

УДК 623.093

Исследование проникновения индентора в броневую конструкцию

Гончаров Р.Б., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Колесные машины»*

*Научный руководитель: Зузов В.Н., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Колесные машины»*

zuzov@bmstu.ru

Проблема создания надежных средств защиты является важной и актуальной. В настоящее время активно ведутся разработки в области вооружения как наступательного, так и оборонительного. Требуется создание надежных способов защиты личного состава и военной техники. Для решения данной проблемы разрабатываются все новые средства защиты, в том числе броневые конструкции. Каждая вновь создаваемая конструкция требует проведения дорогостоящих полигонных испытаний на стадии доводки конструкции до требуемых в техническом задании параметров. Актуальной задачей является моделирование пробития броневой преграды с помощью ЭВМ, это позволяет повысить эффективность разработки, в том числе существенно сократить время разработки, уменьшить количество опытных образцов, попробовать большее количество различных вариантов и комбинаций бронированных элементов.

Существует множество работ, в которых рассматривается задача о пробитии бронепреграды, каждая работа описывает взаимодействие конкретного поражающего элемента и броневой конструкции. Анализ показал, что в многих работах не уделяется должного внимания задачи о термомеханическом связывании, то есть не учитывается нагрев в следствии трения и необратимых пластических деформаций тел при соударении [1-4].

Поэтому целями статьи являются: обоснование наиболее предпочтительного метода моделирования пробития бронированной преграды термически упрочненным сердечником, выбор модели материала, адекватно отражающего свойства реального объекта, оценка влияния температурного и деформационного упрочнения.

В данной работе рассматривается проникновение сердечника пули калибра 7,62 мм с начальной скоростью 910 м/с в броневую преграду толщиной 15 мм, что является наиболее типичным при испытаниях [8].

Стали, которые используются для создания сердечников пуль и броневых элементов в большинстве своем засекречены, но по данным источника [8] сердечники пуль для СВД изготавливают из высокопрочных термически упрочненных сталей, таких как Сталь 10 или У12А. Для броневых конструкций используют стали марок 30Х2Н3М, Ц85, АЗ, СПС 43 и другие. Принимаем, что сердечник пули выполнен из инструментальной стали У12А, подверженной закалке и отпущенной при 400°С, броневая плита из стали Ц 85, так как она обладает улучшенными параметрами по защите, чем ее аналоги. Характеристики соответствующих материалов отображены в таблице 1 [5].

В отличие от известных подходов [1-4] предлагается учитывать разупрочнение материала при увеличении температуры и учет влияния скорости деформации на поведение материала в зоне пластических деформаций. Исследование ведется в объемной постановке, что в последствии позволит учитывать анизотропные свойства материала преграды, например, если она будет сделана из композиционного материала.

Таблица 1

Характеристика сталей

Марка стали	$t_{\text{отп}}, ^\circ\text{C}$	S_B , МПа	$S_{0,2}$, МПа	d , %	y , %	E , ГПа	E_t , МПа	H , МПа	m	G , ГПа	K , ГПа	HRC
У12А	400	1570	1370	10	24	210	2040	2060	0,3	80	175	52
	500	1040	880	11	30	210	1481	1492	0,3	80	175	40
	600	760	650	18	52	210	617	619	0,3	80	175	26
Ст. 10		420	260	32		210	503	604				
30Х2Н3М		1690	580	25		199	98	98	0,2	78	140	
Ц85		2000	1900	10	25	210	1020	1025				40
АЗ		200	1650	12	48	210	966	3008				55
СПС 43		1800	1400	11		210	3703	3770				

Здесь $t_{\text{отп}}$ – температура отпуска стали; S_B – временное сопротивление разрыву; $S_{0,2}$ – условный предел текучести; d – относительное удлинение после разрыва; y – относительно сужение; E – модуль упругости; E_t – тангенциальный модуль упругости (модуль упругости при упрочнении); H – константа упрочнения, вычисляемая по формуле

$$H = \frac{E_t \cdot E}{E - E_t};$$
 m – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига; K – модуль объемной упругости; HRC – твердость.

Решение поставленной задачи осуществляется в программе LS-DYNA, поскольку явные алгоритмы, заложенные в данной программе, позволяют решать быстропротекающие и нелинейные процессы с хорошей точностью при относительно малых затратах машинного времени [6].

Для правильного моделирования свойств стали сердечника пули и броневой плиты используется комбинированная модель материала. Для описания упругих свойств материала используются: уравнение состояния, уравнение прочности, модель разрушения.

