Робота на здобуття щорічної премії Президента України

для молодих учених

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КЕРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

Шлик Сергій Вікторович[1)]

Ченчева Ольга Олександрівна[1)]

Клец Дмитро Михайлович[2)]

Лашко Євгеній Євгенович [1)]

[1)] Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

[2)] Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Мета роботи

Підвищення техніко-економічних показників технологічних процесів імпульсної обробки металів і засобів їх діагностики на основі розвитку теоретичних основ формозміни під дією імпульсного впливу та розрахунку енергосилових параметрів.

Об’єкт дослідження

Процеси імпульсного вибухового навантаження у явній постановці для моделювання складної нелінійної динаміки твердих тіл, рідин, газів і їх взаємодії, пов’язані з переходом від стаціонарного осередку деформації до нестаціонарного з силовою інтенсифікацією.

Предмет дослідження

Термомеханічні режими динамічного вибухового навантаження металевих конструкцій. Робота націлена на розробку математичної моделі імпульсного навантаження матеріалів ударною хвилею, утвореною внаслідок детонації заряду вибухової речовини, розробку математичного апарату розрахунку параметрів ударної хвилі, створення аналітичних залежностей взаємодії ударної хвилі з навантажуваною поверхнею. Пропонується дослідження динамічного вибухового навантаження із застосуванням програмних комплексів, що використовують явний метод рішення рівнянь механіки суцільного середовища.

Задачі роботи:

1. Визначення напруженого стану в точці матеріалу за умов імпульсного навантаження, головних напружень та інваріант тензора напружень з урахуванням імпульсного характеру навантаження.

2. Встановлення характеру поведінки ударної хвилі, що утворюється внаслідок детонації вибухової речовини.

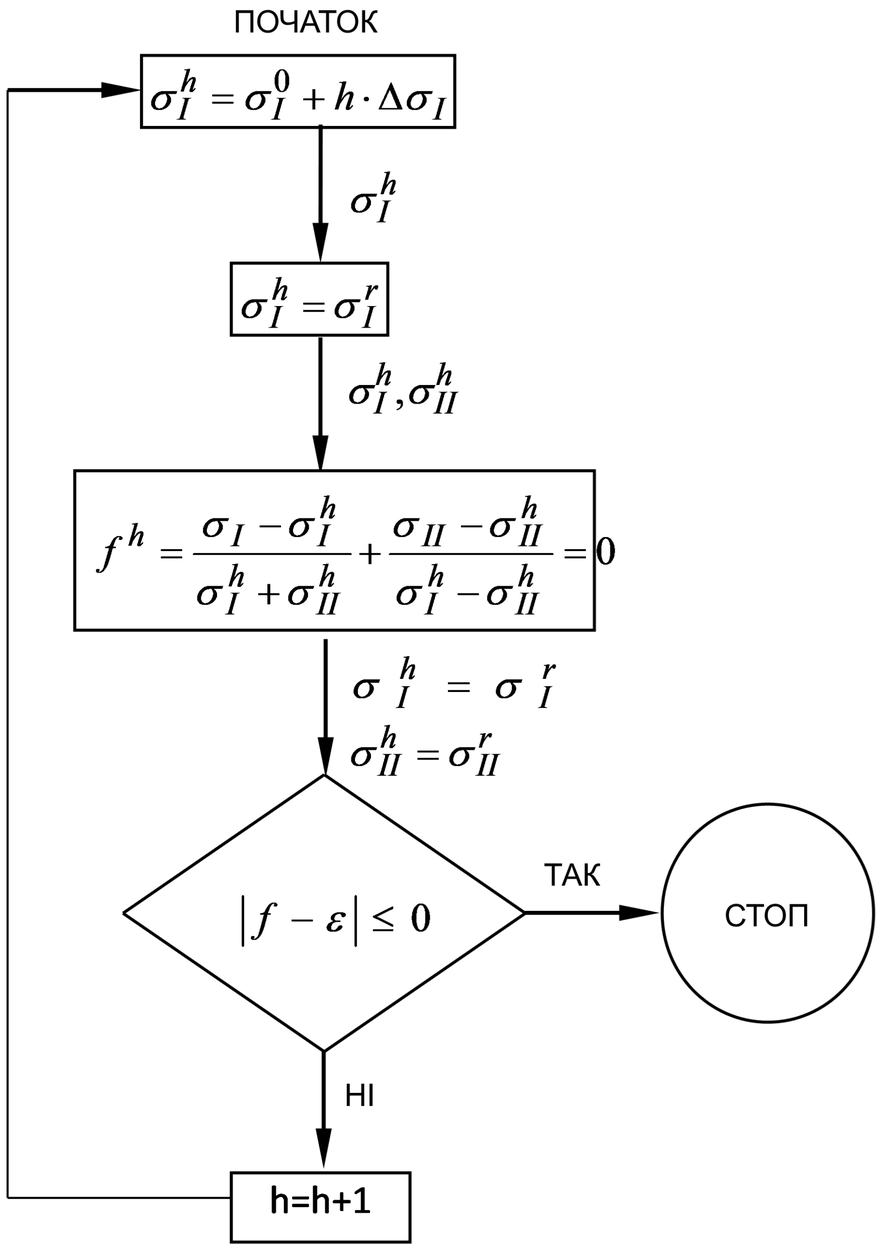
3. Складення аналітичних залежностей взаємодії ударної хвилі із навантажуваною поверхнею.

4. Розробка математичного апарату розрахунку таких параметрів ударної хвилі як тиск фронту детонації і його зміна у часі та швидкість ударної хвилі у момент виходу на поверхню.

5. Розробка ітераційної процедури, яка дозволяє визначати поточні значення напружень та деформацій, що проходять через точки кривої дійсних напружень, а також інтенсивності напружень та деформацій при імпульсній обробці металів.

6. Проведення якісного аналізу розроблених моделей та виконання порівнянь значень, отриманих при числовому моделюванні напружено-деформованого стану матеріалу у системі Ansys AUTODYN із застосуванням розробленої ітераційної процедури, із експериментальними даними.

Розробка ітераційної процедури, яка дозволяє визначати поточні значення напружень та деформацій, а також їх інтенсивності при імпульсній обробці металів

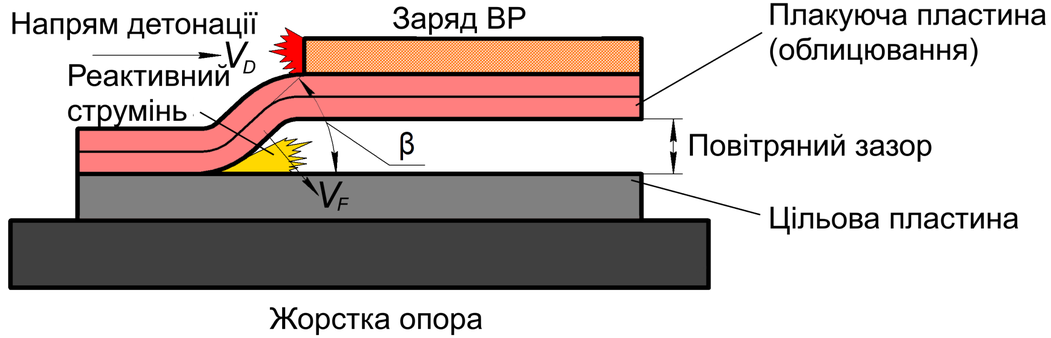


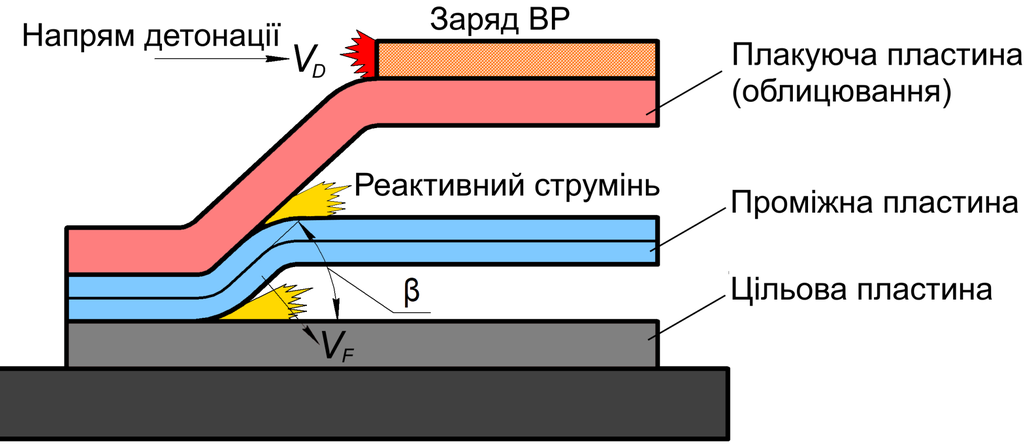
σ_1, σ_2, σ_3, ε_1, ε_2, ε_3 – поточні значення напружень та деформацій, що проходять через точки кривої дійсних напружень;

ε_0, C, n – константи, що задовольняють системі рівнянь;

σ_i, ε_i – інтенсивність напружень та деформацій.

