

Българска академия на науките
Институт по информационни и комуникационни технологии
Секция: „Вградени интелигентни технологии“

ДИ С Е Р Т А Ц И Я

за получаване на образователна и научна степен „ДОКТОР“

автор: маг. инж. Станислав Димитров Гьошев

Тема:

Изследване на управляеми ударни процеси.

научна област: 5. Технически науки

професионално
направление: 5.2. Електротехника, електроника и автоматика.

научна специалност: 02.21.10. Приложение на принципите и методите на кибернетиката в различни области на науката

научен ръководител: проф. д-р Димитър Неделчев Карастоянов

Благодарности

Благодаря на своя научен ръководител проф. д-р Димитър Карастоянов, за ползтворната съвместна работа, за всички съвети и градивните критики, които отправи.

Благодаря на проф. д.м.н. Галя Ангелова, ръководител на проекта ACOMIN, за осигурената помощ и лабораторно оборудване с помощта на което станаха възможни повечето изследвания в дисертацията.

Дълбока благодарност и признателност дължа и на проф. д-р Тодор Нешков, доц. Тодор Пенчев и доц. Любен Клочков от Технически Университет – София за методологичната помощ, съветите и препоръките, без които настоящата дисертация не би се случила.

Съдържание

Благодарности.....	2
УВОД.....	6
ГЛАВА 1. Литературен обзор за областите на приложение на ударни технологични процеси.....	7
1.1. Основни зависимости от механиката на удар.....	7
1.1.1. Класически разглеждания за удар на сфера.....	7
1.1.2. Съвременни изследвания за удар на сфера.....	10
1.2. Ударни технологични процеси за пластична деформация.....	13
1.3. Брикетирание на метални стружки с удар.....	17
1.4.1 Забиване на пилоти на суша.....	20
1.4.2. Забиване на пилоти под вода.....	24
1.5. Същност и теоретични основи на управляем удар.....	25
1.5.1. Определяне силата на отскока $P_{отс}$ на шамповъчен чук.....	26
1.5.2. Конструкция и приложение на промишлен чук за горещо обемно шамповане, работещ с управляем удар.....	29
1.5.3. Конструкция на лабораторен чук за изследване на управляем удар.....	33
Цел и задачи.....	35
ГЛАВА 2. Теория на управляем удар.....	36
2.1. Цел на изследванията.....	36
2.2. Определяне силата на отскока $P_{отс}$ на шамповъчен чук.....	36
2.2.1. Кинематичен подход.....	36
2.2.2. Енергетичен подход.....	39
2.2.3. Динамичен подход. Определяне на $P_{отс}$ при действие на тягата R в момента на удар.....	40
2.3. Уравнения за движение при допълнително действие на външни сили, приложени към падащото тяло с променлива маса.....	41
2.3.1. Съпротивлението на средата $\bar{S}$ зависи от квадрата на скоростта.....	41
2.3.2. Съпротивлението $\bar{S}$ зависи линейно от $\bar{V}$	43
2.3.3. Съпротивлението $\bar{S}$ е линейна функция от положението на тялото, определено с координатата му x	44
2.3.4. Уравнения за движение на чук задвижван с ИРД.....	45
2.3.5. Графично представяне на резултатите.....	47
2.4. Математично моделиране на динамичния процес при подготвителна фаза (движение на горе).....	48
2.4.1. Функция на скоростта на движение.....	48

2.4.2. Уравнение на движение	52
2.4.3. Уравнение на скоростта и уравнение на движението на ракетното устройство, след спиране на горенето в ракетните двигатели на ракетното устройство.....	53
2.4.4. Динамика на ракетно ударно устройство за реализация на технологичния подготвителен режим	54
2.4.5. Определяне на скоростта на изтичане на реактивната струя от реактивен двигател и създаваната тяга при гориво керосин и окислител въздух.....	55
2.4.6. Компютърен експеримент за случая на задвижване на бойник на чук с два ракетни двигателя.....	57
2.4.7. Компютърен експеримент за случая на задвижване на бойник на чук с три ракетни двигателя.....	61
2.5. Моделиране удар на сфера при продължаващо действие на външна сила (комбиниран удар) с МКЕ.....	66
2.5.1.Схема за моделиране с МКЕ.....	66
2.6. Моделиране с МКЕ на деформационния процес при сплескване.....	68
2.6.1. Въведение.....	68
2.6.2. Изследване влиянието на скоростта на удара върху параметрите на деформационния процес при сплескване.....	69
2.6.3. Влияние на допълнителна външна сила, приложена на чука по време на удара, върху параметрите на деформационния процес при сплескване.....	72
2.6.4. Моделиране формата на деформираните образци	73
2.6.5. Обсъждане на резултатите от моделирането	74
ГЛАВА 3. Резултати от лабораторни експерименти за пластична и еластична деформация чрез сплескване в условия на комбиниран удар. Анализ на резултатите. Изводи.	75
3.1. Въведение удар пластично тяло.....	75
3.1.1. Опитна уредба.....	76
3.1.2. Материал и размери на образците	77
3.1.3. Резултати от експерименти за пластична деформация чрез сплескване на цилиндрични образци от олово с постоянно отношение H/D	78
3.1.4. Резултати от експерименти за сплескване на цилиндрични образци от олово с различно отношение H/D	81
3.1.5 Резултати от втора серия експерименти за пластична деформация чрез сплескване на цилиндрични образци от олово с постоянно отношение H/D	89
3.2. Въведение удар еластично тяло.....	92
3.2.1. Постановка на експеримента.....	93
3.2.2. Удар върху еластично тяло.....	94
3.2.3. Заключение.....	97

ГЛАВА 4. Резултати от лабораторни експерименти за брикетиране на метални стружки и уплътняване на железен прах в условия на комбиниран удар. Анализ на резултатите.	
Изводи.	98
4.1. Цел на експериментите	98
4.2. Методика на експеримента	98
4.2.1. Използвани материали.	99
4.3. Резултати от лабораторни експерименти за брикетиране с удар на метални стружки	100
4.4. Резултати от 2-ра серия лабораторни експерименти за брикетиране с удар на метални стружки	112
4.4.1. Въведение	112
4.4.2. Методика за брикетиране на стружки	115
4.4.3. Резултати от брикетиране	118
4.5. Резултати от проведените експерименти за уплътняване на железен прах.	125
4.5.1. Резултати от уплътняване на железен прах	125
4.6. Пластична деформация на брикети от стружки на Al – сплав	128
4.6.1. Проведени са експерименти за обратно изтичане на студено.	128
4.7. Изводи	132
4.7.1. За резултатите от брикетиране.	132
4.7.2. За резултатите от уплътняване на метален прах	132
4.8. Възможност за внедряване на брикетиране и уплътняване на метални прахове със сложен удар.....	133
Заклучение	135
Приноси в дисертационния труд	136
Списък на използвана литература	137
Декларация за оригиналност на резултатите.....	142
Публикации на докторанта по темата на дисертацията	143

УВОД

Изследванията, свързани с удар между две тела получават първоначална теоретична обосновка във фундаменталният труд на Нютон „Математически начала на натуралната философия” [5]. В резултат на проведени експерименти за удар, след свободно падане на сферични тела в масивна плоча, той въвежда „коефициент на възстановяване” e , който и днес има голямо приложение в тази област. Следващите разработки определят две области за изследване на ударни явления:

- удар, при който не се отчитат вълнови процеси, тъй като енергията изразходвана за генериране на вълни е пренебрежимо малка. Тук се отнасят случаите на удар между две сфери и удар между свободно падаща сфера и масивна неподвижна плоча;
- удар, при който се наблюдава възникване и разпространение на вълни в контактуващите тела. Към тази област се отнасят случаите на челен удар по прът, напречен удар по гредата или система от греди, удар по мембрана.

В Глава 1 е направен литературен обзор на областите за приложение на ударните процеси.

В Глава 2 е направена теоретична обосновка на „управляем удар“ и са предложени иновативни решения за подобряване качеството и намаляване енергийните разходи при използване на ударни процеси.

В Глава 3 са дадени резултати от лабораторни експерименти за еластична и пластична деформация, като е показано действието на „управляем удар“. Показани са предимствата на „управляемия удар“ спрямо „обикновен удар“.

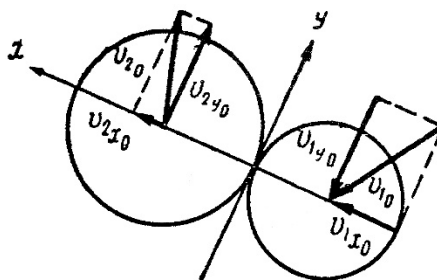
В Глава 4 са направени експерименти за брикетиране на стружки и уплътняване на железен прах. Разгледани са нови методики за брикетиране.

ГЛАВА 1. Литературен обзор за областите на приложение на ударни технологични процеси.

1.1. Основни зависимости от механиката на удар

1.1.1. Класически разглеждания за удар на сфера

Изследванията в настоящата работа са свързани с конкретни технологични процеси, при които се използват ударни сили: обемно щамповане на чукове, брикетирание и забиване на пилоти. В първите два процеса не се отчитат вълнови процеси. При забиване на пилоти се нанасят последователни челни удари върху пилот (прът) с дължина 6 -12 метра в резултат на което в пилота възникват и се разпространяват надлъжни вълни. Следователно в



Фигура 1. Схема на скоростите при централен удар на постъпателно движещи се сфери, за случая $f \neq 0$

настоящата работа е необходимо да се изследват теоретично и експериментално ударни процеси и от двете области, при допълнително въздействие на силата прилагана от Индустриален Ракетен Двигател (ИРД).

Теоретичните разглеждания на ударните явления при централен удар на две сфери и при удар на сфера по масивна плоча се базират на зависимости получени при използване на скоростите на движещите се тела преди и след удара. На фиг.1 е показана схемата при централен удар на две сфери. Ако сферите са идеално гладки (коефициента на триене $f = 0$), тангенциалните компоненти на скоростите след удара също са нула. При $f \neq 0$ тангенциалните компоненти на скоростите са различни от нула. На фигурата и в по нататъшните разглеждания скоростите на двете сфери V_1 , V_2 преди удара са означени с индекс 0, а след удара с индекс f . Масите на двете тела са съответно m_1 , m_2 .

Като се използват зависимостите за импулса на силите в момента на удара, за коефициента на възстановяване e при удар на две сфери, се получава [1,2,3,4,5,6]

$$e = \frac{(V_{2,xf} - V_{1,xf})}{(V_{1,x0} - V_{2,x0})} \quad (1.1)$$

При идеално твърди тела $V_{1,x0} = V_{1,xf}$; $V_{2,x0} = V_{2,xf}$ и $e = 1$. При идеално пластични тела $V_{1,xf} = V_{2,xf}$ и $e = 0$.

За случая на удар на сфера по неподвижна масивна плоча $V_{2,x0} = V_{2,xf} = 0$ и за коефициента на възстановяване се получава (ако се разглеждат абсолютните стойности на съответните скорости)

$$e = \frac{(V_{1,xf})}{(V_{1,x0})} \quad (1.2)$$

Като се използва коефициентът на възстановяване e , нормалните скорости на двете тела след удара се определят от зависимостите

$$\begin{aligned} V_{1,xf} &= V_{1,x0} - (1+e) \frac{m_2 V_{1,x0} - m_1 V_{2,x0}}{m_2 + m_1}; \\ V_{2,xf} &= V_{2,x0} - (1+e) \frac{m_2 V_{1,x0} - m_1 V_{2,x0}}{m_2 + m_1}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Изменението на кинетичната енергия се пресмята по формулата

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \sum_i m_i V_{i,xf}^2 - \frac{1}{2} \sum_i m_i V_{i,x0}^2$$

и след заместване на $V_{i,xf}$ с техните равни от (1.3) се получава

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (1 - e^2) (V_{1,x0} - V_{2,x0})^2 \quad (1.4)$$

От (1.4) се вижда, че загубата на енергия $\Delta E_k = 0$ при абсолютно твърди тела, за които $e = 1$. При абсолютно пластични тела, за които $e = 0$

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (V_{1,x0} - V_{2,x0})^2$$

За случая на удар на свободно падаща сфера в масивна плоча ΔE_k се определя по формулата

$$\Delta E_k = m_1 g (h - h^*)^2 \quad (1.5)$$

където: h е височината от която пада сферата, а h^* е височината на отскока. Като се вземе пред вид формулата за определяне на скоростта при свободно падане $v = v_{1,x0} = \sqrt{2gh}$ и $V_{2,x0} = 0$ от (1.4) и (1.5) се получава (при $m_2 \gg m_1$)

$$e^2 = \frac{h^*}{h} \quad (1.6)$$

Първоначално се е приемало, че коефициентът на възстановяване зависи само от свойствата на материала на удрящите се тела. По-точните пресмятания, че този коефициент зависи и от масата, формата и относителните скорости на удрящите се тела [7]. Например, в [8] е показано, че коефициентът на възстановяване има по-големи стойности при удар на две сфери от материал, чувствителен към скоростта на деформация, отколкото при материал нечувствителен към този параметър. [7]

При удар на две сфери от различни материали коефициентът $e_{1,2}$ се определя по формулата

$$e_{12} = \frac{e_{11}E_2 + e_{22}E_1}{E_1 + E_2} \quad (1.7)$$

където: e_{11} , e_{22} са коефициенти на възстановяване при удар на тела от съответни еднакви материали, а E_1 , E_2 са модули на еластичност.

За определяне на силата F , действаща в момента на удар и времето τ на контакта, се използва теорията на Херц, която отчита еластичните деформации в мястото на контакта. Силата F се определя от зависимостта [8]

$$F = k_2 a^{\frac{3}{2}} \quad (1.8)$$

където: a е големият диаметър на елипсата, получена в резултат на еластичната деформация в мястото на контакт; k_2 – коефициент. Елиптично петно на контакт се получава, когато контактуващите тела имат формата на хиперboloиди. При контакт на сфери петното на контакт е окръжност и в този случай a е диаметър на окръжността. След определяне на a и k_2 за силата F се получава

$$F = \frac{1.14V_0^2}{k_1\alpha_m} \sin\left(\frac{1.068V_0t}{\alpha_m}\right); \quad 0 \leq t \leq \frac{\pi\alpha_m}{1.068v_0}; \quad \left. \begin{array}{l} \\ F = 0; \quad t > \frac{\pi\alpha_m}{1.068V_0}. \end{array} \right\} \quad (1.9)$$

1.1.2. Съвременни изследвания за удар на сфера

В съвременните изследвания на ударните явления свързани с удар на две сфери или на сфера по неподвижна плоча, се правят редица допълнителни уточнявания в постановката на задачата, по-важни от които са:

- видът на материала на удрящите се тела, който се дефинира като еластичен, еластично - пластичен с уякчаване, еластично - идеално пластичен, идеално пластичен. За пластичен и идеално - пластичен материал се взема пред вид и чувствителността към скоростта на деформация. При това се изследват комбинациите от тези материали за всяко от удрящите се тела. Например, при удар на сфера в плоча се разглеждат следните случаи: и двете тела са от материал с еластични свойства; плочата е от еластичен, а сферата от еластично-идеално пластичен материал и т.н. [8,9,10,11,12,13];

- скоростта в момента на удара. В зависимост от тази скорост ударът може да бъде „удар с малка скорост” и „удар с голяма скорост”. Това разделение е от значение при еластично - пластични, еластично - идеално пластични и идеално пластични среди. Съществуват няколко критерия за определяне горната граница на „удар с малка скорост”. Първият критерий е според получаваната деформация и дефекти на структурата [14,15,16,17]. Този критерий обаче не може да задоволи напълно изискванията, тъй като не взема под внимание геометрията на контактната повърхнина и свойствата на удрящото тяло. По-универсален е критерия на Stronge [18], според който при „удар с малка скорост” се получават контактни напрежения които предизвикват малки пластични деформации, заемащи малка част от контактната повърхнина. При „удар с голяма скорост” се наблюдава голяма пластична деформация в близост до контактната повърхнина, която е резултат на пластично изтичане;

- работи се с усъвършенствана теория на Херц [14] , която дава по-точни резултати при определяне параметрите на удара: сила възникваща в момента на удара, време на контакт, скорост на отскок и др.

В е разгледана деформацията на две сфери под действие на приложените сили Р – фиг.2. В съответствие с модифицираната теория на Херц се въвеждат параметрите „еквивалентен модул на еластичност” E^* и „еквивалентен радиус на контактна кривина” $1/R^*$

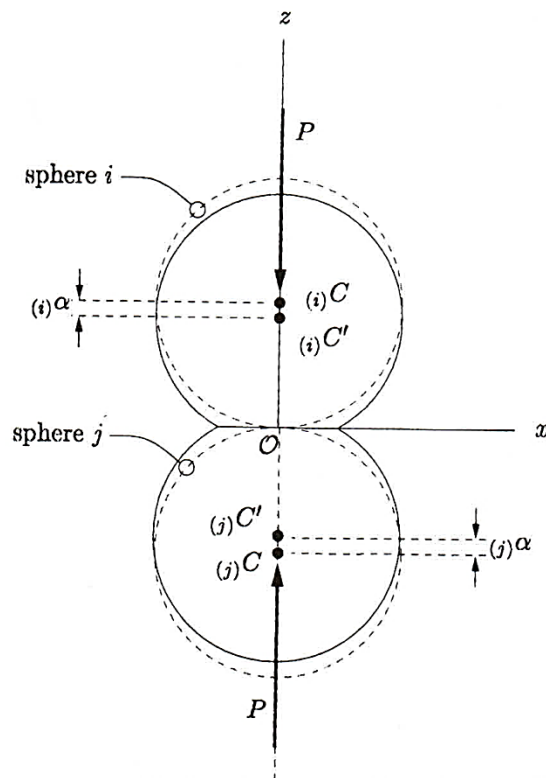
$$E^* = \left(\frac{1 - V_i^2 + 1 - V_j^2}{E_i - E_j} \right) \quad (1.10)$$

$$\frac{1}{R^*} = \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \right), \quad (1.11)$$

където с ν_i , E_i , R_i са означени скоростта, модула на еластичност и радиуса на сферата i , а с ν_j , E_j , R_j - скоростта, модула на еластичност и радиуса на сферата j . На фиг.2 и фиг.3 е показана контактната област, а на фиг.5 и диаграмата за разпределение на контактното налягане p . За произволна точка A , която е на разстояние r от центъра на контактната площ, налягането $p(r)$ се определя от изрази

$$p(r) = p_m \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1.12)$$

където максималното налягане p_m е функция на силата P и се определя по формулата

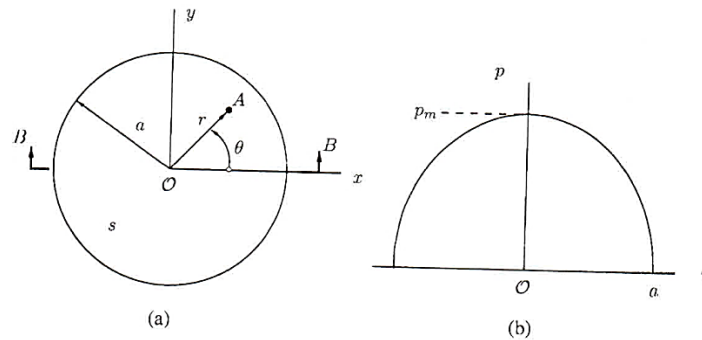


Фигура 2. Контакт на две сфери при действие на нормални сили P

$$p_m = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (1.13)$$

а радиусът a на контактната повърхнина от израза

$$a = \left(\frac{3PR^*}{4E^*} \right)^{1/3} \quad (1.14)$$



Фигура 3. *Контактна площ (a) и разпределение на контактното налягане p в*

Като се замести (1.14) в (1.13) за p_m се получава

$$p_m = \frac{3P}{2\pi a^2} = \left(\frac{6P(E^*)^2}{\pi^3(R^*)^2} \right)^{1/3} \quad (1.15)$$

Според теорията на Херц контактната площ между двете сфери е много по-малка от радиусите на сферите, т.е. $a \ll R_i$, $a \ll R_j$.

Времето τ за контакт между еластична сфера и твърда плоча се определя от модифицираната теория на Херц по формулата

$$\tau = 2.94 \left(\frac{1.25\sqrt{2}\pi\rho(1-\nu^2)}{E} \right)^{2/5} \quad (1.16)$$

където: ρ е специфично тегло на материала на сферата. В работата [16] е изследвана точността на (1.18) чрез моделиране на процеса с МКЕ(Метод на Крайни Елементи).

При удар без триене на сфера от еластично - идеално пластичен материал върху твърда плоча, се използва теорията на Херц и условието за пластичност на Мизес.

Връзката между границата на провлачване σ_Y и силата при която се получава пластично течение P_Y се дава с израза [15]

$$P_Y = \frac{\pi^3 R^2 (1 - \nu^2)^2}{6E^2} [A(\nu) \sigma_Y]^3 \quad (1.17)$$

където $A(\nu)$ е функция на коефициента на поансон ν . Например за материал с $\nu = 0.3$, $A(\nu) = 1.613$, а за материал с $\nu = 0.4$, $A(\nu) = 1.738$.

За деформацията на двете сфери ($\alpha_i + \alpha_j$) се получава

$$\alpha_i + \alpha_j = \left(\frac{a}{R^*} \right) = \left(\frac{9P^2}{16R^* (E^*)^2} \right)^{1/3} \quad (1.18)$$

1.2. Ударни технологични процеси за пластична деформация

Чуковете за коване са първите производствени машини задвижвани с пара. От създаването им през 1837 г от Джеймс Несмит (James Nasmyth) до сега те не са претърпели съществени изменения. Чуковете за горещо обемно щамповане, които конструктивно се различават от чуковете за коване, се използват за получаване на детайли със сложна форма в няколко прехода (до 4 прехода). Съвременните конструкции чукове за коване се задвижват със сгъстен въздух, а чуковете за щамповане с въздух или течност под налягане.

Най-големи производители са Русия, Германия, Англия и САЩ. На фиг. 4 [19] е показана конструкция на съвременен чук за щамповане, задвижван със сгъстен въздух.

Като типично ударни машини чуковете се характеризират със следните основни показатели: енергия на удара (в кJ), маса на падащите части (в t) и скорост в момента на удара (в m/s). Въздушните чукове имат скорост на удара 5-9 m/s, а хидравличните 3-5 m/s, при маса на падащите части до 50 t (най-често 1.5 – 25 t).

В резултат на ударното натоварване при работа възникват еластични вълни, които се разпространяват в частите на конструкцията. В зависимост от собствената честота на отделните части, те поглъщат определена E_v част от енергията на удара E

$$E = \frac{mV^2}{2}, \text{ кJ}, \quad (1.19)$$

където m (N) е масата на падащите части, а V (m/s) е скоростта на тези части в момента на удар.

В работите е показано, че най-голяма част от E_v се поглъща от частите с най-ниска честота на трептене (наковалня). В зависимост от степента на претоварване на машината енергията за разпространение на еластични вълни е в границите на 3 – 30 %

[2], като колкото по-голямо е претоварването, толкова по-голям е този процент. Поради това в [42] се препоръчва да се работи със сили, които са по-малки от максималната сила P_m (силата, която се получава при удар без заготовка).

Силата P_d се изчислява от технолозите при разработване на технологичния процес за щамповане. Вижда се, че при чука с малка маса на падащите части Q_1 (до 4.5 t) $P_m \geq P_d$. Това означава, че пресметнатата сила за деформиране ще бъде по-малка от максималната сила, т.е. чука няма да се претоварва и енергията за разпространение на вълни ще бъде около 3 % - пренебрежимо малка. При чукове с маса на падащите части над 4.5 t винаги ще има претоварване и голяма част от енергията E ще се изразходва за разпространение на еластични вълни: до 30 % при $Q_1 = 25$ t.

Това означава, че за да се получи необходимата степен на деформация ще трябва да се нанасят няколко удара, при всеки от които се получава претоварване на елементите на чука (в най-голяма степен се претоварва буталния прът, което води до разрушаването му и чести смени).

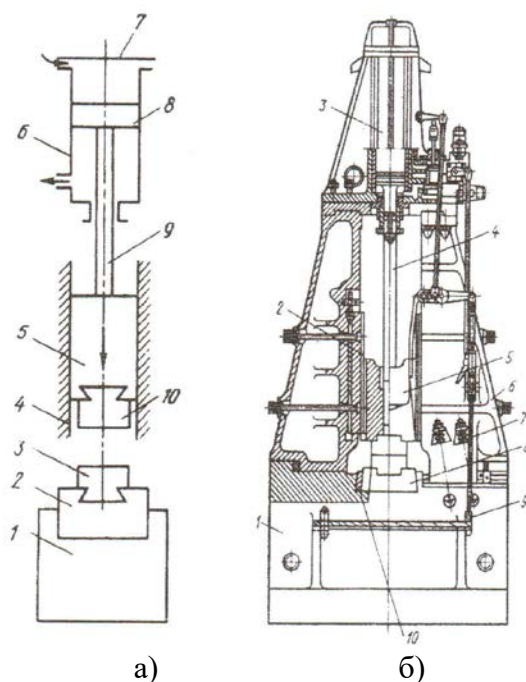
Въз основа на експериментални и теоретични изследвания са получени следните приблизителни изрази [20, 21, 22, 23, 24]:

за кривата P_m

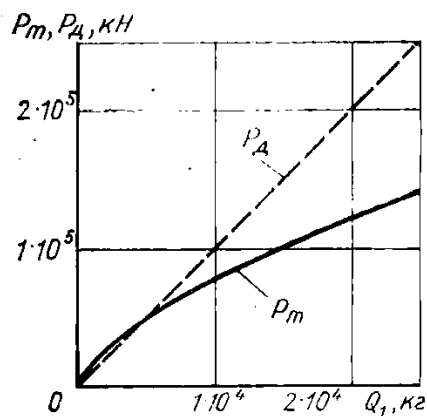
$$P_m = 18880 \left(\frac{Q_1}{1.2} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (1.20)$$

за времето на удара без заготовка (най-малко време за удар) t_y

$$t_y = 0.001 \left(\frac{Q_1}{1.2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.21)$$



Фигура 4. а) пневматичен чук за щамповане: а) схема на чук: 1 – наковалня, 2 – подложна плоча, 3 – долна щампа, 4 – направляващи, 5 – бойник, 6 – двойно действащ пневматичен цилиндър, 7 – предпазен капак на цилиндъра, 8 – бутало, 9 – бутален прът, 10 – горна щампа



Фигура 5. Връзка между силите P_m , P_d и масата на падащите част Q_1

При разглеждане на удрящите се тела (бойник и наковалня) като абсолютно твърди тела (при отчитане на еластичните деформации в контактната област), в [14] са получени по теорията на Херц следните изрази за времето на удара t_y , времето за отскок $t_{отс}$, максималната сила P_m и времето t_m за достигане на максималната сила

$$t_y = t_{y0} \frac{r_0}{r} \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{m_1}{m_0} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{v_{y0}}{v_y} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (1.21)$$

където: $r = \frac{e^{\frac{6}{5}}}{1+e}$; $\beta = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$; m_1, m_2 масите на удрящите се тела; v_y -

скорост на удара; e - коефициент на възстановяване; „0” – индекс за означаване на величини, получени по експериментален път на чук с маса на падащите части 1 t.

$$P_m = 1.57 (1+e)\beta m_1 \frac{v_1}{t_y}, \quad (1.22)$$

$$t_{отс} = \frac{e}{1+e} t_y, \quad (1.23)$$

$$t_m = \frac{t_y}{1+e}. \quad (1.24)$$

В Таблица 1 [43] са дадени стойностите на P_m , t_m и t_y за чукове с различна маса на падащите части, получени при използване на зависимостите (1.21), (1.22), (1.23). Вижда се, че:

- времето за удара t_y (при удар без заготовка) се увеличава от 0.001 s до 0.00264 s при увеличаване на масата на падащите части от 1 t до 20 t. Времето t_m също намалява с увеличаване на масата на падащите части;

- времето за удар t_y в случая е много по-голямо, отколкото при удар на сфера в неподвижна плоча – Таблица 1.2.;

Таблица 1. Стойности на P_m , t_m , t_y за чукове с различна маса на падащите части

Номинальный вес падающих частей в тс	Время удара t_y в с	Наибольшее усилие P_m в тс	Время t_m в с
1	0,00100	1 925	0,00064
2	0,00126	2 830	0,00081
3	0,00144	3 700	0,00093
5	0,00169	5 130	0,00109
5,5	0,00175	5 500	0,00113
10	0,00207	7 760	0,00134
15	0,00245	10 800	0,00158
20	0,00264	12 400	0,00170

- с нарастване масата на падащите части m_1 отношението P_m/m_1 намалява от 1.925 (при $m_1 = 1$ t) до 0.62 (при $m_1 = 20$ t), като при $m_1 = 5.5$ t, $P_m/m_1 = 1$.

В [43] е установено по експериментален път, че при деформация на заготовката, времето за удар се увеличава, а максималната сила P_m намалява, в сравнение с удар между наковалнята и бойника без заготовка. Получена е следната зависимост за определяне времето на удара, при степен на деформация по посока на удара до 0.6:

$$t_y = 2.32 \frac{\varepsilon_k}{v_y}, \quad (1.25)$$

където ε_k е крайната деформация на заготовката по посока на удара в милиметри. Например, при $v_y = 6.5 \text{ m/s}$ и $e = 15 \text{ mm}$ за времето на удара се получава $t_y = 0.00536 \text{ s}$.

1.3. Брикетирание на метални стружки с удар

Технологичният процес на брикетирание се използва за уплътняване на насипни метални частици (стружки, окалина и друг отпадък от металургичното производство), дървени стружки, дървен или въглищен прах, при което се получават брикети с различна форма (най-често цилиндрична). За да се получат брикети с достатъчна плътност и якост при дървените и въглищни брикети се добавят свързващи вещества (до 10 % от масата на брикета), а при металните брикети свързващите вещества се използват само в отделни случаи. Високоскоростно брикетирание се използва само в случаите на метални брикети.

В настоящия момент за получаване на брикети от метални стружки или други метални частици се използват механични или хидравлични преси, комплектовани с устройства за автоматично дозиране. Тези брикети се произвеждат само с цилиндрична форма. Поради нееднаквата структура на насипните стружки, дозиращите устройства не могат да осигурят достатъчно точно дозиране, в резултат на което се получава неравномерно запълване на матрицата. Механичните преси (колянови и ексцентрикови) имат точно определен ход, поради което се получават брикети с различна плътност. При хидравличните преси разликата в дозировката се отразява само на височината на брикетите, като плътността е постоянна. Поради това хидравличните преси за брикетирание са намерили по-широко разпространение от механичните, като са разработени конструкции на вертикални и хоризонтални хидравлични преси. Хоризонталните преси са по-лесни за автоматизация, затова се предпочитат пред вертикалните. Освен това, при хоризонталните хидравлични преси може да се осъществи както едностранно, така и двустранно уплътняване на материала. На фиг. 6 [63] е показана схема за брикетирание на хоризонтална хидравлична преса с едностранно уплътняване.

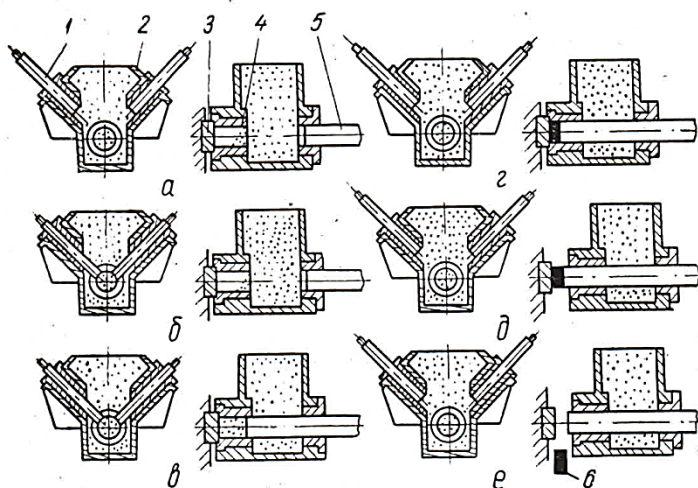
В Таблица 2[63] са дадени технически параметри на хоризонтални хидравлични преси за брикетирание, с различна максимална сила, действаща върху уплътняващото бутало. Вижда се, че това са големи машини, с маса няколко десетки тона и мощност на двигателя стотици киловати. С нарастване на силата производителността (t/h) нараства, но след това намалява, въпреки увеличените размери и маса на един брикет. Това се

дължи на намаляване скорост на преместване на уплътняващото бутало с нарастване на силата.

Стружките, които се получават в достатъчно големи количества, за да се подложат на брикетиране, са от: различни видове стомани, включително и легирани стомани; чугун; алуминий (чист алуминий и алуминиеви сплави); мед и месинг. Във военните заводи се получават в големи количества стружки от титанови и молибденови сплави.

Таблица 2. Технически характеристики на хоризонтални хидравлични преси за брикетиране

Сила, KN	2500	6300	12500
Налягане, bar	200	160	160
Маса на брикет от чугун, kg	2.5	12	31
Диаметър на брикета, mm	100	150	230
Производителност, t/h	1.5	12	8
Мощност, kw	31	112	285
Маса, t	9	27	92



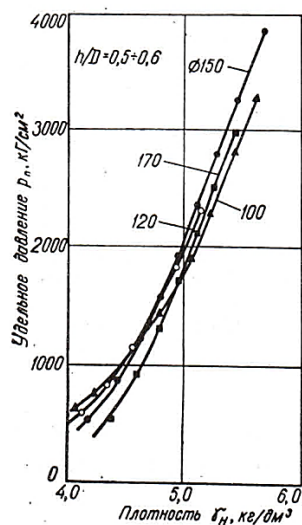
Фигура 6. Схема за уплътняване на стружки на хоризонтална хидравлична преса за брикетиране: а – изходно положение; б – преместване на трабовъчните поансони; в – начало на уплътняване в матрицата; г – край на уплътняването; д – изваждане на брикета; е – отвеждане

При един и същи коефициент на триене f плътността на брикета се повишава при увеличаване на контактното налягане p_n – фиг.7 [63]. Вижда се, че вида на зависимостта $p_n(\gamma_n)$ почти не се влияе от диаметъра на матрицата. При брикети от стоманени стружки се получават аналогични зависимости, което дава основание кривите от фиг.7 да се представят с уравнението

$$p_n = A\gamma_n + B\gamma_n + C, \quad (1.26)$$

където: $A = 425$, $B = 2100$, $C = 2000$ за чугун; $A = 485$, $B = 2830$, $C = 3900$ за стомана. За достигане на една и съща плътност налягането при брикетиране на

стоманени стружки е по-голямо, отколкото при чугунени стружки. Това се обяснява с наличието на графит в чугуна, който служи като смазка и способства за намаляване на силите от триене.



Фигура 7. Зависимост $p_n(\gamma_n)$ за чугунени брикети

В Таблица 3. [62] е показан разхода на електроенергия, за получаване на чугунени и стоманени брикети на хидравлични преси. Вижда се, че разхода е с 30 – 34 % по-малък при получаване на брикети от чугун, главно поради намаленото триене, поради наличие на графитни включения в чугуна. Влияние оказва и продължителността на цикъла на уплътняване на стружките: при чугунени стружки той е 8-10 s, а при стоманени стружки 12 – 15 s.

Таблица 3. Разход на електроенергия при брикетиране на чугунени и стоманени стружки

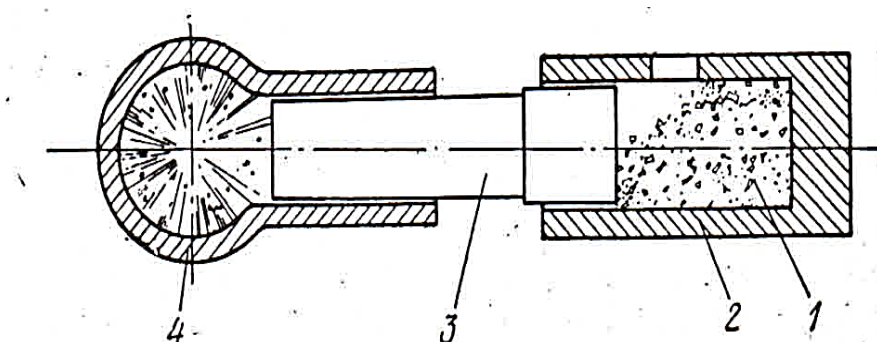
Вид на стружките	Диаметър на матрицата, mm	Средна маса на брикета, kg	Разход на електроенергия, KWh
Чугун	150	10	13.3
Стомана	150	9.4	17.8
Чугун	170	12	10.5
Стомана	170	11	15.9

За получаване на брикети с добра плътност и якост стружките трябва да имат не повече от 2% от масата им смазочно-охлаждаща течност. При 4-6% такава течност сцеплението между стружките рязко намалява и получаването на качествени брикети е невъзможно. Тук трябва да се отбележи, че получаването на брикети чрез уплътняване се дължи на подобряване на сцеплението между отделните стружки (за сметка на отстранения въздух между тях), а не чрез дифузия на материала на стружките [63].

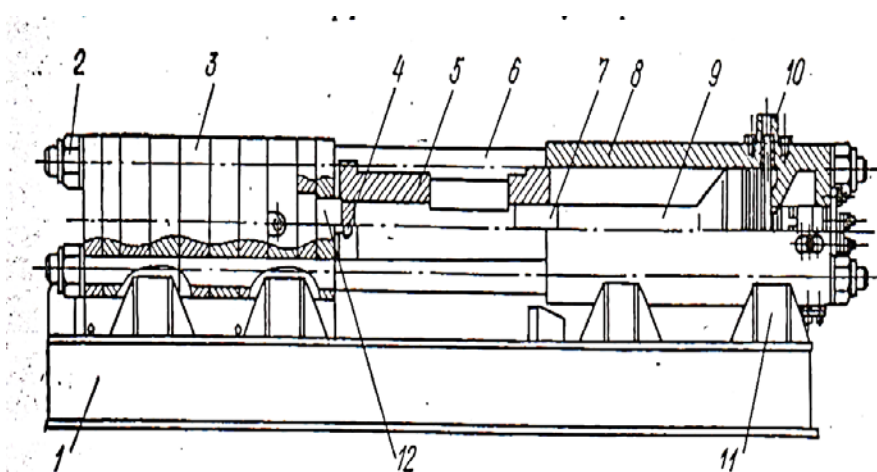
За да се установи степента на плътност и якост на брикетите те се изпитват на ударно натоварване, каквото е натоварването им при товаро-разтоварните и транспортни дейности. За целта брикета се пуска да падне три пъти върху стоманена плоча от височина един метър. Измерва се масата на брикета преди и след

експеримента и според процента на разтрошените части се определя неговото качество. Брикета се приема с добро качество ако не повече от 5% от масата му се разтрошава след трикратния удар.

За да се подобри плътността и якостта на брикетите в бивия СССР са разработени и използвани главно във вонни заводи машини за високоскоростно брикетиране. Принципна схемата на високоскоростно брикетиране е показана на фиг.8, а конструктивна схема на такава машина на фиг.9 [63]. За получаване на висока скорост на движение на уплътняващото бутало то се ускорява от газове, получени при взрив на пропан-бутан или природен газ (в по-стари конструкции са използвани взривни вещества). [25, 26, 27, 28]



Фигура 8. Принципна схема на високоскоростно брикетиране: 1 – насипани



Фигура 9. Конструктивна схема на машина за високоскоростно брикетиране: 1 – заварена рама; 2 – гайки на стягащите колониб; 3 – основа; 4 – хидравлични цилиндри за обратен ход; 5 – матрица; 6 – четири стягащи колони; 7 – уплътняващо бутало; 8 – взривна камера; 9 – бутален прът с бутало; 10 – газоразпределително устройство; 11 – опорни ролки; 12 – подложна плоча

1.4.1 Забиване на пилоти на суша

Пилотите представляват излети или забити в почвата вертикални или наклонени стълбове, които поемат товарите от връхната конструкция и ги предават на земната основа. Конструктивният елемент, който свързва главите на пилотите и разпределя

товарите от връхната конструкция между тях се нарича ростверк (фундаментна стъпка, плоча, греда) .

Пилотите се използват за:

- заздравяване и подобряване на носещата способност на слаби почви, върху които предстои изливане на фундаменти за сгради, мостове, кейове, стълбове за далекопроводи и др.;

- укрепване на почви за подобряване сеизмичната устойчивост на фундаменти за сгради;

- укрепване на речни и морски брегове за намаляване на ерозията им.

