ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ И НАДЕЖНОСТИ МАШИН 2020, № 2, с. 91–105

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ

УДК 517.958: 539.3

К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ С ПОВРЕЖДЕНИЯМИ, ПОДВЕРГАЕМЫХ В ЭКСПЛУАТАЦИИ УДАРНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

В. А. Петушков

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия
e-mail: pva_imash@bk.ru

Поступила в редакцию 04.06.2018 г.
Принята к публикации 25.12.2019 г.

Разработана методология математического моделирования предельных состояний машин и конструкций, подвергаемых квазистатическому эксплуатационному и ударному нагружению, с учетом возникновения больших (конечных) деформаций и деградации свойств материалов. В основе используемых математических моделей лежат известные результаты экспериментального изучения и современные представления мезомеханики о структуре, повреждаемости и нелинейных процессах вязкопластического деформирования и разрушения поликристаллических металлов в условиях высоких температур и скоростей нагружения. Представлены результаты моделирования предварительно нагруженной полосы с надрезом, расположенным в зоне соединения разнородных материалов, подвергаемой ударному воздействию. Подобные биметаллические соединения являются типичными для конструкций многих отраслей техники и требуют особого внимания в процессе эксплуатации. Показано влияние параметров квазистатического нагружения и деградации свойств материалов на волновые процессы деформирования и формирование важных для оценки ресурса предельных состояний.

Ключевые слова: мезомеханика, повреждаемость, ударные воздействия, трехмерные нелинейные процессы деформирования и разрушения, математическое моделирование, биметаллическое соединение, предельные состояния, оценка ресурса

DOI: 10.31857/S023571192002011X

Современная концепция прогнозирования безопасности и ресурса ответственных машин и конструкций, разрушение которых может привести к катастрофическим последствиям, предполагает наличие в их наиболее нагруженных зонах дефектов (трещин) с максимальными размерами, не обнаруживаемыми существующими методами контроля.

Такие дефекты могут возникать при изготовлении или со временем в результате эксплуатации. Потенциальными зонами для инициирования трещин являются локальные особенности в геометрии и структуре материалов, включая концентраторы напряжений, границы разнородных соединений и др., их распространение происходит вследствие циклического деформирования или зависящего от времени нагружения. Все последующие диагностика и оценки остаточного ресурса сводятся, таким образом, к прогнозированию роста трещин в этих зонах вплоть до катастрофического разрушения.

Динамические нагрузки: переходные, ударные или взрывные, обычно имеют уровни в десятки раз большие, чем любые другие в эксплуатации. Они являются причиной не контролируемого роста трещин в условиях ускоренного накопления и локализации повреждений, возникновения больших (конечных) деформаций, приводящих к бифуркации процессов деформирования и потере несущей способности. Последующие вибрации становятся важными только при повторяющихся в процессе эксплуатации подобных воздействиях [1, 2].

Процессы зарождения, роста и слияния повреждений в виде микропор, трещин и др. определяются скоростями и уровнями нелинейных деформаций и степенью объемности возникающих напряженных состояний [2]. Их изучение особенно актуально для оценки несущей способности и остаточного ресурса сосудов и трубопроводов под давлением в энергетике и химических производствах, газотурбинных двигателей и объектов аэрокосмической техники, транспорта и др., которые вместе с высокими эксплуатационными нагрузками могут подвергаться разнообразным динамическим воздействиям. С этой целью используются экспериментальные методы, включая методы неразрушающего контроля и испытания материалов. Однако их возможности оказываются весьма ограниченными из-за объемного характера и быстротечности указанных процессов. Более того, выполнение подобных исследований на натурных изделиях в целом ряде случаев невозможно из-за последствий разрушения или по экономическим соображениям.

Поэтому для изучения (и предсказания) поведения конструкций в экстремальных условиях нагружения наряду с экспериментальными методами широкое применение получили методы математического моделирования (вычислительный эксперимент), ориентированные на использование современных компьютерных технологий (рис. 1).

В этом случае появляется возможность анализа предельных состояний в конструкциях, которые подвергаются действию интенсивных физических полей различной природы для всех наиболее вероятных сценариев нагружения и разрушения, что особенно это актуально для задач нелинейной динамики конструкций со сложными во времени пространственными процессами деформирования [3] и др.

В настоящей статье, следуя рис. 1, приведены основные положения и результаты моделирования трехмерной неоднородной, предварительно нагруженной полосы с надрезом, расположенным в зоне соединения разнородных материалов, и подвергаемой ударному воздействию. Рассматриваемая задача актуальна для многих отраслей машиностроения, поскольку подобные соединения являются типичными в конструкциях и требуют особого внимания в процессе эксплуатации.

С учетом кинетики повреждаемости (деградации свойств) материалов среды изучено влияние начальных нагруженности и повреждений на ударные нелинейные процессы деформирования и разрушения, протекающие в полосе при конечных деформациях в условиях их стеснения. Полученные результаты направлены на обоснование и совершенствование существующих методов оценки ресурса и его продления.

Постановка задачи нелинейного деформирования и разрушения. Процессы неупругого деформирования и разрушения конструкционных поликристаллических металлов взаимосвязаны и протекают одновременно на различных уровнях их структуры [2, 5]. Многочисленные экспериментальные данные по температурному и скоростному деформированию таких материалов в большинстве случаев выявляют их высокую чувствительность, как к изменению температурных режимов, так и скоростей деформирования.