Дослідження напруженого стану заготовки при імпульсному навантаженні під час зварювання вибухом





Схеми зварювання вибухом двошарової композиці та зварювання вибухом з проміжним шаром

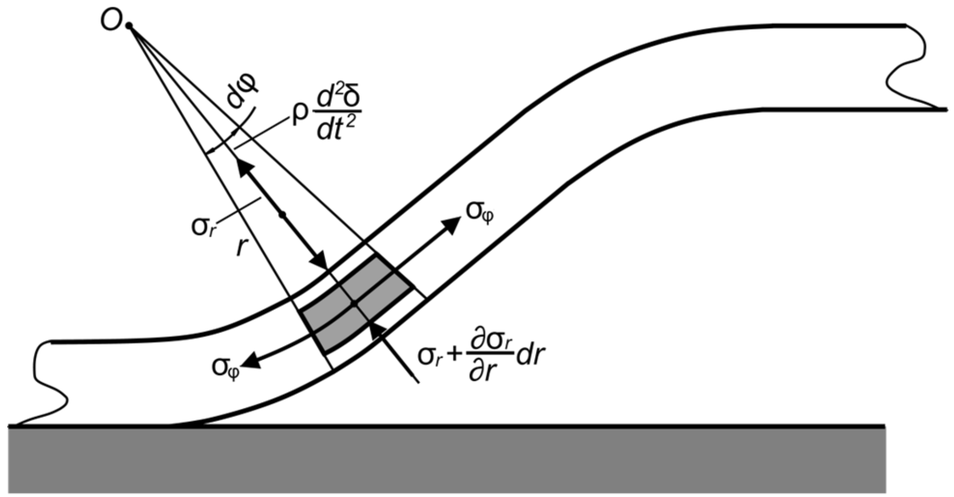
Характерні зони деформованого шару металу при імпульсному деформуванні:

I – зона інтенсивної деформації поверхневих шарів пластин. Пластична деформація в цій зоні забезпечує активізацію та взаємодію між вихідними елементами композиції.

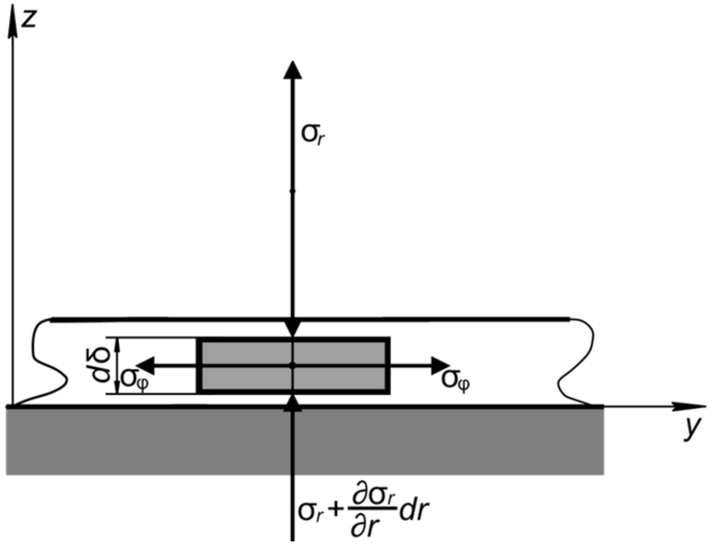
II – зона деформації поверхневих шарів пластин. що зазнають зіткнення. При хвилеподібному профілі лінії з'єднання її характерною особливістю є неоднорідність пластичної деформації в шарах, паралельних зоні зварного шва.

III – зона деформації за всією глибиною зварених заготовок, характерною особливістю якої є однорідність деформації металу в шарах, паралельних зоні зварного шва.

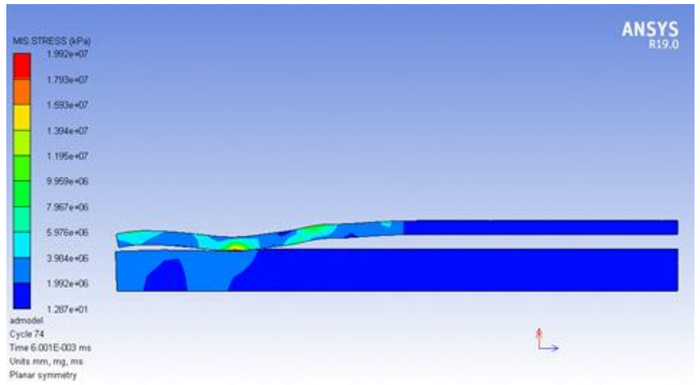
Дослідження напруженого стану заготовки при імпульсному навантаженні під час зварювання вибухом



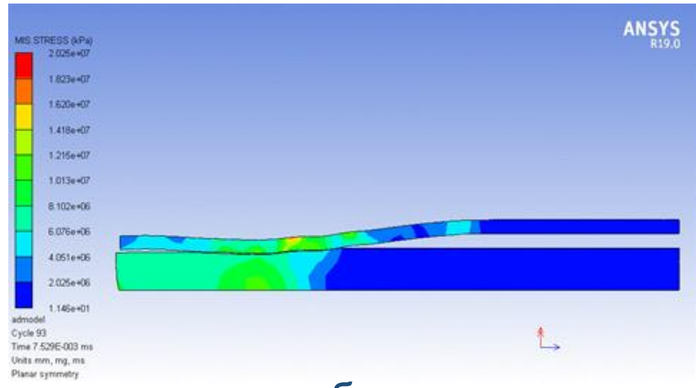
Рівновага елементу плакуючої пластини на ділянці вигину



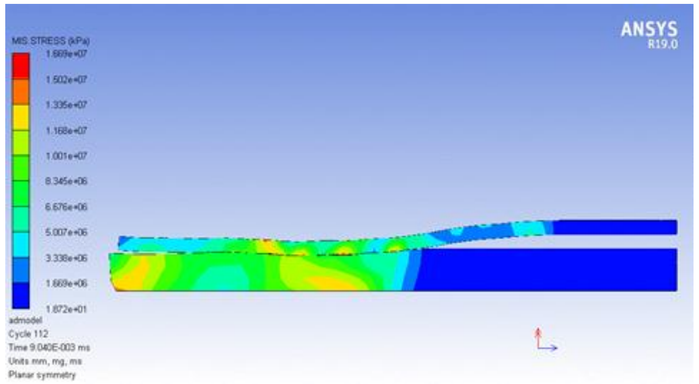
Рівновага плакуючої пластини в момент зіткнення



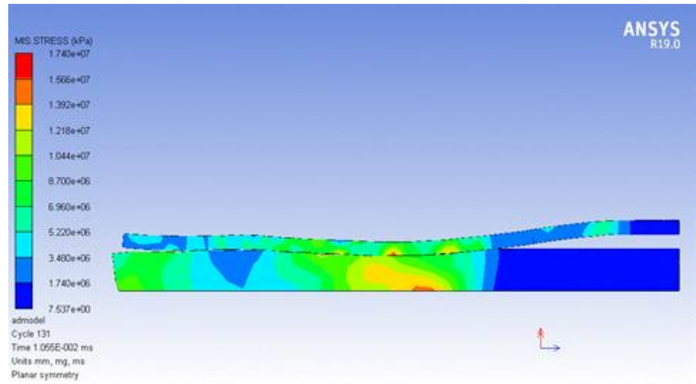
а



б



в



г

Результати моделювання (еквівалентні напруження за фон Мізесом) плакування (зварювання) вибухом у момент часу після детонації заряду вибухової речовини: а – 0,006 мс; б – 0,0075 мс; в – 0,009 мс; г – 0,01 мс

Дослідження напруженого стану заготовки при імпульсному навантаженні під час зварювання вибухом