В строителството се използват следните основни видове пилоти [65]:

- забивни пилоти. Представяват дълги пръти от дърво, стоманобетон, предварително напрегнат бетон или стоманена тръба. Имат заострен край (без тези от тръба) който прониква в почвата под действие на ударна сила, прилагана от машина „чук за забиване на пилоти”. Понастоящем се използват дизелови, хидравлични и вибрационни чукове;

- набивни пилоти тип „Франки”. Получават се като в пробит в почвата отвор се поставя стоманена тръба и в нея се налива сух бетон, който се уплътнява с удари на чук. Тръбата постепенно се изтегля и се оформя бетонен стълб (пилот), заобиколен от трамбована почва. В долния край на пилота се оформя разширение на бетонния стълб (пета);

- сондажни пилоти тип „Беното”. Получават като стоманени сондажни тръби с диаметър до 2 m се врязват в почвата и чрез въртене и натиск проникват на определената дълбочина. Първата тръба е с назъбено чело, а следващите тръби се закрепват към нея с болтове. Почвата в тръбата се изгребва с грайферно устройство и тя се запълва с бетон. Максималната дълбочина на този тип пилоти е 60 m.

- анкерни пилоти. Предназначени са да поемат главно опъновни сили.

За целта на настоящата дисертация интерес представляват забивните и набивни пилоти, при които се използват машини с ударно действие – чукове за забиване на пилоти. Най-широко приложение намират двойно действащи тръбни дизелови чукове.

Забивните стоманобетонни пилоти се използват най-широко в практиката. Те се произвеждат в специализирани заводи и се транспортират до мястото на забиване. Имат следните размери:

Таблица 4. Размери на пилоти с най-широко приложение в практиката.

Сечение [cm]	Дължина [m]	Маса [t]
25/25	до 8	до 1,8
30/30	до 8	до 1,8
30/30	8-10	1,8-2,25
30/30	над 10	над 2,25
35/35	8-10	до 2,45
35/35	10-14	над 2,45

В резултат на забиването почвата около върха и околната повърхнина на пилота се уплътнява. Носимоспособността на единичен пилот се определя от вида на пилотното

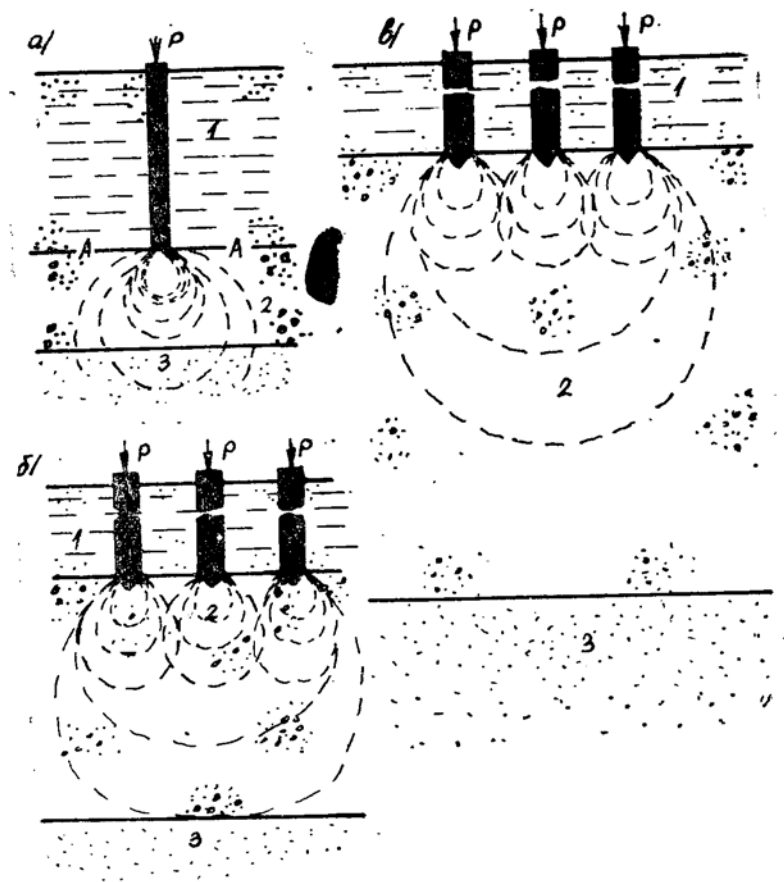
фундиране, което бива: фундиране със „стоящи” пилоти и фундиране с „висящи” пилоти. На фиг.10 [65] са показани условията за фундиране със „стоящи” пилоти. В този случай носимоспособността на пилота се определя от степента на уплътняване на почвата около върха му, който е набит в здрава почва – фиг.10а. Когато пластът здрава почва е с недостатъчна дебелина фундирането е от втора степен – фиг.10б. Вижда се, че резултантната диаграма на напреженията достига до деформируемия почвен пласт 3 и при по-малка дебелина навлиза в него. На фиг.10в е показан достатъчно дебел пласт здрава почва, като в този случай фундирането е най-качествено и се означава като фундиране от първа степен. Вижда се, че резултантната диаграма на напреженията не навлиза в деформируемия почвен пласт 3. Големината на напреженията в уплътнената почва под върха на пилота са в границите на 5 – 12 МПа [65].

При висящото пилотно фундиране върхът на пилота не достига до здрави почвени пластове и неговата носимоспособност се определя от големината на тангенциалните напрежения на триене по околната повърхнина на пилота и от степента на уплътняване на почвата около пилота в процеса на набиване. Уплътняването се осъществява под действие на нормалните напрежения на натиск, действащи в околността на пилота. От фиг.10 се вижда, че при група стоящи пилоти резултантната диаграма на напреженията прониква на по-голяма дълбочина, отколкото при единичен пилот, т.е. при група пилоти ще се получи уплътняване на почвата на по-голяма дълбочина.

За да се получи оптимален ефект от уплътняване на почвата и при двата вида пилоти, за случая на група пилоти, е необходимо минималните разстояния между пилотите да бъдат $3d$ за пилоти с дължина до 7 m и $3.5d$ за дължина над 7 m. При разстояния между пилотите $6d$ този ефект изчезва напълно [65].

За да изясним нашите очаквания свързани с подобряване на носимоспособността на пилотите при използване на ИРД, ще приведем цитат от [65] „Степента на уплътняване зависи освен от геологията на носещия пласт – от мощността на забивния уред и от рязкостта на неговия удар. Така при равна мощност на два чука този, който нанася удар за по-късо време, дава в резултат забит пилот с по-висока носимоспособност при една и съща геология”.

При използване на ИРД като допълнителен двигател в дизелов тръбен чук за забиване на пилоти, се постига увеличаване на скоростта на падане от 7 m/s до 12 m/s, без да се създават условия за възникване на разрушаващи напрежения в главата на пилота. В резултат на увеличената скорост се получава по-голяма енергия и по-малко време за забиване, което според по-горния цитат е условие за получаване на по-голяма носимоспособност, при равни други условия. Освен това по-голямото уплътняване на почвата при забиване с по-голяма скорост е предпоставка за увеличаване на разстоянието между пилотите, т.е. за забиване на по-малко на брой пилоти, при запазване носимоспособността на пилотния фундамент.



Фигура 10. Схеми на стоящо пилотно фундиране: а – стоящо пилотно фундиране на единичен пилот; б – стоящо пилотно фундиране на група пилоти при недостатъчна дебелина на носещия пласт; в – стоящо пилотно фундиране на група пилоти при достатъчна дебелина на носещия пласт; 1 – слаби пластове; 2 – здрави носещи пластове

При забиване на пилоти се употребява термина „отказ на пилота”. Той означава големината на потъване на пилота (в mm) за един удар на чука. Върху големината на отказа оказват влияние пряко или косвено следните фактори:

- енергия на удара на забивното устройство;
- маса на пилота;
- характер и вид на почвения пласт в който се забива пилота;
- сечение на пилота;
- конструкция на забивното устройство;
- дебелина на дървените подложки и тяхната твърдост.

За да има добър ефект от работата на забивното устройство се препоръчва отказът при последните 10 удара да не е по-малък от 2.5 mm/удар. От големината на отказа при последния удар се изчислява и носимоспособността на пилота [65] . Отказът има еластична и пластична компонента. [66-74]

1.4.2. Забиване на пилоти под вода

В източниците [77], [78], [79] се дават следните формули за определяне скоростта на падане под действие на собственото тегло на тяло с тегло m (kg) и напречно сечение A (m^2) като функция на времето, при различни флуиди:

а) флуид с малка гъстота (нелинейно съпротивление)

$$v(t) = \sqrt{\frac{2mg}{\rho AC_d}} \tanh\left(t \sqrt{\frac{g\rho C_d A}{2m}}\right), \quad (1.27)$$

където: g – земно ускорение (m/s^2); ρ – масова плътност на тялото (kg/m^3), C_d – коефициент на съпротивление.

При достатъчно дълъг период от време се достига максималната скорост v_t

$$v_t = \sqrt{\frac{2mg}{\rho AC_d}}, \quad (1.28)$$

която се поддържа постоянна, при понататъшно падане на тялото.

б) визкозен флуид (линейно съпротивление)

$$v(t) = \frac{(\rho - \rho_0)gV}{b} (1 - e^{-bt/m}), \quad (1.29)$$

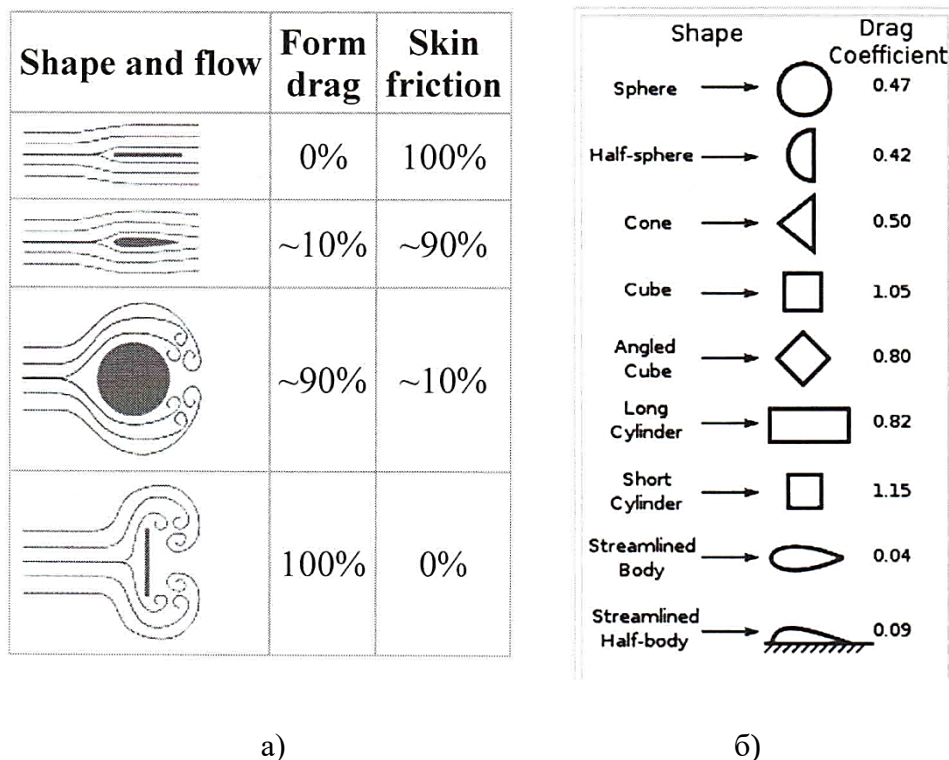
където: ρ_0 – масова плътност на флуида (kg/m^3); b – коефициент, който зависи от свойствата на флуида и от размерите на тялото.

За максималната скорост v_t се получава

$$v_t = \frac{(\rho - \rho_0)gV}{b}. \quad (1.30)$$

Трябва да се отбележи, че при дадено b , по-тежките тела падат по-бързо.

Коефициентът на съпротивление C_d зависи от два фактора: формата на тялото и триенето по околната му повърхнина – фиг. 11.



Фигура 11. а) компоненти на съпротивлението при движение на тяло във флуид, б) стойности на коефициента на съпротивление C_d при движение във флуид на тела с различна форма

На фиг.11 б) [80] са дадени стойности на коефициент на съпротивление C_d при различна форма на движещото се тяло.

1.5. Същност и теоретични основи на управляем удар

За изпълнение целта на настоящата работа е необходимо да се проведат следните теоретични изследвания в областта на механиката на ударни процеси:

- определяне силата на отскока $P_{отс}$, след края на движение на удрящото тяло надолу (скоростта на движение надолу е равна на нула). Тази сила е в резултат на действие на еластични деформации, които зависят от коефициента на възстановяване e . При известна сила $P_{отс}$ може да се определи необходимата реактивна сила R , за да се регулира ударния процес в желаните граници;

- определяне скоростта на удар V_0 при:

- а) действие на допълнителна сила R през различни етапи на движение на падащото тяло;

- б) различни закони на съпротивление на средата в която се движат удрящите се тела.

Това е необходимо за да може да се пресметне енергията на удара при експериментални изследвания и при изследване на разглежданите технологични приложения (обемно щамповане, брикетиране, забиване на пилоти на суша и под вода).

1.5.1. Определяне силата на отскока $P_{отс}$ на щамповъчен чук

Силата на отскока може да се определи по закона на Нютон $F = m \cdot a$, ако се изведе формула за пресмятане на ускорението при удар a_y . При идеално еластични тела ($e = 1$) цялата енергия се изразходва за еластична деформация поради което може да се приеме, че силата на отскока ще бъде равна на силата на удара F_y , т.е.

$$P_{отс} = F_y = m a_y, \quad (1.31)$$

където m е масата на удрящото тяло (падащите части на машината). При $0 < e < 1$ част от енергията се изразходва за пластична деформация, която част е толкова по-голяма, колкото по-малки стойности има коефициентът на възстановяване e (при идеално пластично тяло, когато $e = 0$ цялата енергия на удара се изразходва за пластична деформация). В този случай ускорението a_y ще зависи от коефициента e , т.е. $a_y = f(e)$ и

$$P_{отс} = F'_y = m a_y(e). \quad (1.32)$$

За определяне на ускорението $a_y(e)$ използваме квадратното уравнение (1.89) за скоростта на отскок на наковалнята на щамповъчен чук $V_{1,1}$, от което се получава

$$V_{1,1} = \frac{2e \cdot m_2 \cdot V_{2,0} + \left(4e^2 m_2^2 V_{2,0}^2 - 4m_2 V_{2,0}^2 (m_1 + m_2) (\eta_i + e^2 - 1)\right)^{1/2}}{4(m_1 + m_2)} \quad (1.33)$$

където: $V_{2,0}$ е скоростта на удара; m_1 , m_2 са масата на наковалнята и на падащите части съответно; η_i – к.п.д. на удара.

След преобразуване на (1.33) се получава

$$V_{1,1} = \frac{V_{2,0} (e^2 m_2^2 - m_2 (m_1 - m_2) (\eta_i + e^2 - 1))^{1/2}}{2(m_1 + m_2)} \quad (1.34)$$

За $V_{2,0}$ се получава

$$V_{2,0} = \sqrt{2gS \left(\frac{R}{m_2} + 1 \right)} \quad (1.35)$$

и като заместим (1.36) в (1.35) за $V_{1,1}$ се получава

$$V_{1,1} = \frac{\sqrt{2gS\left(\frac{R}{m_2} + 1\right)} \left(em_2 + [e^2 m_2^2 + m_2(m_1 + m_2)(\eta_i + e^2 - 1)]^{1/2} \right)}{2(m_1 + m_2)} \quad (1.36)$$

Ако положим

$$A = 2g\left(\frac{R}{m_2} + 1\right)$$

$$B = \frac{em_2 + [e^2 m_2^2 + m_2(m_1 + m_2)(\eta_i + e^2 - 1)]^{1/2}}{2(m_1 + m_2)}$$

за $V_{1,1}$ се получава

$$V_{1,1} = B\sqrt{AS} \quad (1.37)$$

Скоростта на отскок на бойника $V_{2,1}$ се получава

$$V_{1,1} = B\sqrt{AS} - eV_{2,0}$$

и като заместим $V_{2,0}$ от (1.35)

$$V_{2,1} = B\sqrt{AS} - e\sqrt{AS}$$

или

$$V_{1,1} = (B - e)\sqrt{AS} \quad (1.38)$$

В уравнение (2.8) $S = S(t)$, а останалите членове са константи. Тогава, за ускорението a_y се получава

$$a_y = \partial V_{2,1} / \partial t = \frac{(B - e)A}{2\sqrt{AS}} \partial S / \partial t \quad (1.39)$$

Като се вземе пред вид, че $\partial S / \partial t = V_{2,0}$ и след заместване на $V_{2,0}$ от (2.5) се получава

$$a_y = \frac{(B - e)A}{2\sqrt{AS}} \sqrt{AS} \quad (1.38)$$

или

$$a_y = \frac{(B-e)A}{2} \quad (1.39)$$

За силата на удара F' от (2.2) се получава

$$F'_y = m_2 a_y \frac{m_2(B-e)A}{2} \quad (1.40)$$

Силата на отскока $P_{отс}$ ще бъде

$$P_{отс} = F'_y = \frac{m_2(B-e)A}{2}$$

и след заместване на A и B с техните равни се получава

$$P_{отс} = g(R + m_2) \left(\frac{em_2 + [e^2 m_2^2 - m_2(m_1 + m_2)(\eta_i + e^2 - 1)]^{1/2}}{2(m_1 + m_2)} - e \right) \quad (1.41)$$

В Таблица 5 са дадени стойности на силата $P_{отс}$, пресметнати по (2.13), за съществуващия чук с ракетно задвижване, за който: $m_1 = 22000$ kg, $m_2 = 220$ kg, $R = 500 \div 2000$ kg, за $e = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ и $\eta_i = 0,9$. Вижда се, че със съществуващия ракетен двигател може да се постигне сила $R > P_{отс}$ при $e = 0.1$ и частично при $e = 0.15$. Тези стойности на коефициента на възстановяване се получават при горещо обемно щамповане в първи преход [3e]. При използване на високоскоростни чукове щамповането се осъществява в един преход [3a], което означава, че в разглежданите граници може да се получи „прилепващ удар” (удар без отскок).

Таблица 5. Стойности на $P_{отс}$, при $R = 500 - 2000 \text{ kg}$

R	$e = 0,1$	$e = 0,15$	$e = 0,2$	$e = 0,25$	$e = 0,3$
500	600	950	1318	1688	2069
1000	1017	1610	2234	2860	3506
1500	1434	2270	3150	4032	4943
2000	1851	2930	4066	5205	6381

1.5.2. Конструкция и приложение на промишлен чук за горещо обемно шамповане, работещ с управляем удар.

За пълноценно използване пластичността на металите при високоскоростно деформиране е необходимо правилно подбиране на температурно-скоростните характеристики на процеса. Например, при право изтичане на цинкови сплав и в условия на „статично” натоварване, добра пластичност се постига при ъгъл на входящия конус 180° . С повишаване на скоростта до 14.3 m/s за запазване на пластичността се работи с ъгъл 90° , а при скорост $33 - 48 \text{ m/s}$ ъгълът се намалява до $60^\circ - 30^\circ$ [47].

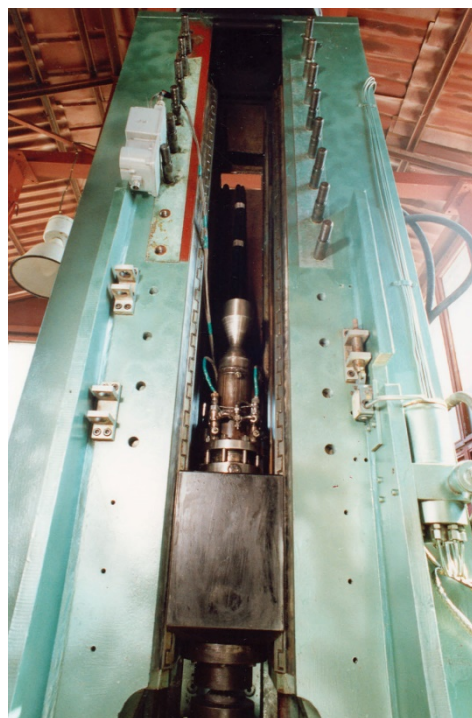
Поради рязкото нарастване на инерционната компонента на силата за деформиране при намаляване на температурата, високоскоростното шамповане трябва да се корозионно-устойчиви сплави температурният интервал е $1180 - 1130^\circ\text{C}$, докато при шамповане с обикновени скорости интервалът на шамповане е $1180 - 950$

При много големи инерционни сили се получават дефекти в изковките получени чрез изтичане, а при право изтичане е възможно откъсване на част от получавания прът.

В следващите разглеждания ще се спрем по-подробно на разработеният в Р България високоскоростен чук за шамповане, който се задвижва от ИРД [57].

На фиг.12 е показана снимка на този чук. С него е осъществено горещо обемно шамповане на няколко стотин изковки за конични зъбни колела.

На фиг.13 е показана снимка на ракетния двигател, който се използва за задвижване на чука. Двигателят работи с гориво керосин и окислител въздух, като максималната реактивна тяга е 2 тона. Чрез регулиране количеството на подаваните гориво и окислител както и на продължителността на работа на ракетния двигател се постигат скорости V_0 до 20 m/s .



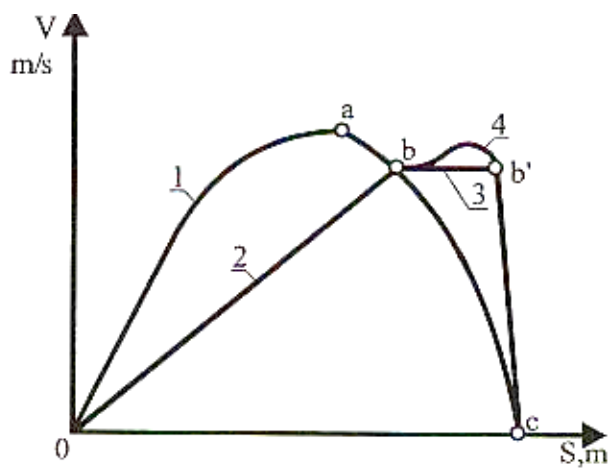
Фигура 12. Снимка на високоскоростен чук за горещо обемно щамповане задвижван от ИРД, разработен и произведен в Р България

Главната особеност на задвижване с ИРД е, че ракетният двигател може да работи както през време на ускоряващото движение надолу, така и през време на работния ход, когато се осъществява деформация на метала. В резултат на това, се постигат следните нови ефекти, при работа на тези машини :

- Регулиране скоростта на падащите части в момента на удара, чрез регулиране тягата на ракетния двигател. Газовите чукове за обемно щамповане (обикновенни и високоскоростни) имат конструктивно зададена постоянна скорост;
- Действие на притискаща сила в момента на удара, чрез регулиране на която може да се намали или да се премахне напълно отскока на подвижните части, което е прието да се означава като „прилепваш удар” [57]. Намаляването или премахването на отскока води до създаване на подобрени условия за запълване на деформация инструмент (щампи) и до намаляване на износването им, което е от съществено значение за подобряване на технологичните и икономически показатели на процеса на горещо обемно щамповане.



Фигура 13. Снимка на първия Индустриален Ракетен Двигател (ИРД) използван за задвижване на високоскоростен чук



Фигура 14. Диаграма за изменение скоростта на падащите части:
1 – на чук задвижван със сгъстен въздух; 2,3,4 – на чук задвижван с

Тези особености могат да се илюстрират с показаните на фиг.14 [57] диаграми за изменение скоростта на падащите части при газов чук и при чук задвижван от ИРД. В интервала О-а (крива 1) се осъществява ускоряване на падащите части, в резултат на изтласкване буталото на газов цилиндър от разширяващ се газ. В т.а се изключва подаването на газ и в интервала а – b има свободно падане. В т.б започва деформацията на заготовката, при която натрупаната кинетична енергия на движещите се части се отдава за пластична деформация и еластична деформация на машината и щампата. След изразходване на цялата енергия движението спира в т.с.

При използване на ИРД падащите части се ускоряват от двигателя до момента на удара (точка b). През по-голямата част на деформационния процес (bb') скоростта на подвижните части се запазва, при действие на ракетния двигател (линия 3) или дори може да се увеличи (линия 4), чрез подходящо регулиране тягата на двигателя.

От казаното до тук става ясно, че за да може да се осъществи намаляване или пълно премахване на отскока е необходимо да се познават скоростта на отскока и силата, под действие на която подвижните части на чука се преместват на горе. В работата [57] е използван енергетичен подход за определяне на скоростта на отскока след удар на подвижните части на чук за щамповане, задвижвани от ИРД и на неподвижната в момента на удара наковалня. Ако с $V_{1,0}$, $V_{2,0}$ означим скоростите на наковалнята и бойника преди удара, а с $V_{1,1}$, $V_{2,1}$ съответните скорости след удара, коефициентът на възстановяване e в случая ($V_{1,0} = 0$) ще бъде

$$e = \frac{V_{2,1} - V_{1,1}}{-V_{2,0}} \quad (1.41)$$

Откъдето за скоростта на бойника след удара $V_{2,1}$ се получава

$$V_{2,1} = V_{1,1} - eV_{2,0} \quad (1.42)$$

Кинетичната енергия на движещите се части в момента на удара ще бъде

$$E = \frac{m_2 \cdot V_{2,0}^2}{2}, \text{kgm}^2 / \text{s}^2 \quad (1.43)$$

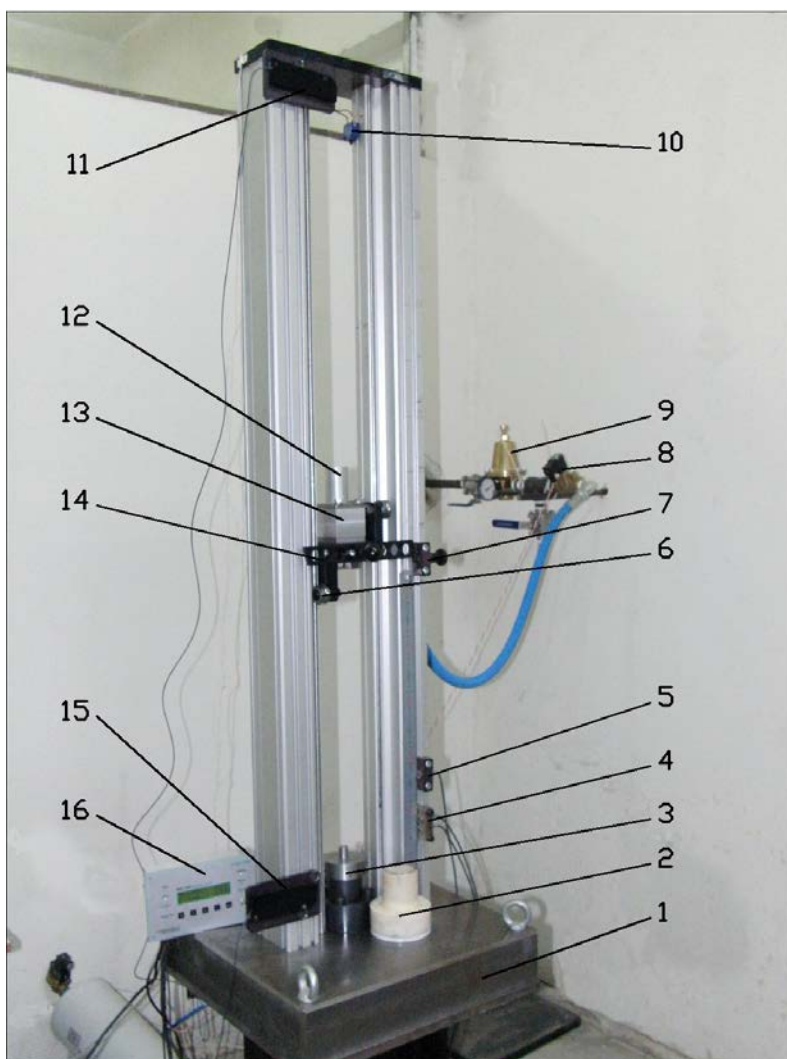
Тази енергия се изразходва за: пластична деформация на заготовката - E_d ; еластична деформация на щампата и машината- E_{el} ; триене в направляващите на машината и щампата - E_f ; for overcome of the air drag (за преодоляване на съпротивлението на въздуха) - E_{ar} ; за отскок на бойника - E_m ; за отскок на наковалнята - E_a , т.е.

$$E = E_d + E_{el} + E_f + E_{ar} + E_m + E_a \quad (1.44)$$

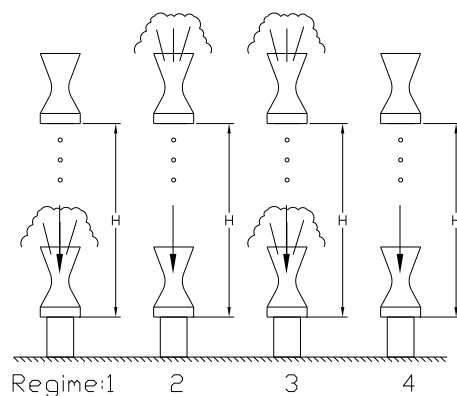
Коефициентът на полезно действие на удара η_i е

$$\eta_i = \frac{E_d}{E}$$

1.5.3. Конструкция на лабораторен чук за изследване на управляем удар.



Фигура 15. Лабораторен стенд за изследване на ударни процеси: 1 – основна плоча с маса 235 kg; 2 – долен неподвижен инструмент за еластичен удар; 3 – долен неподвижен инструмент за пластична деформация; 4 – индукционни датчици за скорост; 5 – датчик за включване/изключване на въздуха; 6 – водещи елементи на падащите части; 7 – пусков механизъм; 8 – електро – магнитен клапан за въздух; 9 – клапан за регулиране на налягането; 10 – датчик за пускане на въздух; 11 – излъчвател на светлинен датчик за скорост; 12 – студен ракетен двигател; 13 – падащи части с маса 6,17 kg ; 14 – планка за активиране на датчици 4, 5 и 11; 15 – приеман елемент на светлинен датчик за скорост; 16 – устройство за управление на стенда



Фигура 16. *Режими за работа на стенда: Режим 1 – свободно падане (с изключен двигател) + притискане в процеса на удар (включване на ракетния двигател в момента на удар); Режим 2 – ускоряване с ракетен двигател в процеса на падане и изключване на двигателя в момента на удар; Режим 3 – включен ракетен двигател през време на падане и на удара; Режим 4 – обикновен удар (ракетният двигател е изключен през цялото време)*

Цел и задачи

В предоставения дисертационен труд се разглеждат проблеми, свързани с високоскоростни управляеми ударни процеси. Поставената цел в този труд е да се изследват възможностите за качествени и енергийно ефективни деформация на метали и уплътняване на метални материали посредством високоскоростни управляеми удари с помощта на ракетно задвижване.

Отчитайки извършения анализ и поставената цел са формулирани следните задачи:

1. Да се анализират различните високоскоростни решения за деформация на метали, брикетиране на метален скрап и забиване на пилоти
2. Да се предложат подходи за теоретично изследване на различни методи и средства за реализация на управляеми ударни процеси.
3. Да се обоснове ползването на прототип (стенд) с развита сензорна, управляваща и комуникационна система за експерименти в лабораторна среда.
4. Да се проведат експерименти за деформация, брикетиране и уплътняване на образци с различни метали и метални материали
5. Да се предложи методика за оценка физикомеханичните свойства на металните материали при различни параметри на ударните процеси.
6. Да се предложи алгоритъм за избор на режим за цифрово заснемане на високоскоростните ударни процеси на деформация и брикетиране.

ГЛАВА 2. Теория на управляем удар.

2.1. Цел на изследванията

За изпълнение целта на настоящата дисертация е необходимо да се проведат следните теоретични изследвания в областта на механиката на ударни процеси:

- определяне силата на отскока $P_{отс}$, след края на движение на удрящото тяло надолу (скоростта на движение надолу е равна на нула). Тази сила е в резултат на действие на еластични деформации, които зависят от коефициента на възстановяване e . При известна сила $P_{отс}$ може да се определи необходимата реактивна сила R , за да се регулира ударния процес в желаните граници;

- определяне скоростта на удар V_0 при:

- а) действие на допълнителна сила R през различни етапи на движение на падащото тяло;
- б) различни закони на съпротивление на средата в която се движат удрящите се тела.

Това е необходимо за да може да се пресметне енергията на удара при експериментални изследвания и при изследване на разглежданите технологични приложения (обемно шамповане, брикетирание, забиване на пилоти на суша и под вода).

2.2. Определяне силата на отскока $P_{отс}$ на шамповъчен чук

2.2.1. Кинематичен подход

Силата на отскока може да се определи по закона на Нютон $F = m \cdot a_y$, ако се изведе формула за пресмятане на ускорението при удар a_y . При идеално еластично тяло, което се удря в идеално твърдо тяло ($e = 1$) цялата енергия се изразходва за еластична деформация на удрящото тяло, поради което може да се приеме, че силата на отскока ще бъде равна на силата на удара F_y , т.е.

$$P_{отс} = F_y = m a_y, \quad (2.1)$$

където m е масата на удрящото тяло (падащите части на машината). При $0 < e < 1$ част от енергията се изразходва за пластична деформация, която част е толкова по-голяма, колкото по-малки стойности има коефициентът на възстановяване e (при идеално пластично тяло, когато $e = 0$ цялата енергия на удара се изразходва за пластична деформация). В този случай ускорението a_y ще зависи от коефициента e , т.е. $a_y = f(e)$ и

$$P_{отс} = F'_y = m a_y(e). \quad (2.2)$$

При машинни чукове удрящата (падаща част - бойник) и удряното тяло (наковалня) може да се приемат като идеално-еластични тела. Между тях се поставя нагрята до висока температура (900 – 1200 °C) стоманена заготовка (най-често), която е с голяма пластичност и претърпява големи пластични деформации. Установено е, че в този

случай коефициентът на възстановяване е в границите $e = 0.05 - 0.30$. Тъй като количеството отдадена енергия за деформация, представяно с к.п.д. на удара η зависи от отношението M/m , където M е масата на наковалнята, а m е масата на бойника, то при по-нататъшните разглеждания се вземат пред вид и тези параметри.

За определяне на ускорението a_y използваме квадратното уравнение (1.89) за скоростта на отскок на наковалнята на щамповъчен чук $V_{1,1}$, от което се получава

$$V_{1,1} = \frac{2em_2V_{2,0} + [4e^2m_2^2V_{2,0}^2 - 4m_2V_{2,0}^2(m_1 + m_2)(\eta_i + e^2 - 1)]^{1/2}}{4(m_1 + m_2)}, \quad (2.3)$$

където: $V_{2,0}$ е скоростта на удара; m_1, m_2 са масата на наковалнята и на падащите части съответно; η_i – к.п.д. на удара.

След преобразуване на (2.3) се получава

$$V_{1,1} = \frac{V_{2,0}(em_2 + [e^2m_2^2 - m_2(m_1 + m_2)(\eta_i + e^2 - 1)]^{1/2})}{2(m_1 + m_2)}, \quad (2.4)$$

Като се вземе пред вид (1.91) за $V_{2,0}$ се получава

$$V_{2,0} = \sqrt{2gS(R/m_2 + 1)} \quad (2.5)$$

и като заместим (2.5) в (2.4) за $V_{1,1}$ получаваме

$$V_{1,1} = \frac{\sqrt{2gS(R/m_2 + 1)}(em_2 + [e^2m_2^2 - m_2(m_1 + m_2)(\eta_i + e^2 - 1)]^{1/2})}{2(m_1 + m_2)}, \quad (2.6)$$

Ако положим

$$A = 2g(R/m_2 + 1),$$

$$B = (em_2 + [e^2m_2^2 - m_2(m_1 + m_2)(\eta_i + e^2 - 1)]^{1/2})/2(m_1 + m_2)$$

за $V_{1,1}$ се получава

$$V_{11} = B\sqrt{AS} \quad (2.7)$$

Като се вземе пред вид (1.82) за скоростта на отскок на бойника $V_{2,1}$ се получава

$$V_{2,1} = B\sqrt{AS} - eV_{2,0}$$

и като заместим $V_{2,0}$ от (2.5)

$$V_{2,1} = B\sqrt{AS} - e\sqrt{AS}$$

или

$$V_{2,1} = (B - e)\sqrt{AS} \quad (2.8)$$

В уравнение (2.8) $S = S(t)$, а останалите членове са константи. Тогава, за ускорението a_y се получава

$$a_y = \partial V_{2,1} / \partial t = \frac{(B - e)A}{2\sqrt{AS}} \partial S / \partial t, \quad (2.9)$$

Като се вземе пред вид, че $\partial S / \partial t = V_{2,0}$ и след заместване на $V_{2,0}$ от (2.5) получаваме

$$a_y = \frac{(B - e)A}{2\sqrt{AS}} \sqrt{AS}, \quad (2.10)$$

или

$$a_y = \frac{(B - e)A}{2}, \quad (2.11)$$

За силата на удара F'_y от (2.2) се получава

$$F'_y = m_2 a_y = \frac{m_2 (B - e)A}{2}, \quad (2.12)$$

Силата на отскока $P_{отс}$ ще бъде

$$P_{отс} = F'_y = \frac{m_2 (B - e)A}{2}$$

и след заместване на A и B с техните равни се получава

$$P_{отс} = g(R + m_2) \left(\frac{em_2 + [e^2 m_2^2 - m_2(m_1 + m_2)(\eta_i + e^2 - 1)]^{1/2}}{2(m_1 + m_2)} - e \right), \quad (2.13)$$

В Таблица 6 са дадени стойности на силата $P_{отс}$, пресметнати по (2.13), за съществуващия чук с ракетно задвижване, за който: $m_1 = 22000$ kg, $m_2 = 220$ kg, $R = 500 \div 2000$ kg, за $e = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ и $\eta_i = 0,9$. Вижда се, че със съществуващия ракетен двигател може да се постигне сила $R > P_{отс}$ при $e = 0,1$ и частично при $e = 0,15$. Тези стойности на коефициента на възстановяване се получават при горещо обемно щамповане в първи преход. При използване на високоскоростни чукове щамповането

се осъществява в един преход, което означава, че в разглежданите граници може да се получи „прилепващ удар” (удар без отскок).

Таблица 6. Стойности на $P_{отс}$, при $R = 500 - 2000$ kg

R	$e = 0,1$	$e = 0,15$	$e = 0,2$	$e = 0,25$	$e = 0,3$
500	600	950	1318	1688	2069
1000	1017	1610	2234	2860	3506
1500	1434	2270	3150	4032	4943
2000	1851	2930	4066	5205	6381

2.2.2. Енергетичен подход

При удар на тяло в неподвижна идеално твърда плоча и идеално еластичен материал на падащото тяло с маса m (коефициентът на възстановяване $e = 1$, $h = h_1$) за баланса на енергията преди и след удара се получава [29, 30, 31, 32, 33]

$$\frac{mV_0^2}{2} = P_{отс} h \quad (2.14)$$

където $P_{отс}$ е силата на отскок, а h е височината на падане. За силата на отскока се получава

$$P_{отс} = \frac{mV_0^2}{2h} . \quad (2.15)$$

При еластично-пластичен удар $0 < e < 1$ и като се вземе пред вид, че $e^2 = h_1/h$, където h_1 е височината на отскока, за h се получава $h = h_1/e^2$. След заместване в (2.15) ще получим

$$P_{отс} = \frac{me^2V_0^2}{2h_1} . \quad (2.16)$$

При $e = 1$ (2.16) преминава в (2.15), тъй като за еластичен отскок $h_1 = h$, а при $e = 0$, $P_{отс} = 0$.

Формула (2.16) може да се използва за определяне силата на отскока, ако по експериментален път са получени данни за височината на отскока h_1 .

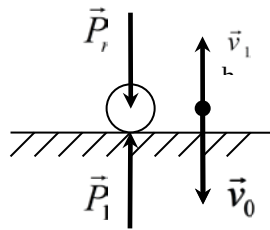
2.2.3. Динамичен подход. Определяне на $P_{отс}$ при действие на тягата R в момента на удар

Схемата на удара е показана на фиг.17. От нея следва, че в момента на удар върху тялото действа тягата на ракетния двигател $R = P_r$ и реакцията $P_{отс} = P_1$; скоростта в момента на удара е V_0 , а скоростта на отскока V_1 . До момента на удара тялото е падало свободно.

Ако с $I_{(R)}$ и $I_{(P_1)}$ означим импулсите на съответните сили и приложим теоремата за изменение на количеството на движение се получава

$$mV_0 - mV_1 = I_{(R)} - I_{(P_1)} \quad (2.17)$$

$$mV_0 \left(1 - \frac{|V_1|}{|V_0|} \right) = I_{(R)} - I_{(P_1)} \quad (2.18)$$



Фигура 17. Постановка на задачата за падане на тяло с маса m при действие на тягата $R = P_r$ в момента на удара

$$m\sqrt{2gh}(1 - e) = I_{(R)} - I_{(P_1)} \quad (2.19)$$

Импулсите на силите P_R и P_1 може да се представят във вида

$$I_{(R)} = P_R(t_m); I_{(P_1)} = P_1(t_m), \quad (2.20)$$

където t_m е средното време за контакт при удар.

