -84
E-mail:
intron@skif.net

НПП «Интрон-СЭТ»

Проводит ремонт приборов неразрушающего контроля, в том числе дефектоскопов МИРА и АРИНА.

Поставляет весь спектр приборов и оборудования для НК и ТД.

Новинки: приборы контроля качества стройматериалов и конструкций (ОНИКС, ПОИСК, ПУЛЬСАР); ультразвуковые дефектоскопы СКАРУЧ, ПЕЛЕНГ-УДЗ-103, автоматизированный комплекс ультразвукового контроля колёсных пар вагонов ПЕЛЕНГ-АВТОМАТ.

У Вас задачи? У нас решения!