Відстань від зони з'єднання, мм	Матеріал (позначення за ДСТУ)	Твердість HV	Інтенсивність напружень, (методика $\sigma_i = f(HV)$), МПа	Інтенсивність напружень (числовий аналіз), МПа
1	2	3	4	5
0	Ст3	460	1020±120	1060
0,25	Ст3	440	1010±142	1040
0,5	Ст3	350	980±111	996
0,75	Ст3	260	800±92	784
1,0	Ст3	180	590±64	560
1,5	Ст3	160	540±62	560
2,0	Ст3	160	540±62	560
0	08Х18Н10Т	460	1120±126	1090
0,25	08Х18Н10Т	455	1120±126	1090
0,5	08Х18Н10Т	375	1090±118	1090
0,75	08Х18Н10Т	374	1090±118	1090

а

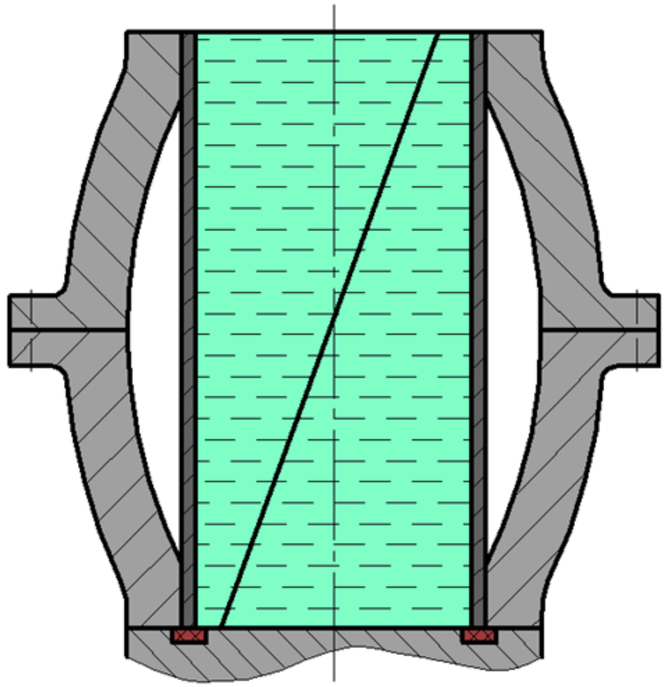
б

в

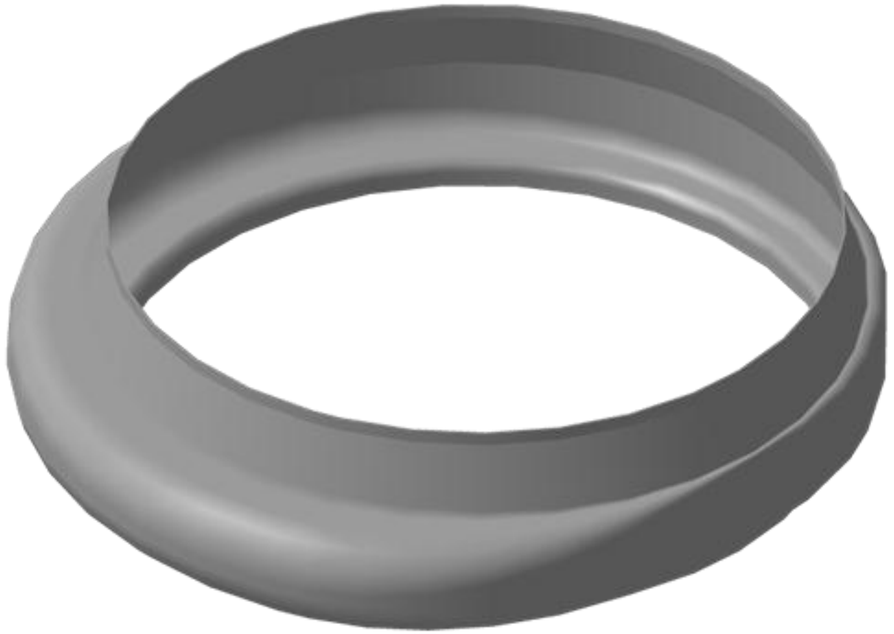
г

Композиції, отримані плакуванням вибухом:
а – пластини сталі 65Г, плаковані листовою міддю; б – пластини сталі 65Г, плаковані листовим алюмінієм; в – лист алюмінію, плакований титаном (вид з одного боку); г – лист алюмінію, плакований титаном (вид з іншого боку)

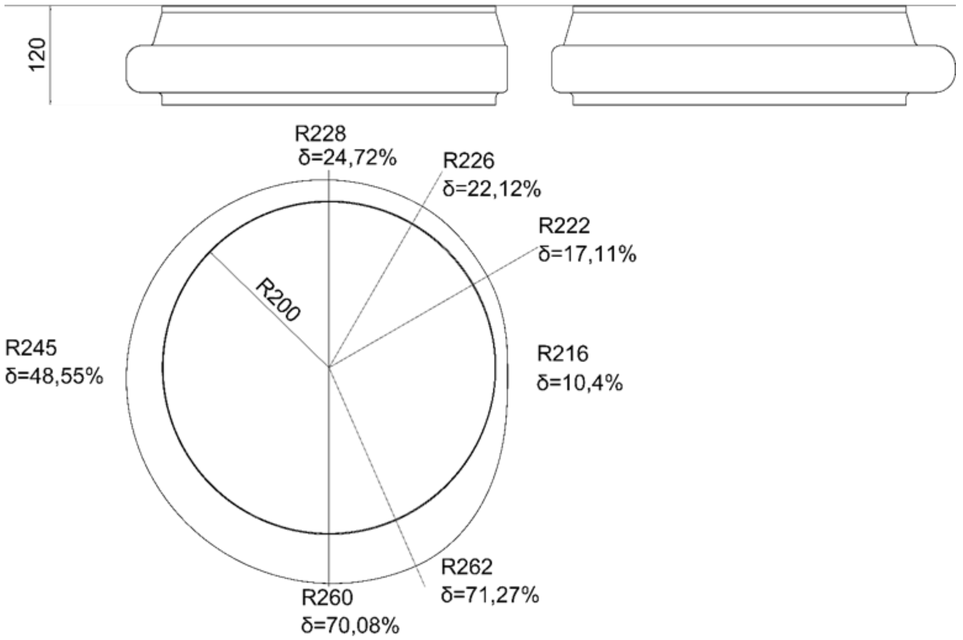
Дослідження напруженого стану заготовки при імпульсному навантаженні під час штампування вибухом оболонкових деталей зі змінною кривизною



Типова схема штампування циліндричної оболонкової заготовки вибухом заряду ВР у рідині