Като заместим (2.20) в (2.19) ще получим

$$m\sqrt{2gh}(1 - e) = (P - P_1)(t_m) \quad (2.21)$$

откъдето за P_1 се получава

$$P_1 = P_R - \frac{m\sqrt{2gh}}{(t_m)}(1-e). \quad (2.22)$$

От (2.22) се вижда, че за определяне на P_1 е необходимо да са известни времето на контакта и коефициентът на възстановяване.

Като вземем пред вид, че $e = \sqrt{\frac{h_1}{h}}$ и заместим в (2.21) се получава

$$m\sqrt{2gh}\left(1 - \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h}}\right) = (P_R - P_1)(t_m)$$

или

$$m\sqrt{2g}(\sqrt{h} - \sqrt{h_1}) = (P_R - P_1)(t_m)$$

и

$$\sqrt{h} - \sqrt{h_1} = \frac{(P_R - P_1)(t_m)}{m\sqrt{2g}},$$

откъдето за h_1 се получава

$$\sqrt{h_1} = \sqrt{h} - \frac{(P_R - P_1)(t_m)}{m\sqrt{2g}}. \quad (2.23)$$

2.3. Уравнения за движение при допълнително действие на външни сили, приложени към падащото тяло с променлива маса

2.3.1. Съпротивлението на средата $\bar{S}$ зависи от квадрата на скоростта

Целта на настоящото изследване е да се дефинира математически работното движение на чук задвижван от ИРД. В техническо отношение промишленият реактивен чук е мобилно съоръжение, извършващо движение вертикално надолу, при действието на реактивен двигател. Дефинирани са следните негови основни експлоатационни параметри: [34, 35, 36]

m_0 - пълна (инициална) маса на ракетния двигател, включваща масата на корпуса и маса на горивната смес (ракетното гориво) ;

$q = dm/dt$ - скорост на изменение на масата на ракетния двигател (газов поток) ;

$m = m_0 - q.t$ - остатъчна маса на бойника в произволен момент t от работния процес;

$\bar{V}$ - скорост на бойника;

$\bar{U}$ - реактивна скорост на изтичане на реактивна струя (скорост, спрямо корпуса);

$\bar{V}_e = \bar{U} + \bar{V}$ - абсолютна скорост на реактивна струя;

$\bar{G}$ - тегло на чук, задвижван с ИРД;

$\bar{S}$ - сила на съпротивление на околната (въздушната) среда.

Прилагайки принципите за импулса и количеството на движение, получаваме следния най-общ вид на диференциалното уравнение на движение на падащите части (бойник) на реактивен чук

$$\frac{dV}{dt} = g - \frac{\bar{S}}{m_0 - qt} + \frac{qU}{m_0 - qt}, \quad (2.24)$$

където:

$\bar{S}$ е големината на силата на съпротивление на средата;

U - магнитут на релативната скорост $\bar{U}$ на реактивната струя.

Настоящото изследване е ориентирано към случая когато

$$m_0 - qt = m = \text{const.} \quad (2.25)$$

Ще разгледаме случая, когато съпротивлението $\bar{S}$ зависи по следния начин от скоростта на устройството

$$\begin{aligned} \bar{S} &= k_s V^2, \\ k_s &= k \cdot \rho \cdot F, \end{aligned} \quad (2.26)$$

където:

k - коефициент, отчитащ формата на обтичаното тяло;

ρ - плътност на средата;

F - площ на проекцията на обтичаното тяло върху равнина, перпендикулярна на скоростта $\bar{V}$.

Полагайки в (2.24)

$$\begin{aligned} \bar{S} &= k_s V^2, \quad qU = R, \\ \frac{k_s}{m} &= \alpha, \quad \beta = \sqrt{\frac{G + R}{k_s}}, \end{aligned} \quad (2.27)$$

където $R = \text{const.}$ е тяга на реактивната струя, получаваме съответно

$$\frac{dV}{dt} = \alpha(\beta^2 - V^2). \quad (2.28)$$

Интегрираме (2.28) чрез отделяне на променливите и получаваме:

а) Ако $V < \beta$ решението е:

$$V = \beta.th(\beta(\alpha t + C_1)). \quad (2.29)$$

при $t=0$, $V = V_0 = \beta.th(\beta C_1) \Rightarrow$

$$C_1 = \frac{1}{\beta} arth\left(\frac{V_0}{\beta}\right).$$

б) Ако $V > \beta$ решението е:

$$V = \beta.cth(\beta(\alpha t + C_2)). \quad (2.30)$$

При $t=0$, $V = V_0 = \beta.cth(\beta C_2) \Rightarrow$

$$C_2 = \frac{1}{\beta} arcth\left(\frac{V_0}{\beta}\right)$$

в) Ако $t \rightarrow \infty$ $\beta(\alpha t + C_i) \rightarrow \infty$ ($\beta > 0$)

$$V = V_{t \rightarrow \infty} \rightarrow \beta = \sqrt{\frac{G + R}{k_s}}.$$

Решенията (2.29) и (2.30) на диференциалното уравнение (2.28) може да се представи във вида съответно

$$V = \beta \frac{e^{2[\beta(\alpha t + C_1)]} - 1}{e^{2[\beta(\alpha t + C_1)]} + 1}, \quad C_1 = \frac{1}{\beta} arth\left(\frac{V_0}{\beta}\right), \quad (2.31)$$

$$V = \beta \frac{e^{2[\beta(\alpha t + C_2)]} + 1}{e^{2[\beta(\alpha t + C_2)]} - 1}, \quad C_2 = \frac{1}{\beta} arcth\left(\frac{V_0}{\beta}\right). \quad (2.32)$$

2.3.2. Съпротивлението $\bar{S}$ зависи линейно от $\bar{V}$

$$\bar{S} = k_s V. \quad (2.33)$$

Тогава диференциалното уравнение (2.24) придобива вида:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{G+T}{m} - \frac{k_s}{m} V . \quad (2.34)$$

Полагайки $\frac{k_s}{m} = \alpha$ и $\frac{G+T}{m} = \gamma$, (2.34) се записва във вида

$$\frac{dV}{dt} + \alpha V = \gamma . \quad (2.35)$$

Уравнение (2.35) има следното решение

$$V = \left(V_0 - \frac{\gamma}{\alpha} \right) e^{-\alpha t} + \frac{\gamma}{\alpha} . \quad (2.36)$$

2.3.3. Съпротивлението $\bar{S}$ е линейна функция от положението на тялото, определено с координатата му x

За по-голяма общност приемаме, че съпротивителната сила $\bar{S}$ започва да действа, след като тялото е изминало надолу пътя h_* . В този случай съпротивлението $\bar{S}$ се представя във вида

$$\bar{S} = -k_s m x \vec{i} , \quad \bar{G} = mg \vec{i} . \quad (2.37)$$

От условието за равновесие на силите, действащи върху падащото тяло се получава

$$m \vec{a} = \vec{G} + \vec{R} = mg \vec{i} - k_s m x \vec{i}$$

или

$$m \ddot{x} = mg - k_s m x ,$$

откъдето

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = g - k_s x$$

и

$$\frac{dv}{dt} . dx = (g - k_s x) dx . \quad (2.38)$$

Решението на (2.38) се получава, като се вземе пред вид, че

$$\frac{dx}{dt} = V; V_{(x=h)} = V_0; V_{(x=h)} = V_* .$$

Тогава

$$\int_{V_*}^{V_0} V dV = \int_{h_*}^h (g - k_s x) dx$$

и

$$\frac{V^2}{2} \Big|_{V_*}^{V_0} = g x \Big|_{h_*}^h - k_s \frac{x^2}{2} \Big|_{h_*}^h$$

откъдето

$$\frac{V_0^2}{2} - \frac{V_*^2}{2} = g(h - h_*) - k_s(h^2 - h_*^2),$$

т.е. за скоростта на удара V_0^2 се получава

$$V_0^2 = V_*^2 + 2g(h - h_*) - k_s(h^2 - h_*^2). \quad (2.39)$$

В (2.39) координатата h_* на падащото тяло, от която започва да действа съпротивителната сила $\bar{S}$, се задава, а скоростта V_* при $x = h_*$ се определя от $V_* = \sqrt{2gh_*}$, с което (2.39) добива вида

$$V_0^2 = 2gh - k_s(h^2 - h_*^2). \quad (2.40)$$

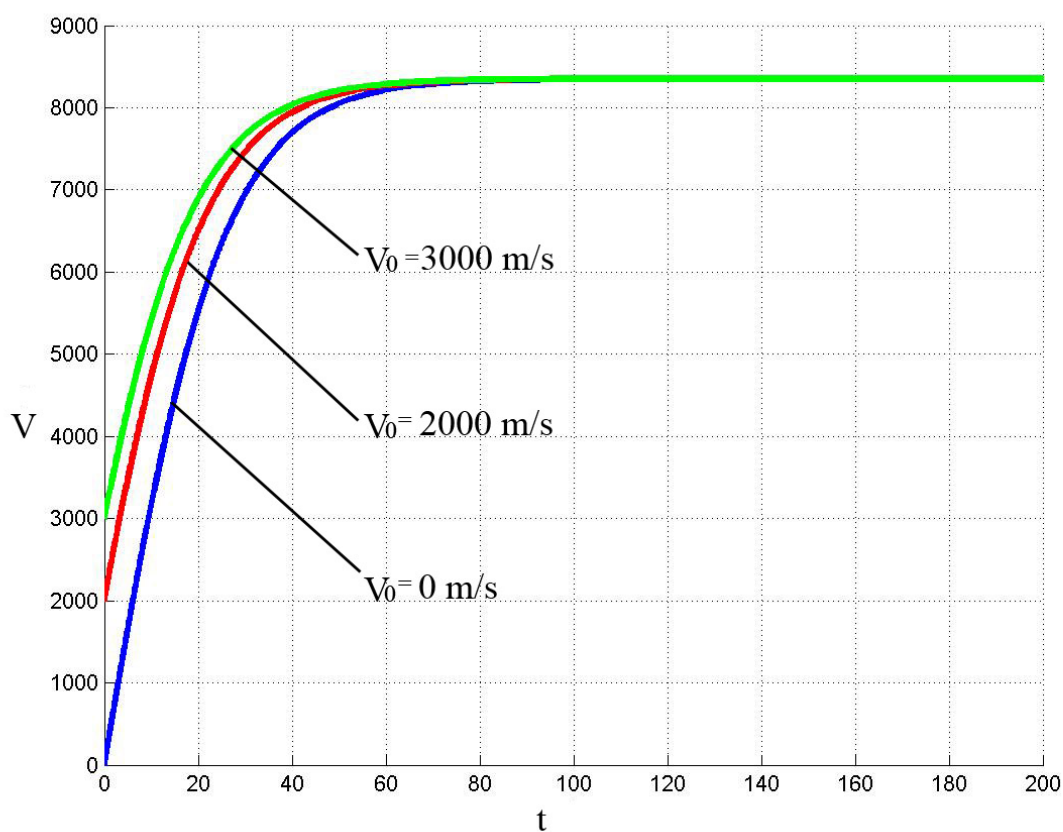
В (2.40) V_0 представлява скоростта с която тялото пада от височина h върху твърда плоча, като от височина $(h - h_*)$ върху него започва да действа съпротивителна сила от вида (2.30).

2.3.4. Уравнения за движение на чук, задвижван с ИРД

А. Силата на съпротивлението зависи от квадрата на скоростта

а) Случай $V < \beta$

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{ch[\beta(\alpha t + C_1)]}{ch[\beta C_1]}, \quad C_1 = \frac{1}{\beta} \operatorname{arth} \left(\frac{V_0}{\beta} \right).$$



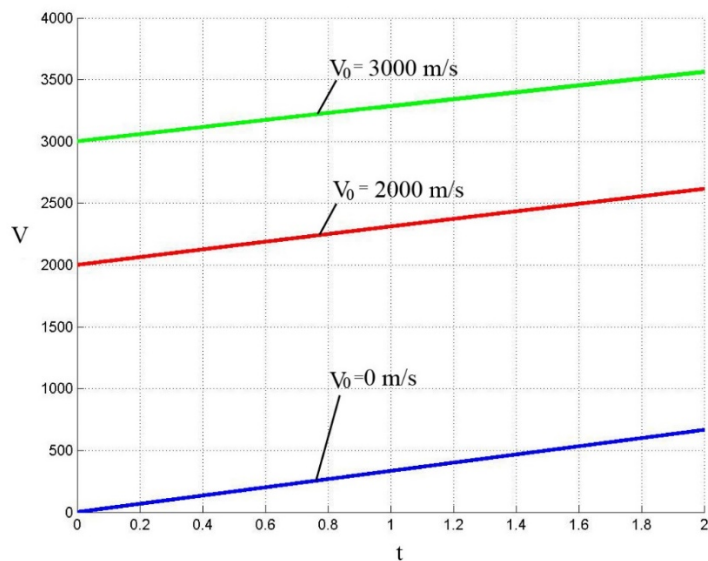
Фигура 18. Графично представяне изменението на скоростта, когато съпротивлението на средата зависи от квадрата на скоростта, при $V < \beta$ и $t \in [0, 200]$

б) Случай $V > \beta$

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\text{sh}[\beta(\alpha t + C_2)]}{\text{sh}[\beta C_2]}, \quad C_2 = \frac{1}{\beta} \text{arcth} \left(\frac{V_0}{\beta} \right). \quad (2.41)$$

Б. Силата на съпротивлението зависи линейно от скоростта

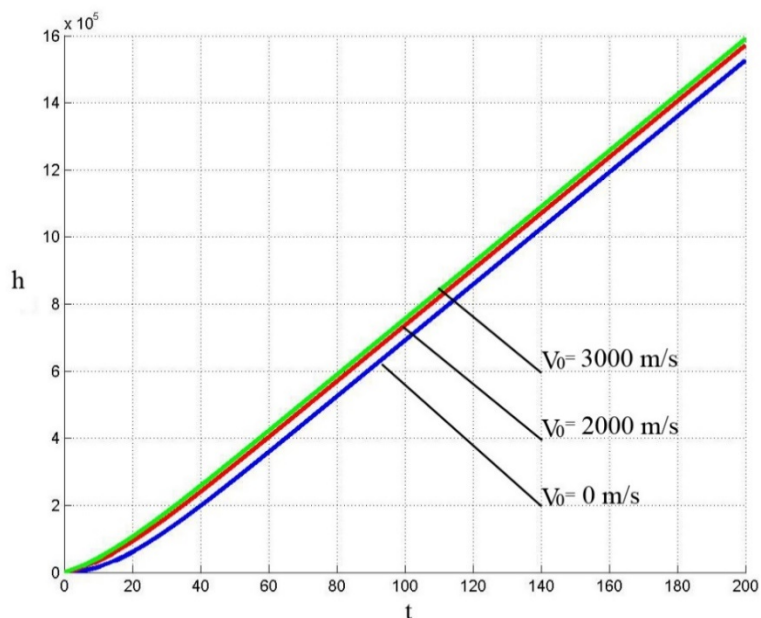
$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \left(V_0 - \frac{\gamma}{\alpha} \right) (1 - e^{-\alpha t}) + \frac{\gamma}{\alpha} t. \quad (2.42)$$



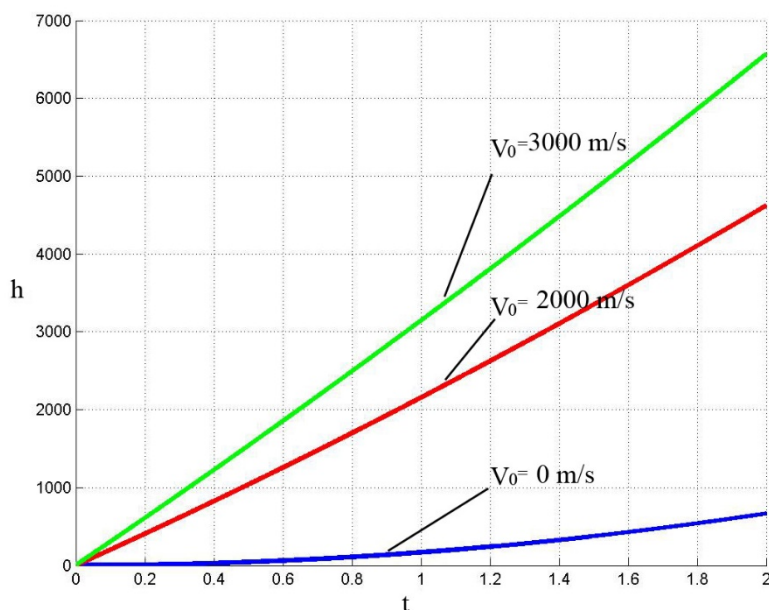
Фигура 19. Графично представяне изменението на скоростта, когато съпротивлението на средата зависи от квадрата на скоростта при $V < \beta$ и $t \in [0, 2]$

2.3.5. Графично представяне на резултатите

На базата на написаните алгоритми е разработена програма, за графично представяне на резултатите от теоретичното изследване. На фиг.18 –фиг.21. са показани графични резултати за случая на въздушна съпротивителна среда.



Фигура 20. Графично представяне закона за движение на чук задвижван с ИРД, когато съпротивлението на средата зависи линейно от квадрата на скоростта при $V < \beta$ и $t \in [0, 200]$



Фигура 21. Графично представяне на закона за движение на чук задвижван с ИРД, когато съпротивлението на средата зависи линейно от квадрата на скоростта и $V < \beta$ и $t \in [0,2]$

2.4. Математично моделиране на динамичния процес при подготвителна фаза (движение нагоре)

2.4.1. Функция на скоростта на движение

Целта на настоящото изследване е да се дефинира математически движението на ракетното ударно устройство в подготвителната фаза – движение нагоре. На фиг.22 е илюстрирана динамична схема на движението на ракетното устройство вертикално нагоре при n броя едновременно работещи индустриални ракетни двигатели. Изследването на динамичното поведение на ракетното устройство, при неговото движение, в условията на подготвителната фаза реализираме след дефиниране на следните експлоатационни характеристики:

m_0 - пълна (инициална) маса, включваща масата на корпусната конструкция на ракетното устройство и маса на горивната смес (ракетно гориво);

$q = \text{constant}$ - разход на работното вещество за задвижване на ракетното устройство;

$m = m_0 - q \cdot t$ - остатъчна маса на устройството в произволен момент t от изследвания процес;

n - брой на индустриалните ракетни двигатели, работещи в условията на подготвителната фаза;

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ - земно ускорение;

$\bar{V}$ - текуща скорост на ракетно удрящо устройство;

$\bar{U}$ - реактивна скорост на изтичане на ракетния поток (реактивна скорост, спрямо корпуса);

$\bar{V}_e = \bar{U} + \bar{V}$ - абсолютна скорост на реактивна струя;

$\bar{G}$ - тегло на ракетното устройство;

$\bar{S}$ - сила на съпротивление на околната въздушна среда.

Както е илюстрирано на фиг.22, в момента t от движението на ракетната установка в условията на подготвителната фаза, остатъчната маса на съоръжението е $m = m_0 - q.t$, а текущата и скорост $\bar{V}$. В интервала от време Δt , количество гориво с маса $\Delta m / n = q.\Delta t / n$ се изтласква от горивната камера на всеки от индустриалните ракетни двигатели, осигуряващи движението на ракетното устройство с релативна скорост $\bar{U}$, осигурявайки нейната абсолютна скорост $\bar{V}_e$.

Тогава, прилагайки принципите за импулса и количеството на движение за интервала от време за показаната на фиг. 22 механична система можем да запишем

$$m\bar{V} + (\bar{G} + \bar{S}).\Delta t = (m - \Delta m)(\bar{V} + \Delta\bar{V}) + \Delta m.\bar{V}_e \quad (2.43)$$

След преработване скаларния вид на уравнение (2.43), получаваме диференциалното уравнение на движение на реактивното удрящо устройство

$$\frac{dV}{dt} = g - \frac{S}{m_0 - qt} + \frac{qU}{m_0 - qt}, \quad (2.44)$$

където:

S е големината на силата на съпротивление на средата;

U - магнитут на релативната скорост $\bar{U}$ на реактивната струя.

Настоящото изследване е ориентирано към случая когато

$$m_0 - qt = m = const. \quad (2.45)$$

Съпротивлението $\bar{S}$ зависи квадрата на скоростта на движение, т.е.

$$\begin{aligned} S &= k_s V^2, \\ k_s &= k.\rho.F, \end{aligned} \quad (2.46)$$

където

k - коефициент, отчитащ формата на обтичаното тяло;

ρ - плътност на въздуха;

F - площ на проекцията на обтичаното тяло върху равнина, перпендикулярна на скоростта $\bar{V}$.

Полагайки в (2.44)

$$S = k_s V^2, \quad qU = T,$$

$$\frac{k_s}{m} = \alpha, \quad \beta = \sqrt{\frac{G-T}{k_s}},$$
(2.47)

където $T = nT_i = \text{const.}$ е тяга, създавана от реактивните струи на работещите в подготвителната фаза индустриални реактивни двигатели, T_i – реактивна сила, създавана от един индустриален реактивен двигател, можем да запишем:

$$\frac{dV}{dt} = \alpha(\beta^2 - V^2).$$
(2.48)

Интегрираме (2.48) чрез отделяне на променливите и получаваме:

$$\frac{1}{2\beta} \ln \left| \frac{\beta+V}{\beta-V} \right| + C = \alpha t,$$
(2.49)

където C е интеграционна константа, която определяме от началните условия: при $t=0$, $h=0$, $V=V_0$.

- **Случай $V < \beta$ ($V, \beta > 0$) равенство (2.7) решено спрямо V е:**

$$V = \beta \frac{k.e^{2\alpha\beta t} - 1}{k.e^{2\alpha\beta t} + 1},$$
(2.50)

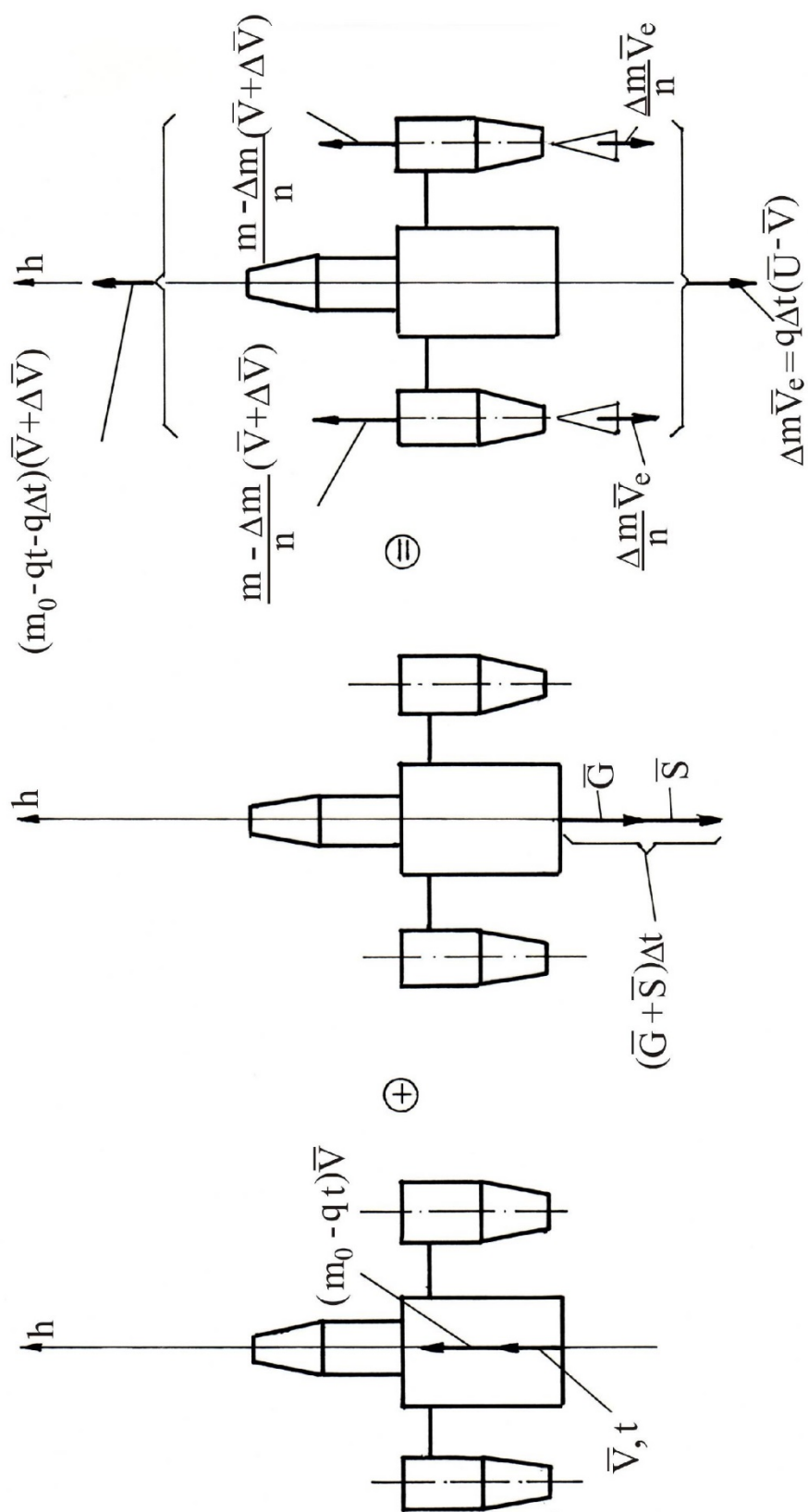
където $k = \frac{\beta+V_0}{\beta-V_0} > 0$.

Изразът (2.50) при $k=1$ ($V_0=0$) може да се представи във вида

$$V = \beta \cdot \text{th}(\alpha\beta t)$$
(2.51)

Както се вижда от (2.51), когато аргументът t се изменя от 0 до $+\infty$ функцията хиперболически тангенс монотонно нараства от 0 до $+1$.

С други думи в изследвания случай скоростта нараства монотонно от $V_{t=0}=V_0$ до $V_{t \rightarrow \infty} = \beta$.



Фигура 22. Структурно-кинематична схема на ракетно устройство на високоскоростен чук

- **Случай $V > \beta$ ($V, \beta > 0$)** тогава решението на (2.7) спрямо скоростта V е

$$V = \beta \frac{e^{2\alpha\beta t} + k}{e^{2\alpha\beta t} - k}. \quad (2.52)$$

При $V_0 = 0$, т.е. $k = 1$ уравнение (2.52) придобива вида:

$$V = \beta \cdot \text{cth}(\alpha\beta t). \quad (2.53)$$

Анализирайки (2.53) установяваме, че когато $t \in [0, +\infty)$, скоростта на реактивното съоръжение намалява монотонно $V_{t=0} = V_0$ до $V_{t \rightarrow \infty} = \beta$.

- **Случай $V = \beta$ ($V, \beta > 0$)**

В този случай $V_{t=0} = V_0 = V_{t \rightarrow \infty} = \beta$, т.е. когато аргументът на функцията t се изменя от 0 до $+\infty$, ракетното съоръжение се движи равномерно със скорост $V = \text{constant}$.

2.4.2. Уравнение на движение

- **Случай $V < \beta$ ($V, \beta > 0$)**

Решението на равенство (7) спрямо V може да се представи във вида

$$V = \beta \cdot \text{th}\left(\alpha\beta t + \text{Arcth}\frac{V_0}{\beta}\right). \quad (2.54)$$

Полученото чрез (12) уравнение на движение на ракетното устройство е

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\text{ch}\left(\alpha\beta t + \text{Arcth}\frac{V_0}{\beta}\right)}{\text{ch}\left(\text{Arcth}\frac{V_0}{\beta}\right)}, \quad (2.55)$$

където h е вертикално преместване на ракетно устройство съгласно фиг. 22.

- **Случай $V > \beta$ ($V, \beta > 0$)**

В този случай скоростта на движение и уравнението на движение на ракетното устройство имат вида

$$V = \beta \cdot \text{cth} \left(\alpha \beta t + \text{Arccth} \frac{V_0}{\beta} \right), \quad (2.56)$$

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\text{sh} \left(\alpha \beta t + \text{Arccth} \frac{V_0}{\beta} \right)}{\text{sh} \left(\text{Arccth} \frac{V_0}{\beta} \right)}, \quad (2.57)$$

Равенства (2.56) и (2.57) са получени при съобразяване с началните условия $t=0$ и $h=0$.

2.4.3. Уравнение на скоростта и уравнение на движението на ракетното устройство, след спиране на горенето в ракетните двигатели на ракетното устройство

Нека запишем диференциалното уравнение (2.44) при съобразяване с условие (2.45) и условие $\bar{U} = \bar{0}$, т.е.:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{G}{m} - \frac{k_s}{m} V^2. \quad (2.58)$$

Решавайки (2.60) при начални условия $t=0$ и $V=V_0$, получаваме

$$V = \lambda \tan \left(\arctan \frac{V_0}{\lambda} - \lambda \alpha t \right), \quad (2.59)$$

където $\lambda = \sqrt{\frac{gm}{k_s}} = \sqrt{\frac{G}{k_s}}$ (G е тегло на ракетното ударно устройство).

Нека сега (2.51) представим във вида

$$\frac{dh}{dt} = \lambda \tan \left(\arctan \frac{V_0}{\lambda} - \lambda \alpha t \right). \quad (2.60)$$

Решавайки (2.60) при спазване на началните условия $t=0$ и $h=0$ получаваме уравнението на движение на ракетното устройство:

$$h = \ln \left[\frac{\cos \left(\arctan \frac{V_0}{\lambda} - \lambda \alpha t \right)}{\cos \left(\arctan \frac{V_0}{\lambda} \right)} \right]^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (2.61)$$

2.4.4. Динамика на ракетно ударно устройство за реализация на технологичния подготвителен режим

Тук се третира случай при който подготвителната фаза включва следните два етапа:

Първи етап: движение на ракетното ударно устройство вертикално нагоре с включени съответни ракетни двигатели; процесът се характеризира с начална скорост $\bar{V}_0 = \bar{0}$ и движение с номинална скорост на реактивна струя, за която е изпълнено $U = constant$; в края на този етап определен от времето t_u и скорост $\bar{V}_u$, се преустановява работата на индустриалните ракетни двигатели.

Втори етап: ударното устройство продължава своето вертикално движение нагоре с начална скорост $\bar{V}_0 = \bar{V}_u$ в продължение на време t_0 , след което се установява неподвижно на предварително дефинирано разстояние H , спрямо началното си положение.

При използване на получените решения на диференциалните уравнения, описващи общата динамика на ракетното ударно устройство можем да напишем следната система уравнения

$$\begin{aligned} V_u &= \beta \frac{e^{\alpha \beta t_u} - e^{-\alpha \beta t_u}}{e^{\alpha \beta t_u} + e^{-\alpha \beta t_u}}, \\ h_u &= \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{e^{\alpha \beta t_u} + e^{-\alpha \beta t_u}}{2} \right), \\ h_0 &= \frac{1}{2\alpha} \ln \left(1 + \frac{V_u^2}{\lambda^2} \right), \\ H &= h_u + h_0. \end{aligned} \quad (2.62)$$

Решението на системата уравнения (2.62) дефинира основните динамични характеристики на специфичния технологичен процес на разглежданата подготвителна фаза, а именно

- Големина на скоростта на движение на ударното устройство в края на *първия етап*:

$$V_u = \lambda\beta \sqrt{\frac{e^{2\alpha H} - 1}{\lambda^2 e^{2\alpha H} + \beta^2}}. \quad (2.63)$$

Представената с (2.63) скорост V_u е началната скорост с която стартира движението на ударното устройство при *втория етап*:

- Височина на издигане на ракетното ударно устройство, при която то се ускорява до скоростта $\bar{V}_u$

$$h_u = \frac{1}{2\alpha} \ln \left(\frac{\lambda^2 e^{2\alpha H} + \beta^2}{\lambda^2 + \beta^2} \right). \quad (2.64)$$

- Време за изминаване на разстоянието h_u :

$$t_u = \frac{1}{\alpha\beta} \operatorname{Arcth} \left(\lambda \sqrt{\frac{e^{2\alpha H} - 1}{\lambda^2 e^{2\alpha H} + \beta^2}} \right). \quad (2.65)$$

- Височина (разстояние) което изминава ракетното ударно устройство с неработещи индустриални ракетни двигатели

$$h_0 = H - h_u. \quad (2.66)$$

- Време за изминаване на разстоянието h_0

$$t_0 = \frac{\lambda}{g} \arctan \left(\beta \sqrt{\frac{e^{2\alpha H} - 1}{\lambda^2 e^{2\alpha H} + \beta^2}} \right). \quad (2.67)$$

- Време, за което ракетното ударно устройство достига височина H , при която скоростта на движение на устройството нагоре се анулира

$$t_\Sigma = t_0 + t_u. \quad (2.68)$$

2.4.5. Определяне на скоростта на изтичане на реактивната струя от реактивен двигател и създаваната тяга при гориво керосин и окислител въздух

В съответствие с първия принцип на термодинамиката [9] можем да запишем

$$q_f H_u + q_i C_{p0} T_0 = q_i C_g T - q_i C_{g0} T_0 + q_i C_p T, \quad (2.69)$$

където

$q_i = q_f + q_a$ - разход на работно вещество (горивна смес) в една топлина камера;

$q_f = 0,62 \text{ kg/s}$ - разход на гориво (керосин) в една горивна камера;

$q_a = 8,90 \text{ kg/s}$ - разход на окислител (въздух) в една горивна камера;

$H_u = 46 \text{ MJ}$ - топлина отделена при изгаряне на 1 kg керосин.

$C_{p0} = 1,005 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}$ - специфичен топлинен коефициент на въздуха при постоянно

налягане, който постъпва в камерата при температура $T_0 = 25^\circ \text{C}$;

$C_{g0} = 0,716 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}$ - специфичен топлинен коефициент на въздуха при постоянен

обем, който постъпва в камерата при $T_0 = 25^\circ \text{C}$;

$T_0 = 25^\circ \text{C}$ - температура на постъпващия в камерата въздух;

T - температура на горивната камера;

$C_p \approx 1,131 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}$ - специфичен топлинен капацитет на работното вещество в

горивната камера при постоянно налягане и $T \approx 1500^\circ \text{C}$;

$C_g \approx 0,844 \frac{\text{KJ}}{\text{kg K}}$ - специфичен топлинен капацитет на работното вещество в

горивната камера при постоянно налягане и $T \approx 1500^\circ \text{C}$;

- *Определяне температурата на горивната камера*

$$T = \frac{q_f H_u + q_i (C_{p0} + C_{g0}) T_0}{q_i (C_p + C_g)} = 1728^\circ \text{K} \quad (2.70)$$

- *Определяне плътността на работното вещество в горивната камера*

$$\rho = \frac{P}{R.T} = \frac{6 \cdot 10^6}{287 \cdot 1728} = 11,768 \text{ kg/m}^3, \quad (2.71)$$

където

$P = 6 \text{ MPa}$ - е налягането в горивната камера;

$R = 287 \text{ J/(kg.K)}$ - газова константа на работното вещество .

- *Определяне на критичната стойност между налягането в камерата и околната среда*

$$\beta_{cr} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,539 \quad (2.72)$$

където

$$k = \frac{C_p}{C_g} = \frac{1,131}{0,844} = 1,340$$

- *Определяне на скоростта на изтичане през дюзата на ракетния двигател*
Тъй като

$$\frac{P_0}{P} = 0,0168 < \beta_{cr}, \quad (2.73)$$

където $P_0 = 101kP$ е атмосферно налягане на морското равнище, имаме надкритично изтичане на газове от дюзата на ракетния двигател. В този случай големината на скоростта на изтичане се определя с изрази

$$U = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \cdot \frac{P}{\rho}} = 764 \text{ m/s}$$

- *Определяне на реактивната сила създавана от един ракетен двигател*

$$T_i = q_i U = 9,52.764 = 7275 \text{ N} \quad (2.74)$$

- *Определяне на тягата на тягата на ракетното ударно устройство*

$$T = n \cdot T_i = 7275 \cdot n \text{ [N]} \quad (2.75)$$

2.4.6. Компютърен експеримент за случая на задвижване на бойник на чук с два ракетни двигателя

Компютърният експеримент реализираме за случая когато реактивното ударно устройство е снабдено с два индустриални реактивни двигателя, от които единия осъществява движението на устройството нагоре (подготвителна фаза), а другият – движение на устройството надолу (работна фаза). Подобно задвижване може да се използва при чукове за забиване на пилоти, работещи на суша, както и при чукове за обемно щамповане с долно задвижване.

Разглеждания случай се характеризира със следните основни параметри:

- *Маса на ударното устройство*

$$m = 3(m_e + m_g) + m_h = 1432 \text{ kg}, \quad (2.76)$$

където

$m_e = 25 \text{ kg}$ е маса на ракетния двигател ;

$m_g = 19 \text{ kg}$ - маса на горивната смес, в един ракетен двигател, осигуряваща непрекъсната работа за време 2s ;

$m_h = 1300 \text{ kg}$ - маса на бойника.

- *Магнитут на силата на съпротивление на средата S*

Както вече беше отбелязано големината на съпротивлението на средата зависи от следните константи:

$k = 0,64$ - съпротивителен коефициент на средата, когато обтичаното тяло има конфигурация на квадратна пластина;

$\rho = 1,206 \text{ kg/m}^3$ - плътност на въздуха при 760 mm налягане и температура 20°C ;

$F = 0,3 \text{ m}^2$ - лице на проекцията на обтичаното тяло върху равнина, перпендикулярна на скоростта $\vec{V}$.

Тогава за коефициента на пропорционалност k_s получаваме:

$$k_s = k \cdot \rho \cdot F = 0,232. \quad (2.77)$$

- *Тяга на ракетното ударно устройство*

Подготвителната фаза се реализира при $n = 2$

$$T = (n = 2) T_i = 14550 \text{ N} \quad (2.78)$$

- *Сила на теглото на ракетното устройство*

$$G = mg = 14048 \text{ N}, \quad (2.79)$$

където $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ - земно ускорение.

- *Динамични константи*

$$\alpha = \frac{k_s}{m} = 0,000162, \quad (2.80)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{T - G}{k_s}} = 1760,3$$

- *Функция на скоростта*

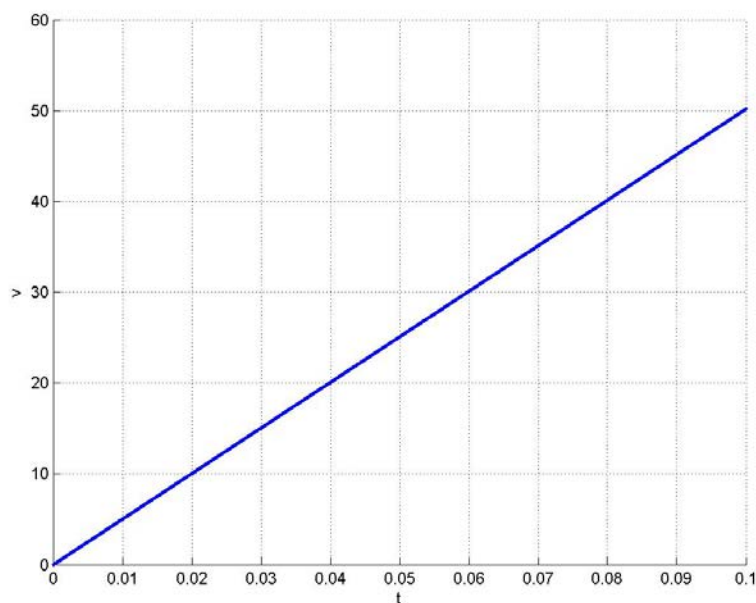
$$V = \beta t h(\alpha \beta t), \quad t \in [0; 0,1] \quad (2.81)$$

- *Уравнение на движение*

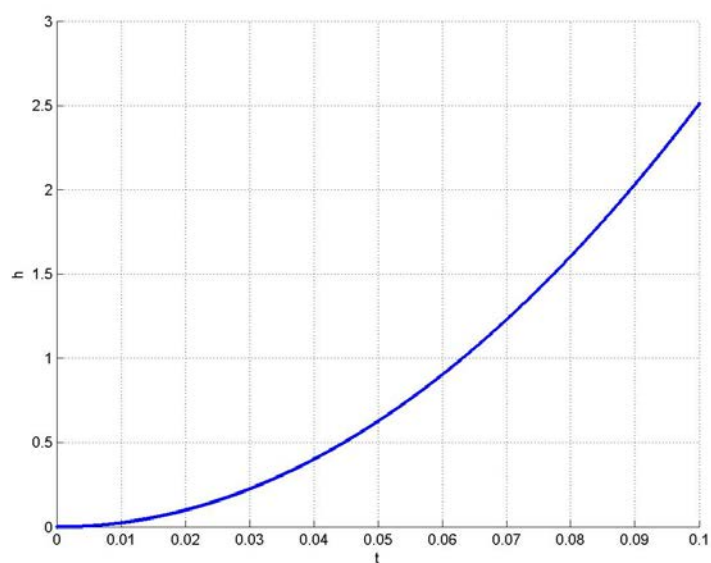
$$h = \frac{1}{\alpha} \ln[ch(\alpha \beta t)], \quad t \in [0; 0,1] \quad (2.82)$$

Въз основа на дефинираните тук характеристики и на база на прости компютърни програми са илюстрирани графично функции (2.83) и (2.84) (виж фиг. 23 и

фиг. 24), които са базови за дефиниране на конкретния динамичен процес за осигуряване на зададените технологични параметри, осигуряващи реализацията на подготвителната фаза.