Уравнение состояния – основное уравнение, описывающее поведение модели при воздействии динамической нагрузки. Модель прочности – описывает поведение материала в зависимости от уровня напряжений, которые в большинстве случаев превышают предел текучести для данного материала, однако могут находиться и в пределах упругости. Модель разрушения – описывает поведения материала в момент разрушения в зоне, где превышен параметр, задаваемый в модели разрушения [3].

В программе LS-DYNA существует несколько способов описания каждого аспекта поведения материала [6, 7].

Уравнение состояние может быть представлено в виде:

1. Линейного уравнения, независящего от энергии,
2. Уравнения Ми-Грюнейзена,
3. Линейного полиномиального уравнения,
4. Ударного уравнения состояния.

Модели прочности

1. Уравнение Johnson-Cook используется для описания материалов, чаще металлов, подверженных большим деформациям, скоростям деформации, температурам. Самый простой вариант описания материала.
2. Уравнение Cowper-Symond описывает поведение материалов с изотропным упрочнением, подверженным большим скоростям деформации.
3. Уравнение Steinberg-Guinan учитывает пластические деформации, давление и изменение внутренней энергии.
4. Уравнение Zerilli-Armstrong учитывает большие деформации, скорости деформации, большие температуры. Основано на теории дислокационной динамики.

Модели разрушения

1. Материал разрушается при достижении заданного значения деформации (d),
2. Материал разрушается при достижении заданного значения напряжения (S_B),
3. Стохастическая модель разрушения,
4. Модель трещинообразования и последующего разрушения,
5. Модель разрушения Johnson-Cook описывает зависимость предельной деформации от скорости деформации и температуры,
6. Модель разрушения Grady-Spall используется для моделирования материалов, подверженных ударным нагрузкам.

Способ задания свойств материалов является важной частью исследования, так как от этого существенно зависит конечный результат. Поэтому в данной работе проводится сравнение способов задания свойств материалов при моделировании высокоскоростного ударного взаимодействия.

Модель материала преграды и сердечника пули задается кусочно-линейным графиком, показанным на рисунке 1. Она не зависит от скорости деформации и температуры, а учитывает только деформационное упрочнение. Модель соответствует типу материала в LS-DYNA MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, характеристики материала указаны в таблице 2.

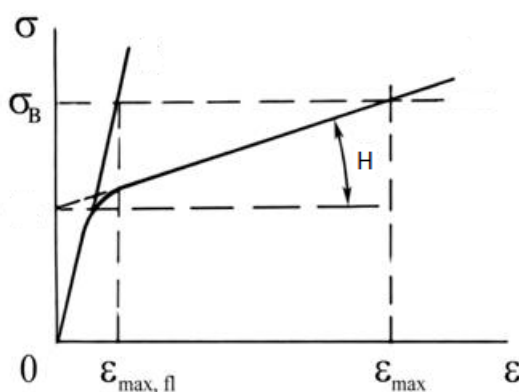


Рис. 1. Диаграмма напряжение-деформация

Таблица 2

Параметры материалов

Сталь	ρ , кг/м ³	E, ГПа	m	$s_{0,2}$, ГПа	H, ГПа	d , %
У12А	7800	200	0,3	1,37	2,06	10
Ц 85	7800	200	0,3	1,9	1,025	10

Модель материала преграды и сердечника пули описывается с учетом влияния деформации и скорости деформации на пластичное состояние.

Уравнение состояния моделируется EOS_LINEAR_POLYNOMIAL, пластичные свойства учитываются в виде модели MAT_JOHNSON_COOK, разрушение происходит при достижении предельной деформации 10 % [5]. Данные уравнения выбираются потому, что они простые, для них известны все параметры и они моделируют свойства близко к реальным.

На рисунке 2 можно видеть зависимость предела текучести для одноосного напряженного состояния от деформации и температуры. Поскольку модель материала MAT_JOHNSON_COOK учитывает в том числе и зависимость напряжения от скорости деформации, то в общем случае график представляет собой четырех мерное пространство, с осями: напряжение (σ), деформация (ϵ_p), скорость деформации ($\dot{\epsilon}_p$) и температура (T).