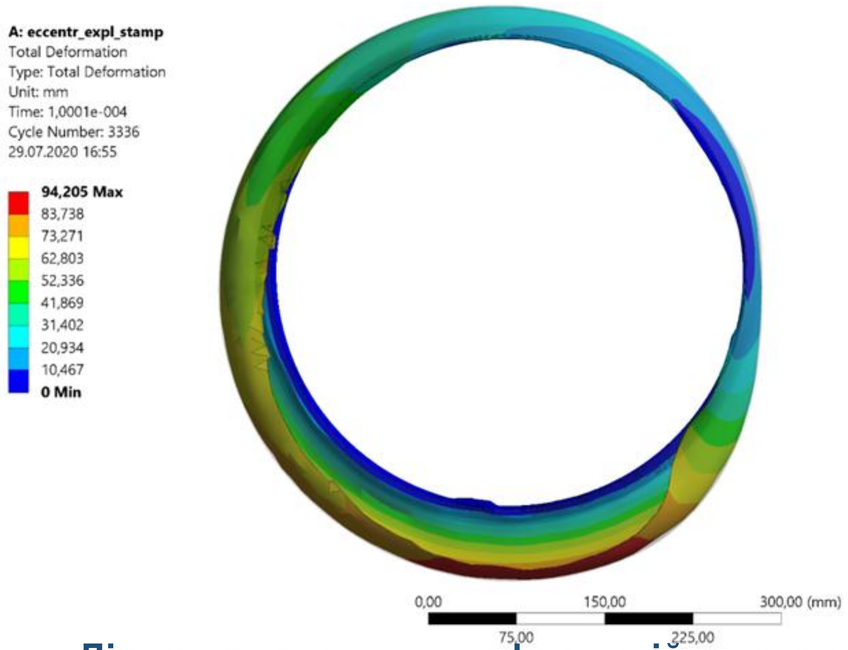


Ізометричний вигляд деталі «равлик» зі змінною кривизною

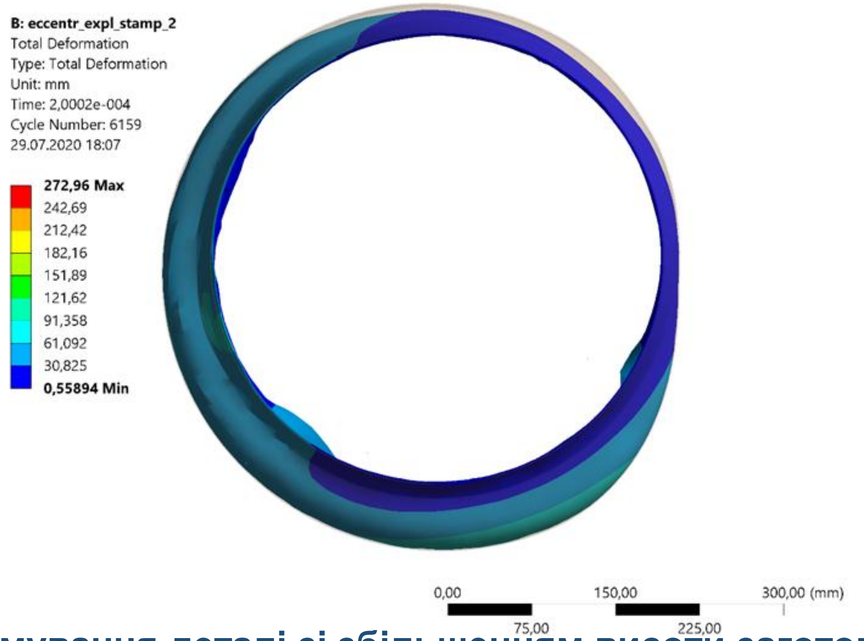


Структура деталі «равлик» зі змінною кривизною

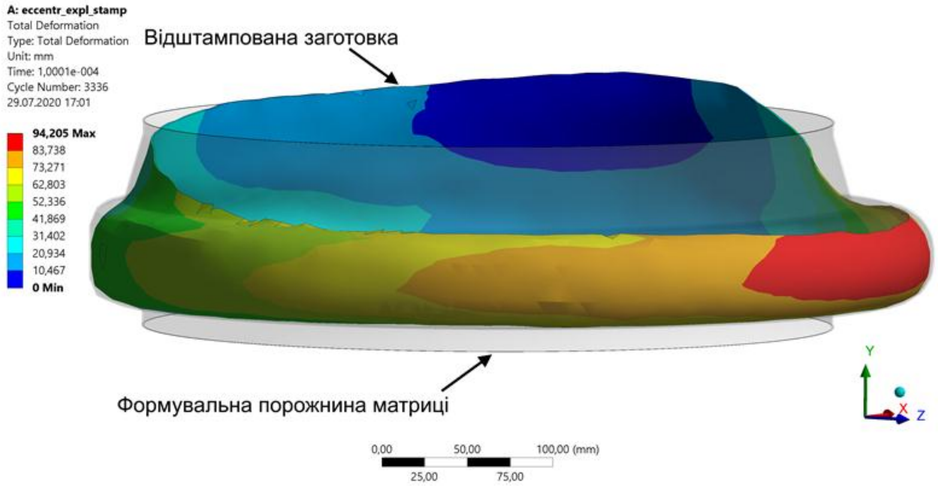
Дослідження напруженого стану заготовки при імпульсному навантаженні під час штампування вибухом оболонкових деталей зі змінною кривизною



Діаграма загальних деформацій заготовки при вибуховому розширенні (вид зверху)



Формування деталі зі збільшенням висоти заготовки



Діаграма заповнення порожнини прес-форми

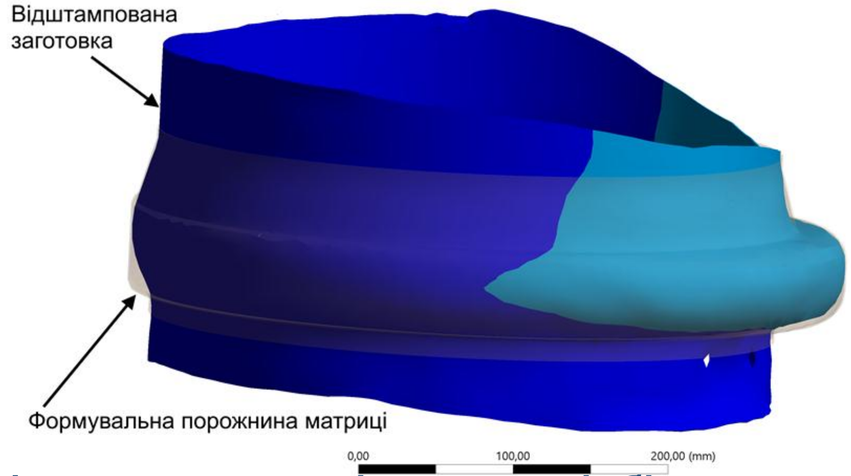


Схема формування деталі «равлик» зі збільшенням висоти заготовки (діаграма заповнення порожнини прес-форми)

Дослідження напруженого стану заготовки при імпульсному навантаженні під час штампування вибухом оболонкових деталей зі змінною кривизною

Зовнішній вигляд сформованої експериментальної деталі «равлик»

Вплив ексцентриситету розташування зарядів на прогини циліндричної заготовки

Ексцентриситет		Прогин f_a, мм	Прогин f_b, мм	Відносний прогин		Область найбільшої деформації φ
мм	e / R			f_a / H	f_b / H	
19,5	0,24	8,5	8	0,4	0,38	0
29,2	0,30	12	8	0,57	0,38	π / 2
68	0,42	15	7,5	0,71	0,36	3π / 4

Порівняння експериментальних результатів з розрахунковими даними

Прогин f_a, мм					Прогин f_b, мм				
Експеримент	I	II	III	IV	Експеримент	I	II	III	IV
8,5	6,82	7,98	8,42	8,5	8	6,48	7,12	7,88	8
12	9,14	11,32	11,84	12,03	8	6,46	7,12	7,88	8
15	11,9	12,42	13,98	15,04	7,5	7,15	7,2	7,38	7,5

I –процес деформації оболонки імпульсом розділений на два етапи; II – без урахування стійкості до деформації; III – з урахуванням стійкості до деформації; IV – при числовому МСЕ-моделюванні у системі Ansys AUTODYN із застосуванням опису властивостей матеріалу, що зазнає імпульсного впливу, та розробленої ітераційної процедури

Дослідження можливості застосування розробленої методики у оборонній промисловості

Хімічний склад (макс. %) сталі Quardian 500

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0,3	0,4	1,2	0,015	0,01	0,8	1,2	0,6	0,005

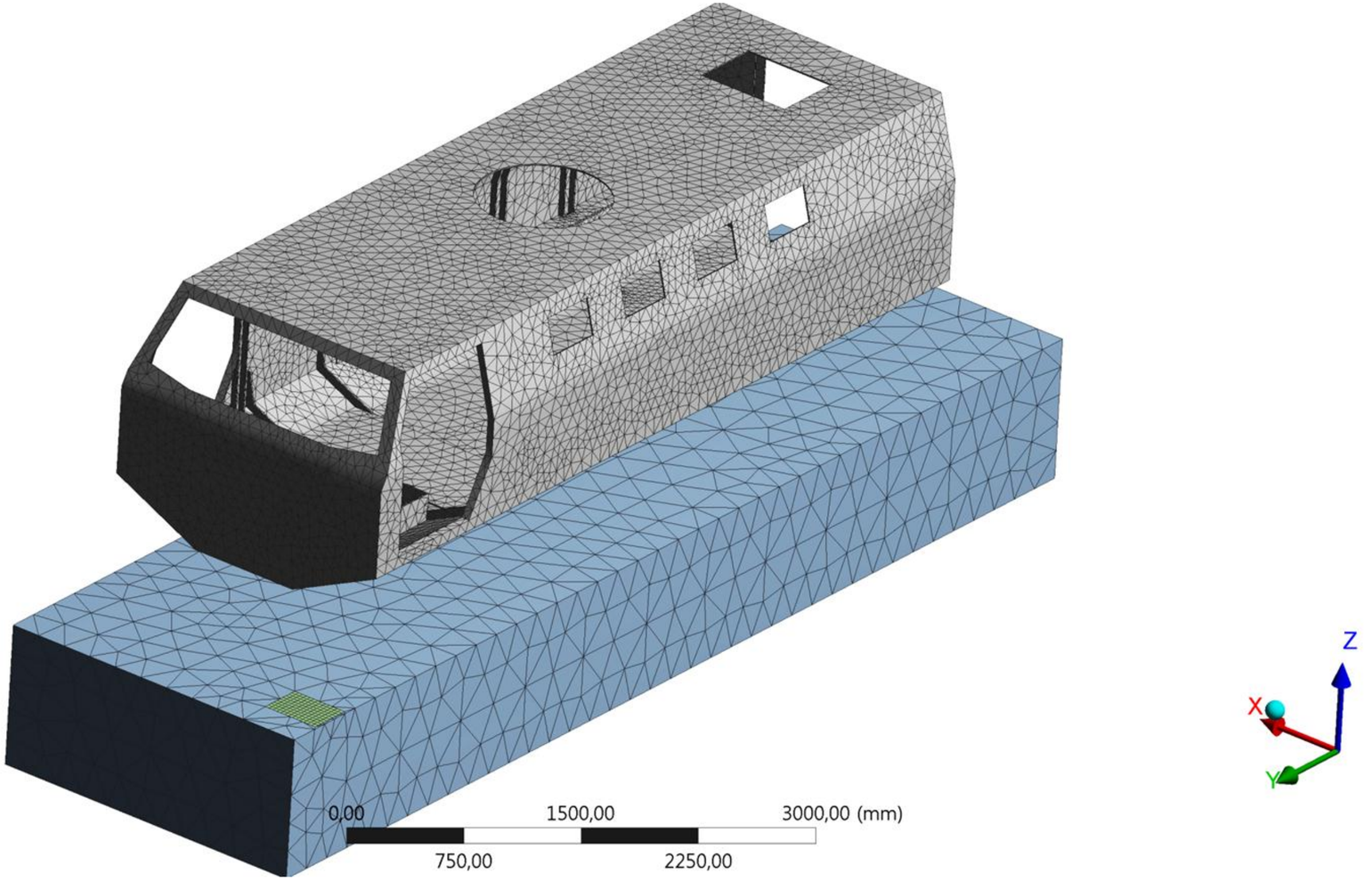
Основні механичні властивості сталі Quardian 500