Квазистатические процессы деформирования большинства конструкций, находящихся в эксплуатации, обычно протекают при скоростях, не превышающих 10^{-4}–10^{-3} с$^{-1}$, с характерным временем нагружения, измеряемым часами. Тогда как динамические воздействия ограничиваются диапазоном скоростей деформирования от $\dot{\varepsilon} = 10^{-1}$ до 10^4 с$^{-1}$. Этот диапазон представляет основной интерес при изучении предельных со-

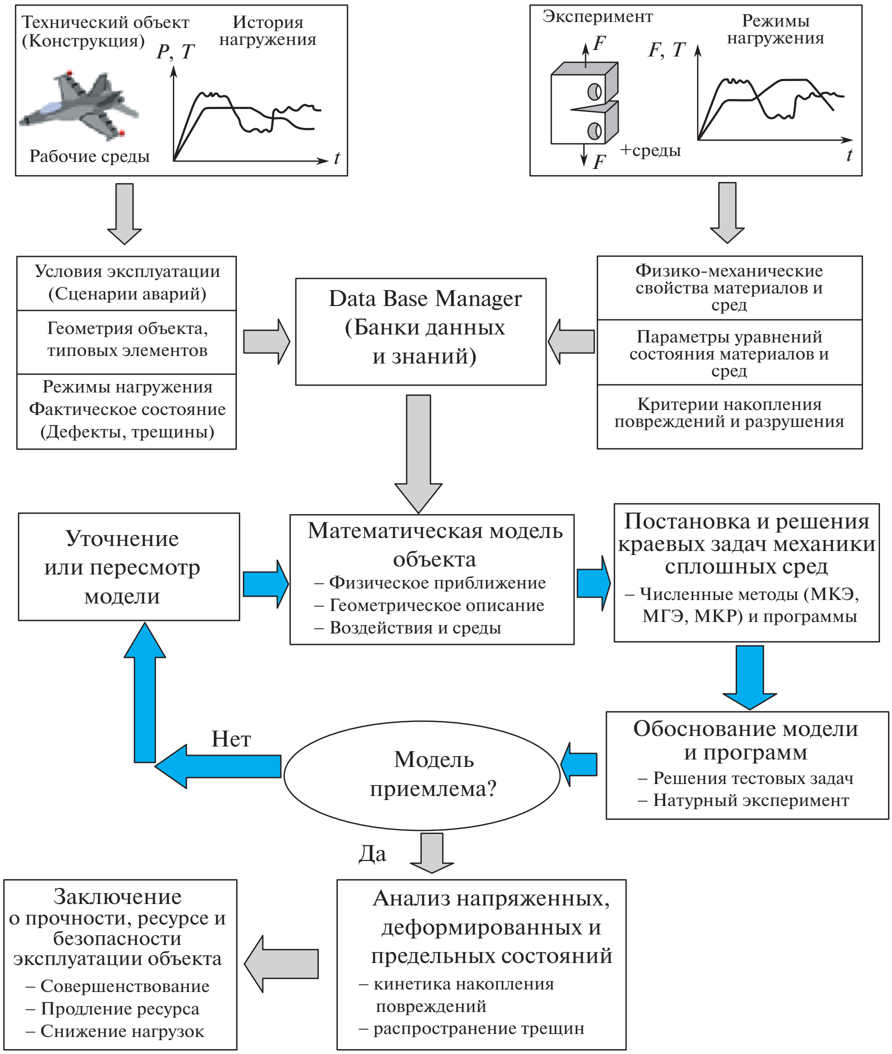

Рис. 1. Моделирование предельных состояний и прогнозирование ресурса.

стояний, оценке несущей способности и прогнозировании остаточного ресурса конструкций.

С подобными скоростями происходят процессы деформирования при землетрясениях и взрывах, или, например, в телах при скоростях соударения от 50 до 500 м/с, характерных для транспортных средств. Заметим, что продольное растяжение одномерного стержня со скоростью деформации 10^0 с$^{-1}$ означает 100% изменение его длины в секунду.

Вязкостные эффекты деформирования с выраженными волновыми процессами деформирования и разрушения становятся существенными для скоростей от 10 с$^{-1}$, что соответствует скоростям соударения, не превышающим 1000 м/с. Характерное время нагружения и отклика конструкций в этом случае измеряется милли- или микросекундами.

При скоростях деформирования 10^4 с$^{-1}$ и выше в деформируемых средах образуются ударные волны. Уровни напряжений на фронтах таких волн могут превосходить на порядок и более прочность материала, оказывается существенным переход от нормальных изотермических условий нагружения к адиабатическим.

Распространение волн в повреждаемой нелинейно-деформируемой среде сопровождается сложной картиной взаимодействия с отраженными волнами. Возникающие при этом напряженно-деформированные состояния и разрушение являются результатом повторяющихся процессов нагружения и разгрузки, образования и развития повреждений, обусловленных большими (конечными) деформациям, и деградации свойств материала.

Для моделирования таких процессов требуется математическое описание движения во времени деформируемой среды и связанного с ним состояния материала с учетом сложных траекторий нагружения и изменения свойств вследствие высоких температур и накопления повреждений. Математическая модель, объединяющая в себе описание диссипативных процессов нелинейного деформирования, повреждаемости и разрушения, должна удовлетворять основным принципам кинематики и термодинамики деформируемых сред и может быть представлена в следующем виде.

Пусть находящаяся в эксплуатации повреждаемая нелинейно-деформируемая поликристаллическая среда (конструкция, элемент конструкции) объема V занимает в момент времени t_r область $\Omega \subset R^3$, ограниченную поверхностью $S = S_\sigma \cup S_u$, $S_\sigma \cap S_u = \varnothing$, где S_σ и S_u части поверхности с заданными усилиями и смещениями соответственно, и $t_r \in (0, \tau^*]$, где τ^* – прогнозируемый срок службы конструкции или ее ресурс.

Для учета больших (конечных) деформаций область Ω будем рассматривать в качестве начальной конфигурации $k^0(\Omega)$ и на момент импульсного воздействия отнесем ее к декартовой системе координат X^i. Тогда любое движение (деформирование) среды относительно исходной конфигурации $k^0(\Omega)$ в любой произвольный момент времени $t > t_r$ определяется следующим непрерывным погружением $x^i = \varphi(X^i, t)$,

$$X^i \in k^0(\Omega), \quad k^0 : \Omega \Rightarrow R^3, \quad t \subset D_t = (t_r, \tau'), \tag{1}$$

где $x^i = x^i(X^k, t)$ – лагранжевы координаты рассматриваемой точки в деформированной среде и τ' – длительность ударного воздействия в субсекундном измерении. Здесь и далее используются соглашения, принятые в тензорном исчислении.