Фигура 23. *Функция на скоростта на движение на ударното ракетно устройство при нулева начална скорост при $t \in [0;0.1]$*



Фигура 24. *Графика на вертикалното преместване на ударното ракетно устройство при $t \in [0;0.1]$*

Представеното изследване съдържа теоретичната база която стои в основата на дефиниране на различни технологични условия за реализиране на подготвителната фаза на процеса на реализиране на удари от ракетното устройство на високоскоростен чук.

Разработеният алгоритъм е послужил като основа за написване на компютърна програма за пресмятане на динамичното поведение на ракетното ударно устройство на високоскоростен чук.

Направеното теоретично изследване и реализираният компютърен експеримент показаха, че прилагането на индустриални ракетни двигатели за осъществяване на „подготвителната фаза” от технологичния работен цикъл на една високоскоростна ударна машина или високоенергиен чук, съответно при забиване на пилоти или обемно щамповане във въздушна среда, е нецелесъобразно, поради изключително малките необходими интервали от време за ускоряване на реактивното ударно устройство с използване на реактивна тяга, предвид обстоятелството, че процесът на стартиране и спиране на горенето в камерата на реактивните двигатели има инерционен характер.

Тук се третира случай при който подготвителната фаза включва следните два етапа:

Първи етап: движение на ракетното ударно устройство вертикално нагоре с включени съответни ракетни двигатели; процесът се характеризира с начална скорост $\bar{V}_0 = \bar{0}$ и движение с номинална скорост на реактивна струя, за която е изпълнено $U = constant$; в края на този етап определен от времето t_u и скорост $\bar{V}_u$, се преустановява работата на индустриалните реактивни двигатели

Втори етап: ударното устройство продължава своето вертикално движение нагоре с начална скорост $\bar{V}_0 = \bar{V}_u$ в продължение на време t_0 , след което се установява неподвижно на предварително дефинирано разстояние H , спрямо началното си положение.

Решението на системата уравнения (2.64) дефинира основните динамични характеристики на специфичния технологичен процес на разглежданата подготвителна фаза, а именно

- Големина на скоростта на движение на ударното устройство в края на *първия етап*:

$$V_u = \lambda\beta \sqrt{\frac{e^{2\alpha H} - 1}{\lambda^2 e^{2\alpha H} + \beta^2}}. \quad (2.83)$$

Представената с (2.85) скорост V_u е началната скорост с която стартира движението на ударното устройство при *втория етап*:

- Височина на издигане на ракетното ударно устройство, при която то се ускорява до скоростта $\bar{V}_u$

$$h_u = \frac{1}{2\alpha} \ln \left(\frac{\lambda^2 e^{2\alpha H} + \beta^2}{\lambda^2 + \beta^2} \right). \quad (2.84)$$

- Време за изминаване на разстоянието h_u :

$$t_u = \frac{1}{\alpha\beta} \operatorname{Arcth} \left(\lambda \sqrt{\frac{e^{2\alpha H} - 1}{\lambda^2 e^{2\alpha H} + \beta^2}} \right). \quad (2.85)$$

- Височина (разстояние) което изминава ракетното ударно устройство с неработещи индустриални ракетни двигатели

$$h_0 = H - h_u. \quad (2.86)$$

- Време за изминаване на разстоянието h_0

$$t_0 = \frac{\lambda}{g} \arctan \left(\beta \sqrt{\frac{e^{2\alpha H} - 1}{\lambda^2 e^{2\alpha H} + \beta^2}} \right). \quad (2.87)$$

- Време, за което ракетното ударно устройство достига височина H , при която скоростта на движение на устройството нагоре се анулира

$$t_\Sigma = t_0 + t_u. \quad (2.88)$$

2.4.7. Компютърен експеримент за случая на задвижване на бойник на чук с три ракетни двигателя

Компютърният експеримент реализираме за случая когато бойника на чука е снабден с три индустриални ракетни двигателя, от които двата осъществяват движението на устройството нагоре (подготвителна фаза), а третият – движение на устройството надолу (работна фаза). Подобно устройство е предназначено за задвижване на чук за забиване на пилоти под вода.

Разглеждания случай се характеризира със следните основни параметри:

- *Маса на ударното устройство*

$$m = 3(m_e + m_g) + m_h = 352 \text{ kg} \quad (2.89)$$

където

$m_e = 25 \text{ kg}$ е маса на реактивния двигател;

$m_g = 19 \text{ kg}$ - маса на горивната смес, в един реактивен двигател, осигуряваща непрекъсната работа за време 2s;

$m_h = 220 \text{ kg}$ - маса на бойника.

- *Магнитут на силата на съпротивление на средата S*

Както вече беше отбелязано големината на съпротивлението на средата зависи от следните константи :

$k = 0,64$ - съпротивителен коефициент на средата, когато обтичаното тяло има конфигурация на квадратна пластина;

$\rho = 1025 \text{ kg} / \text{m}^3$ - плътност на морската вода;

$F = 0,3 \text{ m}^2$ - лице на проекцията на обтичаното тяло върху равнина, перпендикулярна на скоростта $\vec{V}$.

Тогава за коефициента на пропорционалност k_s получаваме:

$$k_s = k \cdot \rho \cdot F = 196,8. \quad (2.90)$$

- *Тяга на ракетното ударно устройство*

Подготвителната фаза се реализира при $n = 2$

$$T = (n = 2) T_i = 14550 \text{ N} \quad (2.91)$$

- *Сила на теглото на ракетното устройство*

$$G = mg = 3452,12 \text{ N}, \quad (2.92)$$

където $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ - земно ускорение.

- *Архимедова сила*

$$A = 126,14 \text{ N}$$

- *Динамични константи*

$$\alpha = \frac{k_s}{m} = 0,559, \quad (2.93)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{T + A - G}{k_s}} = 7,552$$

- *Функция на скоростта*

- В условията на работещи ракетни двигатели

$$V = \beta \tanh(\alpha \beta t), \quad (2.94)$$

- В условия на неработещи ракетни двигатели

-

$$V = \lambda \tan\left(\arctan \frac{V_0}{\lambda} - \lambda \alpha t\right), \quad (2.95)$$

когато $V_0 = V_u$.

- *Уравнение на движение*

- В условията на работещи ракетни двигатели

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln[\cosh(\alpha \beta t)]. \quad (2.96)$$

- В условия на неработещи ракетни двигатели

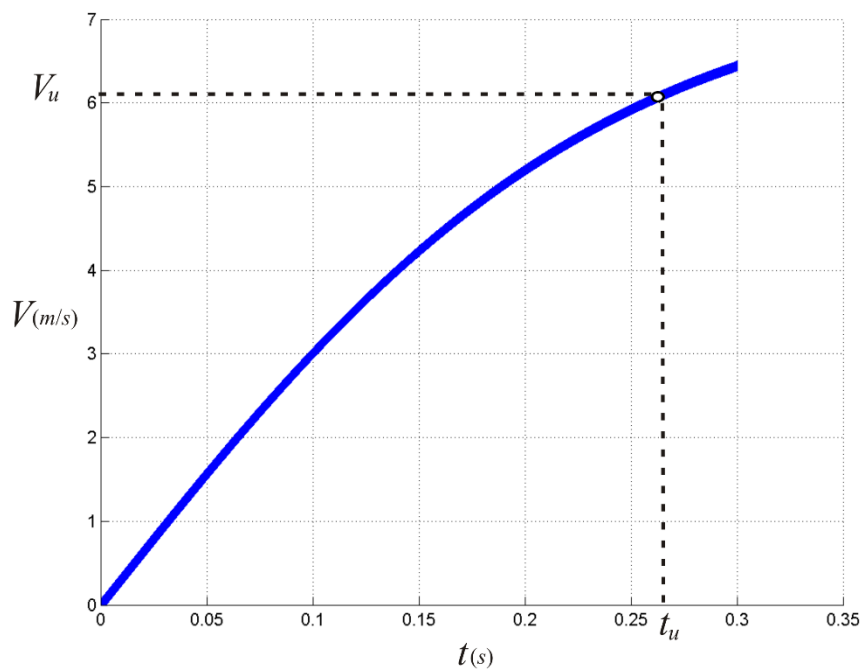
$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\left(\operatorname{arcatn} \frac{V_0}{\lambda} - \lambda \alpha t \right)}{\cos \left(\operatorname{arcatn} \frac{V_0}{\lambda} \right)}, \quad (2.97)$$

когато $V_0 = V_u$.

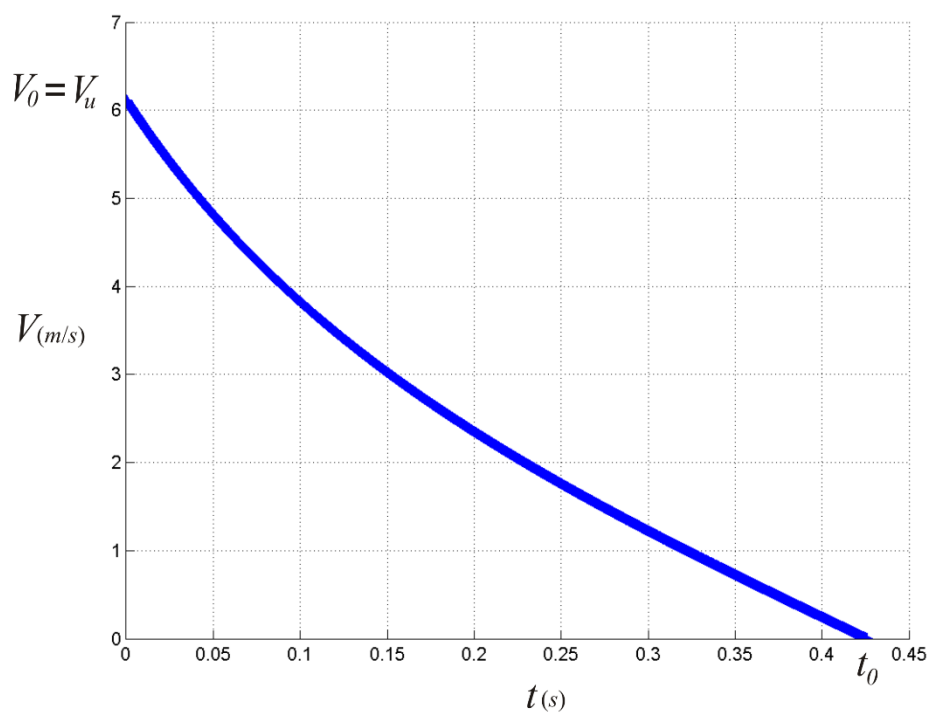
Въз основа на дефинираните тук характеристики и на база на прости компютърни програми са илюстрирани графично функции (2.86) - (2.99) (виж фиг. 25 - фиг.28), които са базови за дефиниране на конкретния динамичен процес за осигуряване на зададените технологични параметри, показани в таблица 7.

Таблица 7. Технологични параметри на симулиран управляем ударен процес

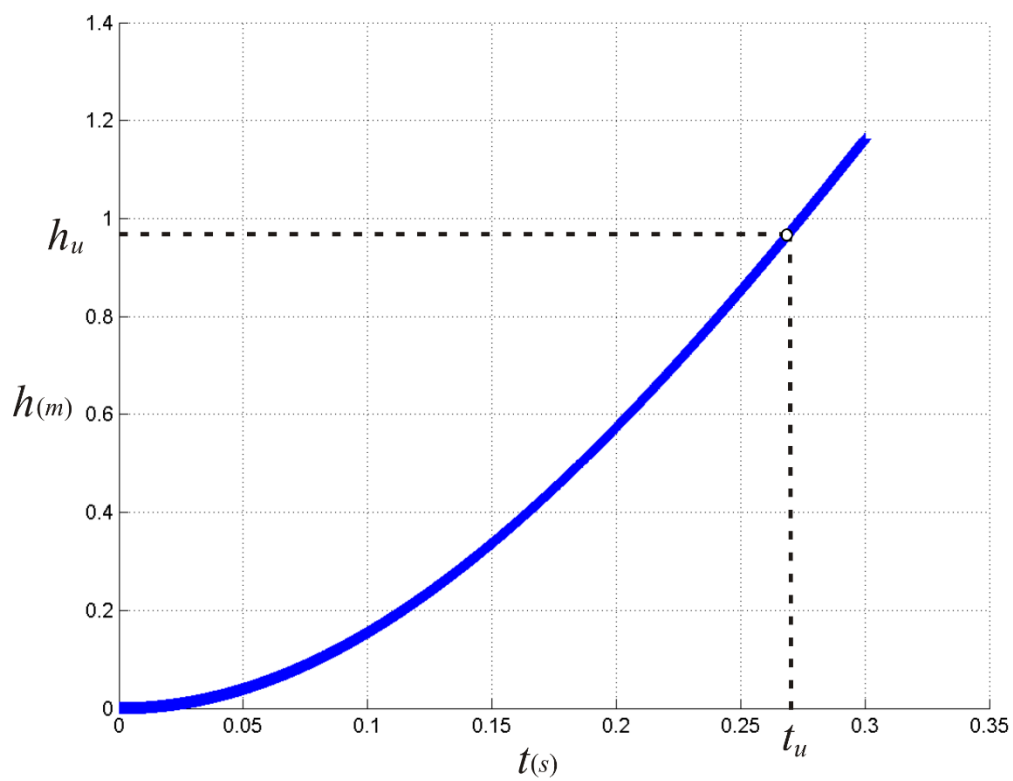
Параметър	Символ	Стойност
1.Големина на скоростта на движение на ударното устройство при работещи индустриални ракетни двигатели.	V_u	6,1186 m/s
2. Вертикално преместване на ракетното ударно устройство при работещи ракетни двигатели	h_u	0,9956 m
3. Време за реализиране на вертикалното преместване на ударното устройство при работещи ракетни двигатели.	t_u	0,2671 s
4. Преместване на ударното устройство при неработещи ракетни двигатели	h_0	1,0446 m
5. Време за реализиране на преместването на ударното устройство при неработещи ракетни двигатели.	t_0	0,4104 s
6. Максимално преместване на ударното устройство	H	2,0000 m
7. Време за реализиране на максималното преместване на ракетното ударно устройство.	t_Σ	0.6775 s



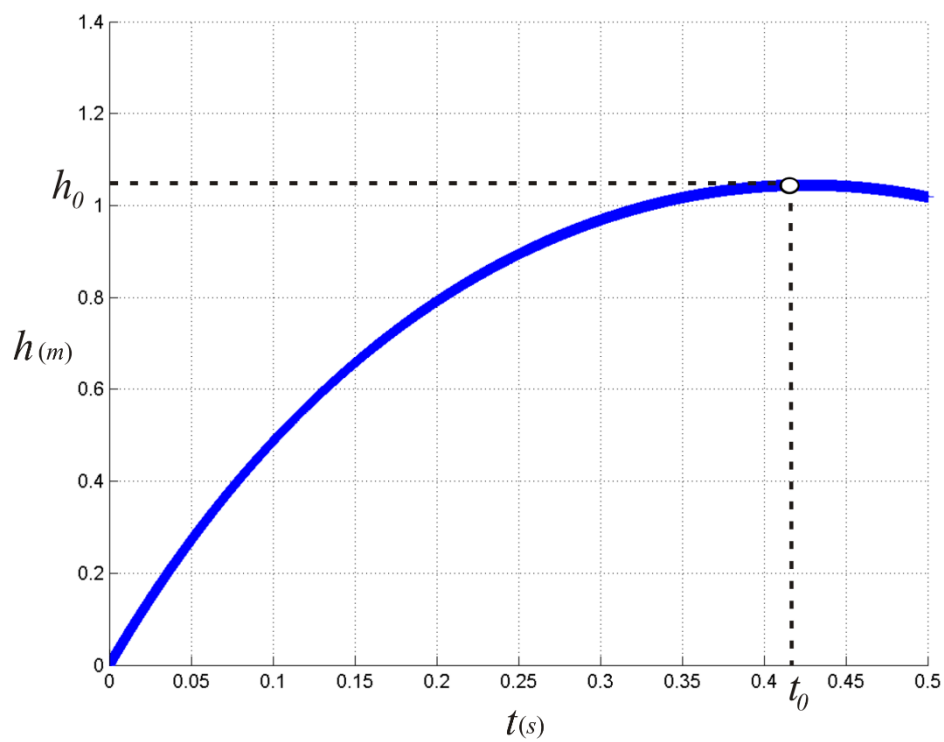
Фигура 25. Функция на скоростта на движение на ударното ракетно устройство при работещи ракетни двигатели



Фигура 26. Функция на скоростта на движение на ударното ракетно устройство при неработещи ракетни двигатели



Фигура 27. Графика на вертикалното преместване на ударното ракетно устройство при работещи ракетни двигатели

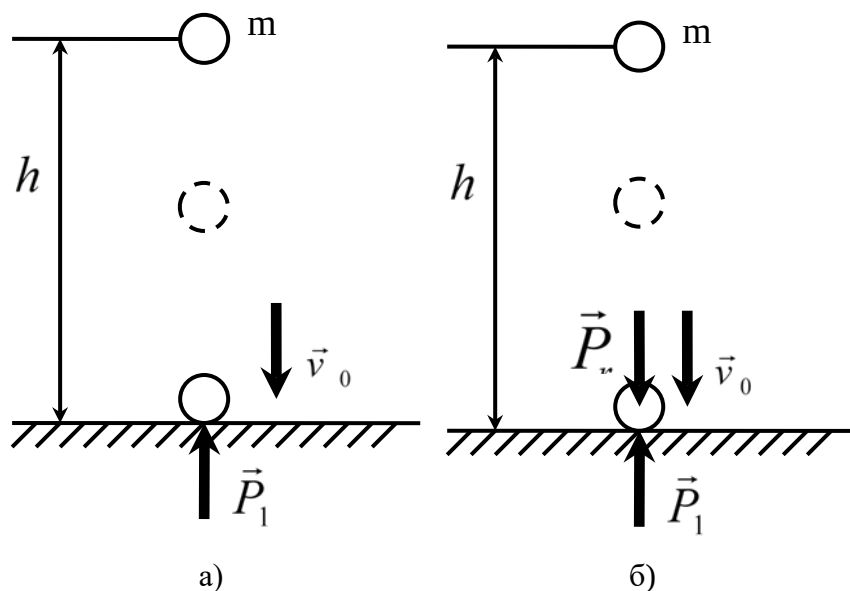


Фигура 28. Графика на вертикалното преместване на ударното ракетно устройство при неработещи ракетни двигатели

2.5. Моделиране удар на сфера при продължаващо действие на външна сила (комбиниран удар) с МКЕ

В резултат на моделиране на ударния процес с МКЕ се определят следните параметри: изменение на силата на удара във времето, разпределението и големината на напреженията и деформациите в сферата и плочата, големината на остатъчната пластична деформация (за среди с пластична компонента), времетраене на контакта, големина на отскока, силата на отскока и др.

По-надолу се моделират с МКЕ следните два случая: свободно падане на сфера, без действие на допълнителна външна сила; свободно падане и действие на допълнителна сила P_r , приложена върху сферата в момента на удара. В зависимост от големината на тази сила може да се намали отскока на сферата, при което се получава т.н. „регулируем” или „комбиниран”



Фигура 29. Постановка на задачата за моделиране с МКЕ при свободно падане на сфера върху плоча (а) и при действие на външна сила в момента на удара (в)

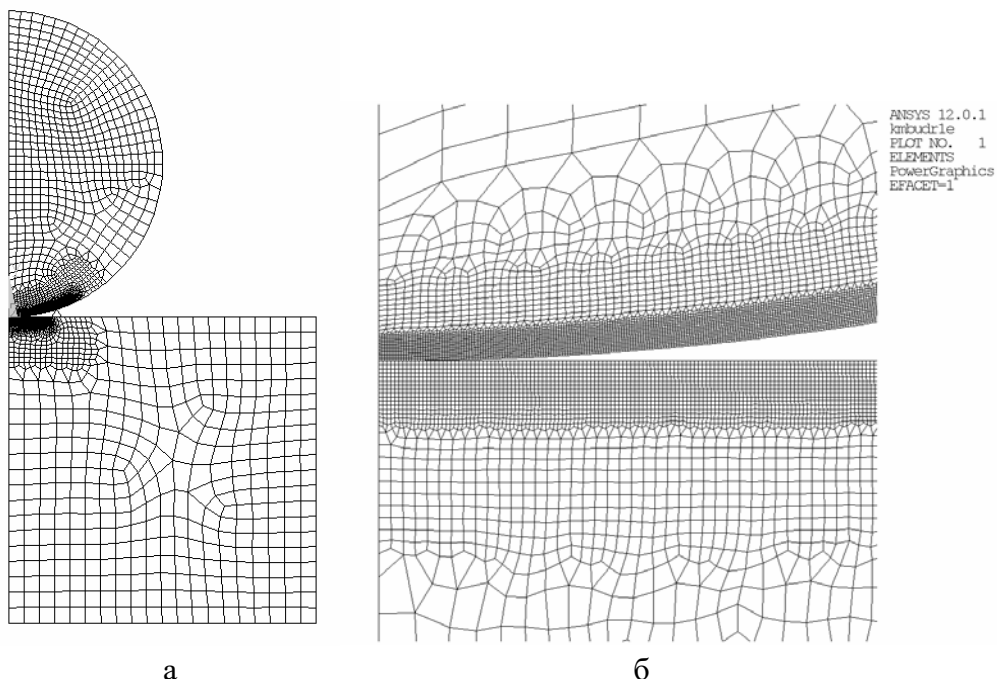
Фиг.29. Постановка на задачата за моделиране с МКЕ при свободно падане на сфера върху плоча (а) и при действие на външна сила в момента на удара (в) удар. Когато $P_r \geq P_1$, където P_1 е силата на отскока, се получава удар без отскок на сферата, наречен „прилепващ удар”. Схемите на тези два случая са показани на фиг.29.

Въз основа на полученото решение са сравнени параметрите на удара получени при моделиране на двата ударни процеса, за случая когато сферата е от идеално еластичен материал, а плочата от еластично - пластичен материал

2.5.1.Схема за моделиране с МКЕ

За моделиране на удара между сфера и плоча се използва сфера с диаметър 20 mm, за която се приема че е от идеално еластичен материал с $R_E = 686 \text{ MPa}$. Материалът на

плочата е еластично - пластичен с показател $R_E = 343 \text{ MPa}$. Масата на сферата $m = 32,88\text{g}$. Приема се, че сферата пада от височина $h = 2 \text{ m}$ и скоростта в момента на удара $V_0 = 6,28\text{m/s}$.



Фигура 30. Мрежа от крайни елементи на сферата и плочата (а) и увеличено изображение на мрежата в центъра на контакт (б).

На фиг.30. е показано омрежването с крайни елементи на сферата и плочата. За сферата са използвани 11484 елемента, които са с най-голяма гъстота около областта на удара. За плочата са използвани 4485 елемента.

Използва се експлицитна форма на крайни елементи и програмния продукт LS-DYNA.

За да може да се определи по-ясно пластичната област се използва критерия на Мизес, според който пластична деформация настъпва когато еквивалентното напрежение σ_{ek} определено с формула (2.100), е равно на границата R_E за материала на плочата

$$\sigma_{ek} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} . \quad (2.98)$$

2.6. Моделиране с МКЕ на деформационния процес при сплескване

2.6.1. Въведение

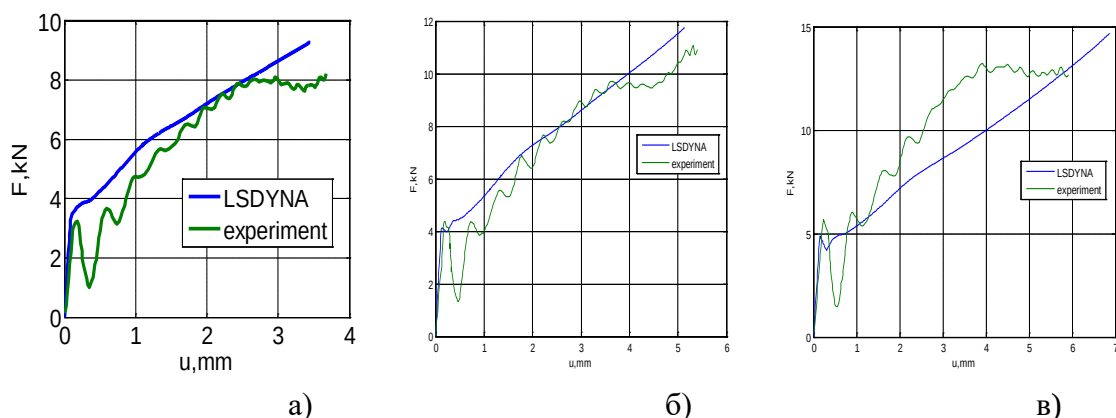
Осъществено е моделиране на деформационния процес при сплескване на цилиндрични заготовки. Предполага се Кулоново триене по контактните повърхнини. Използвана е компютърна програма по метода на крайните елементи за преходни процеси с явно интегриране по времето. Материалът на заготовките е еластично-пластичен със степенно уякчаване, а чукът и наковалнята са идеално твърди. Кинетичната енергия на удара се запазва постоянна чрез съответна промяна на скоростта му в диапазона 3 – 25 m/s и на масата му.

Получени са експериментални записи на зависимостта на силата за деформиране на цилиндричен образец от преместването на бойника при различни начални скорости на удара V . За да се оцени адекватността на предлагания модел, в настоящата работа е избран подобен материал като на оловния образец, изследван в [60]. Разликата е само в това, че не е отчетена скоростта на деформация, тъй като целта на разработката е да се изследва влиянието на скоростта на бойника (скорост на деформиране) при процеса на сплескване на заготовката. Моделът на материала е еластично-пластичен със степенно уякчаване, като законът на изменение на напрежението е

$$\sigma_y = k \bar{\varepsilon}^n, \quad (2.99)$$

където $\bar{\varepsilon}$ е ефективната пластична деформация, а k и n са константи, зависещи от материала.

При този материал на образца и условията от [2] бяха извършени компютърни симулации с програмната система за динамичен анализ по метода на крайните елементи LS-DYNA. Описаният еластично-пластичен материал със степенно уякчаване се съдържа в каталога с материали на програмната система [2]. Използвани са пространствени Лагранжеви елементи с редуцирано интегриране [3]. На фиг. 31 са приведени получените с предложения компютърен модел резултати за зависимостта на контактната сила на бойника от преместването му, сравнени с експерименталните записи, при скорост на деформиране 3 – 5 m/s. Вижда се доброто съгласуване на компютърния и физическия модел. Осцилациите при физическото моделиране вероятно се дължат на неотчетена еластичност в експерименталната система.



Фигура 31. Изменение на контактната сила F действаща върху бойника от преместването s) : а) $V = 3 \text{ m/s}$, б) $V = 4 \text{ m/s}$, в) $V = 5 \text{ m/s}$

2.6.2. Изследване влиянието на скоростта на удара върху параметрите на деформационния процес при сплескване

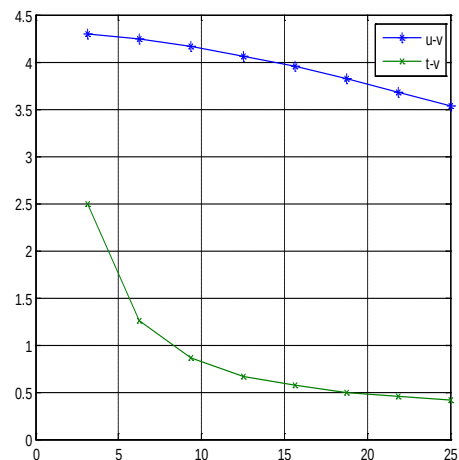
Изследван е цилиндричен оловен образец с диаметър 28 mm и височина 42 mm ($H/D = 1,5$). Материалните характеристики на образца са: модул на еластичност на линейните деформации $E = 17 \text{ GPa}$; коефициент на Поасон $\nu = 0.42$; константи в зависимостта (1) $k = 38.1391 \text{ MPa}$, $n = 0.2742$; обемна плътност $\rho = 11340 \text{ kg/m}^3$. За коефициента на триене по контактните повърхнини е приета стойност $\mu = 0.5$. Разгледани са случаи при различна начална скорост V и маса m на бойника (Таблица 2.3) така, че кинетичната енергия да се запази постоянна със стойност $E_k = 47.46 \text{ J}$.

В Таблица 8 са отразени и получените от симулацията стойности за u_{max} ($u_{max} = H_0 - H_K$, където H_0 , H_K са началната и крайна височина на деформирания образец), времето за това сплескване t^* и формата на деформираното надлъжно сечение на заготовката (използвани са означенията: Б – бъчвообразна форма, Б-Г – бъчвообразно-гъбообразна форма, Г – гъбообразна форма).

Графиките на зависимостите $u_{max} - V$ и $t^* - V$ са показани на фиг. 32. От тях следва, че сплескването на образца слабо намалява с увеличаване на началната скорост на удара, като за целия интервал на изменение на скоростта намалението е около 18 %. Това би могло да се обясни чрез теоремата за кинетичната енергия, приложена за чука. Според нея началната кинетична енергия на това тяло (постоянна при всички скорости) е равна на работата на контактната сила. Ако се проследи изменението на тази сила (фиг. 32) се вижда, че в началния интервал тя има импулсен характер, като максимумът ѝ се увеличава с увеличаване на началната скорост на удара, докато по-нататък нейната стойност почти не зависи от скоростта. Следователно средната стойност на контактната сила при по-големи скорости ще се увеличава и за да бъде работата ѝ постоянна, преместването трябва да намалява.

Таблица 8. Параметри и резултати от симулациите

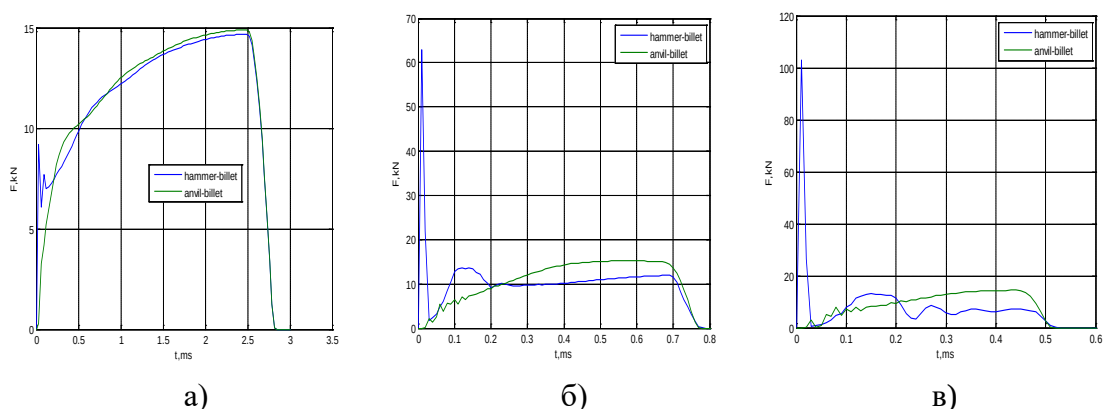
V (m/s)	m (g)	u_{max} (mm)	t^* (ms)	форма
3.125	9720	4.2919	2.49	Б
6.25	2430	4.2464	1.26	Б
9.375	1080	4.1665	0.86	Б
12.5	607.5	4.0643	0.67	Б-Г
15.625	388.8	3.9505	0.57	Б-Г
18.75	270.0	3.8229	0.5	Б-Г



Фигура 32. Зависимост на u_{max} и времето t^* от началната скорост на удара

Времето за деформация намалява бързо с увеличаване на началната скорост на удара, като при скорост 25 m/s намалението приблизително 84 %, в сравнение с времето за деформация със скорост на бойника 3,125 m/s. За този случай обяснение може да се даде, като се използва теоремата за импулсите, приложена за бойника. От нея следва, че времето за сплескване зависи обратно пропорционално от произведението на началната скорост на бойника и средната стойност на контактната сила. При увеличаване на скоростта, както по-горе беше обяснено, нараства и средната стойност на контактната сила, следователно времето за сплескване ще намалява.

При по-малките начални скорости на удара формата на деформиране на образеца е бъчвообразна. Като причина за това може да се посочи наличието на сравнително голямо триене по контактните повърхнини и



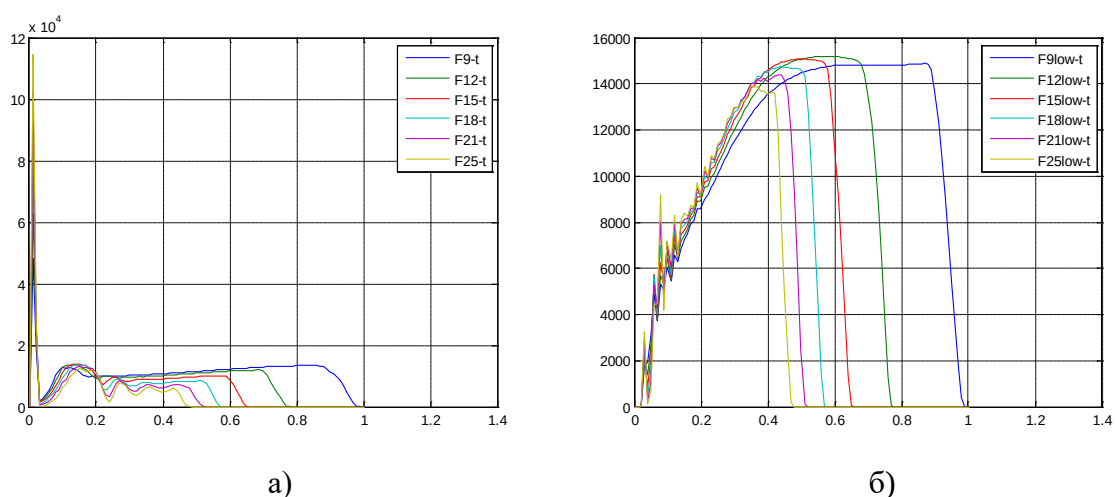
Фигура 13. Изменение на контактните сили действащи върху бойника и Върху наковалнята за времето на деформация: а) $V = 3.125$ m/s, б) $V = 12.5$ m/s, в) $V = 21.875$ m/s

възможност за по-големи радиални премествания в средната по височина част на образеца. С увеличаване на началната скорост на удара образецът придобива комбинирана бъчвообразно-гъбообразна форма. В този случай се оформят две области: в средната има големи радиални премествания, а по горната контактна повърхнина локалните радиални премествания не могат да бъдат ограничени от силите на триене. При най-големите скорости материалът в горната част се деформира по-интензивно, отколкото в долната и средната и формата на образеца става гъбообразна.

На фиг. 33 е показано изменението с течение на времето на контактните сили върху чука и върху наковалнята при деформиране на образеца за най-малката, средната и най-голямата начална скорост в изследвания интервал.

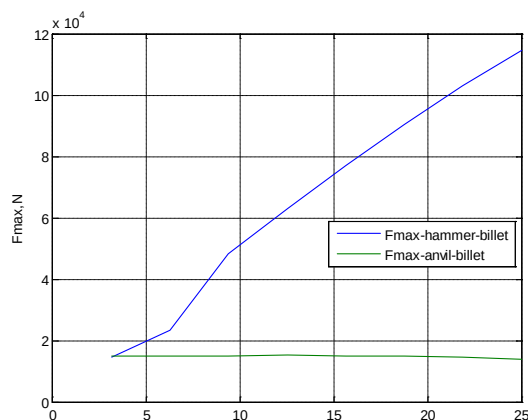
От получените зависимости може да се определят два етапа на изменение на силите, действащи върху бойника и върху наковалнята, при скорости на деформиране 12.5 m/s и 21.875 m/s. Първият етап се характеризира с ясно изразен импулсен характер на силата действаща върху бойника и нулева стойност на силата действаща върху наковалнята. През този етап силата действаща върху бойника нараства до максимум след което пада до нула, за много кратко време, от порядъка на 0,3 ms. Вторият етап се характеризира с плавно и с почти еднаква по големина нарастване на силите действащи върху бойника и наковалнята, като максималната стойност остава много по-малка от максималната импулсна сила.

Изменението на контактните сили върху бойника и върху наковалнята в зависимост от времето за различни начални скорости на удара е дадено на фиг. 34. От нея се вижда, че пълният ударен импулс на контактните сили намалява с увеличаване на скоростта на удара, а закъснението на силата върху наковалнята е равно на времето, за което ударната вълна достига наковалнята.