Твердість, Бринелль	Ударна в’язкість (надріз V, -40°C (мин)), Дж	Межа плинності, МПа	Межа міцності, МПа	Видовження A50, %
480 – 540	20	1250	1400 – 1800	7

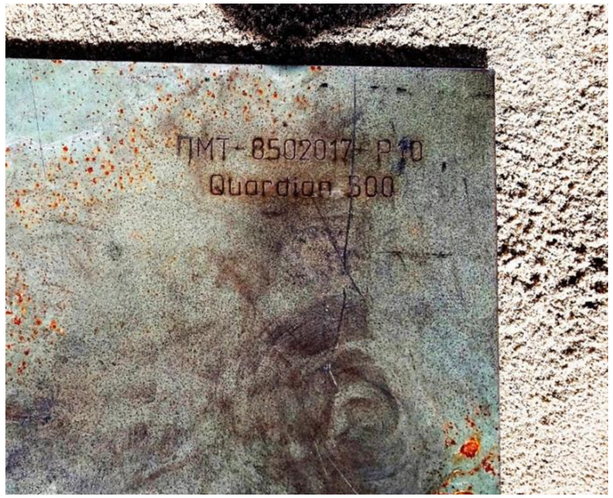
Зовнішній вигляд багатоцільових бронеавтомобілів MPV КрАЗ «Shrek» та КрАЗ «Fiona»

Дослідження можливості застосування розробленої методики у оборонній промисловості

Загальний вигляд розрахункової скінченно-елементної моделі (заряд вибухової речовини розташований під лівим переднім колесом автомобіля; атмосферне повітря не показане)



Дослідження можливості застосування розробленої методики у оборонній промисловості



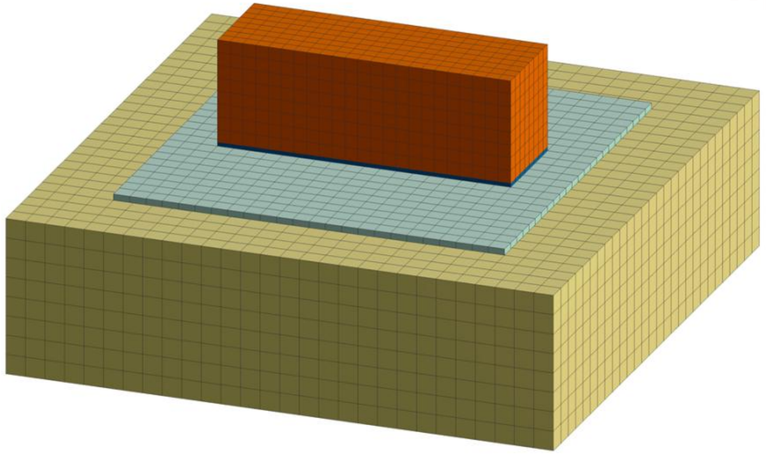
Пластина зі сталі Quardian 500

Пластина матеріалу Quardian 500, заглиблена у піщаний ґрунт

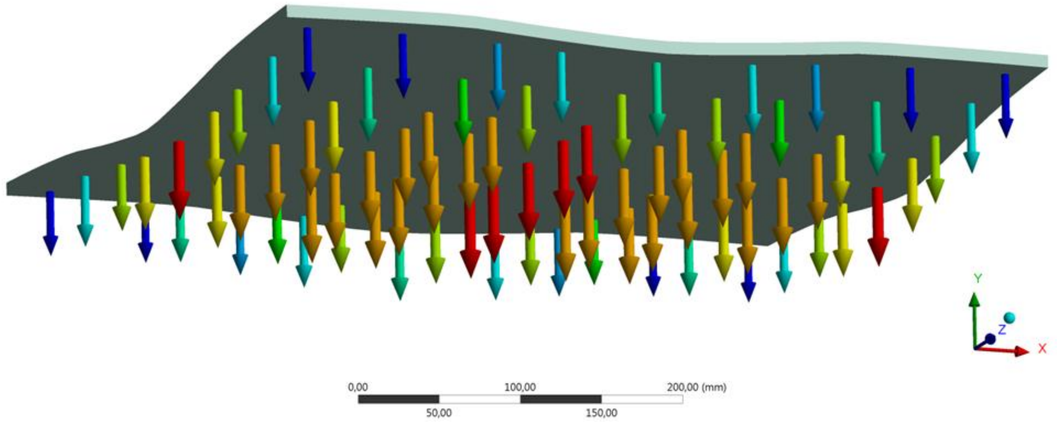
Пластина матеріалу Quardian 500 зі встановленим зарядом вибухової речовини і детонатором

Пластина-ударник зі сталі Г13Л

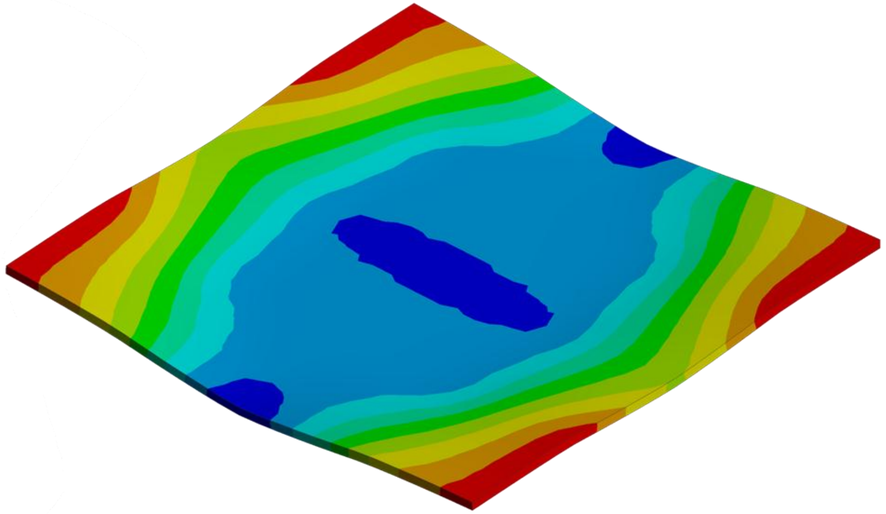
Дослідження можливості застосування розробленої методики у оборонній промисловості



