

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЛОКОМОТИВА ПРИ АВАРИЙНОМ СТОЛКНОВЕНИИ С ПРЕПЯТСТВИЕМ

Разработан алгоритм исследования процесса деформирования элементов, предназначенных для пассивной защиты локомотива скоростного пассажирского поезда при аварийных столкновениях. Проведен анализ особенностей деформирования элементов пассивной защиты за пределом упругости с учетом физической и геометрической нелинейностей, а также влияния скорости деформации на физико-механические характеристики материала конструкции.

Розроблено алгоритм дослідження процесу деформування елементів, призначених для пасивного захисту локомотиву швидкісного пасажирського поїзда при аварійних зіткненнях. Проведено аналіз особливостей деформування елементів пасивного захисту за межею пружності з урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей, а також впливу швидкості деформації на фізико-механічні характеристики матеріалу конструкції.

The algorithm of studies on straining passive protection elements of the locomotive for a high-speed passenger train at emergency impacts is developed. Special features of straining passive protection elements beyond the elasticity limit are analyzed considering physical and geometrical nonlinearities as well as the influence of the strain rate on physical-mechanical performances of the material structure.

При разработке локомотива нового поколения, предназначенного для скоростного пассажирского движения по колее 1520 мм, особое внимание должно быть уделено созданию эффективной системы пассивной безопасности (СПБ) при аварийном столкновении поездов или наезде поезда на препятствие. СПБ предназначена для уменьшения возникающих при ударе продольных сил и ускорений за счет контролируемого пластического деформирования и разрушения специально предназначенных для поглощения кинетической энергии жертвенных элементов, расположенных в концевых частях рамы локомотива [1 – 3].

Разработка технических решений по созданию СПБ базируется на исследовании динамической нагруженности и напряженно-деформированного состояния жертвенных элементов при ударных воздействиях. Проведение таких исследований требует разработки современного научно-методического обеспечения. В настоящее время в Украине, несмотря на достаточно большой объем проведенных научных исследований в области динамики подвижного состава, работающего в штатных условиях эксплуатации, отсутствует научно-методологическая база для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций железнодорожных экипажей с СПБ при нештатных продольных ударных воздействиях с учетом особенностей упругопластического деформирования и разрушения энергопоглощающих защитных элементов в аварийной ситуации.

Данная статья посвящена вопросам математического моделирования процесса деформирования энергопоглощающих элементов СПБ локомотива при характерных для аварийного столкновения ударных воздействиях с учетом ряда особенностей, включая:

– физическую нелинейность материала конструкции при ее упругопластическом деформировании;

- геометрическую нелинейность, характеризующую большие перемещения элементов конструкции, изменение ее размеров вследствие значительных деформаций элементов конструкции;
- зависимость предела текучести материала от скорости деформации;
- контактные взаимодействия между элементами рассматриваемой механической системы соударяющихся тел, в частности между элементами жертвенной конструкции и бойком;
- возможность разрушения отдельных элементов конструкции по заданному критерию.

Методика расчета основана на синтезе автоматизированного геометрического конструирования и конечно-элементного моделирования с учетом указанных выше особенностей деформирования защитной конструкции при ударе. Методика состоит из следующих этапов:

- создание с помощью средств автоматизированного конструирования [4] трехмерной геометрической модели в поверхностях с учетом необходимого уровня детализации исследуемой конструкции;
- импортное геометрической модели через стандартный формат обмена данных в программу, представляющую собой многоцелевой пакет для решения сложных задач механики деформируемого тела с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [5];
- создание конечно-элементной модели;
- выполнение нелинейного динамического расчета [6];
- анализ результатов и проверка их достоверности.

Для описания упругопластических свойств материала при ударных воздействиях использована билинейная зависимость напряжений от деформаций с учетом изотропного кинематического упрочнения. Точка перелома такой двухзвенной кусочно-линейной кривой соответствует динамическому пределу текучести, который зависит от скорости деформации. Моделирование нелинейной характеристики материала основано на использовании истинной диаграммы растяжения.