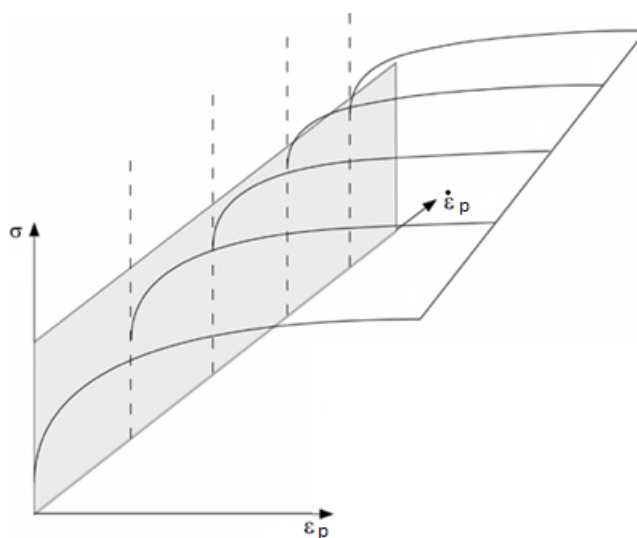


Рис. 2. Характеристика материала MAT_JOHNSON_COOK

Модель материала MAT_JOHNSON_COOK учитывает зависимость предела текучести и предела прочности от скорости деформации и температуры [6], математически это описывается с помощью формулы (1):

$$\sigma_Y = (A + B\epsilon_p^n)(1 + c \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0})(1 - (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m),$$

где σ – предел текучести; A, B, n, c, m – параметры модели, определяемые экспериментально; ε_p – деформация; $\dot{\varepsilon}_p$ – скорость деформации; T – действительная температура материала; T_r – температура окружающей среды; T_m – температура плавления материала.

Уравнение состояния EOS_LINEAR_POLYNOMIAL, необходимое для описания упругих свойств материала, учитывает зависимость давления от плотности материала [6], и выражается с помощью эмпирических формул:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E,$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1,$$

где P – давление или напряжение, отвечающее за изменение объема; C_i – константы, описывающие упругие свойства материала; m – степень сжатия; ρ – плотность материала; E – внутренняя энергия тела.

Неизвестные постоянные для материалов сердечника пули и броневой преграды в общем случае подбираются экспериментально. Параметры, которые использовались в данной работе, указаны в таблице 3, источником данных является библиотека материалов программы ANSYS Workbench, остальные параметры в уравнении равны нулю.

Таблица 3

Параметры материалов

Сталь	ρ , кг/м ³	G , ГПа	A , ГПа	B , ГПа	n	c	m	T_m , К	T_r , К	C_p , Дж*м ³ /К*кг	C_1 , ГПа	d , %
У12А	7800	82	1,37	3,06	0,26	0,014	1	1793	293	477	159	10
Ц 85	7800	82	1,9	1,025	0,18	0,012	1	1763	193	477	159	10

Разрушение материала сердечника пули и броневой преграды происходит при относительной деформации 10 % [5].

Модель материала преграды и сердечника пули описывается с учетом влияния скорости деформации и температурного разупрочнения.

Для описания данного поведения модели использовались те же модели материалов, что и для случая скоростного упрочнения. Зависимость энергии, поглощенной в результате необратимых пластических деформаций выражается зависимостью:

$$w_{pl} = \rho C_p \Delta T = \eta \int \sigma^y d\varepsilon_{pl},$$

где w_{pl} – энергия, выделившаяся при пластической деформации; ρ – плотность стали; ΔT – изменение температуры стали; C_p – удельная теплоемкость стали [6].

Модели пули калибром 7,62 мм и броневой преграды толщиной 15 мм изображены на рисунке 3. Необходимые размеры показаны на рисунке. Модели созданы в программе SolidWorks.