Поле деформаций среды задается вектором смещений ее частиц $u^i = u^i(X^k, t)$ и определяется в векторной форме как

$$u = x - X. \tag{2}$$

Мерой деформации является градиент F

$$F = \frac{\partial \varphi}{\partial X}(X, t), \quad F^T = \frac{\partial X}{\partial x}(x, t), \quad J = \det(F) > 0, \tag{3}$$

или с учетом (2)

$$F_{ij} = \delta_{ij} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j}, \tag{3a}$$

где δ_{ij} – символ Кронекера. Тензор конечных деформаций Грина определяется соотношением

$$E = \frac{1}{2}(F^T F - I), \tag{4}$$

или, принимая во внимание (3), запишем его компоненты ε_{ij} в общепринятом виде

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\nabla_i u_j + \nabla_j u_i + \nabla_i u_r \nabla_j u^r). \tag{4a}$$

Пространственный градиент скорости деформирования определяется соотношением

$$L_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \dot{F}_{ik} F_{kj}^{-1} = D_{ij} + W_{ij},$$

где $v_i = \dot{x}_i(X^k, t)$ – скорость движения деформируемой среды; D_{ij} и W_{ij} соответствующие градиенты скорости растяжения и вращения, причем

$$D_{ij} = \frac{1}{2}(\nabla_i v_j + \nabla_j v_i), \quad W_{ij} = \frac{1}{2}(\nabla_i v_j - \nabla_j v_i). \tag{5}$$

Следовательно, тензор скорости (4) можно представить в виде

$$\dot{E} = \frac{1}{2}(\dot{F}^T F + F^T \dot{F}) = F^T D F. \tag{6}$$

Локальные напряжения, возникающие при деформировании среды, определяются вторым симметричным тензором Пиола–Кирхгофа

$$T_{ij} = J F_{ik}^{-1} \sigma_{kl} F_{jl}^{-1} = F_{ik}^{-1} \tau_{kl} F_{jl}^{-1}, \tag{7}$$

где σ_{ij} – истинные напряжения Коши, $\tau_{kl} = J\sigma_{kl}$ – тензор напряжений Кирхгофа, при этом тензор T относится к начальной конфигурации k^0 среды, а тензоры σ и τ к текущей – k^t. Под скоростями напряжений далее будем понимать выражение с учетом (7), (5)

$$\tau_{jk} = \dot{\tau}_{jk} - \tau_{jr} W_{rk} - \tau_{kr} W_{rj}, \tag{7a}$$

где $\dot{\tau}_{jk}$ – полная производная напряжений по времени.

Уравнения, описывающие вязкопластическое деформирование среды, могут быть представлены в виде

$$\begin{gathered} \rho(x^i, t) J = \rho_0(X^i), \\ \tau_{jk,k} + \rho_0 b_j = \rho_0 \dot{v}_j, \\ \rho_0 c \dot{\theta} = -\nabla q + \kappa \tau : \dot{E} + \rho_0 h, \\ \rho \dot{\eta} + \nabla \frac{q}{\theta} - \rho \frac{r}{\theta} \geq 0; \quad \Omega \times D_t, \end{gathered} \tag{8}$$

где ρ – плотность среды; b – вектор массовых сил; θ – температура; c_v – удельная теплоемкость; h – плотность внутренних источников тепла; q – вектор теплопередачи; κ – числовой коэффициент; η – энтропия системы. Направление процесса обмена энергией, в том числе с окружающей средой, определяется вторым законом термодинамики – неравенством Клаузиса–Дюгема (8).

Для адиабатических процессов доля κ механической работы, обусловленной нелинейным деформированием и переходящей в тепло, составляет примерно 0.85. Скорость изменения абсолютной температуры $\dot{\theta}$ в каждой точке деформируемой среды в этом случае определяется выражением

$$\dot{\theta} = \kappa\tau_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}/\rho c_v. \tag{9}$$

При скоростях нелинейного деформирования порядка 10^4 с$^{-1}$ и более уровни возникающих температур могут превышать 600°K и оказывают существенное влияние на разупрочнение среды.

Уравнения (8) должны быть дополнены краевыми условиями для рассматриваемой конструкции или ее отдельного элемента и соотношениями, определяющими поведение нелинейно деформируемой среды с переменной структурой.

В качестве начальных условий краевой задачи принимаются деформированная после предшествующего квазистатического нагружения конфигурация Ω_r и распределение скоростей $v_i(X^i,t)$ и смещений / или напряжений $\tau_{jk}(X^i,t)$ на ней в начальный момент времени $t_r = t_0 = 0$

$$\begin{gathered} u_i(X^i,t_0) = \hat{u}_i(X^i) \quad \text{и} \quad v_i(X^i,t_0) = v_i(X^i); \\ \text{или} \quad \tau_{jk}(X^i,0) = \tau^0_{jk}(X^i) \quad \text{и} \quad v_i(X^i,t_0) = v_i(X^i), \quad X^i \in \Omega_r. \end{gathered} \tag{10}$$

Граничные условия Неймана и Дирихле для усилий и перемещений, соответственно, запишем

$$\begin{gathered} p_j = \tau_{jk}n_k = p^b_j(X^i,t) \quad \text{на} \quad S_\sigma \times D_t; \\ u_j = u^b_j(X^i,t) \quad \text{на} \quad S_u \times D_t, \end{gathered} \tag{11}$$

где $S_\sigma \cup S_u = S \subset \Omega_r$; n_j – компонента вектора внешней нормали к поверхности S в точке X^i. При наличии в области Ω_r внутренних известной формы границ Γ, обусловленных жестким соединением разнородных материалов или составных тел, условия (5) дополняются следующим

$$v^1_n = v^2_n, \quad \dot{p}^1_j = \dot{p}^2_j \quad \text{на} \quad \Gamma \times D_t, \tag{11a}$$

где цифрами 1, 2 обозначены тела (материалы), находящиеся по обе стороны от границы Γ, а $j = n, \tau_1, \tau_2$ – нормальное и касательные к ней направления.