Характерные диаграммы статического растяжения (в координатах условное напряжение σ – относительное удлинение ε) для большинства машиностроительных сталей представляют собой кривые с прямолинейным участком, соответствующим упругой стадии деформирования (до предела текучести σ_T или $\sigma_{0,2}$), и криволинейным участком, описывающим поведение материала за пределом упругости. Типичные диаграммы растяжения для малоуглеродистой стали представлены на рис. 1, где линиям 1 и 2 соответствуют условная и истинная диаграммы растяжения. На рис. 1 использованы следующие обозначения: σ – условное напряжение; ε – относительное удлинение; σ_T – условный предел текучести; σ_B – условный предел прочности; σ_K – условное напряжение в момент разрыва образца; ε_T , ε_B , ε_K – относительные удлинения, соответствующие σ_T , σ_B , σ_K .

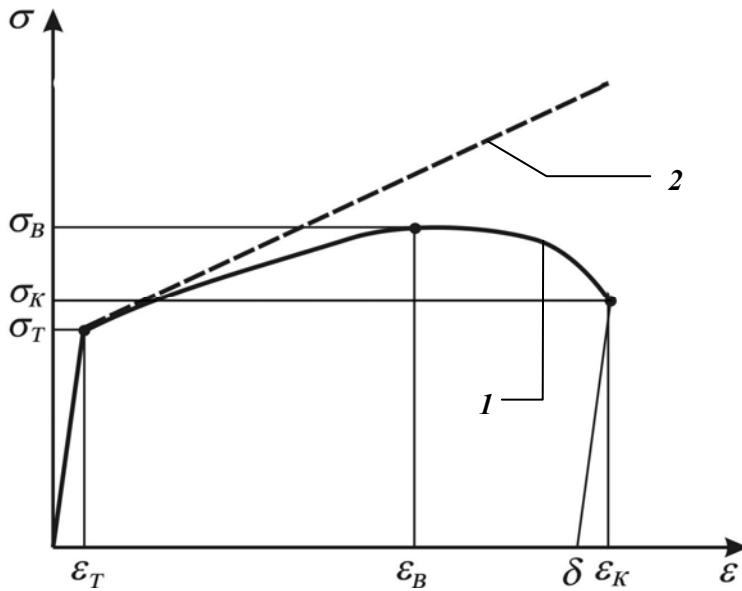


Рис. 1

После стадии текучести на участке упрочнения до максимального значения нагрузки $F_{e\max}$, которую способен выдержать образец, удлинения распределяются равномерно по длине образца, а затем происходит местное сужение в виде шейки и нагрузка падает, хотя напряжение в сечении шейки непрерывно растет. На условной диаграмме после предела прочности σ_B обычно изображают нисходящий участок кривой до напряжения σ_K в момент разрыва образца, поскольку нагрузка падает, а напряжения определяют, исходя из начального значения A_0 площади поперечного сечения образца. При построении истинной диаграммы растяжения величина силы делится на действительную площадь A поперечного сечения образца после образования шейки. При этом на истинной диаграмме вместо нисходящего участка кривой будет восходящий участок с примерно тем же углом наклона, что и на начальном участке упрочнения. В момент разрыва истинные напряжения будут выше условного предела прочности, другими словами, сопротивление пластическому деформированию растет до момента разрушения.

При моделировании нелинейного поведения материала используется значение истинного напряжения s , которое, в отличие от инженерного (условного) значения напряжения σ , представляет собой отношение растягивающего усилия F_e (определяемого по экспериментальной диаграмме растяжения) к площади A поперечного сечения испытываемого образца в текущий момент испытаний

$$\sigma = \frac{F_e}{A_0}; \quad s = \frac{F_e}{A}.$$

Истинное относительное удлинение при растяжении в текущий момент определяется по формуле

$$e = \int_{l_0}^{l_0 + \Delta l} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon),$$

где ε – относительное удлинение; Δl – приращение длины образца в процессе растяжения; l_0 – исходная длина образца.