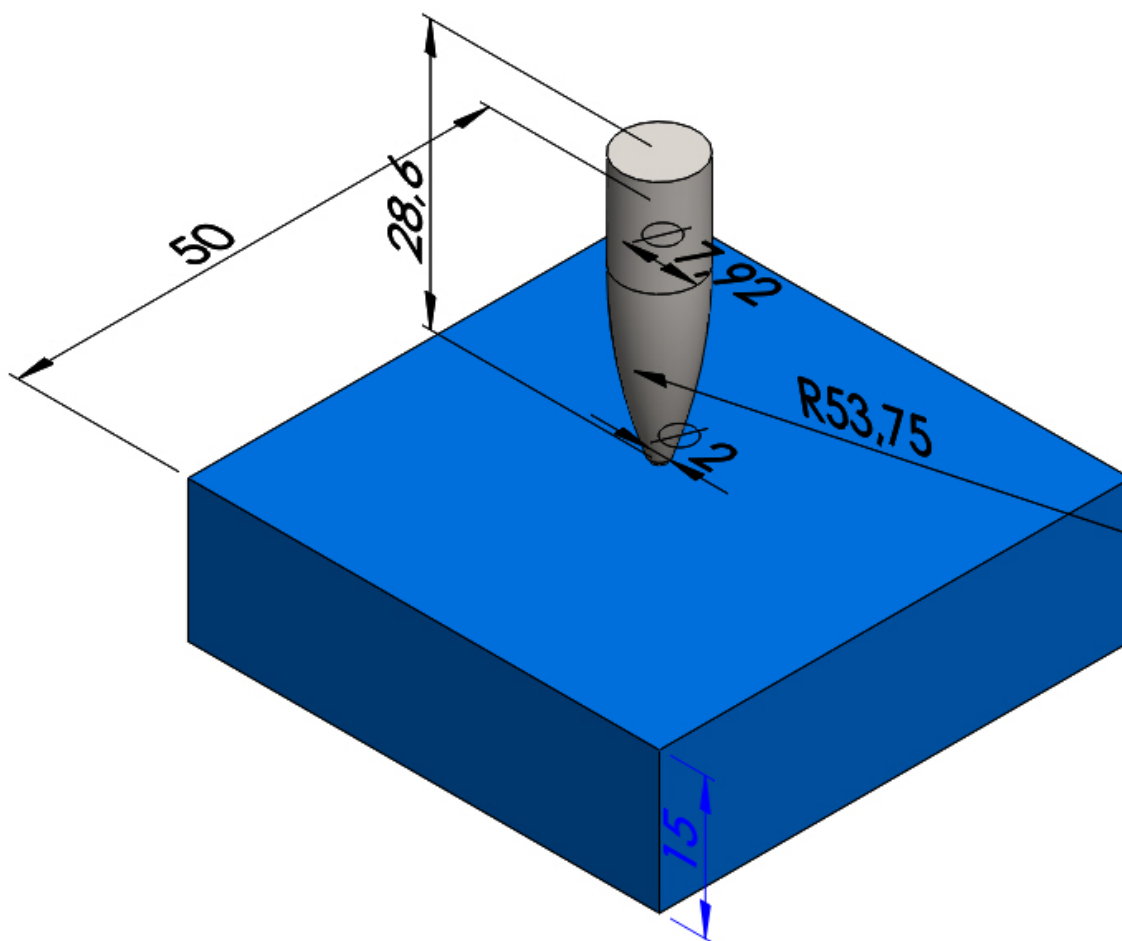


Рис. 3. Твёрдотельная модель композиции сердечник пули и броневая плита

Конечно-элементная модель системы изображена на рисунке 4. В этой модели использовано 38391 конечных элементов типа «Element solid» с тремя степенями свободы в каждом узле. Материал сердечника пули инструментальная сталь У12А, материал броневой пластины Ц 85. Характерная начальная скорость для данного типа пули 910 м/с [8]. Закрепления пластины не играют существенного значения, так как процесс длится 0,0001 с., и броневая плита не успевает значительно сместиться, следовательно, ее перемещения не влияет на пробивную способность пули.