Математическая модель деформируемой среды. Вязкое разрушение конструкционных металлов происходит в основном за счет зарождения, роста и слияния пор (рис. 2) и всегда сопровождается большими (конечными) пластическими деформациями.

Связанные с ними структурные изменения, выявляемые микроскопией уже на мезоуровне, зависят как от условий нагружения конструкции при прохождении в ней ударной волны, так и возникающих в ней напряженных и деформированных состояний (НДС).

В зависимости от объемности НДС рост микропор может происходить в условиях разряжения (кавитации) (рис. 2а) и/или сдвига с их удлинением (рис. 2б). Характеристикой объемности является показатель η, определяемый как

$$\eta = \sigma_m/\sigma_e,$$

где

$$\sigma_m = (1/3)\sigma_{jk}\delta_{jk} = -p, \tag{12}$$

– среднее напряжение, а

$$\sigma_e = \left(\frac{3}{2}S_{jk}S_{jk}\right)^{1/2} \tag{13}$$

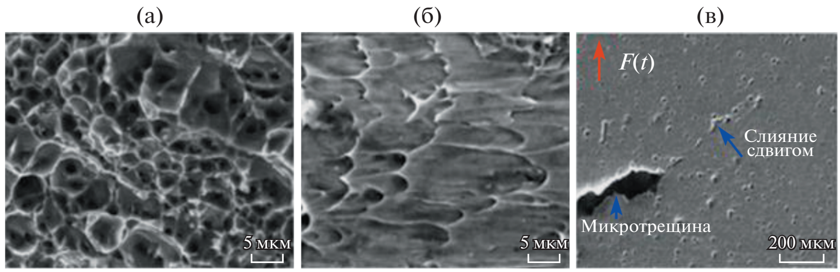

Рис. 2. Фрактография поверхностей излома образца: (а) – чашечки сферических пор; (б) – сдвиговые ямочные углубления; (в) – слияние микропор с образованием трещины.

– эквивалентное напряжение Мизеса. p и $S_{jk} = \sigma_{jk} - \frac{1}{3}\sigma_{ll}\delta_{jk}$ – гидростатическое давление и девиатор тензора напряжений Коши соответственно.

Относительный объем выявляемых микропор часто принимается в качестве меры повреждаемости и используется для описания вязкого разрушения конструкционных металлов и деградации их свойств. Она определяется в каждый момент времени деформирования t в виде скалярно-значимой функции $\xi = \xi(x^i, t)$ как $\xi = v_d/v$, где v – элементарный объем среды в точке x^i, а v_d – часть его, заполненная микропорами, $\xi \in [0,1]$.

В этом случае связь между поврежденным и неповрежденным состояниями деформируемой среды, например для тензора τ_{ij}, определяется соотношением [6]

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}(1-\xi). \tag{14}$$

Кинетика и скорость деградации свойств материала, его разрушения определяются скоростью повреждаемости $\dot{\xi}(x^i, t)$, которая включает в себя скорости зарождения $\dot{\xi}_n$ и роста $\dot{\xi}_g$ микропор, т.е.

$$\dot{\xi} = \dot{\xi}_n + \dot{\xi}_g. \tag{15}$$

Уровни накапливаемых повреждений в любой точке x^i материала вычисляются интегрированием этого уравнения по времени.

Образование новых микроповреждений (микропор) носит случайный характер, и повреждаемость за время Δt может быть определена, например, как [7]

$$\begin{gathered}\xi(t+\Delta t) = 8\pi N^t R_n^3 \Delta t + \xi(t)\exp(3\Delta t(p-p_g)/4\lambda),\\ N^t\Big|_{p>p_0} = N_0^t \exp((p-p_n)/p_1); \quad N^t\Big|_{p\le p_0} = 0,\end{gathered} \tag{16}$$

где p определено вышеж p_n, p_g – пороговое давление зарождения и роста микропор, соответственнож R_n – параметр распределения размеров вновь образованных микропорж λ – вязкость материалаж p_1 и N_0^t – параметр материалаж N^t – скоростная функция числа зарождающихся микропор. При этом начальный (исходный) уровень поврежденности материалов ξ_0 определяется существующими методами диагностики и испытаниями, в том числе так называемых образцов – свидетелей или темплетов для конструкций, находящихся в эксплуатации [8, 9].

Фактом вязкого кавитационного, по аналогии с жидкостью [10], разрушения, иначе исчерпания ресурса конструкции или ее элемента, является достижение предельного уровня повреждаемости ξ_F, который для большинства поликристаллических металлов находится в диапазоне от 0.18 до 0.30 [7].

При малых значениях показателя η объемности НДС разрушение конструкции может происходить из-за локализации деформации, накопления и слияния сдвигом микроповреждений. Слияние микропор, приводящее к образованию трещины (рис. 2в) является следствием локальной потери устойчивости вязкопластического течения, которой способствует термическое разупрочнение материала [11, 12].

В этих случаях кавитационный процесс роста пор резко ограничивается локализацией пластических деформаций в узких полосах сдвига, образующихся из-за потери устойчивости (бифуркации) процесса деформирования под действием отраженных волн напряжения, термического разупрочнения металлов, наличия несовершенств и т.п. Размеры и направление полос локализации в конструкции зависят от параметров материала, ее геометрии и граничных условий, распределения нагрузки и скорости нагружения.

Моделирование подобных процессов сопряжено с вычислительными трудностями, связанными с устойчивостью и неоднозначностью получаемых решений. В общем случае необходимо учитывать нелокальные характеристики структуры материала. Однако для вязко-деформируемых сред таких проблем обычно не возникает, поскольку в них уже неявно присутствует масштаб характерного размера структуры, определяемый вязкостью и ограничивающий локализацию в динамических и квазистатических задачах [14].