Истинное напряжение определяется, исходя из гипотезы о неизменности объема при пластической деформации, по формуле

$$s = \sigma \cdot \exp(e) = \sigma \cdot (1 + \varepsilon),$$

где σ – условное напряжение.

Истинный предел текучести s_T принимается равным условному пределу текучести σ_T , поскольку площадь поперечного сечения в этот момент A_T меняется незначительно и этим изменением можно пренебречь ($A_T \approx A_0$).

Следует отметить, что истинный предел прочности s_B выше условного предела прочности σ_B , поскольку площадь поперечного сечения в этот момент $A_B < A_0$

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0}; \quad s_B = \frac{F_{\max}}{A_B} = \sigma_B \cdot (1 + \varepsilon_B),$$

где ε_B – относительное удлинение, соответствующее σ_B .

В общем случае $\varepsilon_B \leq \delta_5$, где δ_5 – справочное значение относительного удлинения после разрыва цилиндрического образца, длина которого в 5 раз больше диаметра его поперечного сечения. Однако расчет истинного предела прочности s_B для конкретного материала основан на предположении о том, что $\varepsilon_B \approx \delta_5$.

Для определения приведенного модуля, определяющего тангенс угла наклона отрезка прямой на участке пластического деформирования, используются формулы

$$E_{\tan} = \frac{E_h \cdot E}{E_h + E}; \quad E_h = \frac{s_B - s_T}{e_B - \frac{s_B}{E}}$$

$$e_B = \ln(1 + \varepsilon_B); \quad s_T \approx \sigma_T,$$

где E – модуль упругости первого рода, или модуль Юнга.

Для вычисления истинного динамического предела текучести s_d заданных материалов используется зависимость Саймондса–Купера [7]

$$s_d = s_T \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] = k s_T; \quad k = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}},$$

где C и P – коэффициенты упрочнения стали, определяемые на основе экспериментальных данных; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации при динамическом нагружении; k – динамический коэффициент упрочнения стали.

Коэффициенты C и P для рассматриваемого диапазона скоростей деформации определяются на основе двух истинных диаграмм динамического растяжения [8], полученных для граничных значений скоростей деформации ($\dot{\epsilon}_1$ и $\dot{\epsilon}_2$) из рассматриваемого диапазона по формулам

$$P = \frac{\ln(\dot{\epsilon}_1) - \ln(\dot{\epsilon}_2)}{\ln a_1 - \ln a_2}; \quad \ln C = \ln(\dot{\epsilon}_1) - P \cdot \ln a_1;$$

$$a_1 = \frac{s_{d1}}{s_T} - 1; \quad a_2 = \frac{s_{d2}}{s_T} - 1,$$

где s_{d1} и s_{d2} – истинные динамические пределы текучести, полученные при соответствующих скоростях деформации $\dot{\epsilon}_1$ и $\dot{\epsilon}_2$.

Таким образом, моделирование физической нелинейности требует задания следующих параметров: ρ – плотности материала; E – модуля упругости первого рода; $s_T \approx \sigma_T$ – истинного статического предел текучести; μ – коэффициента Пуассона; E_{\tan} – приведенного модуля; C и P – коэффициентов упрочнения материала; ϵ_p – предельной пластической деформации при разрыве.

Моделирование процесса разрушения элементов конструкции осуществлялось двумя способами:

- путем исключения из рассмотрения конечных элементов, у которых величина эквивалентной деформации превысила заданное значение предельной пластической деформации ϵ_p ;

- путем разрыва связей между смежными конечными элементами, если среднее значение эквивалентной деформации по окружающим узел конечным элементам превысило заданное значение предельной пластической деформации ϵ_p .

Расчетная схема для исследования процесса деформирования энергопоглощающей защитной конструкции при ударе приведена на рис. 2.