Фигура 34. Зависимост на контактните сили от времето: а) върху бойника, б) върху наковалнята

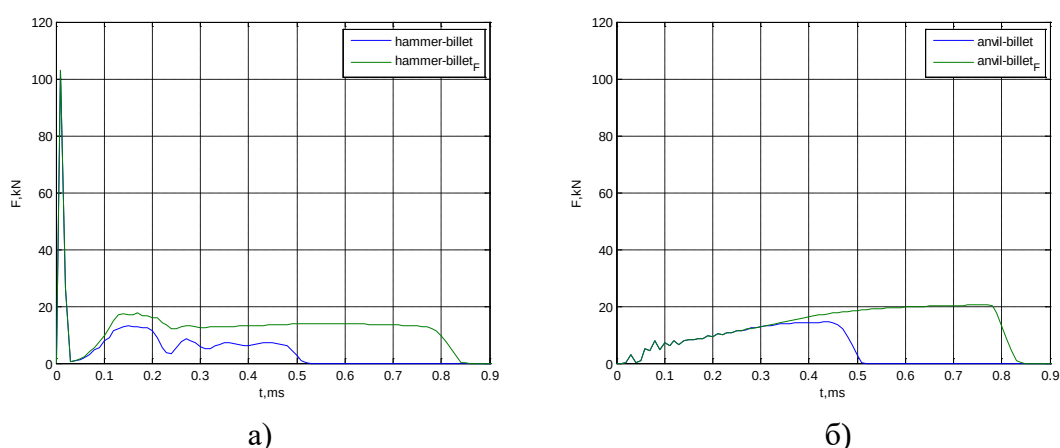
На фиг. 35 е показана зависимостта на максималните стойности на контактните сили от началната скорост на удара. Вижда се, че максималната стойности на контактната сила действаща върху бойника нарастват почти линейно с увеличаване на скоростта. Другата контактна сила (върху наковалнята) има практически постоянна максимална стойност. Следователно в началото на удара (за много малък интервал от време от порядъка на десети от милисекундата) чукът се натоварва много повече от наковалнята. [37-40]



Фигура 35. Зависимост на максималните стойности на контактните сили от началната скорост на удара

2.6.3. Влияние на допълнителна външна сила, приложена на чука по време на удара, върху параметрите на деформационния процес при сплескване

За изследване на ефекта „комбиниран удар“, е направена симулация на процеса при въздействие на допълнителна постоянна сила по време на удара. При начална скорост на чука 21.875 m/s и сила 10 kN на фиг.36 са



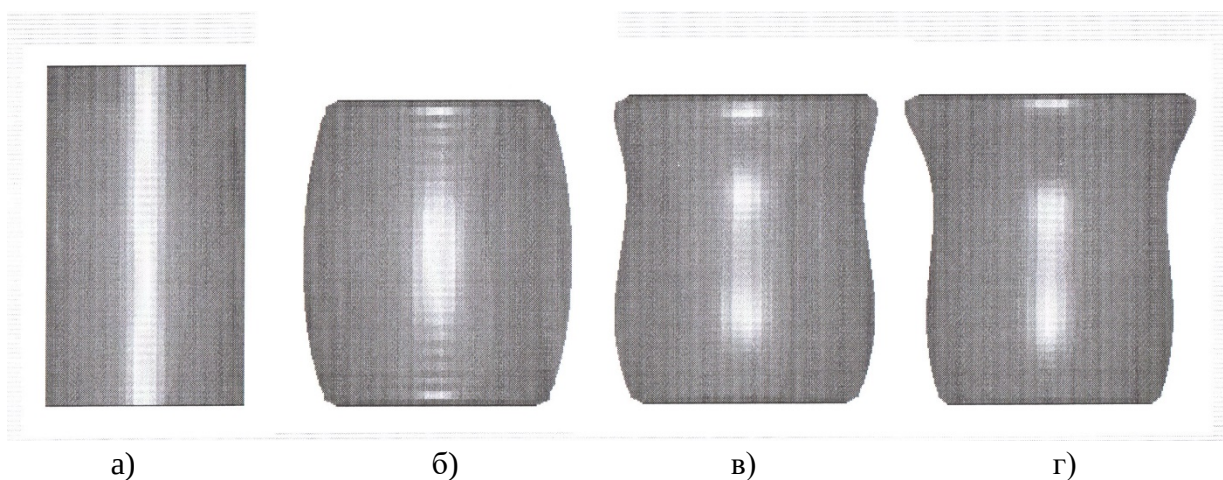
Фигура 36. Зависимост на контактните сили върху чука и върху наковалнята от времето при $V = 21.875 \text{ m/s}$: а) без допълнителна сила; б) при действие на допълнителна сила $P = 10 \text{ kN}$

съпоставени контактните сили върху чука и наковалнята в случаите без и с наличието на допълнителната сила. Вижда се, че времето за сплескване е по-голямо при прилагане

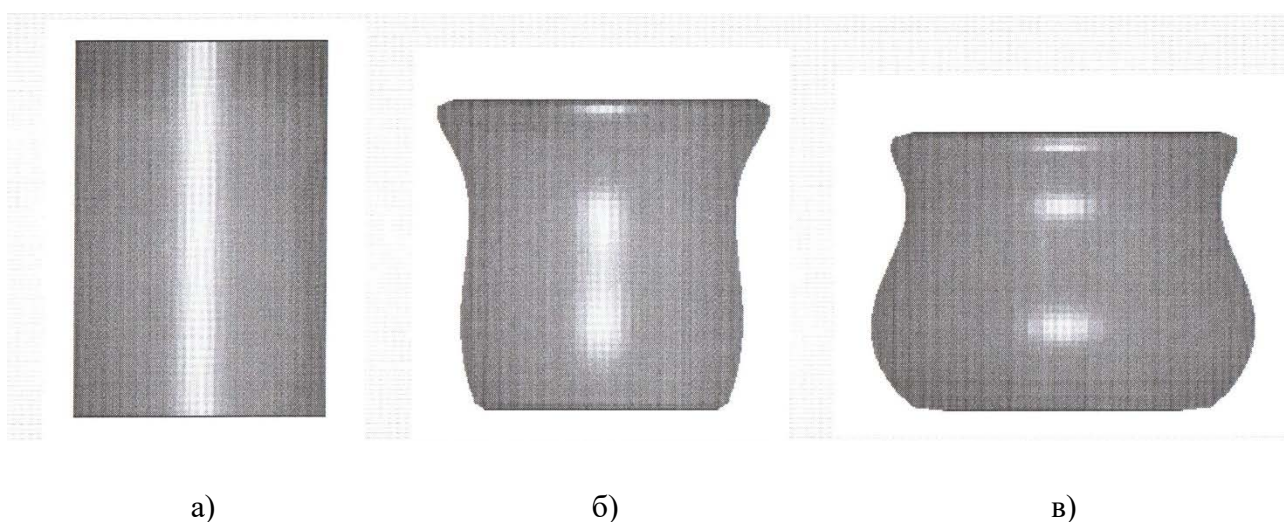
на допълнителна външна сила. При наличие на такава сила стойностите на сплескването и времето за деформиране са: $u_{max} = 7.55 \text{ mm}$, $t^* = 0.78 \text{ ms}$, Сравняването им със записаните в табл. 8 стойности показва, че с прилагането на допълнителна външна сила се увеличават сплескването и времето за деформиране.

2.6.4. Моделиране формата на деформираните образци

На фиг.37 е показана формата на деформираните образци при различни скорости на бойника. Вижда се, че с увеличаване скоростта на деформиране триенето по контактната повърхнина между заготовката и бойника намалява, в резултат ма което се получава по-отчетлива гъбообразна форма. [41]



Фигура 37. Изходна заготовка (а) и форма след деформиране със скорост на бойника:
б – 3,125 m/s; в – 15,625 m/s; г – 21,875 m/s



Фигура 38. Изходна заготовка а). Сравнение формата на деформирана заготовка при скорост на бойника 21,875 m/s: б) - без действие на допълнителна сила; в) - при действие на допълнителна сила $P = 10 \text{ kN}$

На фиг.38 е дадено сравнение между формата на деформираните заготовки при деформиране със скорост 21,875 m/s за случаите на действие на допълнителна сила (комбиниран удар) и без действие на такава сила. Вижда се, че намаляване височината на заготовката при действие на допълнителна сила е по-голямо, отколкото без действие на такава сила. Има ясно изразена тенденция за намаляване на гъбообразната форма, за сметка на бъчвообразната, като тази тенденция е ясно изразена в областта от заготовката в близост до наковалнята. Това може да се обясни със следните особености на действието на допълнителната сила в процеса на деформиране за случая на „комбиниран удар“:

- бързо затихване на еластичните и пластични вълни, които се разпространяват в заготовката, в резултат на което в частта близка до наковалнята деформационния процес протича както при малки скорости на деформиране;
- от фиг.36 се вижда, че в резултат на действие на допълнителната сила изчезва.

Импулсната сила, която се получава в началото на удара от страната на контакт между бойника и заготовката и контактните сили нарастват плавно, подобно на случая при малка скорост на деформиране. Високата скорост на удара оказва влияние върху големината на контактното триене, поради което се получава гъбообразна форма в горната част на заготовката. [75-76]

2.6.5. Обсъждане на резултатите от моделирането

Проведените изследвания дават възможност да се формулират следните изводи.

Съпоставянето на резултатите, получени от предложения в разработката компютърен модел с експериментални изследвания показва достатъчно добро съответствие.

С увеличаване на началната скорост на чука сплескването намалява с около 18 %, а времето за деформиране намалява с около 84 %.

При по-малките начални скорости на удара формата на деформиране на образеца е бъчвообразна. С увеличаване на тези скорости образецът придобива комбинирана бъчвообразно-гъбообразна форма. При най-големите скорости формата на образеца става гъбообразна.

Прилагането на допълнителна външна сила $P = 10 \text{ kN}$ в процеса на деформация, създава условия за „комбиниран удар“, при което се увеличава степента на деформация на образеца и се променя неговата форма – фиг.38. Тези изследвания трябва да се приемат като първоначални, подлежащи на допълнително уточняване.

Контактната сила на чука има импулсен характер в началото на удара с много голяма максимална стойност, като през останалото време е малка и се изменя в сравнително тесен интервал. Максималните стойности на тази сила нарастват значително с увеличаване на началната скорост на удара.

Контактната сила на наковалнята възниква малко след началото на удара, като по-нататък плавно нараства и има малко по-голяма средна стойност от контактната сила на чука.

Прилагането на допълнителна външна сила води до увеличаване на ефективността на процеса на сплескване. По-пълно този въпрос ще бъде изучен при по-нататъшни изследвания.

ГЛАВА 3. Резултати от лабораторни експерименти за пластична и еластична деформация чрез сплескване в условия на комбиниран удар. Анализ на резултатите. Изводи.

3.1. Въведение удар пластично тяло

При еластично – пластични тела обикновения удар се характеризира с това, че енергията на удара $E_y = m.V_y^2 / 2$ (J), където m (kg) е масата на удрящия елемент, а V_y (m/s) е скоростта на удар, се изразходва за еластична E_e и пластична деформация E_d на деформираното тяло, за еластична деформация на деформирания инструмент $E_{и}$, за отскок на удрящия елемент E_o , за генериране на шум и вибрации $E_{ш}$ и за преодоляване на триенето по контактните повърхнини $E_{тр}$, т.е.

$$E_y = E_e + E_d + E_{и} + E_o + E_{ш} + E_{тр}. \quad (3.1)$$

В работата [1] е показано, че загубите $\sum E_z = E_e + E_{и} + E_o + E_{ш} + E_{тр}$ може да бъдат най-много 20 % от E_y .

В случая на сплескване на цилиндрични образци, деформираният инструмент се състои от две твърди успоредни плочи-горна и долна плочи, като долната е неподвижна, а горната плоча пада от зададена височина h . В момента на удара на подвижната плоча в деформираното тяло, възниква ударната сила P_y , която нараства до максимална стойност, при достигане на крайно дилно положение на плочата ($V_y = 0$). В първия момент на контакт се генерират еластични вълни, а след развитие на контактна пластична деформация и на пластични вълни. Те се разпространяват по дължината на тялото със скорост V_e – за еластични и V_p – за пластични вълни. Стойностите на V_e и V_p зависят от еластичните и пластични характеристики на материала на деформираното тяло. Освен разгледаните до тук ефекти при скорост на удара над 5 m/s трябва да се вземе пред вид и влиянието на допълнителни инерционни сили, възникващи в обема на деформираното тяло [42-46].

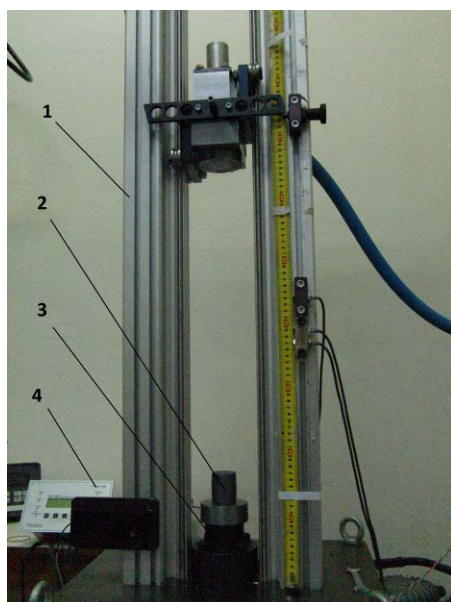
Ако към падащата част се приложи допълнителна сила P' , се създават условия за изменение на параметрите на ударния и деформационен процеси [48]. Като се изменени големината на допълнителната сила P_d може да се променят параметрите на ударния процес, до предварително зададени стойности. Този вид удар се дефинира като „управляем удар”.

Техническото решение за получаване на управляем удар при машини с ударно действие (чукове), е чрез използване на промишлен ракетен двигател [1]. Реализирането на тази идея е представено в [56]. В Лаборатория „Изследване на технологични ударни процеси” към ТУ-София са проведени изследвания за ефекта от приложение на управляван удар при различни процеси на пластична деформация [49-52]. Установено е значително нарастване на степента на деформация при използване на този ефект. В изследванията са взети предвид само някои параметри на ударния процес

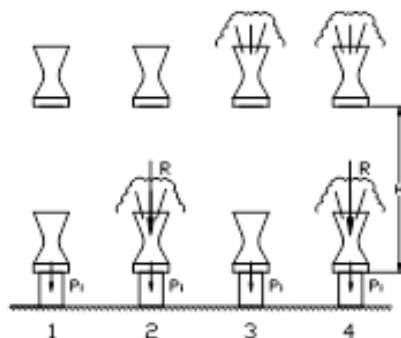
– скорост на деформация и коефициент на възстановяване, поради затруднения за използване на датчици за измерване на други параметри, като ускорение и сила на удара, времетраене на удара. Например, ако искаме да измерваме ускорението на удар чрез съществуващите акселометри, трябва да се знаят границите на изменение на този параметър, тъй като датчиците работят в определени граници – до 10 g, до 100 g, до 1000 g, над 1000 g, където g е земното ускорение. В настоящото изследване за определяне параметрите на ударния процес се използва високоскоростна камера и специализиран софтуер към нея. Това прави възможно измерване на всички параметри на ударния процес и по-точно определяне на ефекта от приложение на управляем удар при пластична деформация чрез сплескване.[53-55]

3.1.1. Опитна уредба

За провеждане на експериментите се използва стенд, показан на фиг.39. За получаване ефекта на управляем удар се използва студен ракетен двигател, задвижван от сгъстен въздух. Налягането на въздуха е до 30 бара. Максималната сила на двигателя (тяга) е 226 N. Маса на падащата част е $m = 6.17 \text{ kg}$, а максималната височина на падане е 1.1 m. Получаваната скорост на удара е в границите 2.8 – 7.8 m/s. Студения ракетен двигател се използва както за ускоряване на падащата част, така и за прилагане на допълнителна сила през време на удара, в зависимост от избрания режим на работа – Фиг.40.



Фигура 39. Стенд за изследване на ударни процеси: 1 – колони; 2 – образец; 3 - долна твърда плоча; 4 – електронно устройство за избор режима на работа



Фигура 40. *Режими на работа на студен ракетен двигател: 1 – обикновен удар (свободно падане с изключен двигател); 2 – управляем удар при свободно падане; 3 – обикновен удар с ускоряване на падащата част; 4 – управляем удар с ускоряване на падащата част.*

Деформацията се осъществява при максимално триене по контактните повърхнини. За да се постигне това деформиращите плочи са обработени с голяма грапавост.

3.1.2. Материал и размери на образците

Образците се изработват от технически чисто олово (Pb 99.99 %) доставено във вид на стандартни отливки с маса 50 kg. След отрязване на част от отливката тя се подлага на многократна студена пластична деформация, до получаване на многостепен прът с диаметър близък до диаметъра на образците. Това се прави за да се разруши лятата структура и да се гарантира, че след деформация околната повърхнина на образците ще бъде гладка (без ефект на портокалова кора). Проведено е изпитване на натиск, в резултат на което са определени: якост на натиск $R_m = 6.3 \text{ MPa}$, модул на еластичност $E = 17.6 \text{ GPa}$.

От така подготвените заготовки се изработват 60 броя образци с отношение на височината H_0 към диаметъра D_0 $H_0/D_0 = 1.5$, при $D_0 = 18 \text{ mm}$.

- Последователност на работа

За да се постигнат различни скорости на удара при свободно падане (Режими 1 и Режим 2 от Фиг.40) падащата част се пуска от височина $h = 1.1 \text{ m}$, 0.8 m , 0.5 m , а при Режими 3 и Режим 4 падащата част се пуска от височина $h = 1.1 \text{ m}$ и 0.8 m . Преди и след удара се измерва височината на образца H_0 и H и с тези данни се пресмята относителната деформация ε

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H}{H_0} = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot 100, \% \quad (3.2)$$

За всяка височина на падане H_0 се осъществява деформация с четирите режима на удар от Фиг.40, като за всяка височина и режим се използват по три образца. Получените данни от трите образци се усредняват с точност 0.1 mm .

При всеки експеримент се заснема ударния процес с високоскоростна камера НАС НХ-6, след което видеоизображенията се обработват със софтуерния продукт Vicasso 5.1 [7]. В случая се работи със скорост на заснемане 3000 кадъра/сек при пълна HD

резолюция. След обработване на видеоизображенията, се получават данни за скоростта на удар V_y , ускорението на удар a_y и времето за протичане на удара t_y . С тези данни се пресмята енергията на удар E_y и силата на удар P_y по формулите

$$E_y = \frac{mV_y^2}{2}, \text{ J}, \quad (3.3)$$

$$P_y = a_y m, \text{ N}. \quad (3.4)$$

3.1.3. Резултати от експерименти за пластична деформация чрез сплескване на цилиндрични образци от олово с постоянно отношение H/D

Сплескване на цилиндрични заготовки се използва като първи преход при технологичния процес за горещо обемно щамповане. В този преход се постига първоначална сравнително малка деформация ($\epsilon = 5\% - 20\%$) и се премахва по-голяма част от окисите (окалина), получени по повърхността на заготовките при нагриване до висока температура – в границите $1000^\circ\text{C} - 1250^\circ\text{C}$ за стомана.

В практиката се използват заготовки с отношение $H/D = 0.5 - 2.2$, като най-често $H/D = 1.0 - 1.8$. В за експериментално изследване на този деформационен процес в лабораторни условия се използват образци от олово или пластилин. Обикновено размерите на образците зависят от силата, която може да се приложи от използваната машина за деформация (за случая на хидравлични и механични преси). При изследване на ударно деформиране се използват чукове, основната характеристика на които е кинетичната енергия на удара E_y – формула (1.2). Друга характеристика е скоростта на удар V_y , m/s. Най-често използваните в практиката въздушни чукове имат $V_y = 5 - 7.5$, m/s и маса на падащите части $G = 1, 2, 3, 5, 8, 10$ t. Колкото по-голяма е масата на падащите части, толкова по-малка е скоростта V_y . За щамповане на изковки със сложна форма от специални сплави, главно за космически и военни цели, се използват високоскоростни газови чукове, за които $V_y = 14, 16, 18, 20$ m/s.

В настоящата дисертация е предвидено, да се осъществят лабораторни изследвания на процесите на пластична деформация в условията на комбиниран удар, при скорост на удара $V_y = 3 - 8$ m/s. За изследване на тези процеси при по-голями скорости се предвижда провеждане на полупромишлени експерименти.

Поради сравнително малката енергия за деформация която може да се получи на лабораторния стенд, във всички експерименти за пластична деформация се използват образци от олово (99,99 Pb).

Образците са с постоянно отношение на височината H_0 към диаметъра D_0 , $H_0/D_0 = 1,5$ - Таблица 9 (с K_0 е означен обемът на образците).

Таблица 9. Размери на образците за сплескване при $H_0/D_0 = 1,5$

D_0, sm	2.4	2.6	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	4.0
H_0, sm	3.6	3.9	4.2	4.5	4.8	5.1	5.4	5.7	6.0
K_0, sm^3	16.28	20.70	25.85	31.99	38.58	46.28	54.94	64.61	75.36

Деформацията се осъществява чрез сплескване при максимално триене по контактните повърхнини. Масата на падащите части е 9,12 kg. Експериментите се осъществяват в условията на свободен удар (без действие на допълнителна сила през време на удара) – Режим 2 и при комбиниран удар - Режим 3 (фиг.40). Скоростта на удара $E_y = 7,20 \text{ m/s} \pm 2\%$ е еднаква за двата режима. Експерименти при които разликата в скоростта на удара за двата режима е $\Delta V_y \neq \pm 2\%$ не се взимат под внимание. След деформацията се измерват размерите на образците и се изчисляват следните параметри: ε , E_y , специфичната енергия на удара E_c

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_k}{H_0} = \frac{\Delta H}{H_0} \cdot 100, \%, \quad (3.5)$$

$$E_c = \frac{E_y}{K_0}, \text{ J/sm}^3, \quad (3.6)$$

където: ε е относителна степен на деформация, %; H_k е крайната височина на деформирания образец, sm; E_y е енергията на удара, J; K_0 е обемът на заготовката, sm^3 . Тук се използва параметърът „специфична енергия на удара” E_c [12] вместо «специфично налягане», защото при чукове основният параметър е енергията на удара E_y . Снимка на стенда с инструменталната екипировка за деформиране чрез сплескване е показана на фиг.41.

Целта на изследването е да се установи какво е влиянието на ефекта «комбиниран удар» при деформация чрез сплескване с различна специфична енергия и постоянно отношение H/D на образците. Тъй като енергията на удара E_y е постоянна ($V_y = \text{const.}$, $G = \text{const.}$), при увеличаване на D_0 и $H_0/D_0 = \text{const.}$ обемът на образците нараства, а специфичната енергия E_c намалява.

За изработване на образците се използва олово на слитъци, с маса на слитъка 25 kg. От слитъка с ковашки топор се отрязва отделна част, която се обработва в следната последователност:

- Деформиране чрез сплескване на хидравлична преса. След всяка деформация парчето олово се завърта, като постепенно се оформя заготовка с приблизително кръгло сечение (многостенна призма). Целта е да се премахнат леярските дефекти – закриване на шупли, пори, разрушаване на едрозърнестата структура и получаване на дребнозърнеста структура в резултат на протекла рекристализация. По този начин се гарантира, че повърхността на получаваните след експериментите образци ще бъде гладка и равномерна, а не с ефекта на „портокалова кора”. Получаване на гладка повърхнина на образците след експериментите е гаранция за добра точност при измерване на техните размери;

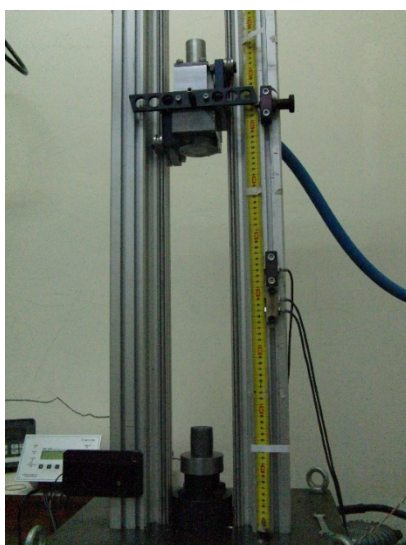
- Струговане на получената чрез деформиране заготовка. В резултат се получават образци за експериментите с точност на размерите ± 0.05 mm и добра гладкост на повърхнините.

Резултатите от експеримент 1 са дадени в Таблица 10.

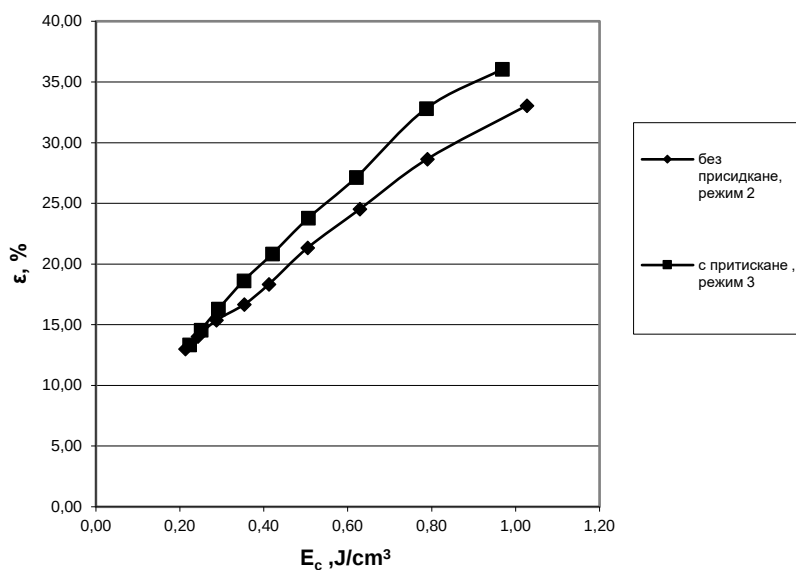
С данните от Таблица 10 е построена зависимостта $E_c - \epsilon$ – фиг.42.

Таблица 10. Данни получени от Експеримент 1.

Режим	D_0 , sm	H_0 , sm	H/D	H_k , cm	ΔH , cm	ϵ , %	V_y , m/s	E_y , J	K_0 , sm ³	E_c , J/sm ³
2(Сво боден удар)	2.40	3.60	1.5	2.36	11.9	33.06	4.73	167.1	16.28	4.24
	2.55	3.77	1.48	2.69	10.8	28.65	4.62	165.8	21.00	4.26
	2.95	4.20	1.5	3.17	10.3	24.52	4.36	162.6	25.85	4.24
	3.00	4.50	1.5	3.54	9.6	21.33	4.18	160.3	31.79	4.27
	3.20	4.80	1.5	3.92	8.8	18.33	4.26	159.0	38.58	4.23
	3.40	5.10	1.5	4.25	8.5	16.67	4.43	163.5	46.28	4.24
	3.60	5.40	1.5	4.57	8,3	15.37	4.25	157.6	54.94	4.26
	3.80	5.70	1.5	4.90	8	42.47	4.25	156.7	64.61	4.24
	4.00	6.00	1.5	5.22	7.8	13.00	4.18	160.3	75.36	4.23
3 (Упра вляем удар)	2.40	3.55	1.48	4.64	4.2	36.06	4.25	157.6	16.28	4.25
	2.60	3.90	1.5	2.26	4.2	32.82	4.58	165.3	21.00	4.26
	2.80	4.20	1.5	4.25	4.2	27.14	4.18	160.3	25.85	4.24
	3.00	4.50	1.5	1.57	4.2	23.78	4.21	160.8	31.79	4.23
	3.20	4.80	1.5	4.25	10.0	20.83	4.32	162.1	38.58	4.25
	3.40	5.10	1.5	4.20	9.5	18.63	4.40	163.0	46.28	4.24
	3.60	5.40	1.5	1.90	8.8	16.30	4.18	160.3	54.94	4.26
	3.80	5.70	1.5	3.18	8.3	14.56	4.29	161.7	64.61	4.24
	4.00	6.00	1.5	4.24	8.0	13.33	4.15	168.0	75.36	4.24



Фигура 41. Снимка на стенда с инструментална екипировка за сплескване



Фигура 42. Диаграма на зависимостта $E_c - \epsilon$ при образци с $D_0/H_0 = 1.5$

3.1.4. Резултати от експерименти за сплескване на цилиндрични образци от олово с различно отношение H/D

Използваните при тези експерименти образци са с $H_0/D_0 = 1.2; 1.5; 1.8$ и постоянен обем $K_0 = \text{const.} = 4.786 \text{ cm}^3$ – Таблица 12. Технологията за получаване на образците е същата както в Раздел 3.1.3.

Осъществява се деформация чрез сплескване при максимално триене по контактните повърхнини. Масата на падащите части е 6,17 kg. Експериментите се осъществяват при условията на свободен удар – Режим 2 и при комбиниран удар - Режим 3 от Фиг.40. Скоростта на удара е в границите $V_y = 2,90 - 8,80 \text{ m/s} \pm 2 \%$ и е еднаква съответните експерименти при двата режима.

$$e = \sqrt{\frac{H_{\text{отс}}}{H}} = \frac{V_{\text{отс}}}{V_y}, \quad (3.7)$$

където: H е височина на падане на подвижните части, m; $H_{\text{отс}}$ е височина на отскока след удара m; $V_{\text{отс}}$ е скоростта на отскока, m/s.

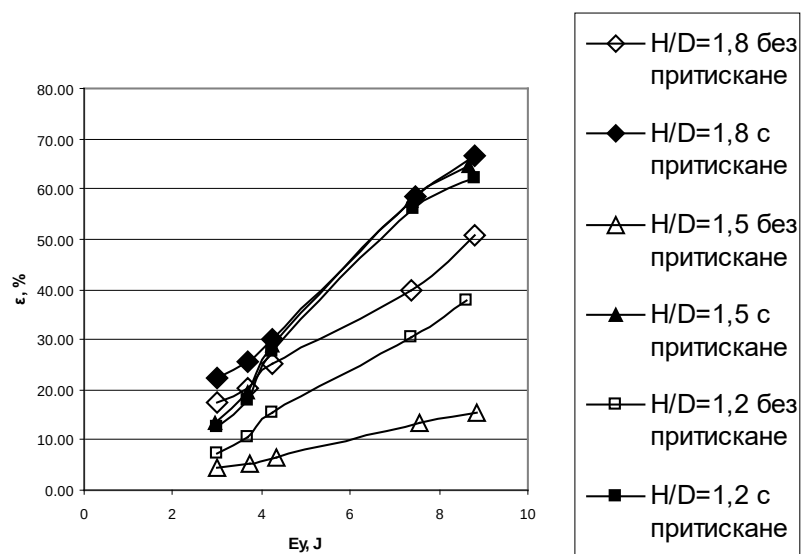
Целта на изследването е да се установи какво е влиянието на отношението H/D върху параметрите на процеса в условията на „комбиниран удар”.

Таблица 11. Данни от Експеримент 2.

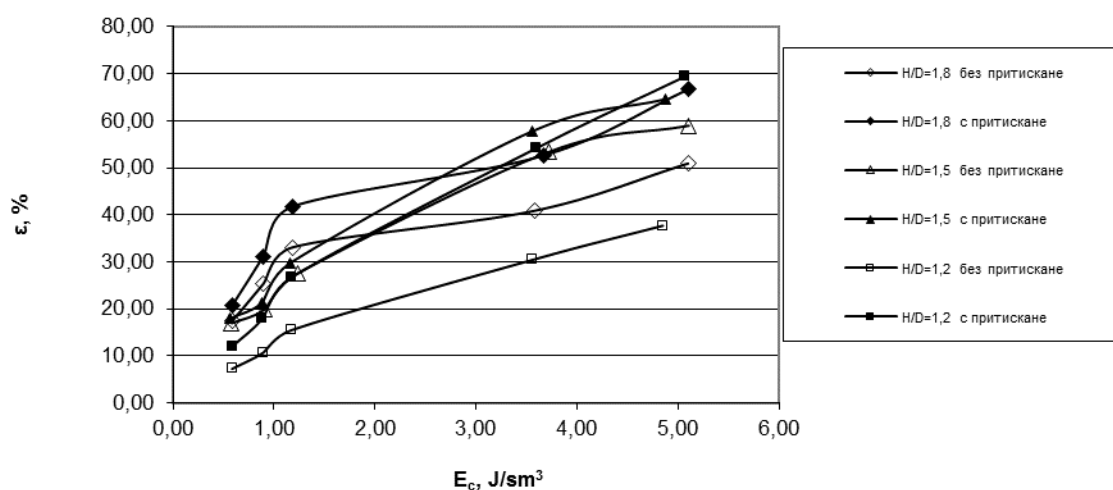
	D ₀ , sm	H ₀ , sm	H ₀ /D ₀	H _k , sm	ΔH, sm	ε, %	V _y , m/s	E _y , J	K ₀ , sm ³	E _c , J/sm ³	H _{отс} , m	e -
2	1.72	2.07	1.2	1.92	0.15	7.25	2.99	2.81	4.807	0.58	0.005	0.0707
	1.72	2.07	1.2	1.85	0.22	10.63	3.69	4.28	4.807	0.89	0.006	0.0774
	1.72	2.07	1.2	1.75	0.32	15.46	4.23	5.63	4.807	1.17	0.006	0.0774
	1.72	2.07	1.2	1.44	0.63	30.43	7.38	17.13	4.807	3.56	0.002	0.0447
	1.72	2.07	1.2	1.29	0.78	37.68	8.61	23.31	4.807	4.85	0.002	0.0447
	1.6	2.4	1.5	1.97	0.43	17.92	2.99	2.81	4.823	0.58	0.003	0.0547
	1.6	2.4	1.5	1.89	0.51	21.25	3.72	4.35	4.823	0.9	0.003	0.0547
	1.6	2.4	1.5	1.74	0.66	27.5	4.35	5.95	4.823	1.23	0.003	0.0547
	1.6	2.4	1.5	1.12	1.35	56.25	7.55	17.93	4.823	3.72	0.001	0.0316
	1.6	2.4	1.5	0.97	1.53	63.75	8.85	24.63	4.823	5.11	0.001	0.0316
	1.5	2.71	1.8	2.24	0.47	17.34	2.98	2.79	4.786	0.58	0.002	0.0447
	1.5	2.71	1.8	2.16	0.55	20.3	3.69	4.28	4.786	0.89	0.002	0.0447
	1.5	2.71	1.8	2.03	0.68	25.09	4.25	5.68	4.786	1.19	0.002	0.0447
	1.5	2.71	1.8	1.63	1.08	39.85	7.38	17.13	4.786	3.58	0.002	0.0447
	1.5	2.71	1.8	1.33	1.38	50.92	8.81	24.41	4.786	5.1	0.002	0.0447
3	1.72	2.07	1.2	1.81	0.26	12.56	2.99	2.81	4.807	0.58	0.004	0.0632
	1.72	2.07	1.2	1.7	0.37	17.87	3.68	4.26	4.807	0.89	0.004	0.0632
	1.72	2.07	1.2	1.5	0.57	27.54	4.24	5.65	4.807	1.18	0.002	0.0447
	1.72	2.07	1.2	0.91	1.16	56.04	7.42	17.31	4.807	3.6	0	0
	1.72	2.07	1.2	0.78	1.29	62.32	8.8	24.35	4.807	5.07	0	0
	1.6	2.4	1.5	2.08	0.32	13.33	2.93	2.7	4.823	0.56	0.001	0.0316
	1.6	2.4	1.5	1.93	0.47	19.58	3.67	4.24	4.823	0.88	0.001	0.0316
	1.6	2.4	1.5	1.71	0.69	28.75	4.22	5.6	4.823	1.16	0.001	0.0316
	1.6	2.4	1.5	1.02	1.38	57.5	7.39	17.17	4.823	3.56	0	0
	1.6	2.4	1.5	0.85	1.55	64.58	8.65	23.53	4.823	4.88	0	0
	1.5	2.71	1.8	2.11	0.6	22.14	2.98	2.79	4.786	0.58	0.001	0.03162
	1.5	2.71	1.8	2.02	0.69	25.46	3.69	4.28	4.786	0.89	0.001	0.03162
	1.5	2.71	1.8	1.9	0.81	29.89	4.25	5.68	4.786	1.19	0.001	0.03162
	1.5	2.71	1.8	1.12	1.59	58.67	7.47	17.55	4.786	3.67	0	0
	1.5	2.71	1.8	0.9	1.81	66.79	8.82	24.46	4.786	5.11	0	0

Таблица 12. Размери на образците при K₀ = const.

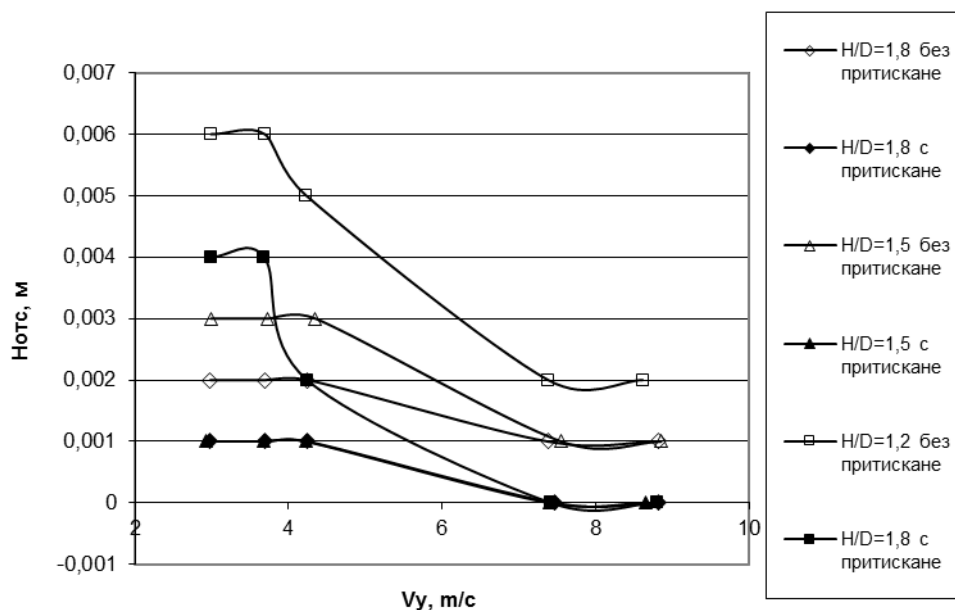
D ₀ , sm	1.72	1.6	1.5
H ₀ , sm	2.06	2.4	2.7
H ₀ /D ₀	1.2	1.5	1.8



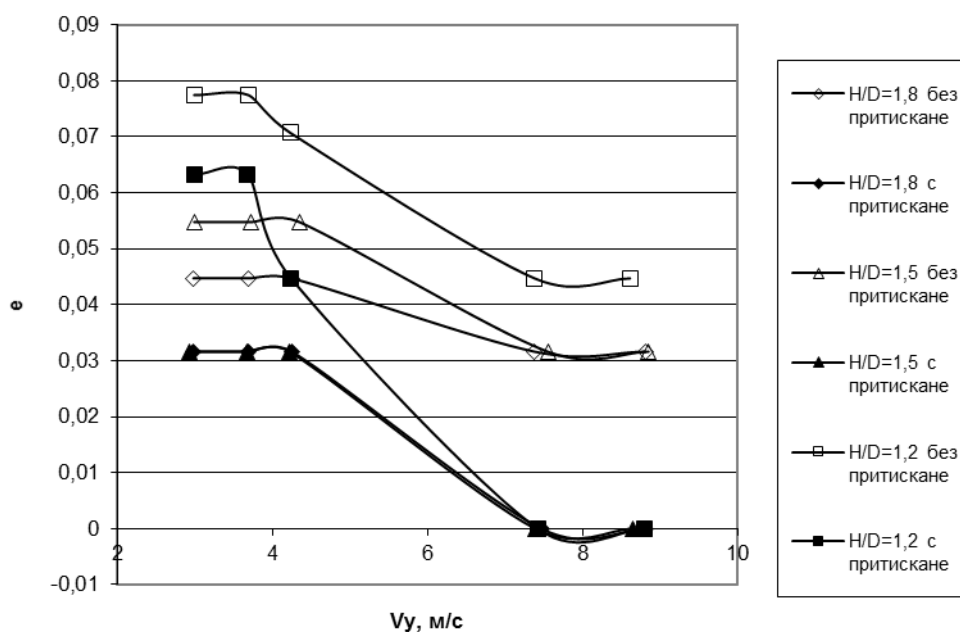
Фигура 43. Диаграма $E_y - \epsilon$ за различни стойности на H_0/D_0



Фигура 44. Диаграма $E_c - \epsilon$ за различни стойности на H_0/D_0



Фигура 45. Диаграма $V_y - H_{отс}$ за различни стойности на H_0/D_0



Фигура 46. Диаграма $V_y - e$ за различни стойности на H_0/D_0

Данните от експеримент 2 са дадени в Таблица 11.

С данните от Таблица 11 са построени в графичен вид зависимостите:

- $E_y - \varepsilon$ – фиг.43;
- $E_c - \varepsilon$ – фиг.44;
- $V_y - H_{отс}$ - фиг.45;
- $V_y - e$ - фиг.46.

- **Анализ на резултатите**

От фиг.42 се вижда, че при деформация на образци с едно и също отношение H_0/D_0 с нарастване на специфичната енергия E_c степента на деформация ϵ получавана в условията на „комбиниран удар“ е по-голяма в сравнение със степента на деформация при „свободен удар“. От данните в Таблица 10 се установява, че съществена разлика между степента на деформация при двата вида удар се наблюдава при $\epsilon > 15.5\%$ ($E_c \geq 3.0 \text{ J/sm}^3$). В този случай степента на деформация ϵ при „комбиниран удар“ е по-голяма от степента на деформацията при „обикновен удар“ с $9.07\% - 14.55\%$, при едни и същи стойности на E_c . При $\epsilon < 15.5\%$ ($E_c < 3.0 \text{ J/sm}^3$) разликата е в границите $2.38\% - 6.05\%$ и може да се приеме за несъществена.

Тези резултати са получени при големина на тягата на студен ракетен двигател 22 kg , действаща през време на комбинирания удар. Очаква се, при по-големи стойности на тягата на ракетния двигател да се получат по-големи разлики в степента на деформация ϵ .