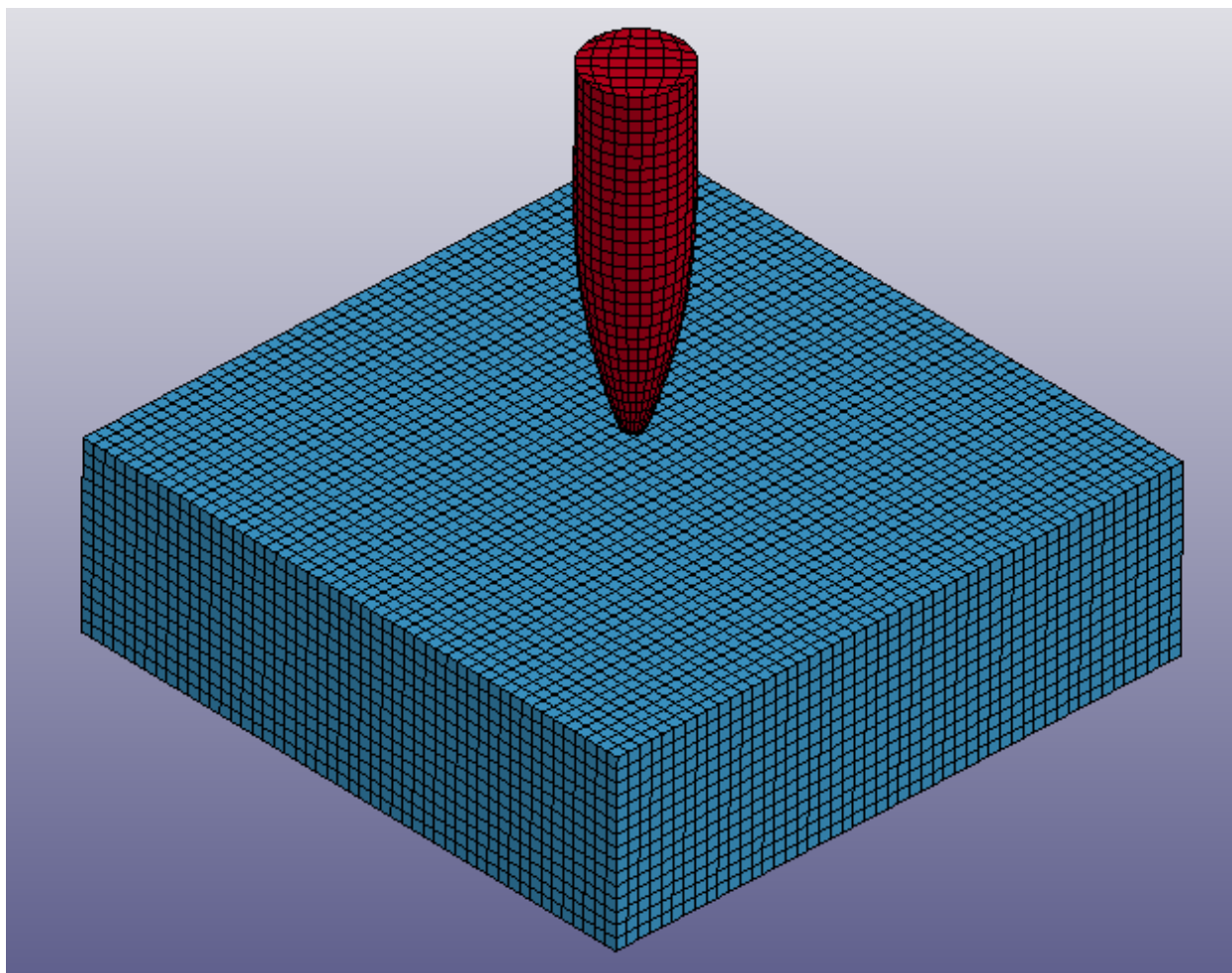


Рис. 4. Конечно-элементная модель преграды и сердечника пули

Результаты моделирования процесса пробития представлены на рисунках 5-8. Для каждого варианта показана степень проникновения сердечника пули в преграду в зависимости от времени моделирования. Это позволяет судить о влиянии учета различных деформационных критериев на пробивную способность. Для оценки необходимости учета нагрева при пробитии показана картина распределения температур в бронеплите и сердечнике.