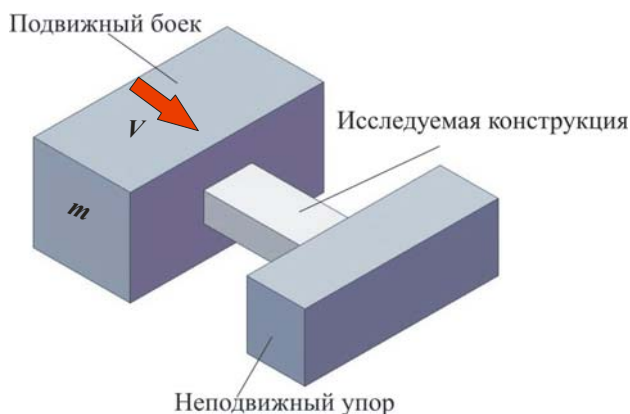


Рис. 2

Исследуемая конструкция расположена между жесткой неподвижной плитой и подвижным бойком, который движется со скоростью V . Боек пред-

ставляет собой твердое тело, масса которого (m) значительно больше массы исследуемой конструкции.

При разработке конечно-элементной модели для нелинейного динамического анализа деформирования жертвенного элемента при ударе используются специальные пластинчатые элементы с четырьмя узлами, каждый из которых имеет по три линейных и угловых перемещения, скорости и ускорения относительно осей узловой системы координат элемента. Эти элементы позволяют учитывать большие мембранные и изгибные пластические деформации. Для моделирования бояка использованы объемные конечные элементы с восьмью узлами, каждый из которых имеет по три линейных перемещения, скорости и ускорения.

В качестве граничного условия использовано условие жесткого закрепления заднего торцового сечения неподвижного упора.

Начальным условием является относительная скорость соударения, т.е. скорость V центра масс бояка в момент времени $t = 0$ с.

Учитывается возможность наличия трения в зоне контакта между соприкасающимися поверхностями бояка и исследуемой конструкции, исследуемой конструкции и неподвижного упора, а также между элементами самой исследуемой конструкции. Схема контактного взаимодействия рассматриваемой механической системы «жертвенный элемент – боек» принята в форме «поверхность в поверхность».

Анализ НДС элементов защитной конструкции при ударе сводится к решению нелинейной динамической контактной задачи с учетом больших пластических деформаций в рамках деформационной теории пластичности [9]. Моделируемый процесс соударения описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$M\ddot{U} + D(\sigma, U) = Q, \quad (1)$$

где M – согласованная матрица масс; D – функция, зависящая от тензора напряжений σ и вектора перемещений U ; Q – вектор обобщенных сил в узлах, обусловленный поверхностными контактными силами, которые характеризуют действие одного тела на другое, т.е. это дискретный эквивалент контактных сил.

Нелинейность решаемой задачи обусловлена:

- нелинейностью соотношений между деформациями и перемещениями;
- нелинейностью соотношений между напряжениями и деформациями;
- нелинейностью соотношений, описывающих условия контактного взаимодействия элементов механической системы, с учетом изменения области контакта в процессе движения.

Решение рассматриваемой контактной динамической задачи с учетом больших пластических деформаций, когда не накладываются ограничения на порядок величин перемещений, их градиентов и компонент тензора деформаций, сводится к численному интегрированию системы дифференциальных уравнений движения (1) при заданных начальных и граничных условиях. При решении задачи рассматриваются линеаризованные формы этих уравнений относительно малых приращений, наложенных на текущее равновесное состояние.

Уравнения движения конечно-элементной системы в приращениях для случая больших деформаций и упругопластических свойств материала имеют вид

$$M\Delta\ddot{U} + (K_c + G(\sigma) + R(\sigma))\Delta U = \Delta Q, \quad (2)$$

где K_c – матрица жесткости; G и R – зависящие от текущих напряжений матрицы геометрической жесткости и пластической жесткости; ΔQ и ΔU – приращения нагрузок и перемещений.