Ако се разгледа кривата при „свободен удар“ от фиг.42 се вижда, че с нарастване на специфичната енергия степента на деформация ϵ_{cy} нараства. В този конкретен случай получената крива се апроксимира с добра точност с уравнението

$$\epsilon_{cy} = 5.17E_c - 0.185E_c^2, \% . \quad (3.8)$$

При промяна на отношението $H_0/D_0 = 1.2; 1.8$ наблюдаваната разлика $\Delta\epsilon$ в степента на деформация за двата вида удар е много по-голяма, отколкото при $H_0/D_0 = 1.5$ – Таблица 13. Разликата $\Delta\epsilon$ се определя от зависимостта

$$\Delta\epsilon = \epsilon_{ky} - \epsilon_{oy} , \quad (3.9)$$

където ϵ_{ky} и ϵ_{oy} са относителните деформации, %, при комбинаран удар и при обикновен удар, съответно. С данните от таблица 13 са построени графичните зависимости $E_c - \Delta\epsilon$ за различни отношения H_0/D_0 – фиг.47

Таблица 13. Разлика $\Delta\epsilon$ при деформиране на образци с различно H_0/D_0

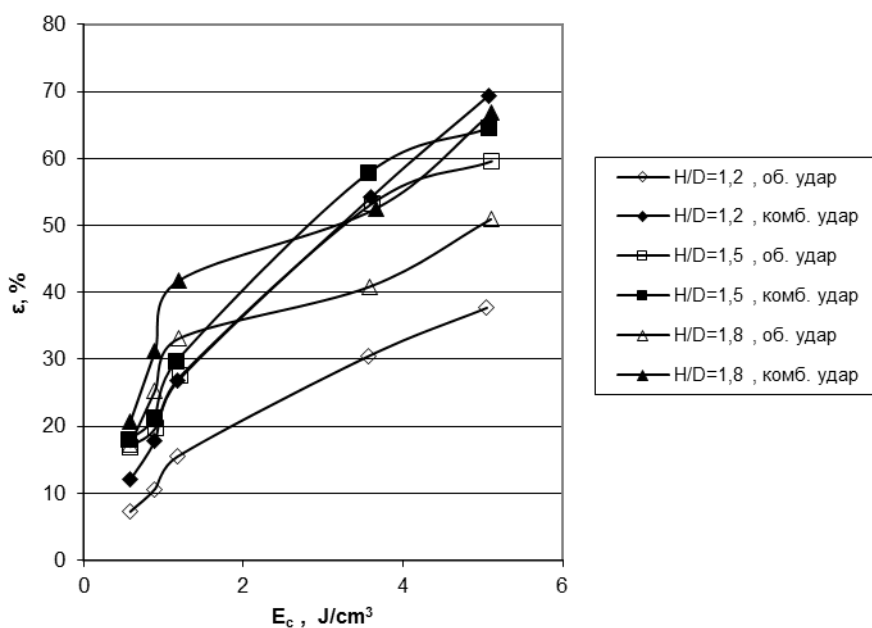
$H_0/D_0 = 1,2$					$H_0/D_0 = 1,5$				
об.удар		комб.удар		$\Delta\epsilon,$ %	об.удар		комб.удар		$\Delta\epsilon,$ %
$E_c,$ J/sm^3	$\epsilon, \%$	$E_c,$ J/sm^3	$\epsilon, \%$		$E_c,$ J/sm^3	$\epsilon, \%$	$E_c,$ J/sm^3	$\epsilon, \%$	
0.58	7.25	0.58	11.98	65.24	0.58	16.94	0.56	17.92	5.78
0.89	10.63	0.89	17.87	68.1	0.9	19.78	0.88	21.25	7.43
1.17	15.46	1.18	26.78	73.09	1.21	27.5	1.16	29.75	8.18
3.56	30.43	3.6	54.2	78.13	3.62	53.33	3.56	57.8	8.38
5.05	37.68	5.07	69.39	84.1	5.11	59.58	5.08	64.58	8.4

Таблица 13 - продължение

$H_0/D_0 = 1,8$				
об.удар		комб.удар		$\Delta\varepsilon$, %
E_c , J/sm^3	ε ,%	E_c , J/sm^3	ε ,%	
0.58	17.34	0.58	20.64	19.03
0.89	25.31	0.89	31.18	23.19
1.19	33.1	1.19	41.77	26.19
3.58	40.85	3.67	52.58	28.71
5.1	50.92	5.11	66.79	31.17

От Таблица 13 и фиг.47 се вижда, че степента на деформация при освободен удар ε_{cy} зависи както от специфичната енергия E_c , така и от отношението H_0/D_0 . Уравнение (3.9) се представя със зависимостта

$$\varepsilon_{cy} = f_1(E_c, H_0 / D_0). \quad (3.10)$$



Фигура 47. Зависимости $E_c - \Delta\varepsilon$ при различни отношения H_0/D_0

При комбиниран удар степента на деформация при сплескване ε_{ky} зависи също и от тягата на ракетния двигател R . В този случай зависимостта (3.10) добива вида

$$\varepsilon_{ky} = f_2(E_c, H_0 / D_0, R). \quad (3.11)$$

За $\Delta\varepsilon$ се получава

$$\Delta \varepsilon = f_2 - f_1 \cdot \quad (3.12)$$

От Таблица 13 и фиг.47 се вижда още, че най-голям ефект от приложение на „комбиниран удар” върху деформационния процес при сплескване се получава при образци с отношение $H_0/D_0 = 1.2 - \Delta \varepsilon_{\max} = 84.1 \%$. Най-малко е влиянието на ефекта „комбиниран удар при ” $H_0/D_0 = 1.5 - \Delta \varepsilon_{\max} = 8.4 \%$. При $H_0/D_0 = 1.8$ влиянието на този ефект върху процеса на деформация при сплескване има стойности в границите на 19% - 31% . Трябва да се отбележи, че тези резултати са за сравнително малки стойности на специфичната енергия $E_c = 0.58 - 5.11, \text{ J/sm}^3$. Ако се сравнят резултатите от Таблица 13 и фиг.47 за сплескване при $H_0/D_0 = 1.5 = \text{const.}$ с тези от Таблица 11 се вижда, че в областта на малките стойности на E_c има добро съвпадение на резултатите, независимо от различния обем на деформиранияте заготовки. Това ни дава основание да предложим понататъшни изследвания с цел получаване на универсални зависимости от вида (2.7) и (2.8), валидни за гореща деформация чрез сплескване. Наличието на такива зависимости ще доведе до разработване на методика за избор на машина за деформиране (чук) с много по-голяма точност, отколкото съществуващите сега методики. Причината за това е, че в сега използваните методики се определя необходимата маса на падащите части на чука, за получаване на изковка с определени размери. Това означава, че не се взема пред вид скоростта на удар и енергията на удар. Предлаганият от нас подход взема пред вид енергията на удара, като я отнася към единица обем на деформираното тяло – специфична енергия на деформация E_c . Според нас, този подход е много близък до избор на чук с който зададената деформация може да се осъществи с един удар. Сега, поради голямата неточност в избора на машина за деформиране с ударно действие се налага много често да се нанасят няколко удара (в някои случаи до няколко десетки удара), за постигане на необходимата деформация.

От фиг.46 и фиг.47 се вижда, че с нарастване на скоростта на удар V_y отскокът (коефициентът на възстановяване e) намалява, независимо от вида на удара. Това означава, че при увеличаване на V_y по-голяма част от енергията на удара отива за деформация, а по-малка част – за отскок. Тъй като отскока се дължи на еластичната компонента на деформациите, това означава, че с нарастване на V_y нараства пластичната компонента, за сметка на еластичната. Този ефект се засилва при „комбиниран удар”, като за $V_y > 4.5 \text{ m/s}$ отскокът започва да намалява и при $V_y \geq 7.4 \text{ m/s}$ става равен на нула, независимо от отношението H_0/D_0 . В този случай се наблюдава т.н. от нас „прилепващ удар”.

При обикновен удар най-голям отскок има при $H_0/D_0 = 1.2$. Вижда се, че за $H_0/D_0 = 1.2$ разликата между отскока при обикновен и «комбиниран удар» е най-голяма. В резултат на това и разликата в пластичната деформация $\Delta \varepsilon_{\max}$ също е най-голяма – Таблица 13.

Влиянието на отношението H_0/D_0 върху големината на пластичната деформация и на отскока при сплескване може да се обясни с влиянието на това отношение върху разпространението на еластични и пластични вълни при ударно натоварване. Този въпрос е подробно разгледан в Литературния обзор в Глава 1.

• Изводи

От получените експериментални резултати и направеният анализ може да се направят следните изводи, относно влиянието на ефекта „комбиниран удар” върху деформационния процес при сплескване.

- За количествено оценяване на ефекта „комбиниран удар ” при пластична деформация е удобно, да се използва параметъра „специфична енергия” E_c , който представлява енергията на удара за един кубичен сантиметър от обема на деформираната заготовка и се измерва в J/sm^3 .
- При $H_0/D_0 = \text{const.}$ с нарастване на скоростта на удара V_y и на специфичната енергия на удар E_c се увеличава разликата $\Delta\epsilon$ между относителните степени на деформация ϵ при „обикновен удар” и „комбиниран удар” – фиг.42. Зависимостта $E_c - \epsilon$ са случая на „обикновен удар ” и при $H_0/D_0 = 1.5$ може да се представи с уравнение (3.8).
- Установено е, че разликата $\Delta\epsilon$ се влияе силно от отношението H_0/D_0 . Най-голяма е тази разлика при $H_0/D_0 = 1.2$ като достига стойност $\Delta\epsilon_{\max} = 84.1 \%$, а най-малка при $H_0/D_0 = 1.5$. Това е в сила при изменение на E_c в границите $0.58 - 5.11 J/sm^3$.
- При сравняване на диаграмите за изменение на $\Delta\epsilon$ – фиг.47 и за изменение на височината на отскока $h_{\text{отск}}$ – фиг.45 се установява, че при отношение $H_0/D_0 = 1.2$, за което отношение разликата в големината на отскока при деформиране в условията на «обикновен удар» и в условията на «комбиниран удар» е най-голяма, ефекта от деформиране с «комбиниран удар» е най-голям. Това се дължи на намаляване на еластичната компонента на деформацията и увеличаване на пластичната компонента при деформиране в условията на «комбиниран удар».
- Като резултат от тези разглеждания са представни в общ вид зависимостите за изменение на относителната деформация при „обикновен удар ” ϵ_{oy} – уравнение (3.10) и при „комбиниран удар” ϵ_{ky} – уравнение (3.11).
- Установено е, че с увеличаване скоростта на удар V_y големината на отскока (и на коефициента на възстановяване e) намалява, независимо от отношението H_0/D_0 . При използваната в експериментите максимална тяга на студен ракетен двигател $R = 22 \text{ kg}$ за $V_y \geq 7.4 \text{ m/s}$ се получава удар без отскок, т.н. „прилепващ удар”, независимо от отношението H_0/D_0 .
- Най-голям отскок (и коефициент на възстановяване e) при „обикновен удар” се получава при отношение $H_0/D_0 = 1.2$, а най-малък отскок се получава при $H_0/D_0 = 1.8$. За отношението $H_0/D_0 = 1.5$ отскокът има средни стойности между другите два случая – фиг.45 и фиг.46. Това се дължи на влиянието на този параметър върху процеса на разпространение на еластични и пластични вълни при пластична деформация с удар.

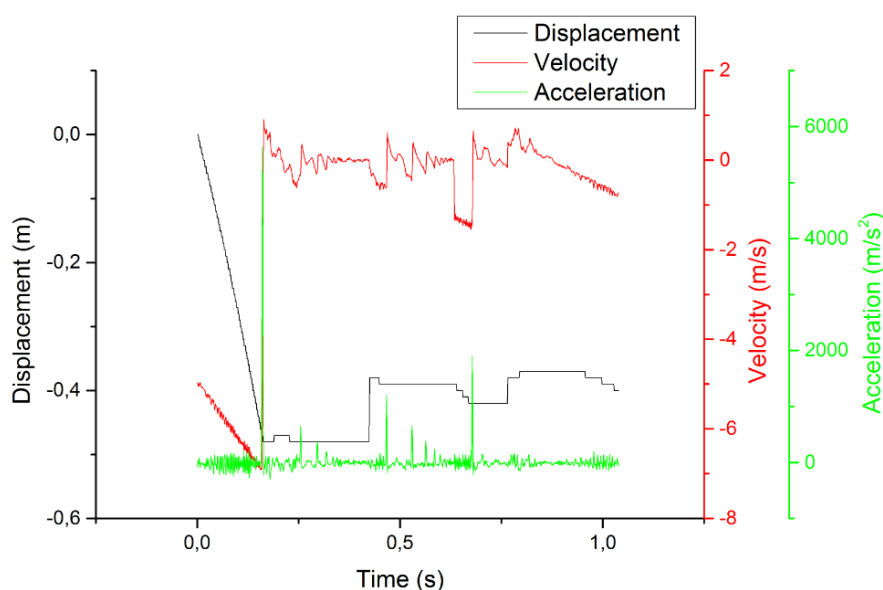
3.1.5 Резултати от втора серия експерименти за пластична деформация чрез сплескване на цилиндрични образци от олово с постоянно отношение H/D

На Фиг.48 е показана получената диаграма за изменение на пътя S , скоростта V_y и ускорението a_y при деформация с обикновен и контролиран удар, за случая на падане от височина $h = 1.1$ m при Режим 1 (обикновен удар - $V_y = 3.8$ m/s) и Режим 2 (контролиран удар - $V_y = 3.6$ m/s). Разликата в скоростите при двата режима е 0.5 %, а в енергията на удар 1 %. От тези диаграми може да се отчитат следните особености на деформационния процес при двата вида удар.

- Времето t_y за протичане на ударния процес до неговото затихване при контролиран удар е с 0.022 s (0.8 %) по-малко, от времето при обикновен удар. Това е един от ефектите на деформация с контролиран удар. Той зависи от тягата на ракетния двигател – колкото по-голяма е тягата, толкова по-голяма ще бъде тази разлика.

- От диаграмите на Фиг.48 за изменение на пътя се вижда, че и в двата случая няма отскок. Това се обяснява с много малката стойност на отскока, която не може да бъде хваната при използваната скорост на заснемане. Практически оловото се държи като идеално - пластично тяло, което се обеснява с малкия модул на еластичност $E = 17.6$ GPa (200 - 220 GPa за стомана).

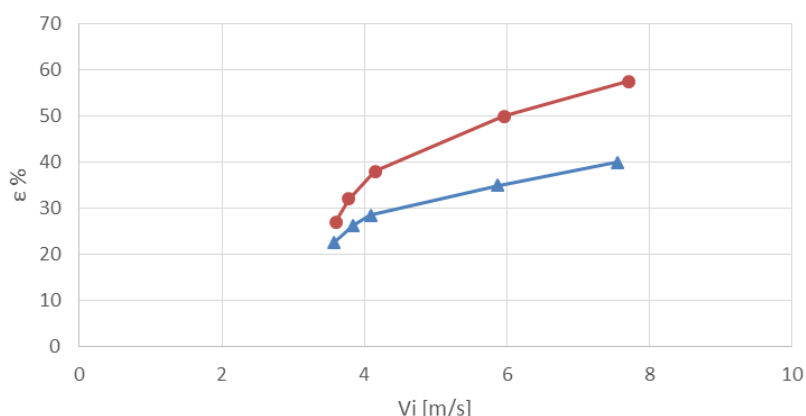
- И в двата случая затихването на скоростта до нула, е съпроводено с малки изменения около тази стойност. Това се обяснява с разпространението на еластични и пластични вълни по дължина на образца. Характера на изменение на скоростта в интервала до затихване на движението е различен за двата режима. Вижда се, че при контролиран удар измененията около нулевата точка са по-разтеглени. Това означава, че разпространението на еластичните и пластичните вълни по дължина на образца става с по-малка скорост, отколкото при свободен удар. Намаляване скоростта на еластичните и пластични вълни е друг ефект на контролирания удар, който също зависи от тягата на ракетния двигател.



Фигура 48. Изменение на пътя, скоростта и ускорението при скорост : а – обикновен удар ($V_y = 3.8$ m/s); б – управляем удар ($V_y = 3.6$ m/s)

• От диаграмите на Фиг.48 за изменение на ускорението се отчита, че при контролиран удар ускорението на удара е с 22.2 m/s^2 (1.6 % или 2.6 g, където g е земното ускорение) по-малко от ускорението при обикновен удар. Абсолютната стойност на ускорението в този случай е около 1400 m/s^2 или около 147 g.

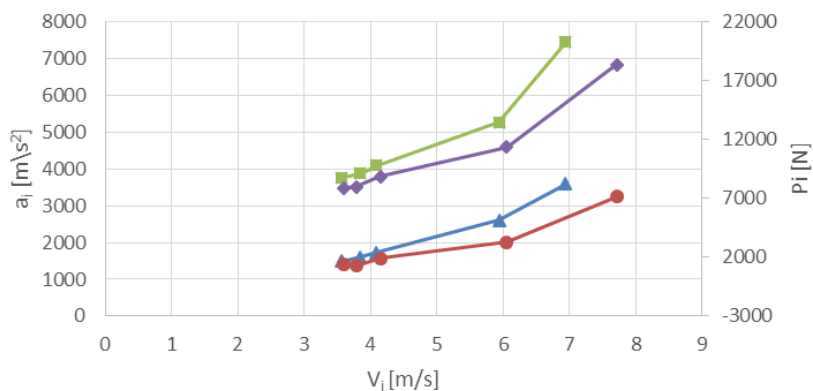
Важен резултат от това изследване е установеното нарастване на степента на деформация ε при сплескване с контролиран удар, в сравнение с деформацията при обикновен удар, при една и съща енергия на удар (скорост на удар) – Фиг.49. Вижда се, че с нарастването на скоростта на удар този ефект нараства: разликата $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{уп}} - \varepsilon_o$, където $\varepsilon_{\text{уп}}$, ε_o е относителната деформация при управляем и при обикновен удар съответно, е $\Delta\varepsilon = 4.5 \%$ при $V_y = 2.8 \text{ m/s}$; $\Delta\varepsilon = 15 \%$ при $V_y = 6 \text{ m/s}$; $\Delta\varepsilon = 17 \%$ при $V_y = 7.8 \text{ m/s}$.



Фигура 49. Зависимост $\varepsilon - V_y$ при обикновен удар и при комбиниран удар

— Ordinary Impact — Controlled Impact

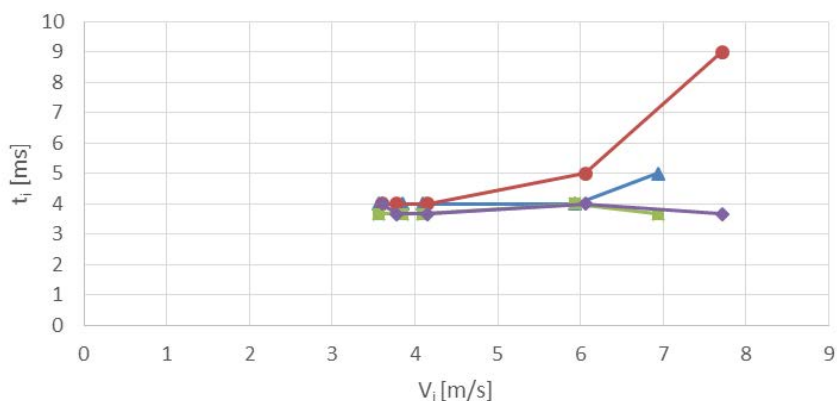
Нарастването на ε при деформация с управляем удар е свързано с по-малко ускорение на удар a_y и сила на удар P_y , в сравнение с обикновен удар – фиг.50. Този ефект е съществен при $V_y \geq 5 \text{ m/s}$, като с нарастване на скоростта на удар разликите $\Delta a_y = a_o - a_{\text{уп}}$; $\Delta V_y = V_o - V_{\text{уп}}$ нарастват. Например, при $V_y = 5 \text{ m/s} \rightarrow \Delta P_y = 1250 \text{ N}$; $V_y = 7 \text{ m/s} \rightarrow \Delta P_y = 2500 \text{ N}$. С нарастване на скоростта на удар ускорението и скоростта нарастват по абсолютна стойност и при $V_y = 7 \text{ m/s} \rightarrow a_y = 7500/5800$ ($a_o/a_{\text{уп}}$) m/s^2 ; $P_y = 8750/6250$ ($P_o/P_{\text{уп}}$) N.



Фигура 50. Изменение на ускорението a :

— ordinary impact ai — controlled impact ai и силата на удар P_y
 — ordinary impact Pi — controlled impact Pi

Този резултат е много важен, тъй като е свързан с трайността на деформиращите инструменти (щампи). Намаляването на силата на удара P_y при деформация с управляван удар, определя намаляване на напреженията в щампите и повишава тяхната трайност.



Фигура 51. Изменение на времето за удар: обикновен удар; управляем удар

— Ordinary Impact — Controlled Impact

От Фиг.51 се вижда, че при $V_y \geq 5$ m/s започва съществено нарастване на времето на удар при управляем удар $t_{уп}$, в сравнение с времето при обикновен удар t_o , което при скорости над 6 m/s започва да намалява. При $V_y = 7$ m/s $\rightarrow \Delta t = t_{уп} - t_o = 3.33$ ms (нарастване на времето за удар с 66 %). С този резултат може да се обясни нарастването на деформацията ϵ при управляем удар, въпреки намаляване на силата на удар $P_{уп}$. Увеличеното време на действие на деформиращата сила, води до увеличаване на времето за пластично течение на материала на заготовката. Освен това нарастването на изброените по-горе ефекти с нарастването на скоростта на удар V_y над определена стойност (в случая при $V_y \geq 5$ m/s), е свързано и с възникване в обема на деформирувания материал на натискови инерционни напрежения. В работата [2] скоростта от 5 m/s също е определена като долна граница за възникване на натискови инерционни напрежения при горещо деформиране на стомана и алуминий. Поддържане действието на тези напрежения за по-дълъг период от време при управляван удар, води до по-голяма степен на деформация, въпреки по-малките стойности на действащите сили $P_{уп}$ от тези при обикновен удар P_o .

• Заключение

От направените експериментални изследвания беше установено, че при пластична деформация чрез сплескване в условията на управляем удар, се получава съществено изменение на параметрите на процеса, в сравнение с деформация с обикновен удар. Основните разлики са следните.

- При една и съща енергия и скорост на удара при управляем удар се постига нарастване на относителната степен на деформация при сплескване ϵ в границите 4.5 % - 17 % в зависимост от скоростта на удар.

- Това нарастване на деформацията се постига при намаляване на силата за деформиране $P_{уп}$, в сравнение с силата P_0 при обикновен удар.
- Посочените ефекти при управляем удар силно се влияят от скоростта на удар V_y . Това може да се обясни с увеличаване на времето на удара $t_{уп}$, в резултат на което се удължава процеса на деформиране, както и с по-продължителното действие на пластични инерционни напрежения на натиск в обема на
- Съществено влияние на инерционните напрежения се наблюдава при $V_y \geq 5$ m/s. Тази стойност следва да се приеме за долна граница, над която тези напрежения трябва да се взимат пред вид, не само при деформиране на олово но и при гореща деформация на стомана и алуминии [2].
- Намаляването на силата за деформиране при управляем удар $P_{уп}$ определя намаляване на напреженията в деформиращия инструмент (щампа), което води до увеличаване на трайността му, в сравнение с деформация с обикновен удар.

3.2. Въведение удар еластично тяло

При еластичните тела обикновения удар се характеризира с това, че след първия удар следва отскок, следващ удар с отскок и т.н. до затихване на процеса. При деформация на еластичен образец между плоски твърди плочи, енергията на удар $E_y = m.V_y^2 / 2, J$, където m е масата на падащата част ; V_y е скоростта на удар, се изразходва за еластична деформация ($E_{ел}$) и за отскок. Енергията за отскок $E_{отс}$ зависи от еластичната компонента на деформацията и еластичните деформации на плочите. Коефициентът на полезно действие на удара η_y , който определя каква част от E_y е изразходвана за пластична деформация, зависи от еластичните свойства на деформирувания материал и се определя от израза

$$\eta_y = \frac{E_y - E_{отс}}{E_y} = \frac{\Delta E}{E_y}, \quad (3.13)$$

Ако към падащата част се приложи допълнителна сила P_d , която действа по време на удара, става възможно да се намали големината на отскока ($E_{отс}$) и да се увеличи к.п.д. на удара, т.е. да се увеличи степента на деформация. При достатъчно голяма P_d^1 може да се получи деформация без отскок. Ако $P_d > P_d^1$ пластичната деформация ще бъде още по-голяма (η_y ще остане винаги $\eta_y < 1$ поради еластични деформации на плочите). Следователно, чрез изменение големината на допълнителната сила P_d може да се променят параметрите на ударния (деформационния) процес. Този вид удар се дефинира като „управляем удар”.

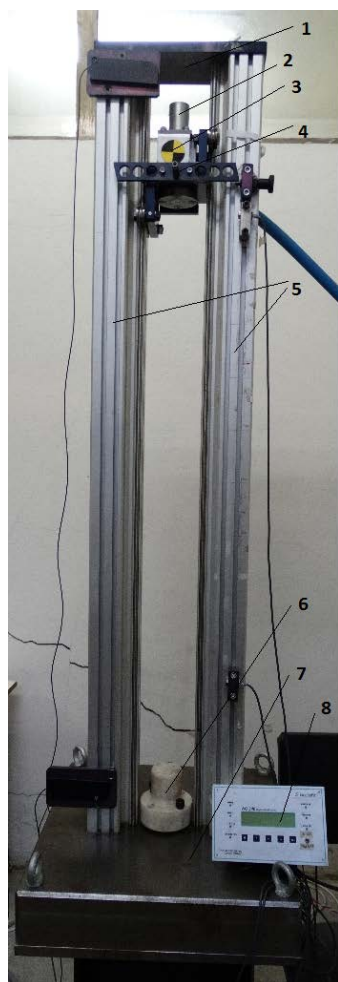
Техническото решение за получаване на управляем удар при машини с ударно действие (чукове), е чрез използване на промишлен ракетен двигател [1]. Тази идея е реализирана от инж.Петър Бодуров [2]. В Лаборатория „Изследване на технологични ударни процеси” към ТУ-София са проведени изследвания за ефекта от приложение на

управляван удар при различни процеси на „ деформация [58-61]. Установено е значително нарастване на степента на деформация при използване на този ефект. В тези изследвания са взети пред вид само някои параметри на ударния процес – скорост на деформация и коефициент на възстановяване, поради затруднения за използване на датчици за измерване на други параметри, като ускорение и сила на удара, времетраене на удара. Например, ако искаме да измерваме ускорението на удар чрез съществуващите акселометри, трябва да се знаят границите на изменение на този параметър, тъй като тези датчици работят в определени граници – до 10 g, до 100 g, до 1000 g ,..., до 100000 g, където g е земното ускорение.

В настоящото изследване за определяне параметрите на ударния процес се използва високоскоростна камера и специализиран софтуер към нея. Това прави възможно измерване на всички параметри на ударния процес и по-точно определяне на ефекта от приложение на управляем удар при еластична деформация.

3.2.1. Постановка на експеримента

Лабораторен стенд за изучаване на контролиран удар е чук задвижван чрез ракетен двигател – фиг.52. Двигателят работи със сгъстен въздух. Максималната сила на двигателя е 226 N. Максималната височина на падане е 1,1 м, а масата на падащото тяло (матрицата) е 6,17 кг. Чрез устройството за управление може да се настройт четири режима на работа – фиг.40 [80]



Фигура 52. Лабораторен стенд за изследване на контролиран удар от еластична деформация а). настройка за контролирано проучване на удара; 1 обикновен удар; 2 - обикновен удар + контролиран удар; 3 - ускорен от ракетен двигател обикновен удар; 4 - ускорен удар + контролиран удар; P_i - сила на удара; R – тяга от ракетен двигател б) 1- горна плоча на стенда; 2- дюза за пневматична тяга; 3- маркер на падащото тяло; 4- падащо тяло; 5- направляващи; 6- ебастичен образец; 7- долна плоча на стенда; 8-



Фигура 53. Високоскоростна камера NAC HX-6 е до 2330 кадъра в секунда при пълна резолюция HD (1920x 1080) и до 100 000 кадъра в секунда при намалена резолюция (320x120).

Данните за параметрите на процеса на удара са получени след обработка на заснетите изображения със софтуера Vicasso 5.1, който е специално проектиран да работи с високоскоростна камера фиг. 53.

3.2.2. Удар върху еластично тяло

Еластичното тяло е от материал Ertalon 66 SA ($E = 3450$ МПа, Шарпи динамична сила $4,5 \text{ KJ} / \text{cm}^2$). Тялото е фиксирано към земята с плоча и четири болта. Височина на падане на матрицата е 1.1, 0.8, 0.5 m. Във всяка от тези височини се извършват удари с четири режима на работа, показани на фиг.40. Ударите се записват и данните за параметрите на всеки удар се получават след обработка на видео изображението със софтуера Vicasso 5.1. Енергията на удара E_i , максимална сила на удара P_i , Енергия на отскока E_R , Сила на отскока P_R и коефициент на възстановяване се изчисляват чрез формулите

$$E_i = \frac{mV_i^2}{2}, \text{ J}; \quad (3.14)$$

$$P_i = a_i m, \text{ N}; \quad (3.15)$$

$$E_R = \frac{mV_R^2}{2}, \text{ J}; \quad (3.16)$$

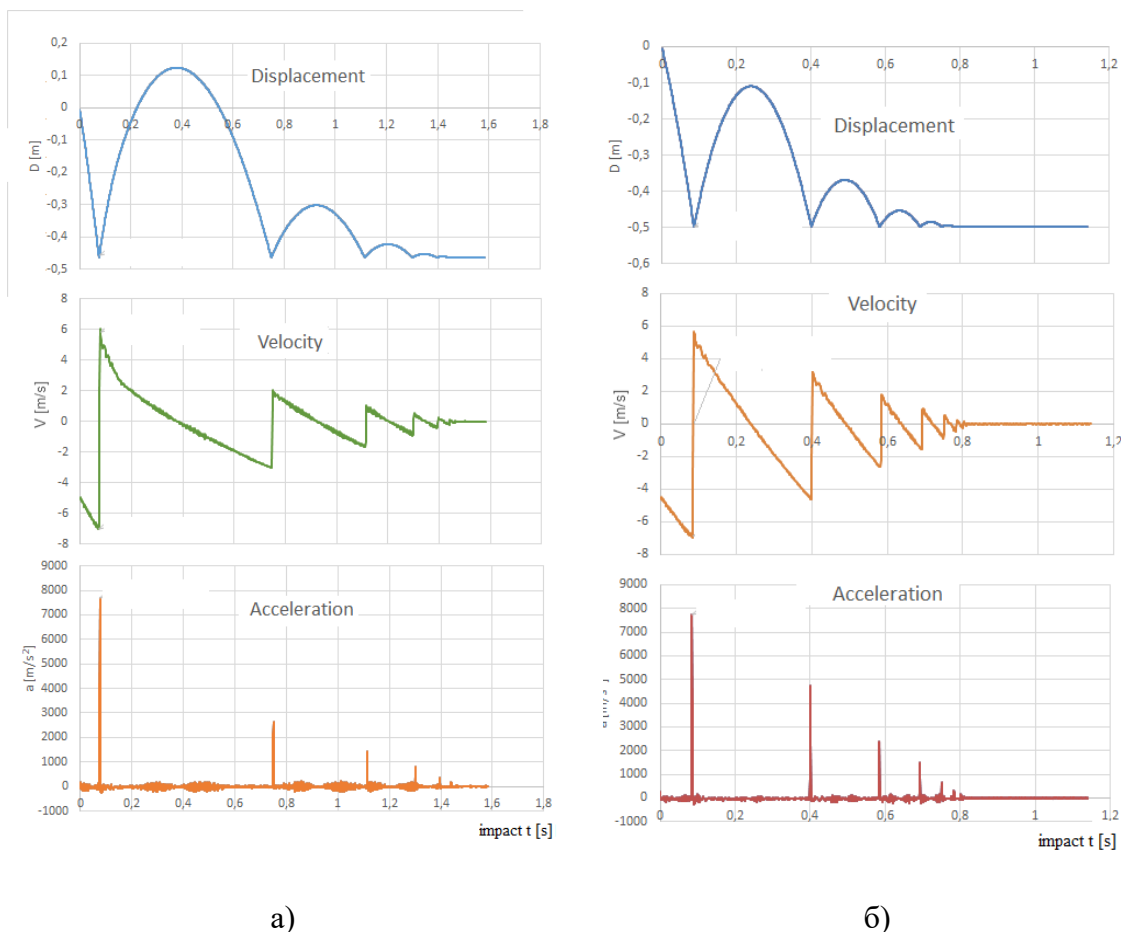
$$P_R = a_R m, \text{ N}; \quad (3.17)$$

$$e = \sqrt{\frac{H_R}{H_i}}; \quad (3.18)$$

където: m е масата на падащо тяло (матрицата), kg; V_i , V_R са скоростите на удара и на отскока, m/s; A_i , A_R са ускоренията на удара и на отскока, m / s^2 ; H_i и H_R са височините на падане и на отскок ,m.

Ударите се записват с високоскоростна камера NAC HX6 ,данните за параметрите на удара се получават за параметрите на след обработка на видео изображения със софтуера Vicasso 5.1. Тогава параметрите E_i , E_R , P_i , P_R , E , са изчислени от (1) - (6). Височина на падане на матрицата е 1.1, 0.8, 0.5 m. Във всяка от тези височини се извършват удари с четири режима на работа, показани на фиг.40.

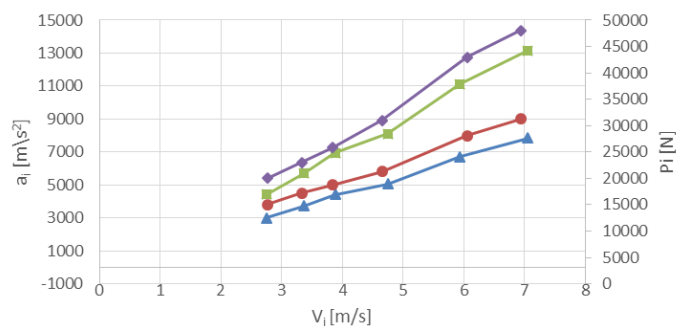
На фиг. 54 може да се види разликата в параметрите на обикновения и на контролирания удар:



Фигура 14. Промяна в преместване, скорост и ускорение спрямо времето на удара ($H_0 = 1 \text{ m}$):

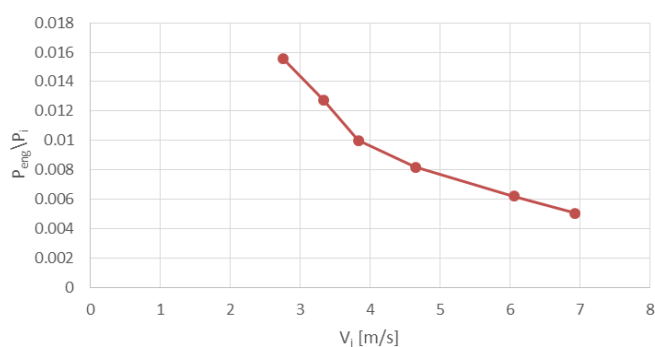
a - обикновен удар; *б* - контролиран удар

- t_i за управляем удар е с 0,002 s по-голямо от колкото при обикновения удар. Това може да бъде обяснено с действието на тягата от двигателя по време на удара. Като се вземе пред вид, че при обикновен удар $t_i = 0.006 \text{ s}$, увеличението на времето за удара при управляем удар е 33 %.
- Големината на отскока при контролиран удар е с 0.2 m (34 %) по-малка, отколкото при обикновен удар. При втория и следващи отскоци тази разлика намалява.
- По-малкият отскок при контролиран удар се осъществява за по-малко време. В резултат на това времето за окончателно спиране на падащата част (време за затихване на удара) е значително по-малко. В конкретния случай времето за затихване на удара при обикновен удар е с 0.651 s (80.5 %) по-голямо, от времето за затихване на удара при контролиран удар.

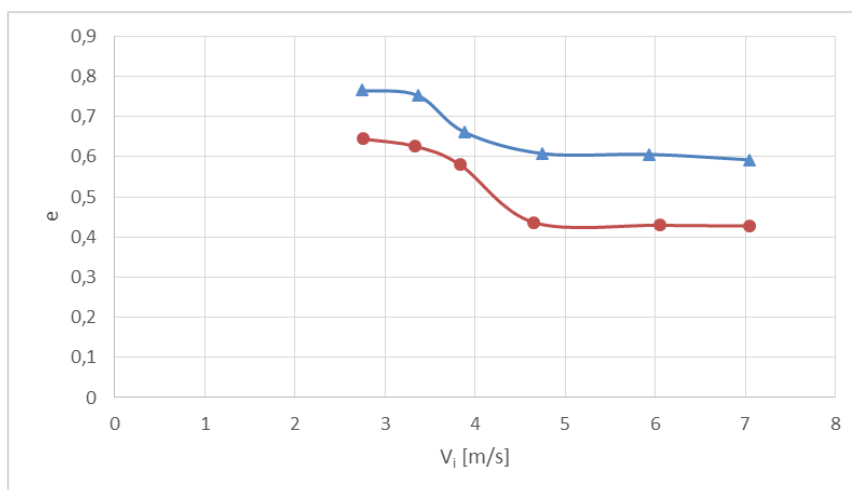


Фигура 15. Промяна на ускорението на удар A_i и силата на удар P_i : с V_i

— ordinary impact a_i — controlled impact a_i — ordinary impact P_i — controlled impact P_i



Фигура 16. Изменение на отношението P_{eng}/P_i с V_i (с P_{eng} е означена тягата на двигателя, а с P_i силата на удар)



Фигура 57. Изменение на коефициента на възстановяване e с V_i :

— ordinary impact — controlled impact

От фиг.55 се вижда, че ускорението и силата на удара при контролиран удар са по-големи, отколкото при обикновен удар, като този ефект нараства при нарастване на скоростта на удар.

При контролиран удар се наблюдава значително намаляване на отскока и на коефициента на възстановяване, в сравнение с обикновен удар – фиг.57. Този ефект също нараства при нарастване на скоростта на удар. От фиг.57 може да се определи, че при $V_i = 2.8 \text{ m/s}$ намалението на коефициента на възстановяване е 7.5 %, при $V_i = 7 \text{ m/s}$ намалението е 25 %. Подобен ефект е наблюдаван и при удар на сфери от еластично-пластичен материал [6].

3.2.3. Заключение

Експериментите показват, че при използването на контролиран удар може да се променят параметрите на процеса. Въпреки сравнително малката сила (тяга) на ракетния двигател получените ефекти от неговата работа по време на процеса на удара са значителни и се проявяват в следните направления:

- Времето за удар t_i намалява, като този ефект нараства при нарастване на скоростта.
- Времето за протичане на целия процес до затихване на отскоците при използване на контролиран удар, е много по-малко, от времето до затихване при обикновен удар. Този ефект също нараства с нарастване на скоростта.
- При контролиран удар ускорението и силата на удар са по-големи, отколкото при обикновен удар и този ефект нараства при нарастване на скоростта.
- Големината на отскока и на коефициента на възстановяване са по-малки при контролиран удар, като с нарастване на скоростта на удар този ефект нараства – фиг.57.

Нарастването на изброените по-горе ефекти при нарастване на скоростта на удар въпреки намаляване на отношението P_{eng}/P_i (фиг.56), се обяснява с усилване на влиянието на еластичните вълни, които се разпространяват в обема на деформираното тяло.

ГЛАВА 4. Резултати от лабораторни експерименти за брикетиране на метални стружки и уплътняване на железен прах в условия на комбиниран удар. Анализ на резултатите. Изводи.

4.1. Цел на експериментите

Метални стружки както и метални отпадъци от тънък листов материал се подлагат на брикетиране поради две основни причини – по-ефективно транспортиране и повишаване на рандемана при разтопяване в металургични пещи. Колкото по-голяма е плътността на получаваните брикети, толкова по-голяма е икономическата ефективност в тези две направления. Поради това е оправдан стремежа за търсене на технологии за брикетиране, чрез които да се постигне плътност на брикета близка до плътността на монолитен метал.

Съществуващите технологии за брикетиране с хидравлични преси са достигнали границите на възможностите си. Понататъшно увеличаване мощността на пресите, което би довело до увеличаване плътността на брикетите е икономически неизгодно. [62]

Приложението на чукове (въздушни и високоскоросни взривни) не е намерило широко приложение поради технически проблеми, свързани с трайността на елементи на конструкцията и на щампите.

Според получените резултати от експериментите за пластична деформация дадени в и Глава III на настоящата работа, има основание да се твърди, че при ударно въздействие върху брикетираните материали при условията на комбиниран удар се постига съществена промяна както в работа на машините и инструментите, така и в протичане на технологичните процеси. Ако това се окаже вярно и за процеса на брикетиране, ще може да се твърди, че предаваната от ракетния двигател сила през цялото време на комбиниран удар, намалява или свежда до нула разгледаните по-горе негативни влияния на ударното натоварване. В резултат на това се създават условия за икономически ефективно повишаване плътността на брикетите и в някои случаи приближаването на тази плътност до плътността на монолитен метал.

Целта на представените по-долу експерименти е, да се изследва в лабораторни условия до каква степен тези твърдения са верни.

4.2. Методика на експеримента

Експериментите се провеждат на стенда, описан в Глава 1- фиг.17. Работи се с налягане на въздуха до 30 bar, който се подава към студения ракетен двигател. Използва се същата матрица с диаметър на отвора 20 mm , както при експериментите за пластична деформация чрез изтичане. Поансонът е с диаметър 19.6 mm и е поставен в същия поансонодържател както при експериментите за обратно изтичане в процеп . Хлабината между поансона и отвора на матрицата е необходима за да може да се осигури илизание на въздуха през време на уплътняване на стружките. В противен

случай се наблюдава силно намаляване на ефекта от действието на ударната сила. [75-76]

4.2.1. Използвани материали.