В качестве критерия разрушения обычно используется соотношение между уровнем накапливаемых во времени вязкопластических деформаций ε_e^{vp} и предельной при разрушении деформации ε_F, устанавливаемой экспериментально [11]

$$\xi_{sh} = \varepsilon_e^{vp}/\varepsilon_F \geq 1, \tag{17}$$

где $\varepsilon_e^{vp} = \left(\frac{2}{3} e_{jk}^{vp} e_{jk}^{vp}\right)^{1/2}$ — эквивалентная пластическая деформация; $\varepsilon_e^{vp} = \int_t \dot{\varepsilon}_e^{vp} dt$.

Определяющие соотношения для рассматриваемой нелинейно-деформируемой поликристаллической среды могут быть получены на основе термодинамических принципов с использованием законов сохранения энергии (8). Следуя требованиям к модели, в качестве основных параметров состояния среды примем эквивалентную вязкопластическую деформацию ε_e^{vp}, повреждаемость ξ, температуру θ и микронапряжения ρ_{jk} для учета сложных траекторий деформирования и эффекта Баушингера. Приведем эти соотношения в окончательном виде. Их вывод, а также вычислительные аспекты моделирования подробно представлены [4].

Конечные деформации (6), зависящие от скорости деформирования, включают в себя упругие и вязко-нелинейные составляющие. Для установления их связи с напряжениями используем мультипликативное разложение градиента скорости конечных деформаций F между конфигурациями k^0 и k^1 в следующем виде

$$F = F_e F_{vp} F_d, \tag{18}$$

где вместе с упругой F_e и вязкопластической F_{vp} включена дополнительная составляющая F_d , учитывающая изменение конфигурации вследствие повреждаемости. Суммарный якобиан деформации J в (3), характеризующий объемную деформацию, определяется в этом случае с учетом допущения, что сжимаемость приходится только на долю повреждаемости.

Из разложения (18) следует искомое представление для тензора скоростей конечных деформаций

$$\dot{E} = \dot{E}^{e} + \dot{E}^{vpd} = \dot{E}^{e} + \dot{E}^{vp} + \dot{E}^{d}, \qquad (19)$$

где $\dot{E}^{e}$, $\dot{E}^{vp}$ и $\dot{E}^{d}$ – соответственно упругие, вязкопластические и вязко-повреждаемые составляющие скорости деформации.

Процессы развития повреждений являются термодинамически необратимыми. Однако деформации непосредственно из-за повреждений могут частично или полностью восстанавливаться при разгрузке. Поэтому $\dot{E}^{d}$ полагаем состоящей из упруго-повреждаемой (обратимой) и вязкопластически повреждаемой (необратимой) скоростей деформации. Поскольку мерой скорости изменения объема является след ε_{ii} тензора $\dot{E}$ и $\dot{J} = \dot{J}^{d} = \dfrac{\partial J^{d}}{\partial F_{d}}\dot{F}_{d} = J\dot{\varepsilon}^{d}$, где точка обозначает производную по времени в текущем состоянии, деформации за счет повреждаемости могут быть представлены в виде

$$\varepsilon^{d} = 1/J - 1. \qquad (20)$$

Определяющие соотношения, устанавливающие связь между скоростями напряжений и деформаций, запишем в виде обобщенного закона Гука

$$\tau = C : (\dot{E} - \dot{E}^{vpd}) - \alpha\dot{\theta}I, \qquad (21)$$

где тензор упругости $C = 2\mu I + \left(K - \frac{2}{3}\mu\right) I \otimes I = C(\xi, \theta)$, является функцией температуры и накопленных повреждений, α – коэффициент температурного расширения, I – единичный тензор.

Компоненты тензора упругой деформации $\dot{\varepsilon}^{e}_{jk}$ могут быть представлены в виде шаровой и сдвиговой составляющих

$$\dot{\varepsilon}^{e}_{jk} = \dot{e}^{e}_{jk} + \dot{\varepsilon}\delta_{jk} = \frac{1}{2\mu}\dot{S}_{jk} + \frac{1}{3K}\dot{\sigma}_{m}, \qquad (22)$$

где напряжения $\dot{S}_{jk}$ и $\dot{\sigma}_{m}$ определяются (12), (13). Выражения для объемного модуля K и модуля сдвига μ с учетом повреждаемости, температуры и разупрочнения, приведены в [4].

При ударных воздействиях объемная деформация $\dot{\varepsilon}$ может быть очень большой и сопровождаться резким повышением температуры, в то время как сдвиговые деформации $\dot{e}^{e}_{jk}$ остаются малыми, ограниченными началом пластического течения. В этом случае зависимость среднего напряжения от объемных деформаций и температуры оказывается нелинейной и может быть представлена в виде следующего уравнения состояния

$$p = \rho_0\gamma_0 c_v\theta_n(1 + \varepsilon^{d})^{\gamma_0+1}, \qquad (23)$$

где $\theta_n = \theta_{n0}\exp[2a\varepsilon^{d}/(1 + \varepsilon^{d})][1 + \varepsilon^{d}]^{2(\gamma_0 - a - 1/3)}$ и θ_{n0} выделяемая “адиабатическая” и начальная температура; γ_0 – коэффициент Грюнейзена, a – параметр материала.

Компоненты тензора вязкопластических деформаций $\dot{E}^{vp}$ определяются как в [14]

$$\dot{\varepsilon}^{vp}_{ij} = \dot{\Lambda}\frac{\partial f}{\partial \tau_{ij}}, \qquad (24)$$

где Λ – множитель Лагранжа, f – поверхность вязкопластической текучести с учетом повреждаемости ξ

$$f = \left(\frac{3}{2}J_2\right)^{1/2} - \Bbbk(\varepsilon_e^{vp}, \theta, \xi)[1 + (\lambda\dot{\varepsilon}_e^p)^{1/m}][1 - (\theta/\theta_m)^n] + nI_1^2\xi^2 \le 0, \tag{24a}$$

λ – вязкость материала; $\Bbbk(\varepsilon_i^p, \theta, \xi) = \sigma_y^s(\varepsilon_e^p, \theta, \xi) + \sigma_y^r(\varepsilon_e^p, \theta, \xi)$ – изотропное упрочнение (или разупрочнение) материала; $\sigma_y^s = \sigma_y(\theta)(1-\xi)$ – статический вязкопластический предел текучести; σ^r – m и n параметры материала; θ_m – температура плавления материала; $I_1 = \tau_{ii}$, $J_2 = \frac{1}{2}\hat{S}_{jk}\hat{S}_{jk}$, $\hat{S}_{jk} = S_{jk} - \rho_{jk}$; ρ_{jk} – тензор микронапряжений, определяющий положение поверхности текучести во времени.