Полученная в результате конечно-элементной дискретизации система дифференциальных уравнений движения достаточно большой размерности решается с помощью метода последовательных нагружений, основанного на сочетании численного интегрирования с итерационной корректировкой результатов после каждого шага по времени. Это один из наиболее эффективных методов решения больших систем нелинейных уравнений. Суть метода состоит в следующем. Поскольку до приложения нагрузок моделируемая конструкция находится в ненапряженном состоянии, в качестве начальной точки, соответствующей ее недеформированному состоянию, выбран нулевой вектор узловых перемещений. Положив нелинейные слагаемые в (2) равными нулю, из решения полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений определяются приращения перемещений ΔU за время Δt , истинные перемещения $U + \Delta U$ и соответствующие им напряжения σ . На основе найденных значений напряжений вычисляются новые матрицы $G(\sigma)$ и $R(\sigma)$, и решается система обыкновенных дифференциальных уравнений. Итерационный процесс повторяется до тех пор, пока отличие перемещений на соседних итерациях не станет меньше заранее заданной малой величины. Затем рассматривается следующий шаг по времени. Сходимость метода последовательных нагружений для существенно нелинейных задач динамики достаточно медленная, однако этот метод позволяет определить развитие больших пластических деформаций в элементах конструкции и получить полный набор решений на каждом шаге по времени.

В результате решения рассматриваемой задачи определяется динамическое напряженно-деформированное состояние элементов конечно-элементной системы при заданной скорости соударения. На основе полученных значений перемещения центра масс бойка и соответствующих значений контактной силы (интеграла по области контакта от распределенных контактных напряжений) между подвижным бойком и исследуемой конструкцией в текущие моменты времени строится диаграмма деформирования (зависимость контактной силы от продольного перемещения центра масс бойка) при ударе.

Адекватность разработанной конечно-элементной модели и достоверность получаемых результатов численного моделирования подтверждаются:

- корректностью выбора расчетной схемы на основании накопленного ранее опыта при решении подобных задач в рамках принятых допущений и гипотез;
- учетом основных конструктивно-силовых элементов рассматриваемой конструкции с использованием построенных геометрических моделей;
- точностью задания физико-механических параметров рассматриваемых конструкций;

– тщательным тестированием разработанной конечно-элементной модели, проверкой ее на наличие недопустимо малых элементов и их удалением, устранением отдельных нестыковок силовых элементов;

– использованием для решения нелинейной динамической контактной задачи специализированного пакета программ, который имеет международный сертификат качества.

В данной статье в качестве примера рассмотрено деформирование энергопоглощающего элемента СПБ локомотива при ударе в этот элемент массой 100 т со скоростью 36 км/ч (10 м/с). Исследуемая конструкция энергопоглощающего элемента состоит из короба с расположенным внутри него трехслойным сотовым блоком и деформируемого упора в виде коробчатой сварной конструкции с х-образными внутренними продольными перегородками. Геометрическая модель рассматриваемой защитной конструкции приведена на рис. 3.

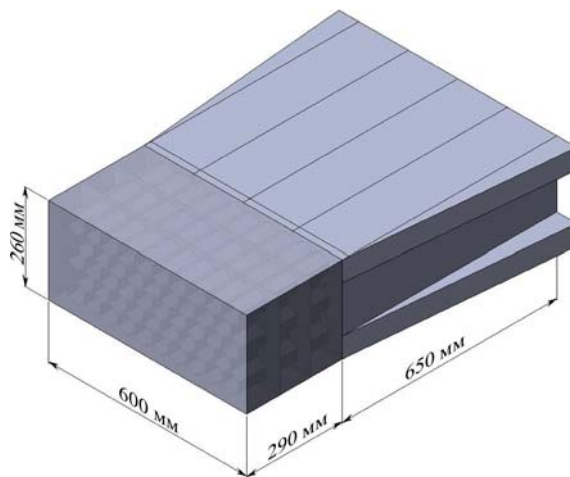


Рис. 3

Энергопоглощающий элемент СПБ выполнен из листовой малоуглеродистой высокопластичной стали, имеющей следующие характеристики: $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$; $\mu = 0,3$; $\sigma_T = 200 \text{ МПа}$ и $\sigma_B = 320 \text{ МПа}$; $E_{\text{tan}} = 857 \text{ МПа}$; $C = 205$; $P = 4,42$; $\varepsilon_p = 0,6$.