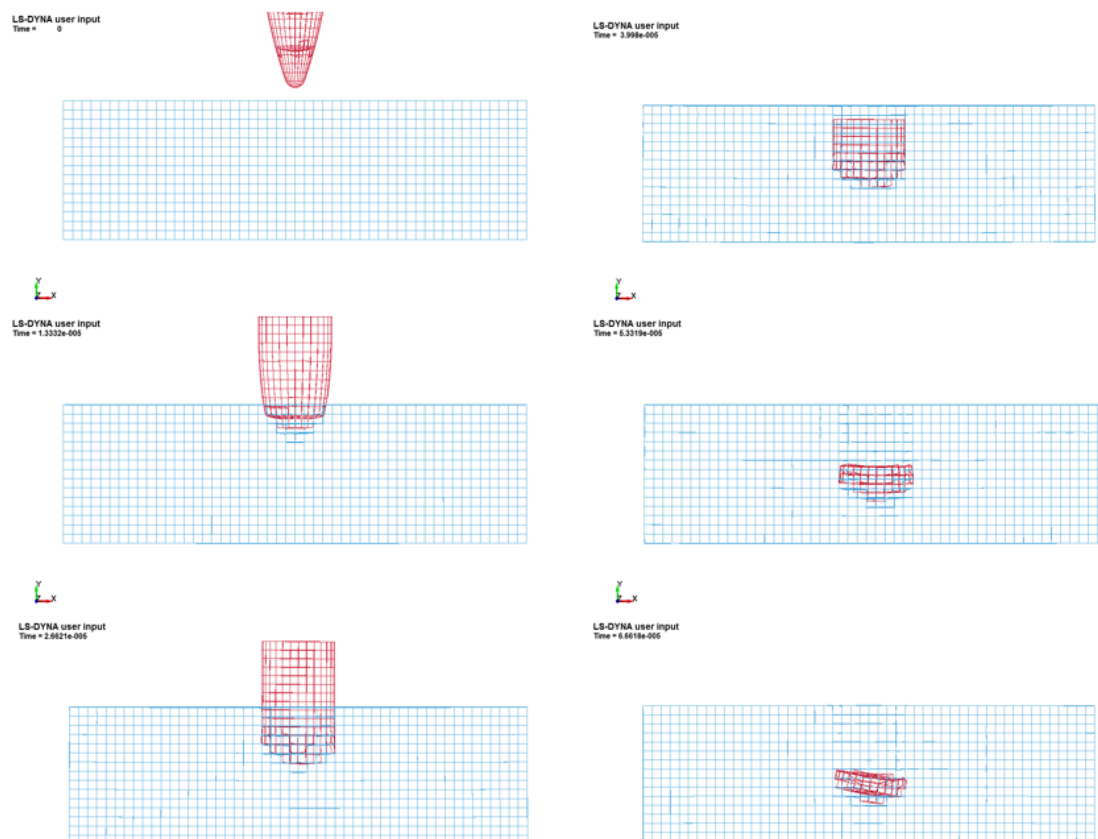


Рис. 5. Процесс проникновения сердечника в преграду с учетом деформационного упрочнения

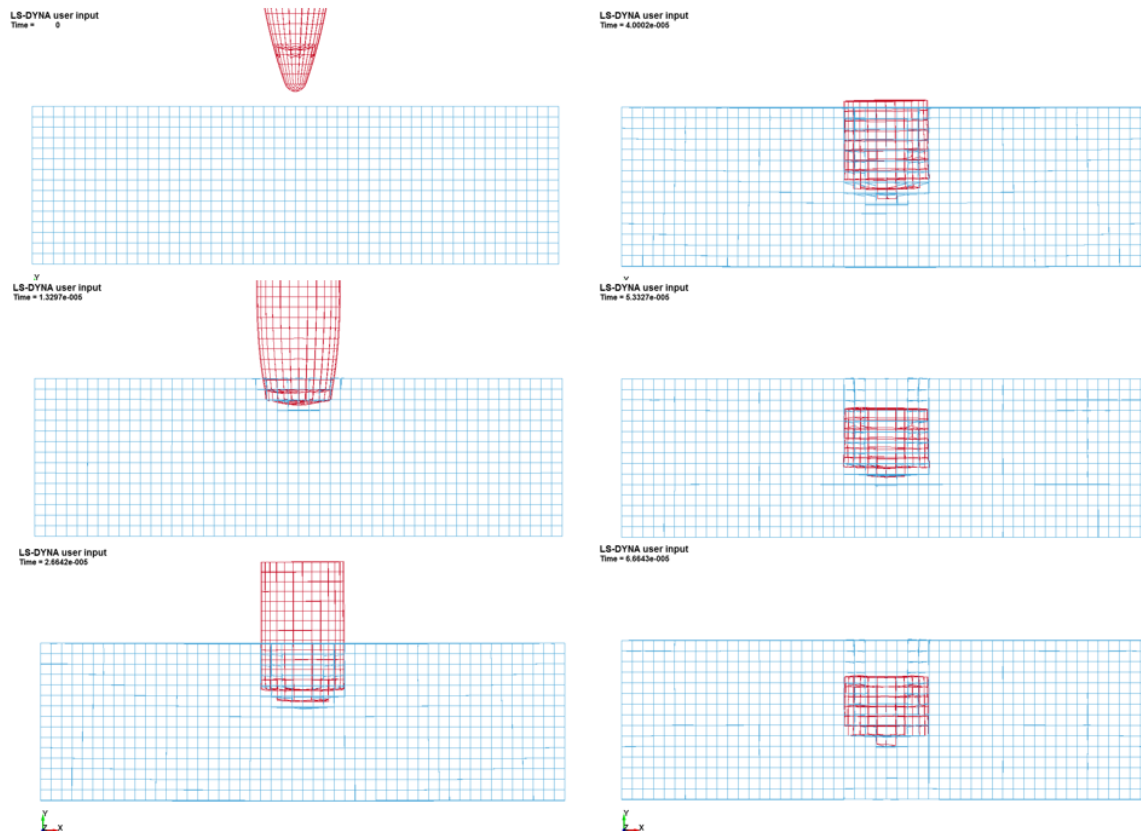


Рис. 6. Процесс проникновения сердечника в преграду с учетом скоростного упрочнения