Избрани са следните материали:

- Армко желязо с въглеродно съдържание 0.02 %;
- нелегирана стомана с въглеродно съдържание 0.45 %;
- сив чугун с въглеродно съдържание 3.2 %;
- алуминиева сплав със съдържание на 0.9 % Mg и 1.9 % Mn;
- мед с чистота 99.9 %;
- месинг със съдържание на 37 % Zn.

На фиг.58 са показани формите на тези стружки. Поради малкия диаметър на отвора на контейнера стружките са с малка дължина, дебелина и ширина.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Фигура 58. Вид на стружките, използвани при експериментите: а) – стомана 45; б) алуминиева сплав; в) – мед; г) месинг; д) армко желязо; е) сив чугун

Методиката на експеримента включва следните процедури:

- измерване масата на стружките m за брикетиране на лабораторна везна с точност 0.01 gr;
- насипване на стружките в контейнера и леко трамбоване, за получаване на равна челна повърхнина.
- брикетиране със скорост на удара $V_y = (4,2 - 7.0 \text{ m/s}) \pm 2 \%$, в условия на „свободен удар” и „комбиниран удар”. Ако скоростта на удар е извън допустимите стойности, експериментът не се взема под внимание;
- изваждане на брикета и измерване на височината му с точност 0.01 mm (диаметърът на всички брикети е 20 mm);
- пресмятане обема на брикета K , mm^3 ;
- пресмятане на енергията на удара E_y , J;
- пресмятане на специфичната енергия за брикетиране E_c по формулата

$$E_c = \frac{E_y}{K}, \text{ J/mm}^3. \quad (4.1)$$

- пресмятане на плътността на брикета ρ по формулата

$$\rho = \frac{m}{K}, \text{ gr/mm}^3. \quad (4.2)$$

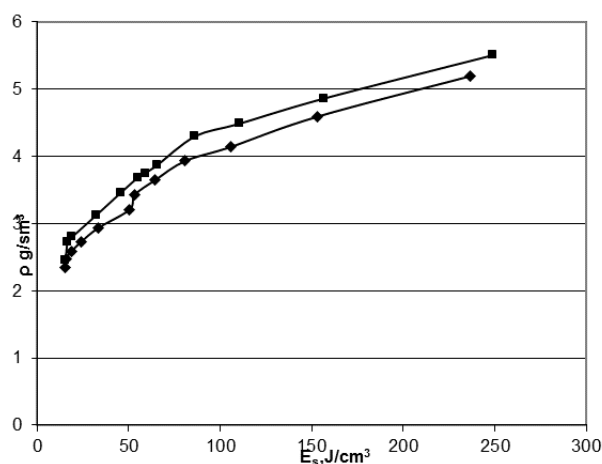
- получените данни се нанасят в таблици;
- с данните от таблиците се представят в графична форма зависимостите $E_c - \rho$ и $E_c - (\rho_{\max}/\rho_0)$, където: $\rho_{\max}$ е максималната плътност получена при ударно брикетиране; ρ_0 е плътността на съответния монолитен материал.

4.3. Резултати от лабораторни експерименти за брикетиране с удар на метални стружки

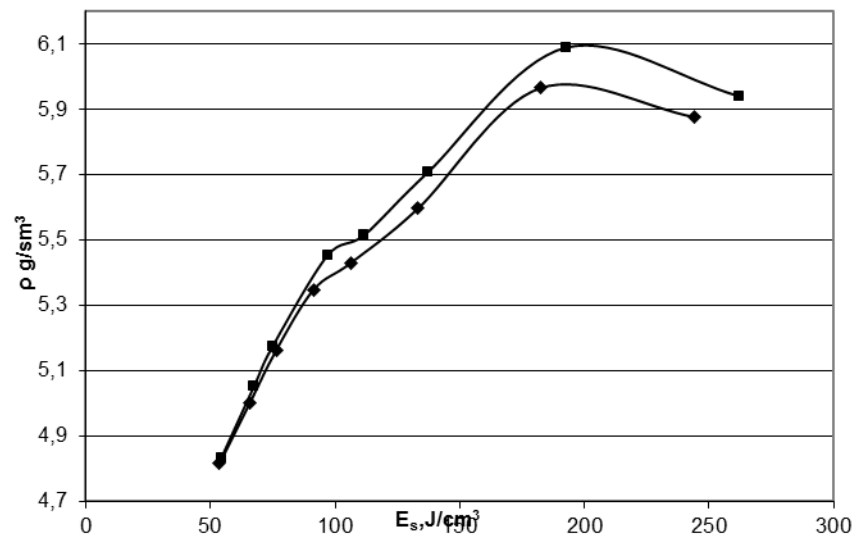
Резултатите от експериментите са публикувани в работите [4], [20]. Данните от експериментите за брикетиране на стружки от използваните метали и сплави са дадени в Таблица 13 – Таблица 19. С данните от тези таблици са построени графичните зависимости от фиг.59 – фиг.65.

Таблица 13. Данни от експерименти за брикетиране на стружки от Армко
желязо (H_1 е височина на брикета)

Режим	V_y , m/s	m, gr	H_1 , mm	ρ , gr/sm ³	E_c , J/sm ³
Свободен удар	4.17	15	17	2.341	15.32
	4.16	13	16.17	2.478	16.08
	4.16	11	13.55	2.584	18.57
	4.17	9	10.5	2.728	23.99
	4.17	7	7.6	2.932	33.18
	4.15	5	4.96	3.209	50.41
	6.92	15	12.8	3.430	53.37
	6.91	13	10.75	3.649	64.44
	7.04	11	8.9	3.934	80.94
	7.02	9	6.92	4.140	105.51
	7.07	7	4.64	4.592	152.88
	6.93	5	2.95	5.195	236.46
Комбиниран удар	4.17	15	16.5	2.46	15.59
	4.17	13	15.2	2.722	16.62
	4.17	11	12.79	2.802	19.12
	4.18	9	8.45	3.129	32.42
	4.16	7	5.48	3.466	45.89
	4.16	5	4.24	3.754	59.11
	6.86	15	12.6	3.69	55.17
	6.94	13	10.7	3.867	65.37
	7.04	11	8.34	4.298	86.19
	6.97	9	6.38	4.49	110.64
	7.00	7	4.64	4.862	156.57
	7.04	5	2.89	5.507	248.73



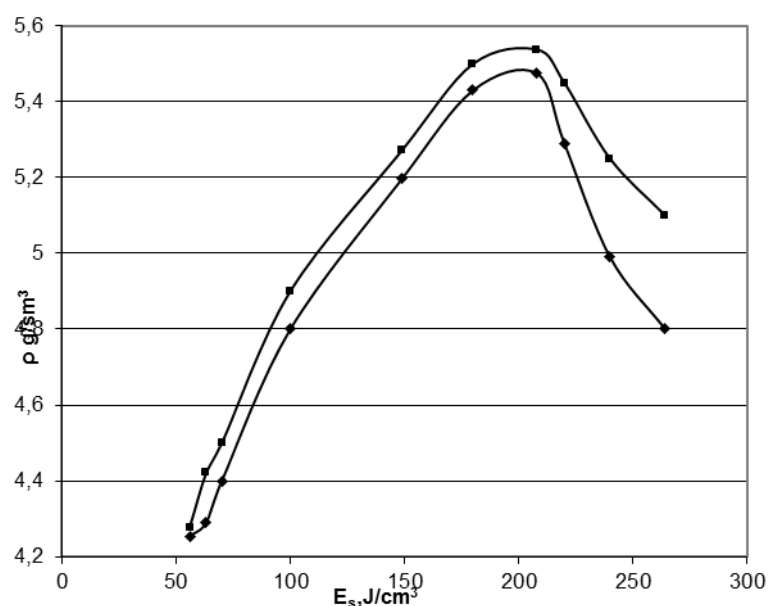
Фигура 59. Зависимост $E_c - \rho$ получена при брикетиране на стружки от Армко
желязо: $\blacklozenge$ - свободен удар; $\blacksquare$ – комбиниран удар



Фигура 60. Зависимост $E_c - \rho$ получена при брикетиране на стружки от стомана с 0.45 % въглерод: $\blacklozenge$ - свободен удар; $\blacksquare$ – комбиниран удар

Таблица 14. Данни от експерименти за брикетиране стружки от стомана (H_1 е височина на брикета)

Режим	$V_y,$ m/s	m, gr	$H_1,$ mm	$\rho,$ gr/sm ³	$E_c,$ J/sm ³
Свободен удар	6.91	19	12.56	4.815	53.63
	7.01	17	10.82	5.001	65.83
	6.98	15	9.25	5.162	76.42
	6.98	13	7.74	5.346	91.26
	6.97	11	6.45	5.429	106.3
	6.97	9	5.12	5.595	133.19
	6.94	7	3.73	5.964	182.31
	6.94	5	2.68	5.875	244.27
Комбиниран удар	6.94	19	12.52	4.831	54.28
	6.96	17	10.43	5.05	67.39
	6.9	15	9.36	5.173	74.9
	7.01	13	7.59	5.452	96.98
	6.99	11	6.35	5.514	111.63
	6.95	9	5.11	5.706	137.17
	6.97	7	3.66	6.088	192.59
	6.96	5	2.68	5.939	262.1



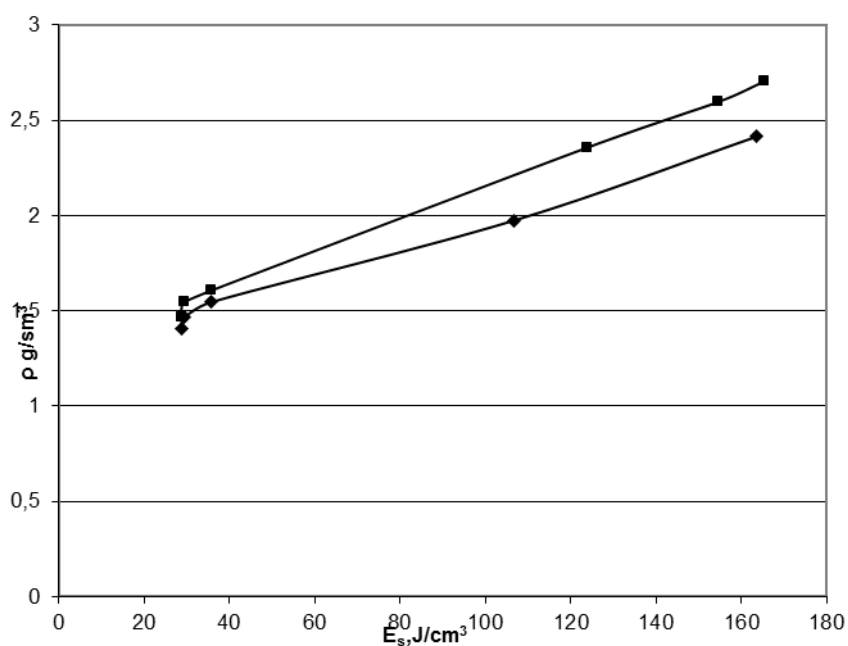
Фигура 61. Зависимост $E_c - \rho$ получена при брикетиране на стружки от сив чугун с 3.2 % въглерод: $\blacklozenge$ - свободен удар; $\blacksquare$ – комбиниран удар

Таблица 15. Данни от експерименти за брикетиране на стружки от чугун (H_1 е височина на брикета)

Режим	V_y , m/s	m, gr	H_1 , mm	ρ , gr/sm ³	E_c , J/sm ³
Свободен удар	6.98	17	12.65	4.254	55.95
	6.96	15	11.13	4.290	63.17
	7.06	13	9.16	4.400	70.00
	7.00	11	6.82	4.800	100.00
	7.09	8	4.90	5.197	148.91
	6.98	7	4.20	5.430	180.00
	7.08	6	3.50	5.475	207.88
	6.98	5	3.00	5.290	220.00
	7.04	4	2.80	4.990	240.00
	7.01	3.55	2.67	4.800	264.14
Комбиниран удар	7.03	17	12.72	4.278	55.95
	7.13	15	10.56	4.421	63.17
	7.06	13	9.02	4.500	70.00
	7.00	11	6.69	4.900	100.00
	6.98	8	4.83	5.272	148.91
	6.98	7	4.11	5.500	180.00
	7.11	6	3.48	5.538	207.88
	7.00	5	2.92	5.450	220.00
	7.04	4	2.75	5.250	240.00
	7.06	3.55	2.62	5.100	264.14

Таблица 16. Данни от експерименти за брикетиране на стружки от алуминиева сплав
(H_1 е височина на брикета)

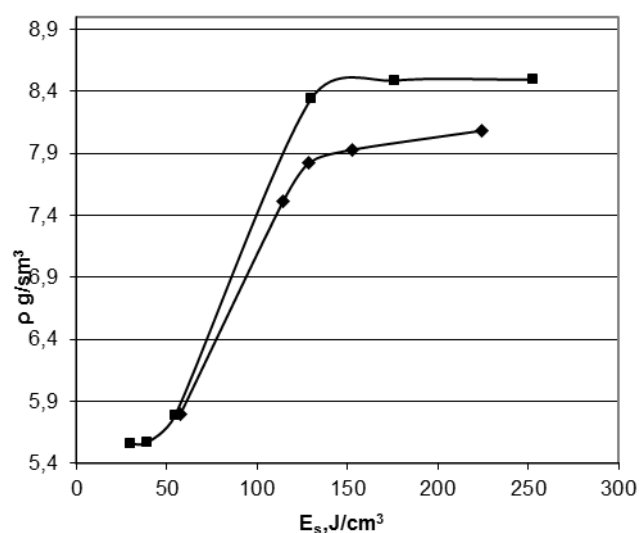
Режим	V_y , m/s	m , gr	H_1 , mm	ρ , gr/sm ³	E_c , J/sm ³
Свободен удар	4.13	4.35	8.62	1.406	28.76
	4.12	3.85	8.37	1.464	29.39
	4.12	3.35	6.90	1.545	35.68
	6.89	4.00	6.45	1.974	106.74
	7.05	3.35	4.42	2.413	163.44
Комбиниран удар	4.13	4.35	8.62	1.464	28.76
	4.12	3.85	8.37	1.545	29.39
	4.12	3.35	7.00	1.606	35.68
	7.08	4.35	5.88	2.355	123.73
	7.09	3.85	4.72	2.596	154.57
	7.16	3.35	4.50	2.703	165.28



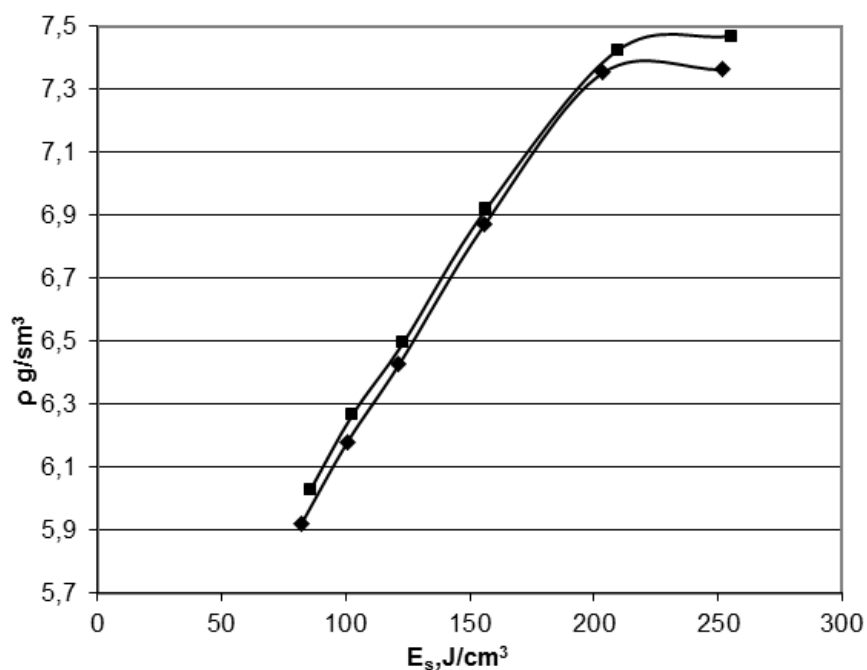
Фигура 62. Зависимост $E_c - \rho$ получена при брикетиране на стружки от алуминиева сплав (0.9 % Mg, 1.9 % Mn): ◆ - свободен удар; ■ – комбиниран удар

Таблица 17. Данни от експерименти за брикетиране на стружки от мед – 99.9 %
Cu (H_1 е височина на брикета)

Режим	V_y , m/s	m, gr	H_1 , mm	ρ , gr/sm ³	E_c , J/sm ³
Свободен удар	4.1	8	4.23	5.800	57.54
	7.08	15	6.35	7.519	114.57
	7.02	13	5.55	7.826	128.88
	7.00	11	4.65	7.930	152.86
	6.98	8	3.15	8.084	224.55
Комбиниран удар	4.13	15	8.25	5.558	30.02
	4.12	11	6.30	5.569	39.05
	4.11	8	4.50	5.787	54.52
	7.09	15	5.62	8.337	129.73
	7.13	11	4.20	8.488	175.82
	7.23	8	3.00	8.496	252.78



Фигура 17. Зависимост $E_c - \rho$ получена при брикетиране на стружки от мед (99.9 % Cu): ♦ - свободен удар; ■ – комбиниран удар



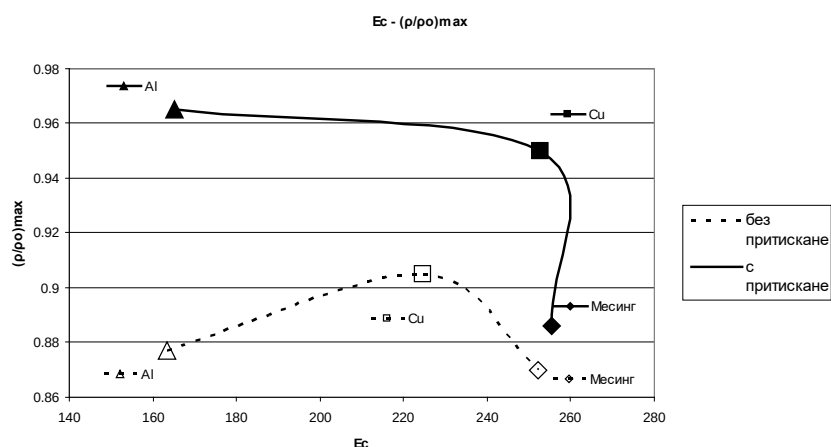
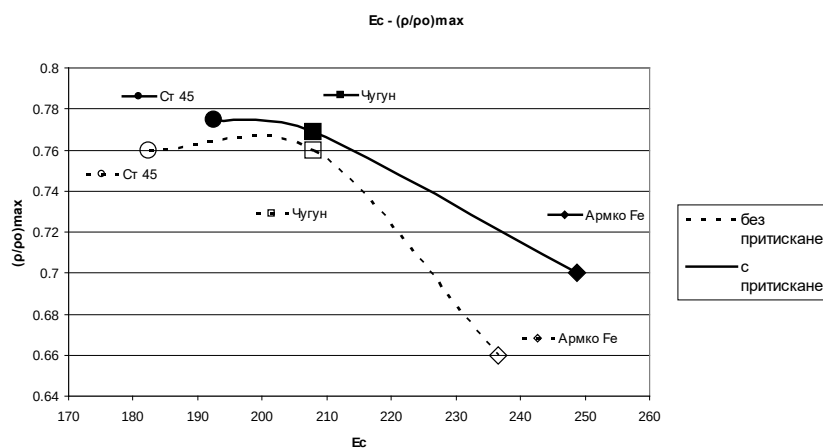
Фигура 64. Зависимост $E_c - \rho$ получена при брикетиране на стружки от месинг (37 % Zn): ◆ - свободен удар; ■ – комбиниран удар

Таблица 18. Данни от експерименти за брикетиране на стружки от месинг (37 % Zn) (H_1 е височина на брикета)

Режим	V_y , m/s	m , gr	H_1 , mm	ρ , gr/sm ³	E_c , J/sm ³
Свободен удар	6.98	16	8.60	5.922	82.25
	7.03	14	7.12	6.181	100.75
	7.02	12	5.80	6.426	121.48
	7.04	10	4.59	6.870	155.94
	6.95	8	3.44	7.353	203.77
	6.99	6.5	2.81	7.363	252.25
Комбиниран удар	7.06	16	8.45	6.027	85.67
	7.10	14	7.11	6.268	102.83
	7.02	12	5.88	6.496	123.24
	7.03	10	4.60	6.920	156.61
	7.04	8	3.43	7.424	209.57
	6.98	6.5	2.77	7.469	255.53

Таблица 19. Стойности за $\rho_{\max}/\rho_0$ и $(E_c)_{\max}$ за изследваните материали
 $((E_c)_{\max}$ е стойността на E_c за $\rho = \rho_{\max}$)

Материал	ρ_0 , gr/sm ³	$\rho_{\max}$, gr/sm ³		$\rho_{\max}/\rho_0$		$(E_c)_{\max}$, J/sm ³	
		Своб. удар	Комб удар	Своб. удар	Комб удар	Своб. удар	Комб. удар
Армко Fe	7.87	5.195	5.507	0.660	0.700	236.46	248.73
Стомана	7.85	5.964	6.088	0.760	0.775	182.31	192.52
Чугун	7.20	5.475	5.538	0.760	0.769	207.88	207.88
Al сплав	2.82	2.413	2.703	0.855	0.964	163.44	165.28
Мед	8.94	8.084	8.496	0.904	0.950	224.55	252.78
Месинг	8.56	7.363	7.424	0.860	0.867	252.25	255.53



Фигура 65. Зависимости между специфичната енергия на брикетиране E_c и отношението $(\rho_{\max}/\rho_0)$: а) за черни сплави; б) за цветни сплави.

4.3.1. Анализ на резултатите

Представните по-горе резултати от проведените лабораторни експерименти показват, че използваните материали и сплави може да бъдат разделени на две групи. Към първа група се отнасят желязо-въглеродни сплави, а към втора група се отнасят цветни метали и сплави. Характерните особености при брикетиране на метални стружки за двете групи са.

Желязо-въглеродни сплави.

- При трите материала - Армко желязо, стомана и сив чугун, използването на брикетиране с „комбиниран удар“ повишава плътността на брикетите в сравнение с брикетиране при „свободен удар“. В Таблица 20 са показани разликите $(\Delta\rho)_{\max}$ между максималната плътност на получените брикети при свободен удар $(\rho_{\text{св}})_{\max}$ и плътността на брикетите получена при комбиниран удар $(\rho_k)_{\max}$, където

$$(\Delta\rho)_{\max} = (\rho_k)_{\max} - (\rho_{\text{св}})_{\max}, \text{ gr/sm}^3. \quad (4.3)$$

От Таблица 20 се вижда, че въглеродното съдържание в желязо-въглеродните сплави оказва съществено влияние върху плътността на брикетите, получавани чрез ударно брикетиране. Най-голяма плътност се получава при брикетиране на стружки от нелегирана стомана с въглеродно съдържание 0,45 %, а най-малка плътност при Армко желязо. При това използваната специфична енергия е най-голяма при брикетиране на стружки от Армко желязо, а най-малка при брикетиране на стружки от стомана. Като сумарен резултат това означава, че брикети от стоманени стружки с 0.45 % въглеродно съдържание, се получават с най-голяма плътност, при най-малък разход на енергия.

Таблица 20. Разлики на максималната плътност на брикети при брикетиране със „свободен удар“ и с „комбиниран удар“ на стружки от желязо-въглеродни сплави $((E_c)_{\max}$ е специфичната енергия при максимална плътност на брикета)

Материал	$(\rho_{\text{св}})_{\max}$ gr/sm ³	$(\rho_k)_{\max}$, gr/sm ³	$(\Delta\rho)_{\max}$, gr/sm ³	$(\Delta\rho)_{\max}$, %	$(E_c)_{\max}$, J/sm ³
Армко Fe	5.195	5.507	0.312	6.00	242.595
Стомана	5.964	6.088	0.124	2.08	253.185
Сив чугун	5.475	5.538	0.063	1.15	207.880

➤ Ефектът от ударно брикетиране с комбиниран удар е най-голям при брикетиране на стружки от Армко желязо (0.02 % C): $(\Delta\rho)_{\max} = 6 \%$. С увеличаване на въглеродното съдържание тази разлика намалява до 1.15 % при брикети от сив чугун. Това може да се обясни с малката стойност на допълнителната сила на притискане, получавана от студения ракетен двигател при комбиниран удар. За да се получат по-големи разлики $(\Delta\rho)_{\max}$ при брикетиране на стружки от стомана и чугун, е необходимо да се приложи по-голяма сила на ракетния двигател.

➤ От фиг.59 се вижда, че при малко съдържание на въглерод с увеличаване на специфичната енергия на удара E_c , плътността на брикетите непрекъснато нараства. Това означава, че при увеличаване на ударната енергия, плътността на брикетите може да нараства значително над получените при експеримента стойности;

➤ От фиг.60 и фиг.61 се вижда, че при увеличаване на въглеродното съдържание се появява ясно изразен максимум на плътността, при използване на специфична енергия за брикетиране $(E_c)_{\max}$. При нарастване на E_c над тази стойност ($E_c > (E_c)_{\max}$) плътността на брикетите намалява. Ефектът от намаляване на плътността нараства, с увеличаване на въглеродното съдържание. Това означава, че получаване на брикети с по-голяма плътност може да се постигне единствено чрез увеличаване на допълнителната сила на притискане при брикетиране с комбиниран удар, т.е. чрез увеличаване на силата на ракетния двигател (тягата на ракетния двигател R), действаща през време на удара.

➤ От Таблица 14 и фиг.60 се вижда, че най-голяма плътност на брикетите, определена чрез отношението $\rho_{\max}/\rho_0$, се получава при ударно брикетиране на стружки от стомана, а най-малка плътност при брикетиране на стружки от Армко желязо (при сравнително близки стойности на специфичната енергия на удара E_c). При брикетиране на стоманени стружки с хидравлични преси отношението $\rho_{\max}/\rho_0 = 0.66 - 0.7$ [18], докато при ударно брикетиране с комбиниран удар е 0.775. Както беше отбелязано по-горе, това отношение може да стане по-голямо ако се увеличи тягата на ракетния двигател.

➤ Използването на комбиниран удар в процеса на брикетиране осигурява получаване на по-голяма плътност на брикета в сравнение с високоскоростно ударно брикетиране. Този резултат се получава при сравнение на данните от Таблица 20 и Таблица 21 [19].

Таблица.21. Данни за параметри на брикети, получени чрез високоскоростно уплътняване [19].

Марка машини	Развиваемая энергия, тс.м	Материал стружки	Брикет				Производительность, т/ч
			Диаметр, мм	Высота, мм	Плотность, кг/дм ³	Масса, кг	
МИБ-165Т	35	Титан	165	70—100	3—3,5	5—6	0,4
МИБ-275	60	Легированные стали	275	120—130	5—5,5	20—25	2,5—3
МИБ-275А	65	Алюминиевые сплавы	275	65—75	2,2—2,4	10—12	1,5
МИБ-260	65	Легированные стали	260	75—100	5—5,5	20—22	2,5—2,7
МИБ-350	70	Углеродистые стали	350	80—90	5—5,5	40—45	5—5,5

За цветни метали и сплави.

- Получените резултати от проведените експерименти за ударно брикетиране на стружки от цветните метали и сплави (чиста мед, алуминиева сплав, месинг) показват, че за всички материали плътността на брикетите получени с „комбиниран удар” е по-голяма от плътността на брикетите получени със „свободен удар”. В Таблица 22 са показани разликите $(\Delta\rho)_{\max}$ за тези материали, пресметнати по формула (4.3).

Таблица 22 Разлики на максималната плътност на брикети при брикетиране със „свободен удар” и с „комбиниран удар” на стружки от цветни метали и сплави ($(E_c)_{\max}$ е специфичната енергия при максимална плътност на брикета)

Материал	$(\rho_{св})_{\max}$ gr/sm ³	$(\rho_k)_{\max}$, gr/sm ³	$(\Delta\rho)_{\max}$, gr/sm ³	$(\Delta\rho)_{\max}$, %	$(E_c)_{\max}$, J/sm ³
Al сплав	2.413	2.703	0.290	12.00	164.360
Мед	8.084	8.496	0.412	5.10	238.665
Месинг	7.363	7.469	0.106	1.43	253.890

- Ефектът от ударно брикетиране с комбиниран удар е най - голям при брикетиране на стружки от алуминиева сплав (0.9 % М, 1.9 % Мп): $(\Delta\rho)_{\max} = 12\%$ - Таблица 22. Тази сплав е с най-малка якост и твърдост. При стружки от мед и месинг якостта и твърдостта нарастват – Таблица 22, което води до намаляване на разликата $(\Delta\rho)_{\max}$ до 1.43 %. Това може да се обясни със сравнително малката стойност на допълнителната сила на притискане R, получавана от студения ракетен двигател при комбиниран удар. За да се получат по-големи разлики $(\Delta\rho)_{\max}$ при брикетиране на стружки от мед и месинг, е необходимо да се използва ракетен двигател с по-голяма сила (тяга R).

- При брикетиране с комбиниран удар на стружки от материали с голяма пластичност, каквито са деформируемата алуминиева сплав и чистата мед (99.9 % Cu), въпреки сравнително малката допълнителна сила R, прилагана от студен ракетен двигател през време на удара, се получават плътности на брикетите много близки до плътността на съответния монолитен материал – Таблица 19 и фиг.65а. От фиг.65б се вижда, че при брикетиране на стружки от деформируеми алуминиеви сплави, може да се постигне непрекъснато увеличаване на плътността на брикетите чрез увеличаване на специфичната енергия за ударно брикетиране E_c . Плътността на брикети получени от стружки на чиста мед може да се увеличава над определена максимална стойност само чрез нарастване на допълнителна сила R от ракетния двигател. Така от тези два материала може да се получат брикет с плътност, която има много малка разлика с плътността на монолитния материал, т.е. отношението $\rho_{\max}/\rho_0$ клони към единица. В такъв случай получаваните брикети ще може да се използват за производство чрез механична обработка на неотговорни детайли. Този резултат може да се обобщи за всички деформируеми алуминиеви сплави, при уговорката, че за различните сплави брикетирането ще трябва да се осъществява с различна по големина допълнителна сила R, прилагана от ракетния двигател; [80-84]

- Специфичната енергия E_c за брикетиране на стружки от деформируема алуминиева сплав с комбиниран удар е с 31 % по-малка, от специфичната енергия за брикетиране на стружки от чиста мед и с 35 % по-малка от специфичната енергия за брикетиране на стружки от месинг. Това означава, че при една и съща енергия за брикетиране с комбиниран удар, може да се получат брикети от стружки на разглежданата деформируема алуминиева сплав, обемът на които е с 31 % и 35 % по-голям от обема на брикетите от медни (99.9 % Cu) и месингови стружки (37 % Zn), съответно.

4.3.2. Изводи

➤ Резултатите от проведените лабораторни експерименти за ударно брикетиране на метални стружки, получени от желязо-въглеродни сплави и от цветни метали и сплави показват, че при използване на ефекта „комбиниран удар” може да постигне голямо увеличаване на плътността на получаваните брикети, в сравнение с плътността на брикетите при използване на хидравлични преси или „свободен удар”. Например, при използваната от нас в лабораторни условия сравнително малка допълнителна сила $R = 22 \text{ kg}$, получавана от студен ракетен двигател, увеличаването на плътността на брикетите $\rho_{\max}$ от стоманени стружки при брикетиране с „комбиниран удар” е в границите 11 % - 21 %, в сравнение с брикетиране с хидравлични преси. При брикетиране на стружки от деформируема алуминиева сплав тази разлика е в границите 12 % - 23 %.

➤ Увеличаването на плътността на брикетите е постижимо по два начина:

– чрез увеличаване на специфичната енергия на удара E_c . По този начин може да се увеличи плътността на брикетите от стружки на нисковъглеродни стомани, представител на които е Армко желязо - фиг.59 както и на брикети от стружки на алуминий и на деформируеми алуминиеви сплави – фиг.62;

- чрез увеличаване силата на притискане R , осъществявана от ракетния двигател през време на удара, при една и съща енергия E_c . По този начин може да се увеличи плътността на брикети получени от стружки на стомана и сив чугун, както и на брикети получени от стружки на чиста мед и месинг;

➤ С увеличаване на въглеродното съдържание на желязо –въглеродни сплави се преминава към процес на ударно брикетиране, при който за всяка сплав има максимум на плътността $\rho_{\max}$ и съответна специфична енергия на удара $(E_c)_{\max}$ – Таблица 13, след което плътността започва да намалява въпреки увеличаване на специфичната енергия на деформация E_c – фиг.59 и фиг.60. Поради това, преди започване на промишлено брикетиране е необходимо, да се определят стойностите на $\rho_{\max}$ и на E_c за стружки от всяка конкретна желязо-въглеродна сплав, или за всяка конкретна смес от стружки на такива сплави. По този начин ще се оптимизира процеса на ударно брикетиране на стружки за този вид материали.

➤ При получаване на брикети чрез ударно брикетиране на стружки от мед и месинг, с увеличаване на специфичната енергия E_c се достига до максимална плътност $\rho_{\max}$ и съответна специфична енергия на удара $(E_c)_{\max}$ – Таблици 16 и 17, след което плътността остава същата ($\rho = \rho_{\max}$) въпреки увеличаване на специфичната енергия на

деформация E_c – фиг.62 и фиг.63 Поради това, преди започване на промишлено брикетиране е необходимо, да се определят стойностите на p_{max} и на E_c за стружки от всяка конкретна медна сплав, или за всяка конкретна смес от стружки на такива сплави. По този начин ще се оптимизира процеса на ударно брикетиране на стружки за този вид материали.

➤ За процесите на брикетиране на стружки от цветни метали и сплави с голяма пластичност (в конкретните експерименти това са деформируема алуминиева сплав и чиста мед) са установени следните особености:

- при получаване на брикети от стружки на деформируеми алуминиеви сплави чрез ударно брикетиране с „комбиниран удар” може да се постигне плътност на брикета много близка до плътността на монолитна сплав, чрез прилагане на точно определена за всяка сплав специфична енергия на удар $E_c = (E_c)_{мон}$. За използваната в няшите експерименти сплав, която освен алуминий съдържа 0.9 % Mg и 1.9 % Mn се получава $(E_c)_{мон} > 164.36 \text{ J/sm}^3$ – Таблица 19;

- при получаване на брикети от стружки на чиста мед чрез ударно брикетиране с «комбиниран удар», може да се постигне плътност на брикета много близка до плътността на монолитна сплав при изпълнение на следните условия: 1. $E_c = (E_c)_{max} = 238.665 \text{ J/sm}^3$ – Таблица 19; 2. допълнителната сила $R = R_{мон}$, получавана от ракетния двигател през време на ударно брикетиране с „комбиниран удар” да е $R_{мон} > 22 \text{ kg}$ (за брикети с диаметър 20 mm). Тъй като тази сила зависи от диаметъра на брикетите, то тя трябва да се определя при всяка стойност на този параметър.

4.4. Резултати от 2-ра серия лабораторни експерименти за брикетиране с удар на метални стружки

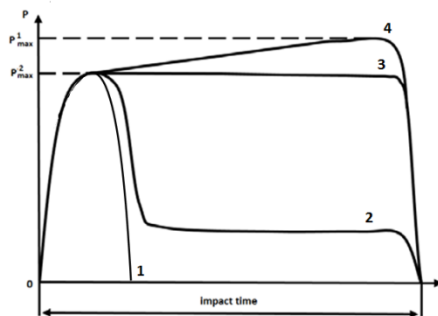
4.4.1. Въведение

В настоящото изложение са представени резултати от експерименти за ударно брикетиране на стружки от AL-сплав и сив чугун, както и от уплътняване на железен прах. Материалите за експериментите са предоставени от фирма “Капрони”-гр.Казанлък.

Експериментите са проведени в лаборатория „Изследване на технологични ударни процеси” при ТУ-София. Използвана е уредба за сложен (комбиниран) удар – Фиг.39.

Основният елемент на тази уредба е студен ракетен двигател 12, който работи със стъстен въздух с налягане до 33 МПа. Използването на такъв двигател дава възможност за получаване на удар, при който се получава комбинирано въздействие на ударната сила P_y с допълнителна сила R от ракетния двигател, която действа през време на удара. На Фиг.40 са показани режимите на работа на уредбата, а на Фиг.66 – възможното изменение на силата през време на удара. От Фиг.66 се вижда, че при сложен удар устройството може да работи като комбинация на чук и хидравлична преса, т.е. да се получи ударно действие на силата, след което максималната ударна сила или различна от нея сила, да продължи да действа с постоянна (или нарастваща) стойност, като хидравлична преса. Големината на допълнителната постоянна сила, действаща през време на удара, зависи от тягата на ракетния двигател R . При

регулиране на тягата R , може да се получат различните диаграми за изменение на силата P_y , показани на Фиг.66.



Фигура 18. *Диаграми за изменение на силата на удар: 1 – обикновен удар; 2, 3, 4 – сложен удар*

Основните технически характеристики на уредбата са: максимална височина на падане – 1.1 m; максимална скорост на удар – от 7 m/s до 8 m/s, в зависимост от масата на падащата част; маса на падащата част – 6.17 kg или 9.12 kg; максимална енергия на удара – 240 J; максимална допълнителна сила (тяга) от ракетния двигател $R = 226 \text{ N}$.

Максималната скорост на удара се получава в резултат на ускорение от работещия ракетен двигател през време на падане, а допълнителната сила се получава, когато двигателя продължава да работи след удара – режим 4 от Фиг.66.

Бяха проведени експерименти за брикетизиране на метални стружки от армко желязо (0.04% Fe), стомана (0.45% Fe), сив чугун (3.5 % Fe), Al- сплав (1.8 % Mg, 0.9 % Mn), мед (99.9 % Cu), месинг (37 % Zn). (Раздел 4.3) На Фиг.67 е показан вида на използваните стружки във втората серия експерименти, а на Фиг.68 - диаграми за постигнатата плътност на брикетите от Al-сплав и чугун, при различна „специфична енергия на удара E_c ” [86-90].



а)

б)

Фигура 19. *Вид на стружки използвани за брикетизиране: а – Al-сплав; б – сив чугун [1]*

Енергията на удара, която е основна характеристика на машини с ударно действие, се пресмята по формулата

$$E_y = \frac{mV_y^2}{2}, \text{ J}, \quad (4.4)$$

където m е масата на падащата част, kg, а V_y е скоростта на удар, m/s.

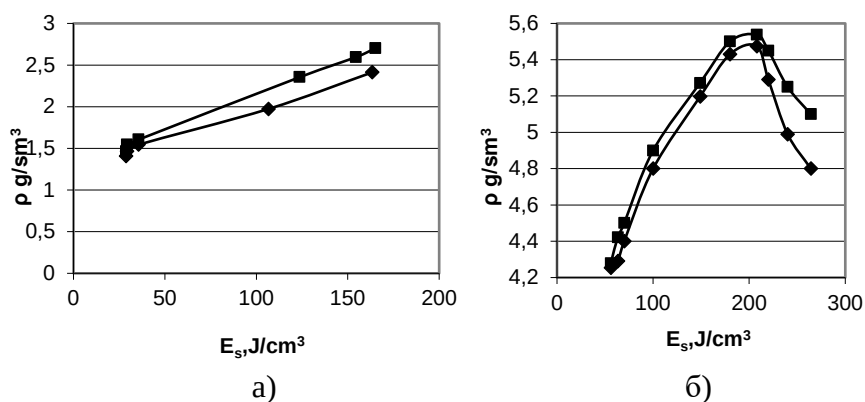
Специфичната енергия E_c е енергията за единица обем и се пресмята по формулата

$$E_c = \frac{E_y}{\Theta}, \text{ J/sm}^3, \quad (4.5)$$

където Θ , sm^3 , е обемът на получаваното след удара тяло (брикет). Този показател се използва, тъй като дава обективна основа, за приложение на получените в лабораторни условия резултати, при внедряване в практиката на технологичния процес за ударно брикетирене. Например, ако в лабораторни условия е установено, че за брикет с обем Θ_1 максимална плътност се получава при $E_c = E_c^1$, J/sm^3 , за да се получи в производствени условия брикет с обем Θ_2 ($\Theta_2 > \Theta_1$) със същата плътност, ще бъде необходима енергия на удара E_y^2

$$E_y^2 = E_c^1 \cdot \Theta_2 = \frac{E_y^1 \cdot \Theta_2}{\Theta_1} = E_y^1 \cdot \frac{\Theta_2}{\Theta_1}, \text{ J}. \quad (4.6)$$

Получената от (3) стойност на необходимата енергия на удар, за получаване в промишлени условия на брикет с максимална плътност, ще послужи за избор на машина (чук), с която да се работи (енергията на удара е основна характеристика на ударните машини). Ако на една и съща машина се получават брикети от стружки на различни материали, тогава машината се избира по най-голямата енергия, от енергиите необходими за получаване на брикети с максимална плътност за различните материали.