Условия нагружения и разгрузки нелинейно-деформируемой среды (условия Куна–Такера) могут быть записаны в виде

$$\dot{\Lambda} \ge 0, \quad f \le 0 \Leftrightarrow \dot{\Lambda}f = 0. \tag{25}$$

Обращаясь к схеме на рис. 1 отметим, что ключевой проблемой моделирования рассматриваемых сред, остается разработка простых методов идентификации параметров используемых моделей и уравнений их эволюции.

Пренебрегая инерционными силами и вязкостью материала, приведенные уравнения (8)–(11) и (21)–(24) могут быть использованы и для изучения квазистатических процессов деформирования и разрушения конструкций под действием эксплуатационных нагрузок, предшествующих ударным воздействиям или последующих за ними. В этом случае для любой переменной физического поля $g(x^i, t)$ справедливы соотношения

$$\dot{g}(x^i, t) = \partial g/\partial t = dg/dt \quad \text{и} \quad \Delta g = \dot{g}\Delta t, \tag{26}$$

а для прогнозирования остаточного ресурса должны быть использованы соответствующие модели формирования и накопления повреждений, которые определяются режимами эксплуатации и учитываются подобно (14)–(17). Полагая процессы высокоскоростного деформирования адиабатическими, решение нелинейной краевой задачи, записанной в локальной форме (8)–(11), (21)–(25) можно получить МКЭ с использованием явной разностной аппроксимации на временном слое $D_t = (t_r, \tau')$ [4].

В МКЭ, как обобщении метода Галеркина, вместо исходной краевой задачи (8)–(11) ставится в соответствие задача отыскания минимума функционала

$$u^0 = \inf_{u \in V} \Pi(u), \quad \forall t \in D_t,$$

где $V = \{u = (u_i, q) : u_i \in W_2^1(D)^3,\ q = L^2(D)^3;\ u|_{S_u} = u^*\}$ и u^0 – искомое решение; функционал $\Pi(u)$ – слабая форма представленных уравнений с краевыми условиями (8)–(10) на границе S_u; u_i – вектор перемещений деформируемой среды с неоднородными граничными условиями.

Результаты моделирования. Следуя рис. 1, выполним трехмерный анализ высокоскоростных процессов нелинейного деформирования и разрушения пластины в виде биметаллического соединения с надрезом (трещиной) вблизи его границы под действием давления и внезапно приложенной ударной нагрузки (рис. 3). Подобные соединения конструктивно часто оказываются щелевыми, в них происходит более ин-

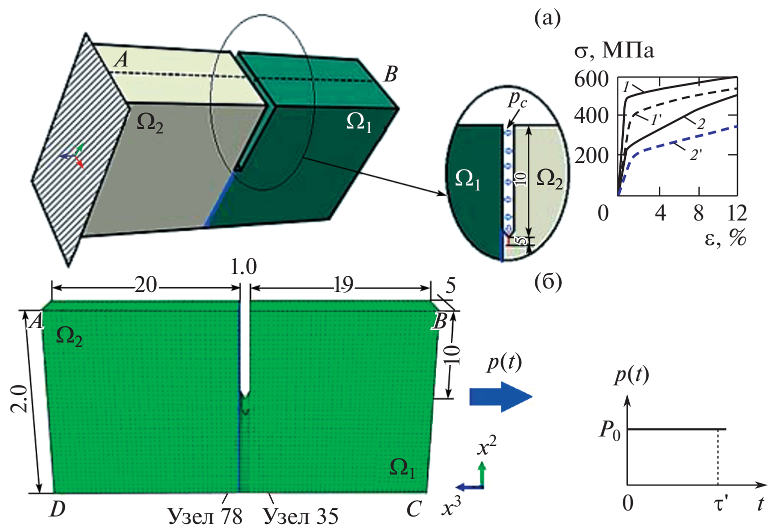

Рис. 3. Биметаллическая полоса с надрезом: (а) – геометрия, условия закрепления и диаграммы деформирования материалов для температур 20 и 320°С; (б) – расчетная схема МКЭ и ударная нагрузка.

тенсивная деградация свойств соединяемых материалов вследствие коррозии и водородного охрупчивания и велика вероятность образования трещин и разрушения.

Предлагаемые ниже результаты моделирования являются продолжением [15], где были подробно изучены особенности распространения нелинейных волн напряжения, формирования НДС и их кинетики с учетом влияния неоднородности свойств материалов и концентрации напряжений в подобных соединениях.

В рассматриваемом соединении используются конструкционные стали 15ХГН2МА и 0Х18Н10Т, которые заполняют соответственно области Ω_1 и Ω_2 (рис. 3). Их свойства с соотношением модулей Юнга $E_1/E_2 = 1.05$, коэффициентов Пуассона $\nu_1/\nu_2 = 0.91$, статических пределов текучести $\sigma^1_{02}/\sigma^2_{02} = 1.95$, коэффициентов линейного расширения $\alpha_1/\alpha_2 = 0.69$, начальных плотностей $\rho_1/\rho_2 = 1.0$ приняты аналогичными [15]. Диаграммы деформирования материалов для возможного диапазона изменения температур также приведены на рис. 3а.

Выбранные стали широко применяются, например, в конструкциях реакторов ЯЭУ, другие их параметры, необходимые в соотношениях (23), (24), должны определяться из серии специально поставленных экспериментов [16]. Ниже мы воспользуемся значениями, приведенными в литературе для аналогичных по свойствам и применению зарубежных сталей [7, 16].