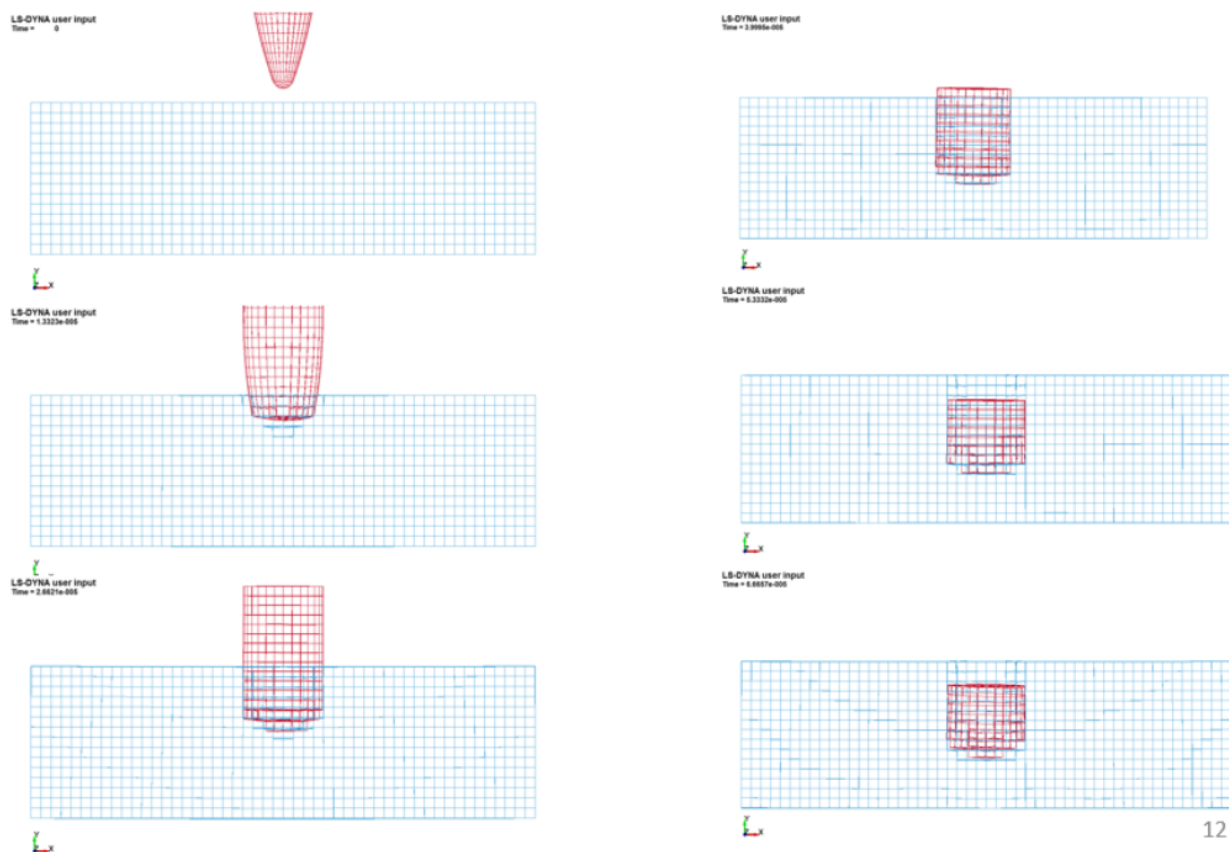


Рис. 7. Процесс проникновения сердечника в преграду с учетом температурного разупрочнения