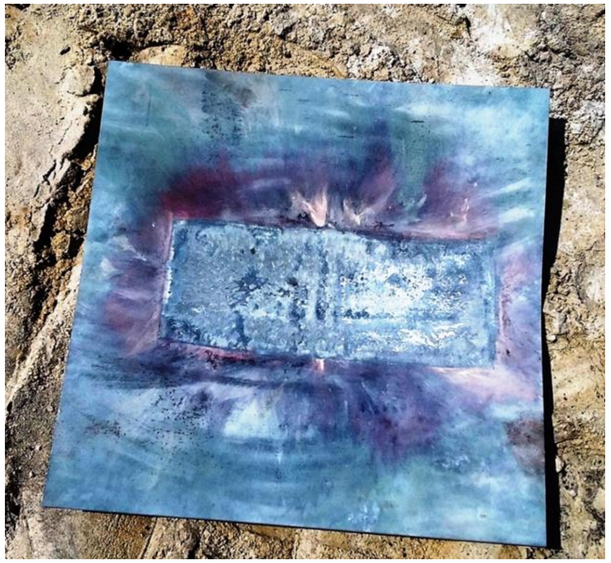
Загальний вигляд розрахункової скінченно-елементної моделі вибухового навантаження пластини



Вектори напрямку та інтенсивності деформацій пластини

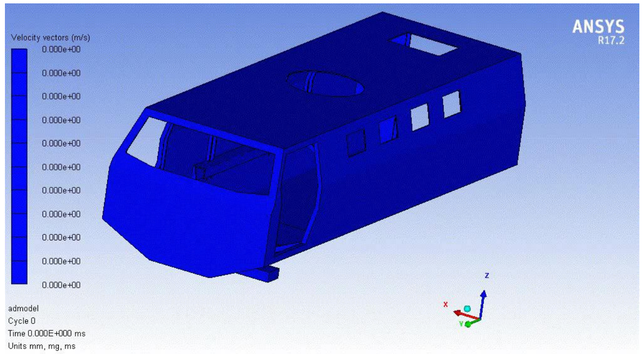


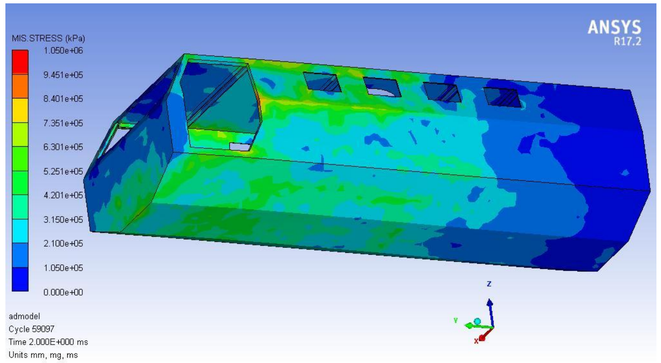
Епюра деформацій досліджуваної пластини вздовж вісі Y



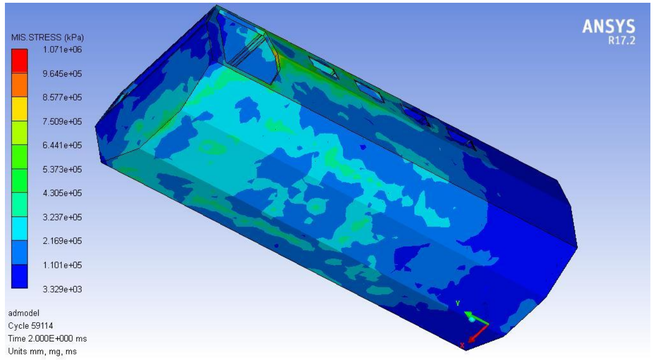
Дослідна пластина, деформована після вибухового навантаження

Дослідження можливості застосування розробленої методики у оборонній промисловості (підрив заряду під центром автомобіля)

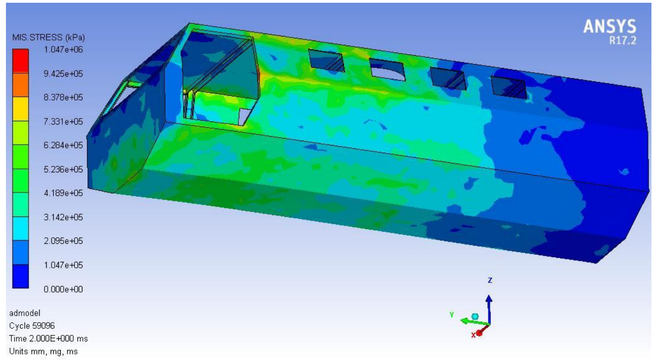




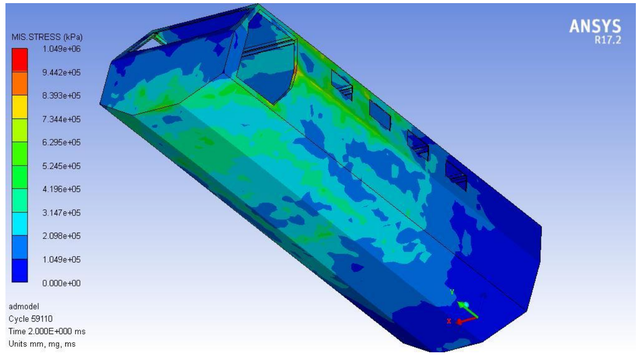
10 кг



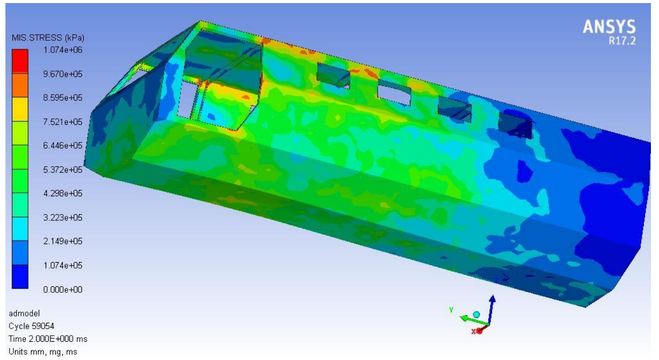
6 кг



14 кг

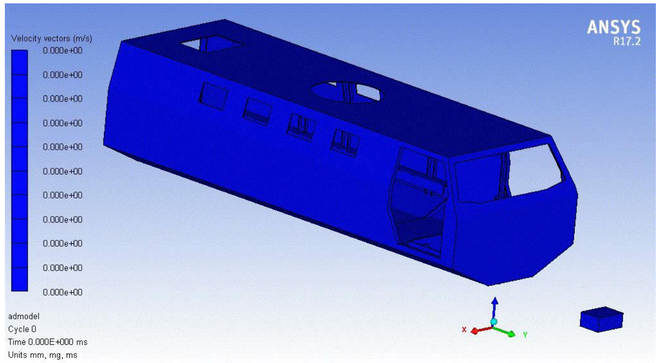


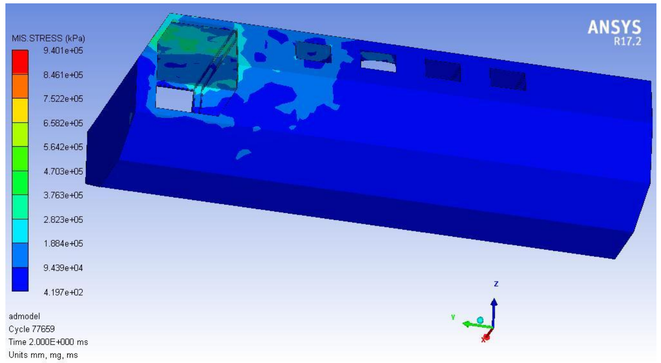
8 кг



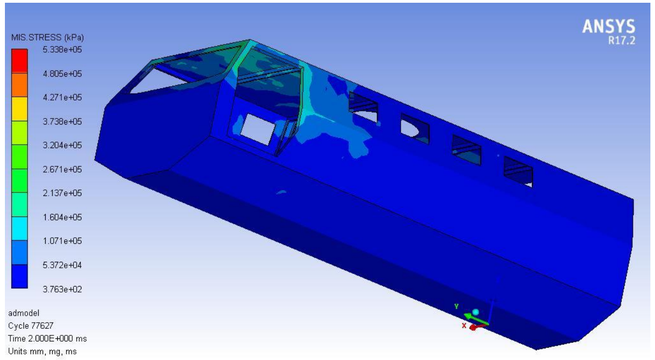
20 кг

Дослідження можливості застосування розробленої методики у оборонній промисловості (підрив заряду під переднім колесом автомобіля)