Разнородное соединение выполнено в виде полосы с надрезом вблизи границы соединения Г, рис. 3, с условиями контактного разрыва (11а). Комбинированное нагружение соединения включает в себя распределенное давление интенсивностью p_c внутри надреза и ударное воздействие $p(t) = p_0 H(t)$, где $p_0 = 500$ МПа, и $H(t)$ – функция Хевисайда, по боковой кромке. Противоположная грань пластины полагается полностью закрепленной и с учетом симметрии рассматривается только 1/2 пластины относительно ее срединной плоскости ABCD.

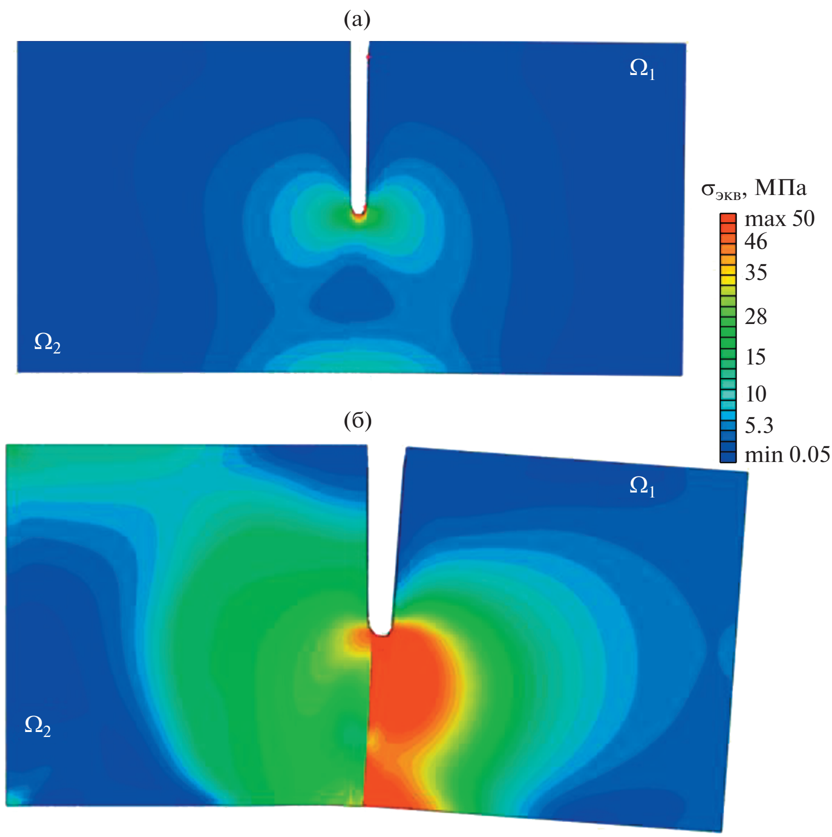

Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в щелевом соединении с исходной поврежденностью материалов 0.04 под действием: (а) – только постоянного давления p_c = 32 МПа; (б) – постоянного давления p_c = 32 МПа и ударного нагружения в момент времени t = 500 мкс.

В моделировании для описания геометрии и решения задачи использован МКЭ с объемными элементами и построением более подробной сетки в окрестности надреза, рис. 3б, а также явная схема интегрирования по времени с соблюдением известного условия Куранта. Как следует из ранее выполненного сравнительного анализа с МГЭ [15] при решении аналогичной задачи, такого приближения оказывается достаточным для соблюдения требуемых в моделировании точности и вычислительной устойчивости метода.

Вначале получено решение трехмерной задачи о предварительном нагружении поверхности надреза рассматриваемого соединения давлением p_c величиной от 16 до 50 МПа. Результаты этого решения используются далее в качестве начальных условий (10) для изучения динамического отклика соединения в условиях возникновения конечных деформации (геометрическая нелинейность) и наличия повреждений, исходный уровень которых был принят равным 4%.

На рис. 4 приведены распределения зон эквивалентных напряжений при наличии только давления p_c = 24 МПа на берегах надреза (рис. 4а) и комбинированного нагружения (рис. 4б). Следствием ударного воздействия, как следует из рис. 4, является

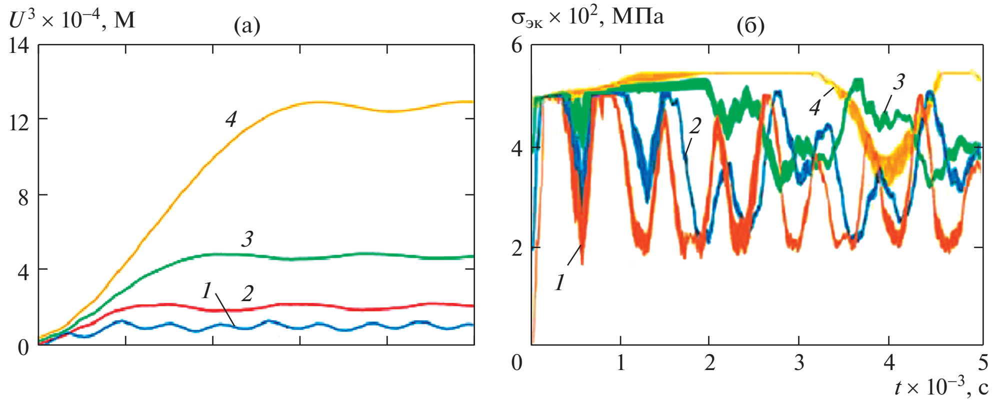

Рис. 5. Динамический отклик щелевого соединения без давления – *1*; при наличии давления в надрезе p_c = 16 МПа – *2*; 32 МПа – *3*; 48 МПа – *4*: (а) – максимальное раскрытие берегов надреза; (б) – изменение напряжений в вершине надреза во времени.