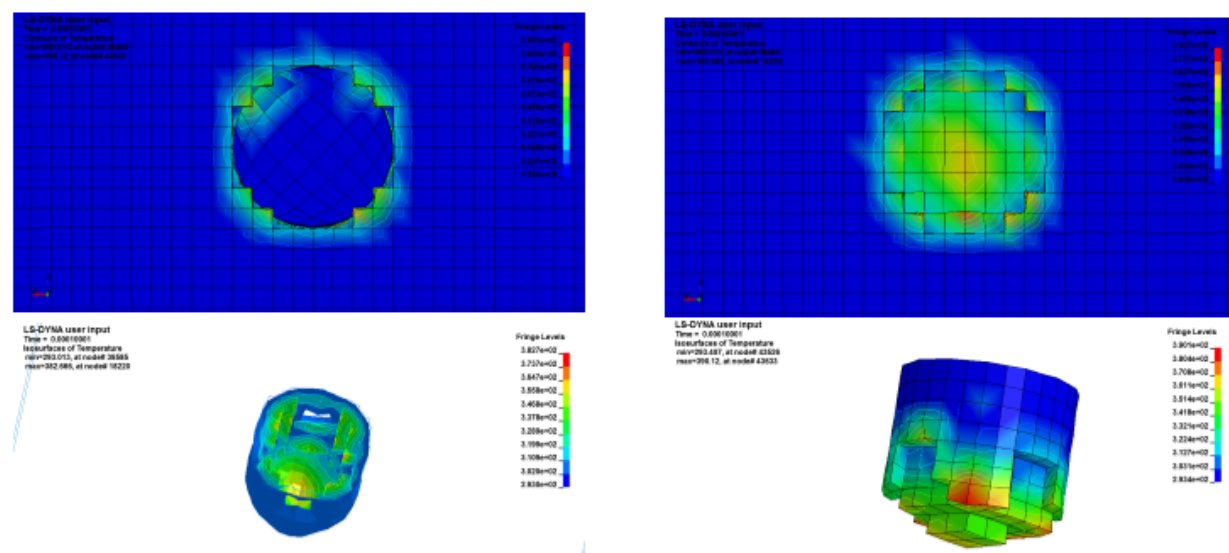


Рис. 8. Распределение температурных полей

Анализируя полученные результаты можно сказать, что пробитие преграды не произошло ни в одном случае, откольной пробки не наблюдается, сердечник пули застрял

в плите. При дальнейшем моделировании сердечник под влиянием упругих деформаций начинает обратное движение и вылетает из преграды.

В следствии пластических деформаций произошел нагрев сердечника пули и преграды, при этом максимальное изменение температуры составляет около 100 °С. Разогрев материала не сильно влияет на прочностные свойства сталей, как видно из рисунков 6 и 7. В случае моделирования с учетом температурного разупрочнения сердечник пули и бронеплита разрушились меньше, чем при учете только скоростного упрочнения.

Выводы

1. Пуля не пробила преграду ни в одном случае.
2. При моделировании материала с учетом только деформационного упрочнения сердечник почти полностью разрушился.
3. При моделировании материала с учетом скоростного упрочнения сердечник разрушился на половину.
4. При моделировании материала с учетом температурного разупрочнения сердечник разрушился на 3 %, а бронеплита на 6 % меньше, чем без его учета.
5. Произошел нагрев пули и преграды в прилегающей к зоне контакта области на 100°С.
6. Термический разогрев несильно влияет на пробивную способность пули.

Список литературы

1. Форенталь М.В. Динамика деформирования и разрушения пластин при высокоскоростного нагружения ударниками со сложной структурой: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М., 2010. 22 с.
2. Краюхин А.А., Иолев А.Г., Стадник А.Л., Янилкин Ю.В. Численное исследование пробития алюминиевой плиты заостренным стальным ударником при скорости удара 0,3-0,86 км/с // 2-я международная конференция «Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела»: труды. Режим доступа: <http://old.kpfu.ru/conf/pnmdtt09/> (дата обращения 12.03.2015).
3. Галиновский А.А., Колпаков В.И., Муляр С.Г. Анализ эффективности различных средств индивидуальной бронезащиты // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/342101.html> (дата обращения 24.01.2015). DOI: 77-30569/342101

4. Piekutowski A.J., Forrestal M.J., Poormon K.L., Warren T.L. Perforation of aluminum plates with ogive-nose steel rods at normal and oblique impacts // Int. J. Impact Engng. 1996. Vol. 18. No. 7_8. P. 877–887.
5. Сорокин В.Г., Волосин А.В., Вяткин С.А. и др. Марочник сталей и сплавов / под общ. ред. В.Г. Сорокина. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
6. Hallquist J. LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL. – Livermore (USA): Livermore Software Technology Corporation, 1993-2003. Available at: <https://www.dynamore.de/de/download/manuals/ls-dyna/R6.1.0-Vol2.pdf>, accessed 28.01.2015.
7. Музеймнек А.Ю. Описание поведения материалов в системах автоматизированного инженерного анализа: учеб. пособие. Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. 152 с.
8. Коломийцев Л.В., Собакаръ И.С., Никитюк В.Т., Сомов В.В. Патроны к стрелковому оружию. М.: Харьков, 2003. 336 с.