Конечно-элементная расчетная схема жертвенного элемента показана на рис. 4.

Рис. 5 иллюстрирует полученную расчетным путем достаточно близкую к идеальной зависимость контактного усилия F от продольного перемещения u центра масс бойка при ударе, а рис. 6 – зависимость энергии, поглощаемой при деформации жертвенного элемента, от продольного перемещения u центра масс бойка при ударе. На рис. 7 для наглядности приведены фрагменты деформирования одной четвертой части энергопоглощающей конструкции при ударе.

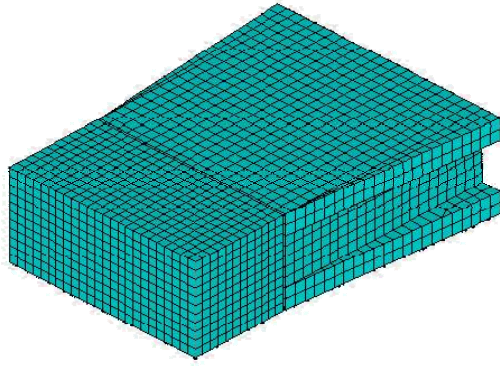


Рис. 4

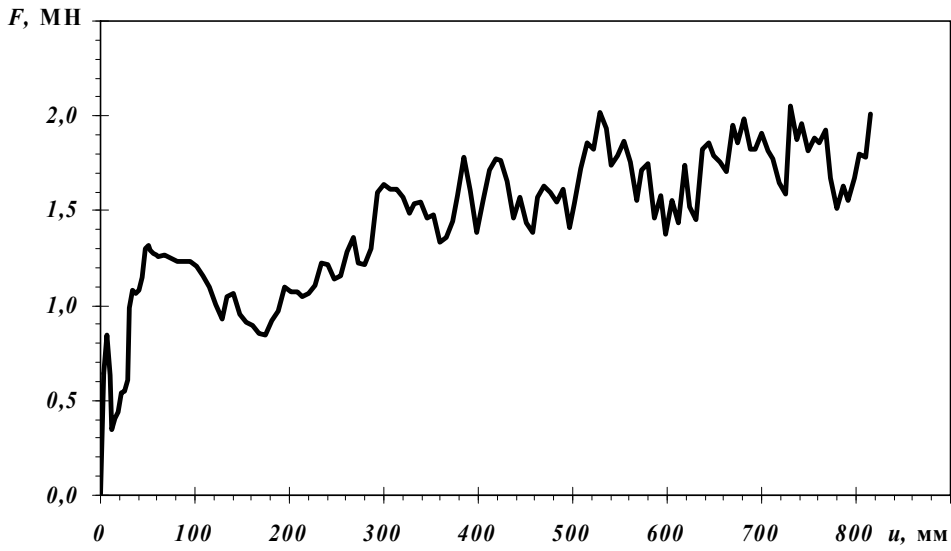


Рис. 5

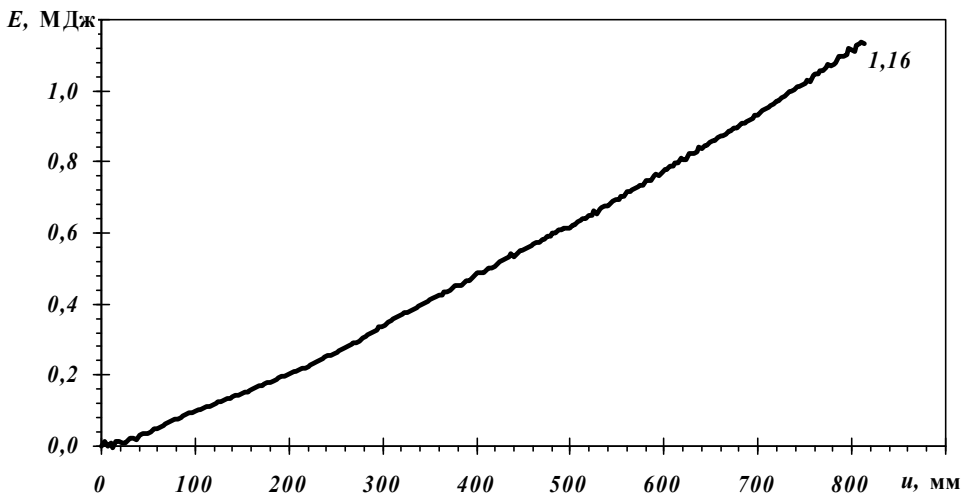


Рис. 6

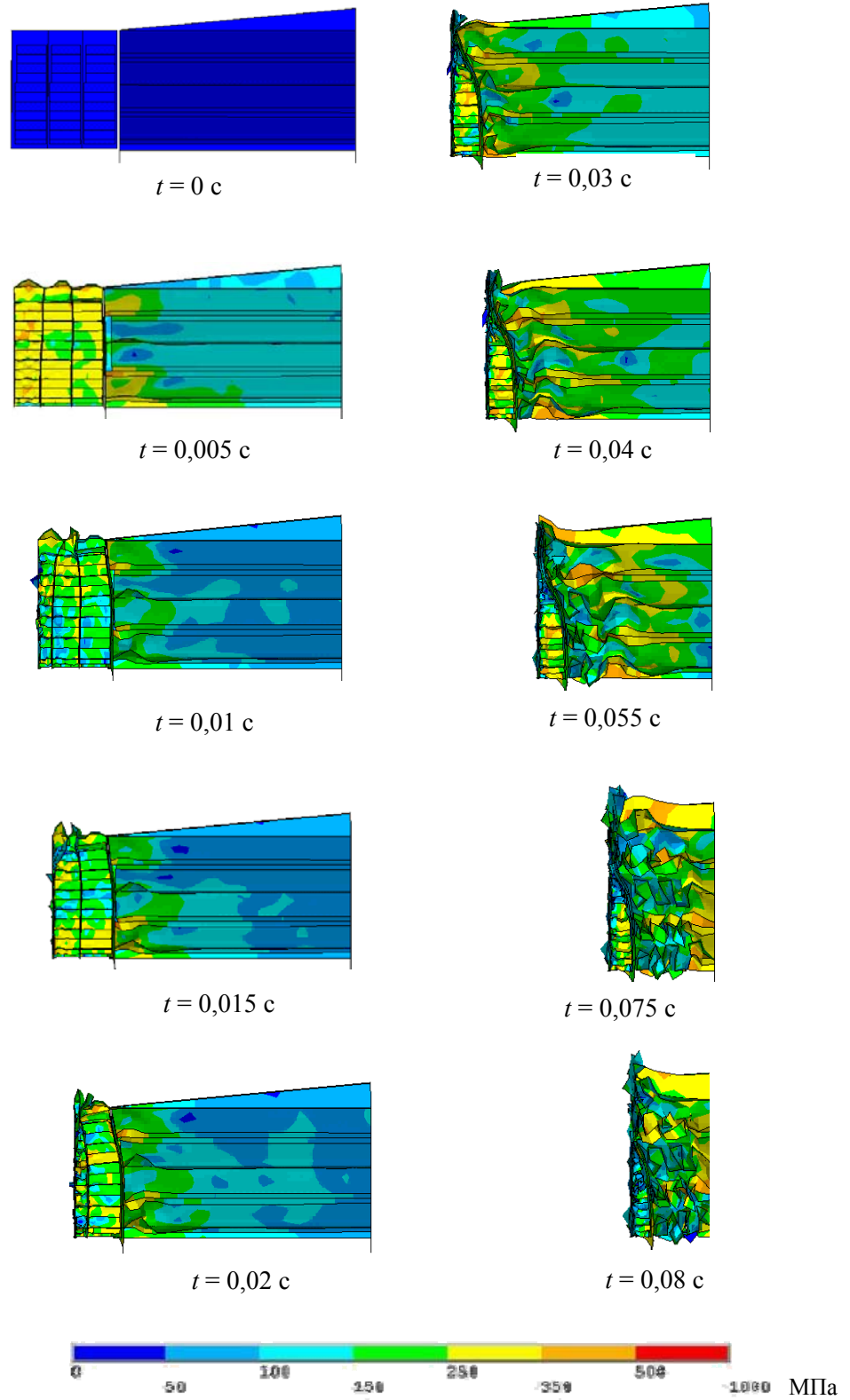


Рис. 7

Анализ полученных результатов показал, что при продольном перемещении центра масс бойка на 0,8 м и сжатии жертвенного элемента на 85% от его исходной длины может быть поглощено примерно 1,16 МДж кинетической энергии.

Таким образом, разработан алгоритм исследования процесса деформирования элементов, предназначенных для пассивной защиты локомотива скоростного пассажирского поезда, при аварийных