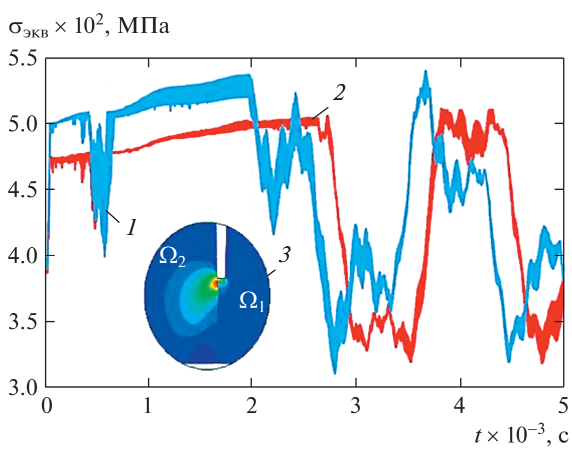

Рис. 6. Изменение эквивалентных напряжений в вершине надреза по времени при отсутствии – *1* и наличии начальных микроповреждений – *2*, характер распределения микронапряжений в окрестности надреза для момента времени t = 500 мкс – *3*.

не только резкое возрастание уровней напряжений, но и заметное искажение геометрии полосы.

Роль статической составляющей в комбинированном нагружении особенно четко проявляется в изменении во времени максимального раскрытия надреза, рис. 5а, обычно используемого в качестве параметра разрушения, и распределения напряжений в наиболее нагруженной точке в его вершине, рис. 5б. Происходит резкое возрастание уровней смещения берегов надреза (трещины), меняются волновые картины распространения волн напряжений в его вершине.

При значениях давления $p_c \geq 48$ МПа происходит потеря несущей способности биметаллического соединения.

Наличие начальных повреждений ведет к изменению исходных свойств материалов, используемых в модели, изменяются и функции, входящие в уравнения течения (24). Как следует из рис. 6, предел текучести материала подобласти Ω_1 изменяется от 500 МПа до 475 МПа, оказывается существенным влияние начальных микроповреждений на уровни и характер распространения волн напряжения в динамическом процессе деформирования щелевого соединения. На рис. 6 приведена представляющая интерес картина *3* – формирования зон поврежденности в окрестности надреза в результате ударного воздействия.

В направлении этих зон формируется поверхность разрушения, как это следует из известных результатов динамического испытания компактных образцов с надрезом [16]. При этом распределение поврежденности в материалах щелевого соединения находится в полном соответствии с распределением пластических деформаций в нем. Максимальные уровни повреждений достигаются на четверть толщины пластины от ее внешней боковой поверхности там же, где реализуются максимальные пластические деформации. К моменту времени $t = 5.0 \times 10^{-3}$ с они не превышают 10%.

Заключение. Как следует из представленных результатов, для обоснованного прогнозирования остаточного ресурса конструкций, находящихся в эксплуатации и подвергаемых ударному нагружению, необходимо располагать подробной информацией об их фактическом состоянии, уровне предшествующих нагружению накопленных повреждений и их влиянии на процессы высокоскоростного деформирования и разрушения во времени. Не менее важным оказывается учет влияния на эти процессы параметров эксплуатационного квазистатического нагружения, на фоне которого происходят указанные процессы. В этом случае можно успешно использовать принцип допускаемой повреждаемости или эксплуатации по фактическому состоянию, гарантирующий надежное функционирование машин и конструкций на протяжении всего срока их службы при наличии дефекта, трещины или другой формы повреждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lifetime-Oriented Structural Design Concepts, eds. Stangenberg F., Breitenbücher R., Bruhns O.T. Berlin, Springer-Verlag, 2009, 721 p.
2. *Ashby M.F., Jones D.R.H.* Engineering Materials 2. An Introduction to Microstructures, Processing and Design. Oxford, Elsevier, 2006, 451 p.
3. *Petushkov V.* Numerical simulation of high-velocity dynamics of the nonlinear deformation and failure of damaged medium // Math. Models and Comp. Simulations. 2010. V. 2. № 1. P. 76.
4. *Петушков В.А., Надарейшвили А.И.* Математическое моделирование деформирования и разрушения объемных тел при высокоскоростном ударном взаимодействии // Математическое моделирование. 2004. Т. 16. № 5. С. 17.
5. *Романов А.Н.* Структура и прочность конструкционных материалов. В. 4. М.: МЦНТИ. 1988. 155 с.
6. *Работнов Ю.Н.* Механизм длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 5.
7. *Curran D.R., Seaman L., Shockey D.A.* Dynamic failure of solids // Phys. Reports 1987. V. 147. P. 253.
8. *Alves M.* Measurement of ductile material damage // Mechanics of Structures and Machines. 2001. 29. P. 451.
9. *Лебедев А.А., Чаусов Н.Г.* Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. К.: Ин-т пробл. прочности им. Г.С. Писаренко НАНУ, 2004. 133 с.
10. *Петушков В. А.* Локальные течения повреждаемой деформируемой среды при ударных взаимодействиях с кавитирующей жидкостью // Изв. РАН. МЖГ. 2007. № 3. С. 121.
11. *Aifantis E.* The Physics of Plastic Deformation // Int. J. Plasticity. 1987. V. 3. P. 211.

12. *Brunig A., Chyra O., Albrecht D. et al.* A ductile damage criterion at various stress triaxialities // International Journal of Plasticity 24 (2008) 1731.
13. *Петушков В.А.* Вязкопластическое течение и локализация деформаций в повреждаемой среде при ударных воздействиях // Журн. СФУ. Сер. Матем. и физ. 2009. Т. 2. В. 3. С. 336.
14. *Dornowski W., Perzyna P.* Numerical investigation of macro crack propagation along a bimaterial interface in adiabatic dynamic processes as a problem of micromechanics// Engng. Trans. 2006. 54. 4. P. 289.
15. *Петушков В.А.* Изучение переходных процессов в нелинейно-деформируемых средах на основе интегральных представлений и метода дискретных областей // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.- мат. науки, 2017. Т. 21. № 1. С. 137.
16. *Celentano D.J., Chaboche J.L.* 2007. Experimental and numerical characterization of damage evolution in steels // Int. J. Plasticity, 23. 1739.