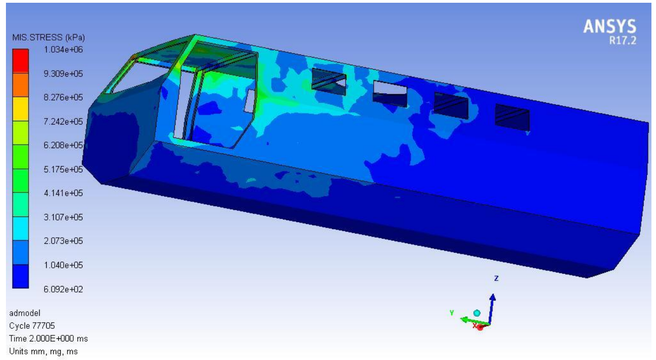




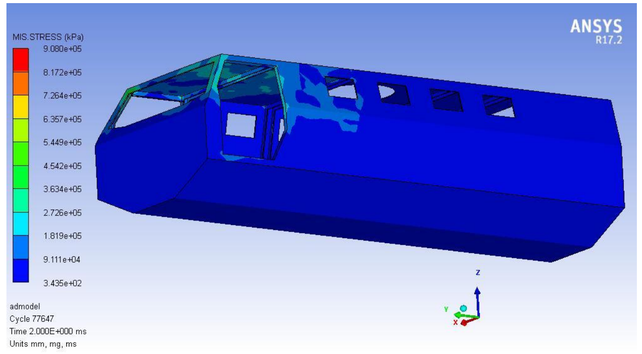
10 кг



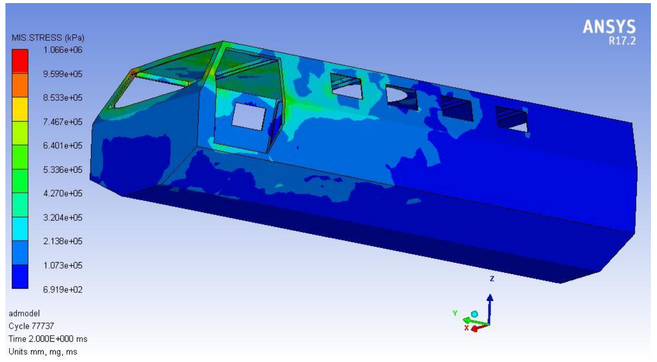
6 кг



14 кг

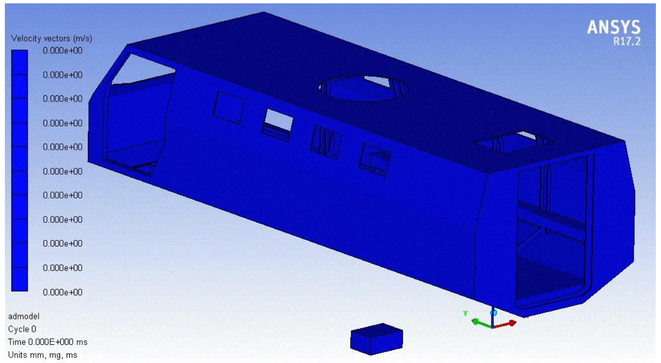


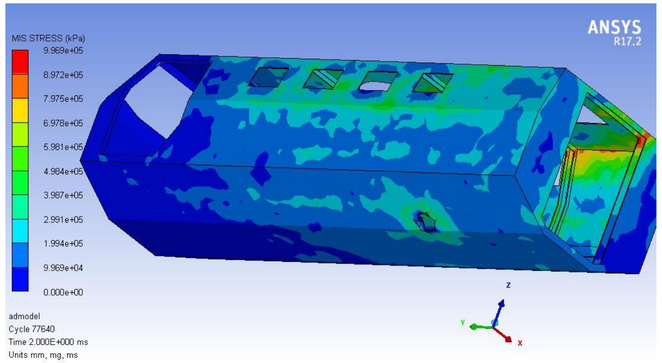
8 кг



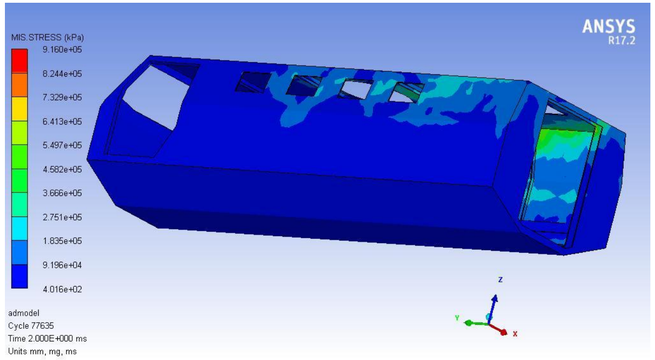
20 кг

Дослідження можливості застосування розробленої методики у оборонній промисловості (підрив заряду під заднім колесом автомобіля)