столкновениях. Анализ НДС элементов защитной конструкции при ударе сводится к решению нелинейной динамической контактной задачи с учетом больших пластических деформаций в рамках деформационной теории пластичности, влияния скорости деформаций на физико-механические характеристики материала жертвенной конструкции, контактного взаимодействия между ее элементами и бойком, а также возможности разрушения элементов конструкции при сверхнормативном ударе. С помощью предложенного алгоритма проведен нелинейный динамический анализ НДС элементов конкретной защитной конструкции при ударе в нее массой 100 т со скоростью 36 км/ч. Показано, что при упругопластическом деформировании и практически полном разрушении рассмотренного жертвенного элемента (сжатии его на 85% от исходной длины) может быть поглощено примерно 1,16 МДж кинетической энергии бойка.

1. Inno Trans 2008 – крупнейшая выставка железнодорожной техники // Железные дороги мира. – 2008. – № 10. – С. 9 – 28.
2. Аллен Р. Передовые технологии для железнодорожного транспорта / Р. Аллен // Железные дороги мира. – 2004. – № 10. – С. 43 – 44.
3. Tyrell D. Overview of a Crash Energy Management Specification for Passenger Rail Equipment / D. Tyrell, E. Martinez, K. Jacobsen, D. Parent, K. Severson, M. Priante, A. B. Perlman // American Society of Mechanical Engineers. – 2006. – № RC2006-94044. – P. 38 – 48.
4. Прохоренко В. П. SolidWorks. Практическое руководство / В. П. Прохоренко. – М. : ООО «Бином-Пресс», 2004. – 448 с.
5. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
6. Dietenberger M. Development of a high strain dependent vehicle model / M. Dietenberger, M. Buyuk, C. D. Kan // LS-Dyna : Anwenderforum, October, 2005, Bamberg : reports. – Bamberg : FHWA / NHTSA National crash analysis centre, 2005. – № 9. – P. 15 – 25.
7. Саймондс П. С. Динамика неупругих конструкций : пер. с англ. / П. С. Саймондс. – М. : Мир, 1982. – 224 с.
8. Диаграммы упругопластического деформирования конструкционных материалов. – Режим доступа : <http://www.toehelp.ru/theory/sopromat/>
9. Качанов Л. М. Основы теории пластичности / Л. М. Качанов. – М. : Наука, 1960. – 416 с.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 26.08.10,
в окончательном варианте 10.10.10