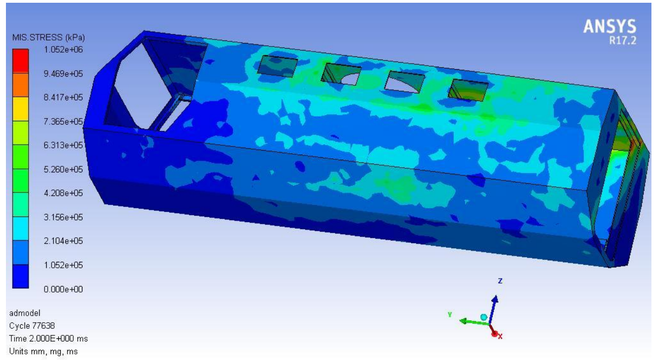




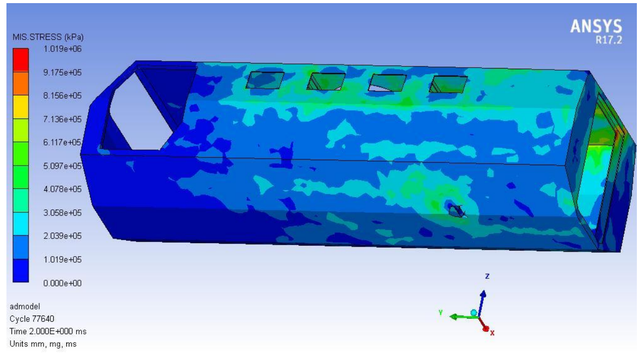
10 кг



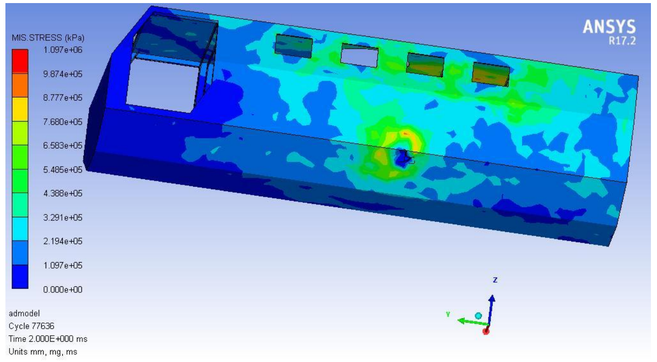
6 кг



14 кг

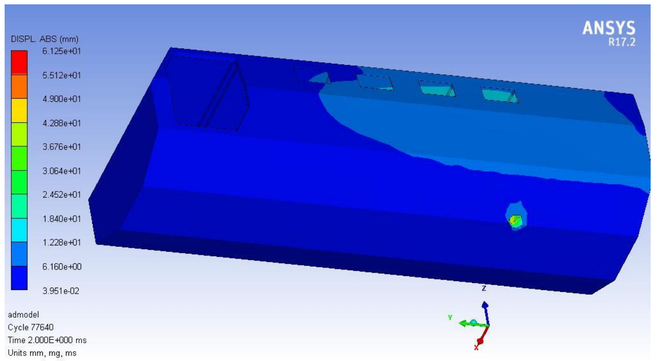


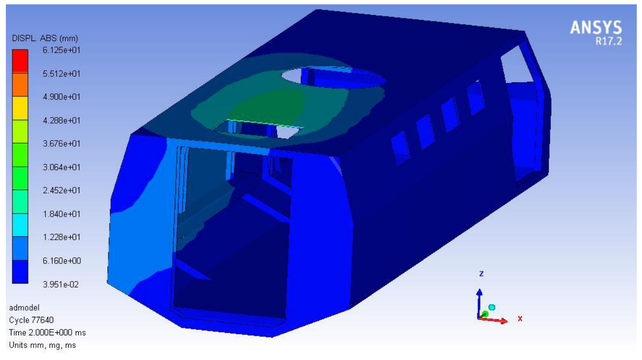
8 кг



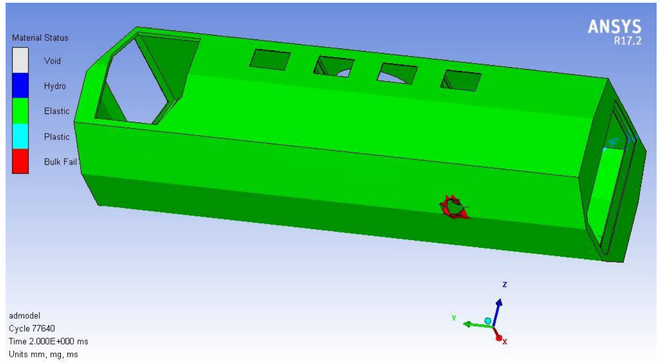
20 кг

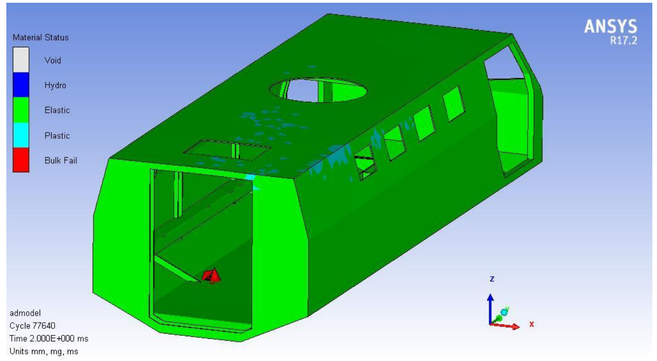
Дослідження можливості застосування розробленої методики у оборонній промисловості (підрив заряду під заднім колесом автомобіля)



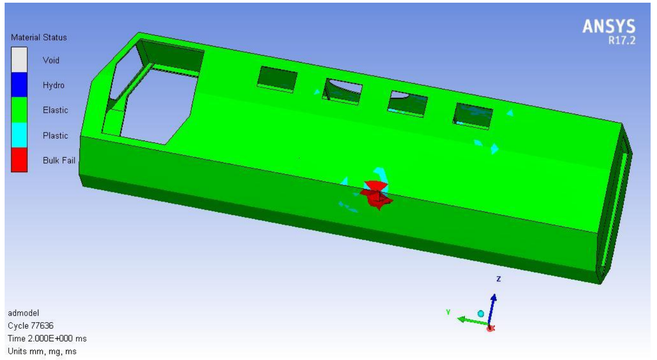


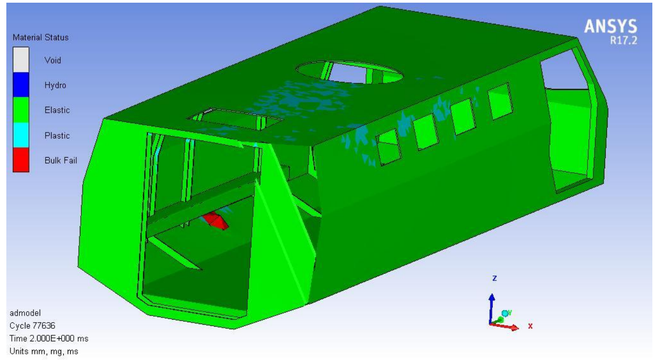
8 кг





10 кг

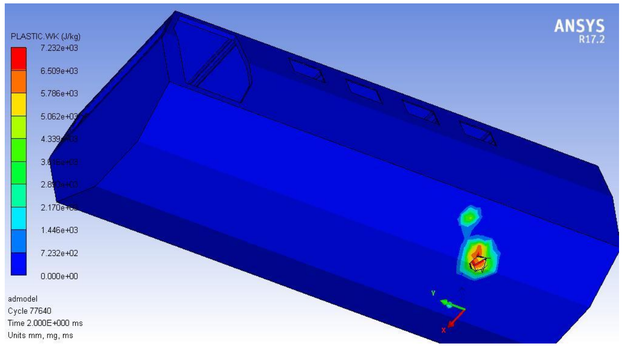




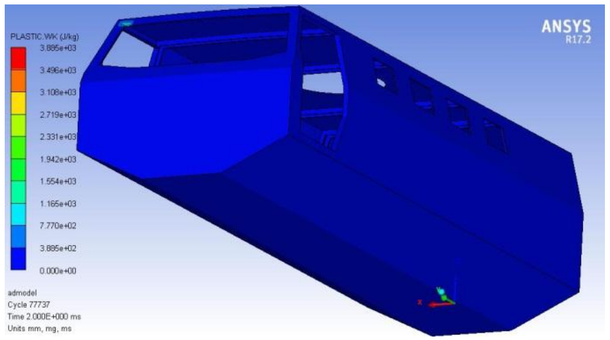
20 кг

Дослідження можливості застосування розробленої методики у оборонній промисловості (підрив заряду під заднім колесом автомобіля)

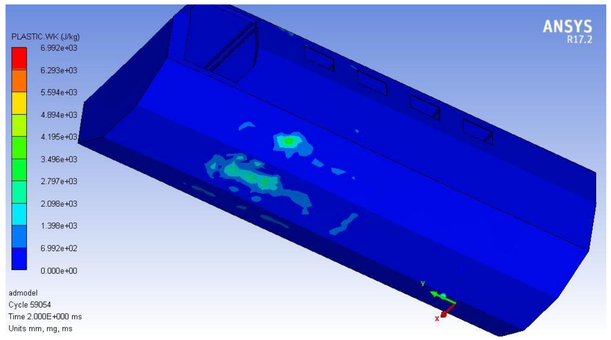
Робота пластичної деформації



підрив 8 кг під заднім колесом

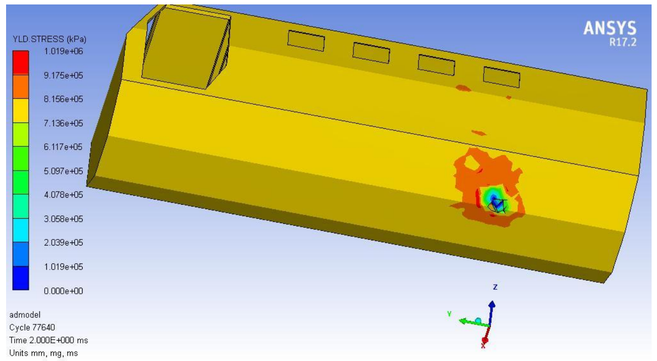


підрив 20 кг під переднім колесом



підрив 20 кг під центром днища

Напруження плинності



підрив 8 кг під заднім колесом

Основні результати та висновки

– Визначено рівняння напруженого стану в точці матеріалу за умов імпульсного навантаження, встановлено способи визначення головних напружень й інваріант тензора напружень з урахуванням імпульсного характеру навантаження.

– Встановлено характер поведінки ударної хвилі, що утворюється внаслідок детонації вибухової речовини. Складено аналітичні залежності взаємодії ударної хвилі з навантажуваною поверхнею.

– Розроблено математичний апарат розрахунку таких параметрів ударної хвилі як тиск фронту детонації і його зміна у часі та швидкість ударної хвилі у момент виходу на поверхню.

– Розроблена ітераційна процедура, яка дозволяє визначати поточні значення напружень та деформацій, що проходять через точки кривої дійсних напружень, а також інтенсивності напружень та деформацій при імпульсній обробці металів.

– На основі розв’язку рівнянь рівноваги при зіткненні плакуючої пластини (облицювання) з цільовою пластиною в процесі зварювання вибухом отримані залежності динамічних напружень стиску від виникаючого тиску вибухового навантаження. Це робить можливим визначення механізму формозміни плакуючого шару при імпульсному навантаженні до та під час зіткнення з цільової пластиною.

– Проведено якісний аналіз розроблених моделей та виконано порівняння значень, отриманих при числовому моделюванні у системі Ansys AUTODYN напружено-деформованого стану оболонкових заготовок при штампуванні вибухом з застосуванням ітераційної процедури, з натурними експериментами.

– Проведено експериментальне дослідження динамічного вибухового навантаження сталі Quardian 500 і співставлення отриманих результатів з аналітичними розрахунками, отриманими у системі Ansys AUTODYN із застосуванням розробленої ітераційної процедури. Визначена адекватність розробленої математичної моделі числового дослідження вибухового навантаження результатам натурного експерименту.

– Із використанням запропонованої у роботі аналітичної методики виконано теоретичний розрахунок протимінної стійкості кузовів спеціалізованих броньованих автомобілів КрАЗ «Shrek» та КрАЗ «Fiona» згідно вимог договору по стандартизації NATO AEP-55 STANAG 4569 – детонація заряду вибухової речовини масою 6, 8 і 10 кг під кожним колесом і центром автомобіля та детонація заряду вибухової речовини масою 14 і 20 кг під кожним колесом і центром автомобіля.