Фигура 20. Плътност на брикети в зависимост от E_c : а – за брикети от Al-сплав; б – за брикети от сив чугун; ■ – сложен удар; ♦ - обикновен удар [1]

От Фиг.68 се вижда, че при различните материали диаграмата $\rho - E_c$ има различен вид. При брикетирене на стружки от Al-сплав плътността нараства при нарастване на

E_c , като при достатъчно голяма E_c може да се постигне плътност много близка до плътността на монолитна сплав. Този извод се подвърждава от резултатите публикувани в работите [4], [5]. В тези източници е показано, че при голяма плътност на брикетите, те може да се използват, за директно получаване на детайли чрез следваща пластична деформация (право и обратно изтичане, студено или горещо щамповане).

При ударно брикетиране на стружки от сив чугун, с увеличаване на E_c се достига до максимум на плътността, след което по-нататъшното увеличаване на E_c , води до намаляването на плътността на брикетите. Този характер на диаграмата се наблюдава в по-малка степен и при брикетиране на стоманени стружки, но не и при брикетиране на стружки от армко желязо – Фиг.58а. Може да се направи извода, че наличието на максимум в диаграмата зависи от въглеродното съдържание в желязо-въглеродните сплави.

Трябва да се отбележи, че получените сравнително малки разлики между плътността при обикновен и сложен удар (в границите на 10%-20 % за различните сплави), се дължи на малката тяга на студения ракетен двигател ($R=226$ N). При сила на удара от порядъка на 10000 N – 15000 N, тази сила е много малка, за да се получат големи разлики, т.е. при тези експерименти силата на удар се изменя по крива 2 от фиг.66. При действащия промишлен чук, задвижван от ракетен двигател с тяга $R = 19620$ N [6], диаграмата на силата ще е близка до крива 3 от фиг.66 и се очаква да се получат много по-големи разлики между плътността на брикетите, получени с обикновен и със сложен удар. Освен това, при промишлен чук задвижван от ракетен двигател, може да се постигнат по-големи скорости на удар (до 18 m/s), в резултат на което ефектите от увеличаване на енергията на удара (в съответствие с формула (1)) и на скоростта на удара се сумират.

Получените положителни резултати, свързани с увеличаване плътността на брикетите при използване на сложен удар, ни дават основание, да изследваме този ефект и при брикетиране на предоставените от Фирма „Капрони” стружки и железен прах. Още повече, че технологията за ударно уплътняване на метални прахове се изследва и прилага все по-широко през последните години [91-97].

4.4.2. Методика за брикетиране на стружки

➤ За провеждане на експериментите за брикетиране на стружки, се използва експерименталния стенд, показан на Фиг.39. С монтираните към стенда индуктивни и светлинни датчици, може да се измерва скоростта на удар с голяма точност [12]. За определяне силата на удара P_y , е необходимо, да се познава ускорението на удара a_y . Тогава P_y се определя от закона на Нютон

$$P_y = m.a_y, N. \quad (4.7)$$

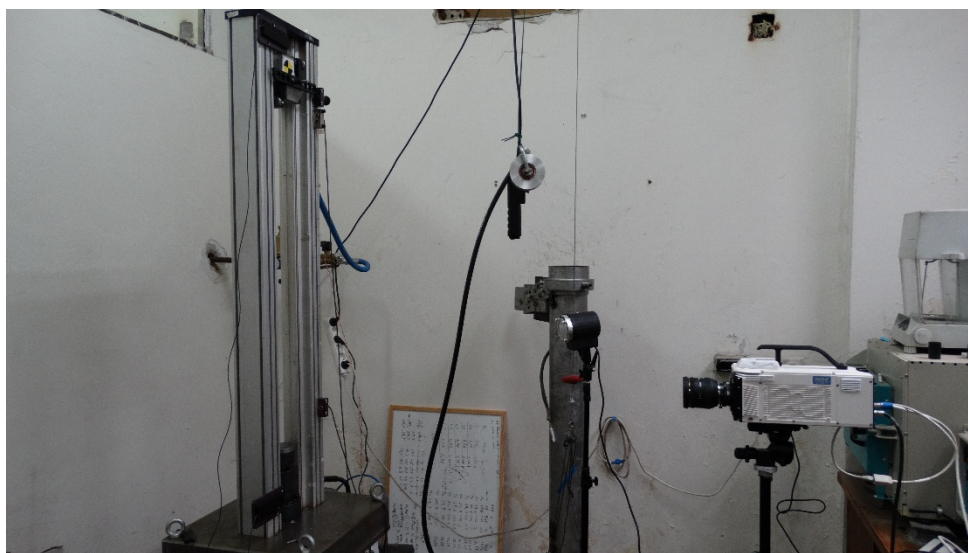
За експериментално определяне на ускорението, се използват датчици за ускорение. Поради това, че този вид датчици са с обхват на измерване (например: до 10 g, до 100 g,

...., 100000 g, където g е земното ускорение), не беше възможно тяхното използване, защото предварително не ни беше известен порядъка на действащото ускорение при различните процеси (брикетиране, различни операции за пластична деформация).

В настоящият момент ИИКТ-БАН разполага с високоскоростна камера и софтуер към нея, с който може да се определят параметрите път, скорост, ускорение на удрящи се тела. На Фиг.69 е показан стенда с тази камера и специални осветителни тела, за осъществяване на високоскоростни видео записи. Използването на камерата и софтуера дава възможност за определяне на скоростта V_y и на ускорението a_y , и след това за пресмятане на енергията E_y и на силата P_y по формули (1), (4).

След получаване на брикета, той се поставя в Рентгенов Томограф Nikon XTH 225 Compact Industrial CT Scanner (ИИКТ-БАН), за да се изследва структурата му в хоризонтални и вертикални сечения. Разделителната способност на получаваните изображения е 5 μm . От съответните сечения се определят автоматично диаметъра $D_{бр}$, mm, и височината $H_{бр}$, mm, на брикета, с точност до четвъртия знак след десетичната точка.

С данните за $D_{бр}$ и $H_{бр}$ се определя обема на брикета Θ , cm^3 , след което се пресмята специфичната енергия E_c по формула (2).



Фигура 21. Лабораторен стенд за сложен удар с високоскоростна камера

➤ Масата на брикета $G_{бр}$ (в грамове) се определя, чрез измерване с аналитична везна (Лаборатория «Трибология» при ТУ-София), с точност до четвъртия знак след десетичната точка, след което се пресмята плътността $\rho_{бр}$, по формулата

$$\rho_{бр} = \frac{G_{бр}}{\Theta}, \text{ gr/cm}^3. \quad (4.8)$$

➤ На Фиг.70 е показана инструменталната екипировка, използване за брикетиране. Диаметърът на отвора на матрицата, в който се насипват стружките, е $D_m = 20 \text{ mm}$.

Диаметърът на поансона $D_p = 19.6 \text{ mm}$. Между матрицата и поансона има хлабина 0.2 mm на страна. Тази хлабина служи за излизане на въздуха, който се намира между стружките, при уплътняването им.



Фигура 70. Инструментална екипировка за брикетиране на метални стружки

➤ За определяне първоначалната маса на стружките в един брикет, се използват данните от диаграмите на Фиг.73. От тях се отчита, E_c при която се получава най-голяма плътност на брикета от съответния материал, след което, от данните за провеждането на експерименти по брикетиране получени в [1], се определя масата на стружките за този материал. В конкретния случай се получи, че масата на стружките за един брикет от Al-сплав трябва да е 4 gr , а за брикет от чугунени стружки да е 6 gr , за да се получи максимална плътност на брикета.

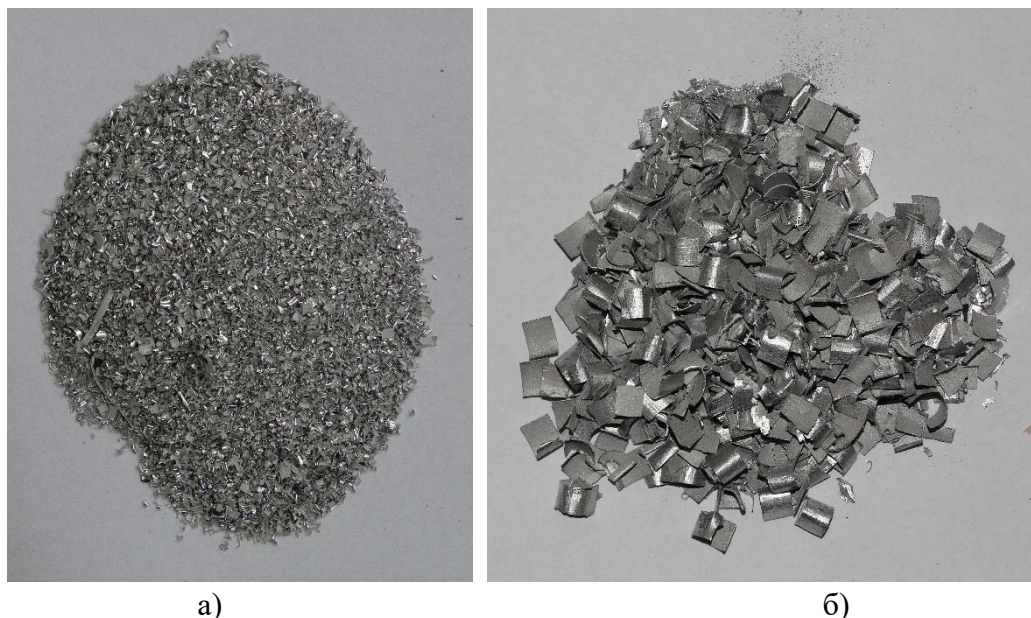
➤ Доставените стружки са с останала по тях смазочно-охлаждащата течност на машините за механична обработка, на които са получени. Част от тези стружки бяха почистени (обезмаслени), а другата част останаха в състояние на доставка. Това е направено с цел, да се изследва възможността за получаване на брикети без почистване на стружките.

➤ Поради наличие на хлабина между матрицата и поансона, получаваните брикети имат израстъци с дебелина 0.2 mm по двете челни повърхнини. Тези израстъци се отстраняват чрез обработване на машина за полиране на металографски шлифове (Лаборатория „Изпитване на материалите” при ТУ-София).

➤ Всички получени данни от експериментите се нанасят в таблици, които служат за построяване на графични зависимости и за анализ на резултатите.

4.4.3. Резултати от брикетиране

На фиг.71 е показан вида на стружките за брикетиране. Сравнението между вида и големината на стружките от Фиг.58 и фиг.71 показва голяма разлика и за двата вида материали. Най-съществена е тази разлика в големината на стружките.



Фигура 71. Вид на стружките за брикетиране: а – Al-сплав; б – чугун

От всеки материал са получени по четири брикета от почистени стружки и стружки във вид на доставка (омаслени). Вида на получените брикети е показан на Фиг.72. Израстъкът по горната челна повърхнина се дължи на хлабината между матрицата и поансона. Израстъкът по долната челна повърхнина е поради хлабина в избутвача от матрицата. Както е отбелязано в Раздел 4.4, тези елементи се премахват, преди измерване на масата на брикета с аналитична везна.

След видео-заснемане на ударния процес за всеки брикет, се извършва обработка на записа с програмния продукт Vicasso 2009. В резултат се получават диаграми на пътя, скоростта и ускорението. От тези диаграми се отчита скоростта на удар V_y и ускорението на удар a_y . С тези данни се пресмята енергията на удар E_y и силата на удар P_y по формули (1), (4). На Фиг.73 са показани тези диаграми за един от ударите

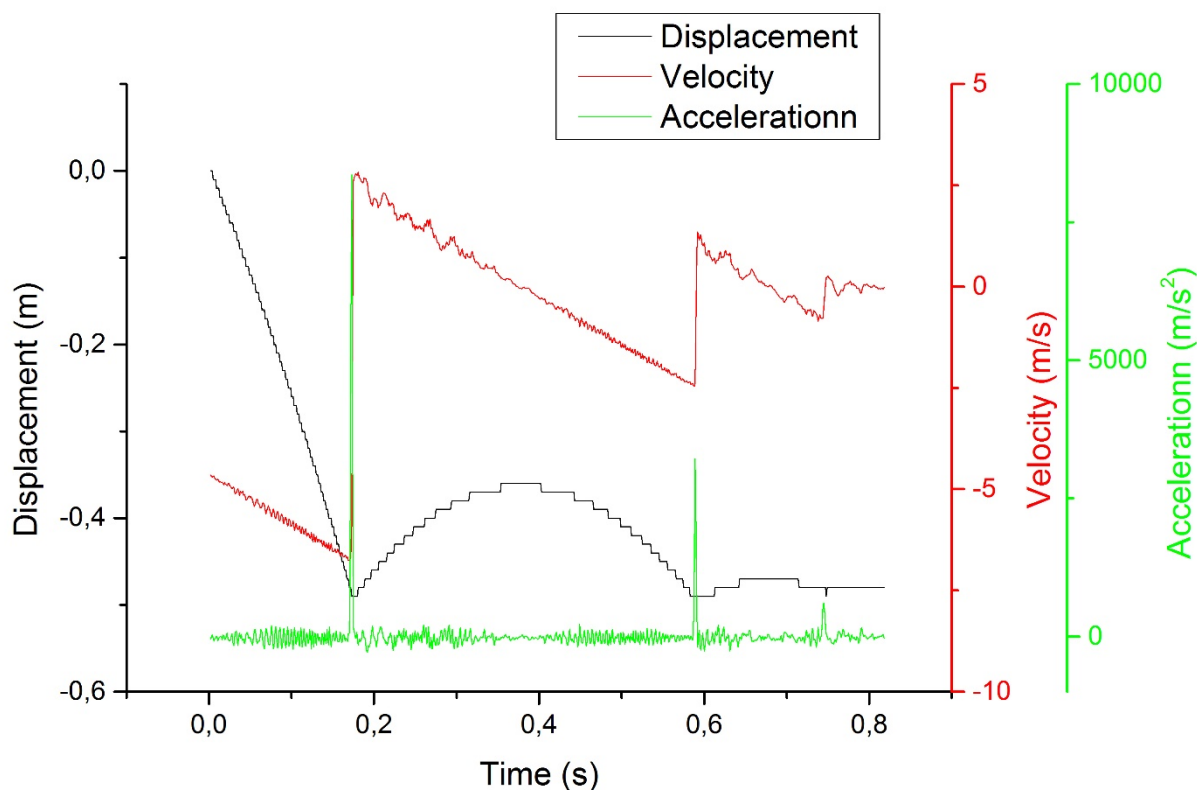


a)



б)

Фигура 22. а – брикети от алуминиеви стружки (А1 – А4 от почистени стружки; АМ1 – АМ4 от стружки във вид на доставка); б – брикети от чугунени стружки (Ч1 – Ч4 от почистени стружки; ЧМ1 – ЧМ4 от стружки във вид на доставка)



Фигура 23. *Диаграми на път, скорост и ускорение за един случай на брикетиране със сложен удар*

В Таблица 23 са дадени резултатите от брикетиране със сложен удар на стружки от предоставените материали. Може да се отбележат следните особености:

- Брикетите от Al – сплав са с много добра плътност – средна плътност $\rho = 2.5328 \text{ gr/sm}^3$, при плътност на чист алуминий $\rho = 2.7 \text{ gr/sm}^3$. При това, плътността при замърсени стружки ($\rho = 2.5329 \text{ gr/sm}^3$) е малко по-голяма от плътността на почистени стружки ($\rho = 2.5292 \text{ gr/sm}^3$). **Практически наличието на смазочно-охлаждаща течност по стружките не оказва влияние върху плътността на брикетите.**

- Ако се съпоставят данните за специфичната енергия на удара E_c при брикетиране на стружки от Al – сплав от Таблица 23 (средни стойности) и от Фиг.68а се вижда, че и при двата вида стружки има пълно съвпадение на получените резултати при максимална енергия $E_c = 150 \text{ J/sm}^3$. Това означава, че ако в производствени условия се осъществи брикетиране с $E_c > 150 \text{ J/sm}^3$, ще може да се получат брикети с плътност много близка до плътността на монолитен метал.

- Брикетите от чугун са с много малка плътност – $\rho = 2.0819 \text{ gr/sm}^3$ средна плътност, при плътност на монолитна сплав около $\rho = 7.5 \text{ gr/sm}^3$. **И в този случай няма съществена разлика, между плътността на брикетите от замърсени стружки и от почистени стружки.**

- Ако се съпоставят данните за специфичната енергия на удара E_c при брикетиране на стружки от чугун от Таблица 24 (средни стойности) и от Фиг.68б се вижда, че има голяма разлика между енергията E_c за достигане на максимална плътност и E_c

получавана при настоящите експерименти. От фиг.68 се определя, че максимална плътност на брикет от чугунени стружки се получава при $E_c = 200 \text{ J/sm}^3$. От Таблица 1 се вижда, че при проведените експерименти средната специфична енергия за получаване на брикети от чугунени стружки $E_c = 88.1445 \text{ J/sm}^3$, т.е. тази енергия е над два пъти по-малка, от необходимата специфичната енергия за получаване на брикет от чугунени стружки с максимална плътност.

- От Таблица 23 се вижда, че по-голямата плътност на брикетите от Al – сплав, в сравнение с плътността на брикетите от чугун, се получава при по-голяма сила на удара P_y : при брикетиране на стружки от Al – сплав средната сила на удара е $P_y = 15048.24 \text{ N}$, а при брикетиране на стружки от чугун $P_y = 14000.22 \text{ N}$.

Ще отбележим следните особености на получените брикети от стружки на Al – сплав, които може да се наблюдават на Фиг.72:

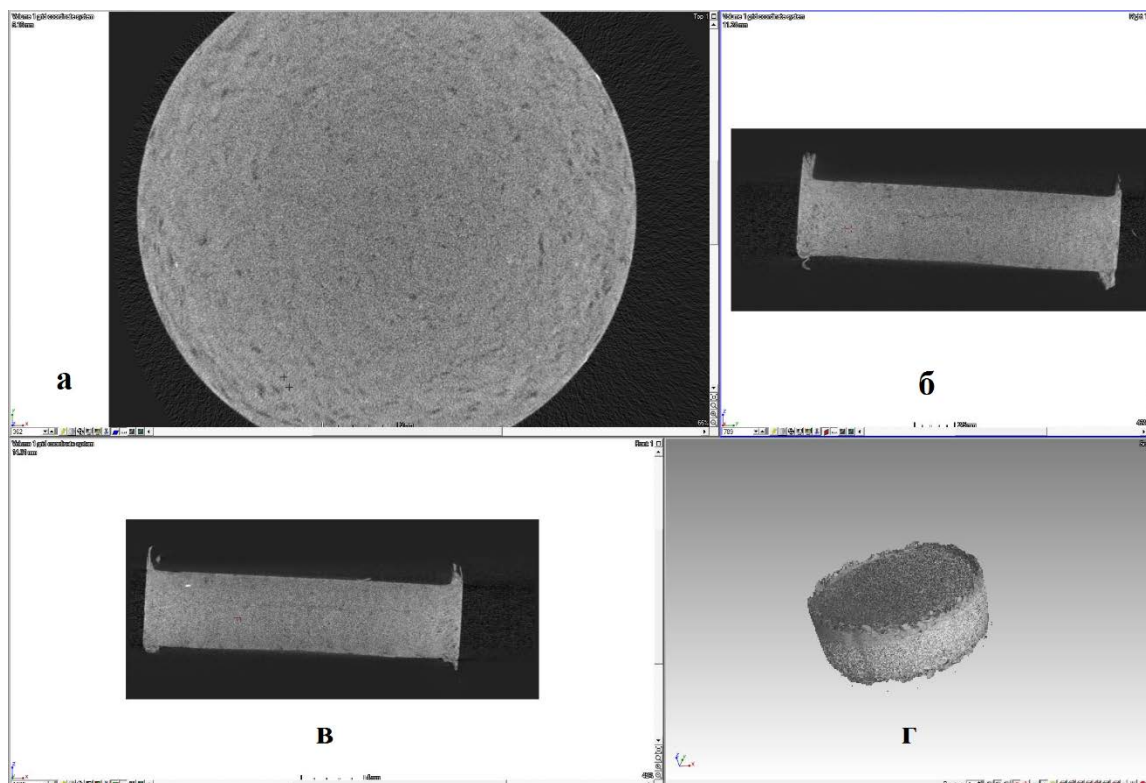
- Неплътностите (въздушни микропори) са предимно в периферията на брикета. В централната част (около $\frac{1}{2}$ от диаметъра) плътността е много добра – Фиг.74а.

- От Фиг.Фиг.74б,в се вижда, че най-голям обем от въздушни микропори има във външните области по височина. Това може да се обясни с изтласкването на въздуха от централните части към периферните, където е изхода на въздуха от матрицата (хлабината m/y

Таблица 23. Данни за параметрите на ударния процес и на получаваните брикети

Опит №	Означение	V_y , m/s	a_y , m/s ²	$H_{отс}$, mm	$H_{бр}$, sm	$D_{бр}$, sm	Обем Θ , sm ³	$G_{бр}$, gr	ρ , gr/sm ³	E_y , J	E_c , J/sm ³	P_y , N
1	A1	7.12598	1609.823	1.597	0.461	2.013	1.466419	3.7346	2.546748	231.5549	157.905	14681.59
2	A2	7.16733	1611.719	1.862	0.474	2.013	1.507772	3.7771	2.505088	234.25	155.3617	14698.88
3	A3	6.80936	1494.162	1.743	0.488	2.011	1.549222	3.8545	2.488023	211.4353	136.4784	13626.76
4	A4	7.17096	1631.31	2.242	0.506	2.008	1.601576	4.1275	2.577149	234.4874	146.4104	14877.55
средно		7.068408	1586.754	1.861	0.482	2.011	1.531247	3.8734	2.529252	227.9319	149.0389	14471.19
1	AM1	7.1024	1654.62	1.713	0.461	2.011	1.463507	3.7687	2.575116	230.025	157.1739	15090.13
2	AM2	7.1563	1695.654	1.795	0.482	2.012	1.531696	3.8364	2.504674	233.5296	152.4647	15464.36
3	AM3	6.95581	1609.755	1.398	0.474	2.012	1.506274	3.8442	2.552125	220.6278	146.4726	14680.97
4	AM4	7.19591	1640.078	1.927	0.478	2.01	1.515967	3.7891	2.499461	236.1219	155.7567	14957.51
средно		7.102605	1650.027	1.708	0.473	2.011	1.504361	3.8096	2.532844	230.0761	152.967	15048.24
1	Ч1	7.1277	1587.088	1.193	0.893	2.012	2.837769	5.6940	2.006506	231.6667	81.63692	14474.24
2	Ч3	7.16826	1551.145	1.073	0.919	2.013	2.923295	5.7585	1.969866	234.3108	80.15297	14146.44
3	Ч4	7.13799	1540.652	0.863	0.915	2.011	2.904791	5.7696	1.986236	232.3361	79.98376	14050.75
4	Ч5	7.09843	1461.562	0.913	0.949	2.011	3.012729	6.0060	1.993542	229.768	76.26573	13329.45
средно		7.133095	1535.112	1.010	0.919	2.011	2.919646	5.8070	1.989037	232.0204	79.50985	14000.22
1	ЧМ1	7.10634	1458.034	1.133	0.786	2.02	2.517648	5.1232	2.034915	230.2803	91.46646	13297.27
2	ЧМ2	7.11565	1551.117	1.027	0.842	2.004	2.654466	5.5894	2.105659	230.8841	86.97948	14146.19
3	ЧМ3	7.0764	1445.938	1.145	0.867	2.019	2.774351	5.6115	2.022635	228.344	82.30538	13186.95
4	ЧМ4	7.0846	1525.41	1.095	0.782	2.015	2.49245	5.1892	2.081967	228.8735	91.82671	13911.74

A, Ч са означения за експерименти с обезмасленни стружки, от Al – сплав и чугун съответно; AM, ЧМ са означения за експерименти със стружки във въд на доставка (омаслени) от Al – сплав и чугун

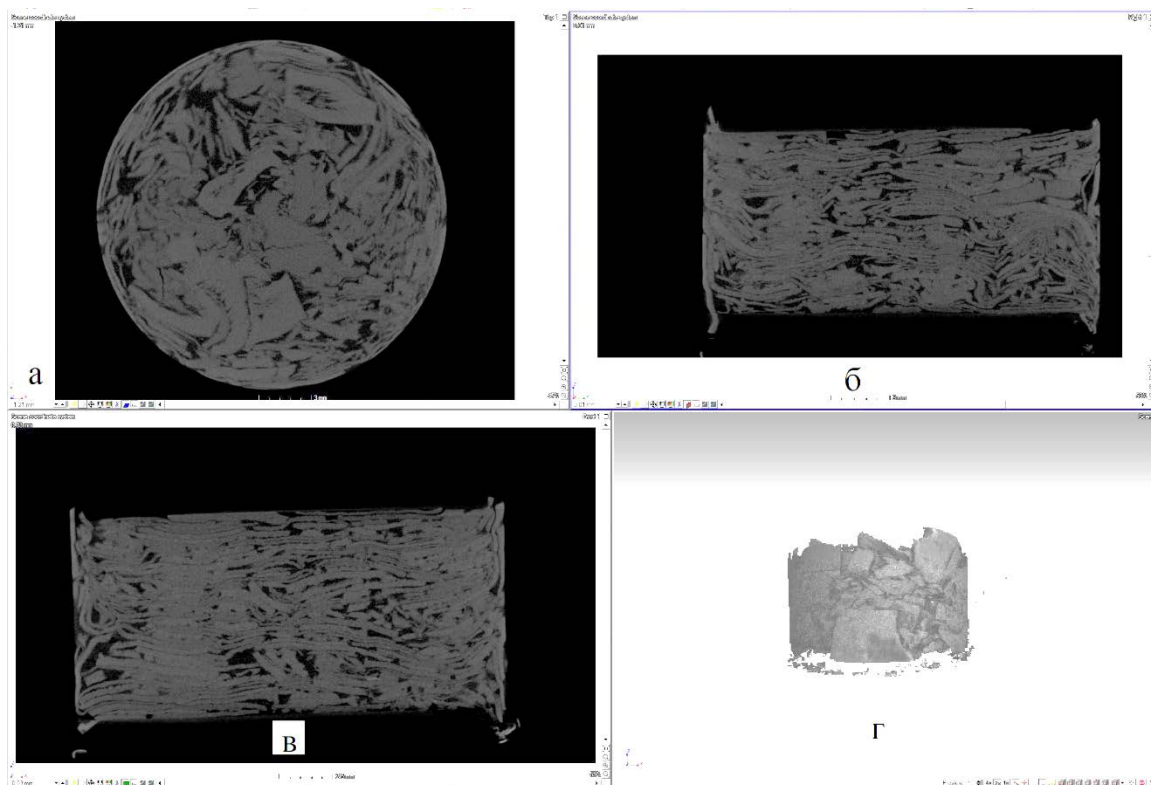


Фигура 24. Снимки от Рентгенов Томограф на брикет от Al – сплав: а – напречно сечение в средата на брикета по височина; б, в – взаимноперпендикулярни вертикални сечения, през центъра на брикета; г – 3-D изображение

матрицата и поансона). Поради малкото време на действие на ударната сила, за въздухът достигнал периферните области, няма достатъчно време да излезе извън брикета. Ако действието на ракетния двигател, продължи по-дълго време и тягата му R е достатъчно голяма, за да поддържа необходимото вътрешно налягане в брикета, под действие на което въздухът продължава да се движи до пълното му отстраняване, ще се създадат условия, за получаване на брикет с плътност много близка до плътността на монолитен метал. **Такъв брикет ще може да бъде използван за директно производство на детайли.** Този въпрос се изследва по-долу.

- В средата по височина на сеченията показани на Фиг.74 б,в се вижда тънка начупена линия. Според нас това е признак за разслояване на метала, поради действие на пластични вълни на опън [11], [13].

Разслояването не е от значение, при използване на брикетите за стопяване в пещ.



Фигура 25. Снимки от Рентгенов Томограф на брикет от чугун с маса 6 gr ($E_c =$): а – напречно сечение в средата на брикета по височина; б, в – взаимноперпендикулярни вертикални сечения, през центъра на брикета; г – 3-D изображение на брикет

От Фиг.Фиг.75а,б,в, се вижда, че между чугунените стружки има големи области с въздух, които са неравномерно разпределени в обема на брикета; 3-D изображението от Фиг.75г показва слабо сцепление между стружките и лошо качество на брикета. Както беше показано по-горе, това се дължи на малката специфична енергия на удара E_c , която е над два пъти по-малка от необходимата енергия за получаване на брикет с максимална плътност, в съответствие с Фиг.68б.

От Фиг.75 се вижда също, че разположението на стружките в най-външния слой, който контактува с матрицата, е такова, че възпрепятства излизането на въздуха от брикета. **Този ефект, според нас се определя от формата на стружките и лесно може да се отстрани, ако стружките са с по-малки размери. Това може да се постигне чрез смилане на стружките преди брикетиране, например в малка топкова мелница или ако се промени режима на рязане на металорежещата машина. Доказателство за това твърдение е фактът, че при малки размери на стружките – Фиг.67б, плътността на получаваните брикети е около 5.6 gr/sm^3 – Фиг.68б.**

За да се получи по-голяма специфична енергия на удара E_c , експериментите за получаване на брикети от замърсени чугунени стружки (ЧМ) бяха повторени, при маса на стружките 3.5 gr – Фиг. 76. Данните от тези експерименти са показани в Таблица 24.



Фигура 26. Брикети от чугунени стружки с маса 3.5 gr

От Таблица 24 се вижда, че и в тези случаи не може да се постигне голямо увеличаване на плътността на брикетите. Брикети ЧМ 7, ЧМ 8, ЧМ 10, ЧМ 11 са получени при нанасяне на два удара, а останалите брикети са получени с един удар. Смятаме, че причината за това е вече коментираната форма на стружките, която не позволява излизане на въздуха от брикетите.

Таблица 24. Данни от допълнителни експерименти за брикетиране на чугунену стружки

№	Озн.	V_y , m/s	A_y , m/s ²	Нотс, mm	Н бр, cm	Д бр, cm	В бр, cm ³	Г бр, gr	ρ , gr/cm ³	E_y , J	E_c , J/cm ³	F_y , N
1	ЧМ5	3.92514	1096.114	39	0.452	2.065	1.513032	3.0011	1.9835	70.25466	46.43302	9996.56
2	ЧМ6	6.05089	1788.711	25.75	0.408	2.082	1.388325	2.867	2.065078	166.9565	120.2575	16313.04
3	ЧМ7	5.89058	1635.752	47.1	0.499	2.003	1.571564	3.7413	2.380622	158.2271	100.6813	14918.06
4	ЧМ8	5.90531	1701.199	68.75	0.467	2.009	1.479607	3.5617	2.407193	159.0194	107.4741	15514.93
5	ЧМ9	6.22163	1433.471	18.27	0.551	2.016	1.757933	3.7465	2.131196	176.5116	100.4086	13073.26
6	ЧМ10	5.90171	1498.717	27.47	0.433	2.02	1.386948	3.105	2.238728	158.8256	114.5144	13668.3
7	ЧМ11	5.92012	1413.261	16.85	0.463	2.011	1.469856	3.2471	2.209128	159.8181	108.7304	12888.94
8	ЧМ12	5.73513	1320.484	16.77	0.589	2.04	1.924178	4.1127	2.13738	149.9862	77.9482	12042.81

Брикети при опити 1, 2, 5, 8 са проведени с един сложен удар, а при останалите опити са получени с два последователни сложни удар.

4.5. Резултати от проведените експерименти за уплътняване на железен прах.

➤ За провеждане на експериментите за уплътняване на железен прах се използва същия лабораторен стенд, инструментална екипировка и режими на работа, както при експериментите за брикетиране на стружки.

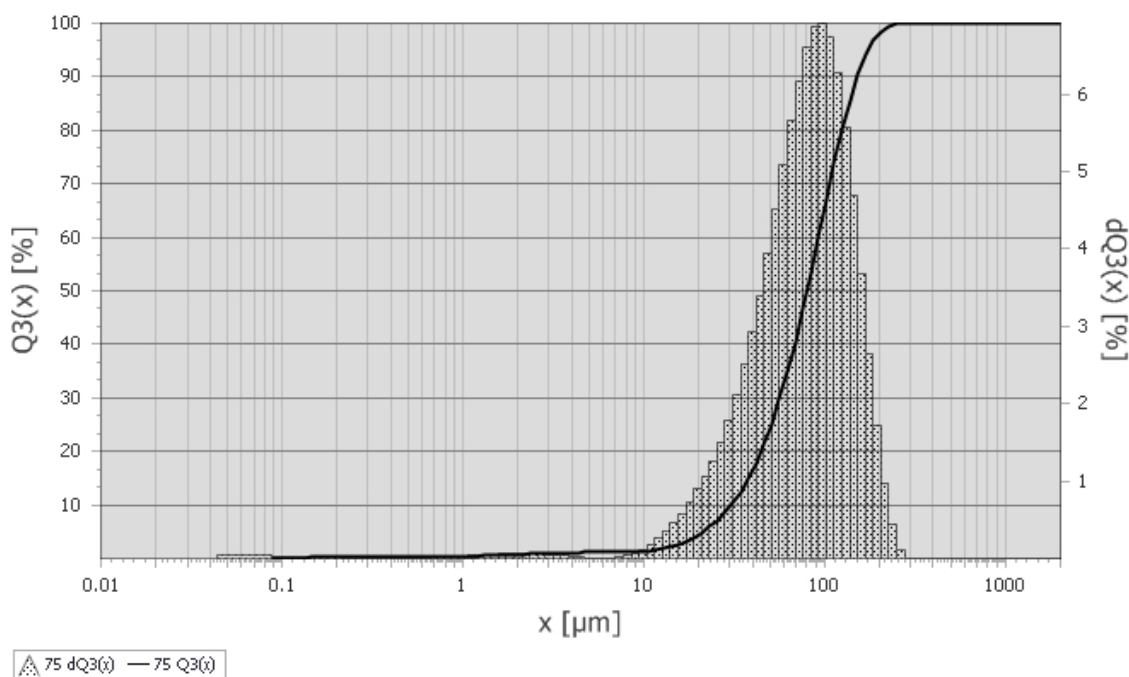
➤ Едрината на частиците на предоставения железния прах марка AS29-100, се определя на Fritch Analysette 22 Nano Tec+ (ИИКТ-БАН). Резултатите са показани на Фиг.77.

➤ За получаване на по-добро сцепление на частиците се използва цинков стеатат, в количество 1 % от масата на железния прах.

➤ Поради това, че до сега не са били провеждани експерименти за уплътняване на метални прахове, не може да се определи масата на праха, при която се получава максимална плътност. Експериментите ще се проведат при маса на железния прах 3.5 gr, 4 gr, 4.5 gr.

➤ След изваждане на цилиндричните образци от уплътнен прах, те се напръскват с лак и се измерва теглото им G_n с аналитична везна.

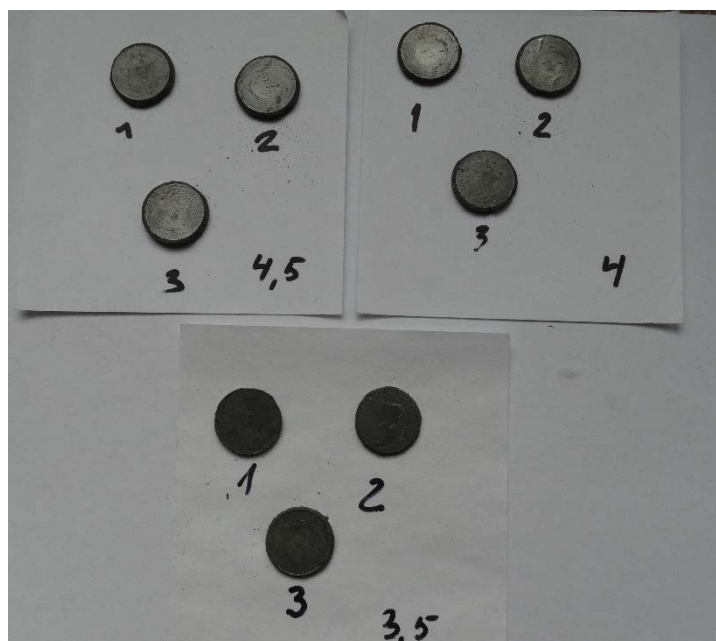
По-нататък методиката е както при брикетиране.



Фигура 27. Диаграма за разпределение едрината на частиците от железен прах

4.5.1. Резултати от уплътняване на железен прах

На Фиг.78 са показани получените цилиндрични детайли, след ударно уплътняване на железен прах. Означенията 4.5, 4, 3.5 определят масата на детайлите от една група. В Таблица 25 са показани данните от тези експерименти.



Фигура 28. Цилиндрични образци с маса 4.5 gr, 4 gr, 3.5 gr получени след уплътняване на железен прах чрез сложен удар

Таблица 25. Данни за параметрите на ударния процес и на образци от железен прах

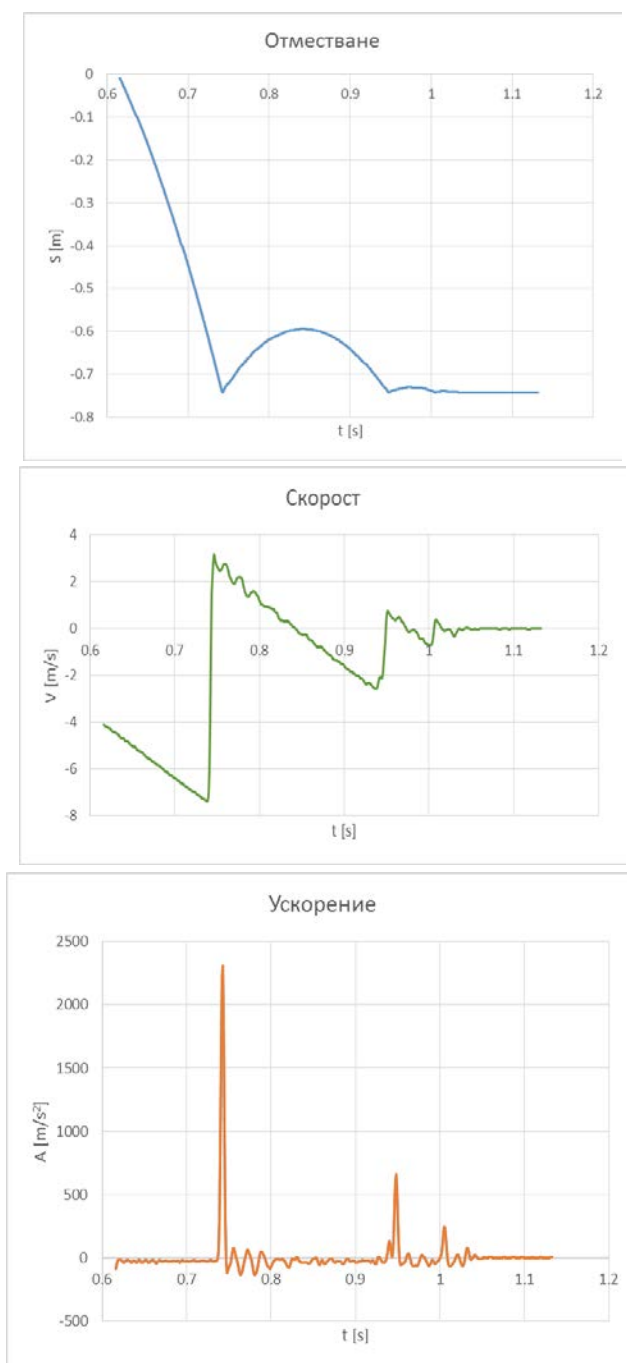
№	Озн.	V_y , m/s	A_y , m/s ²	Нотс, mm	Н бр, cm	D бр, cm	V бр, cm ³	G, gr	ρ , gr/cm ³	E_y , J	E_c , J/cm ³	F_y , N
1	P7	7.35646	2386.896	17.005	0.176	2.011	0.558736	3.0214	5.407565	246.7758	441.6682	21768.49
2	P8	6.98668	2287.302	16.503	0.181	2.018	0.578616	2.9597	5.115135	222.5905	384.6945	20860.19
3	P9	7.35451	2402.917	16.902	0.148	2.018	0.473123	3.1002	6.552636	246.645	521.3131	21914.6
Средно 3 гр		7.23255	2359.038	16.80333	0.1683	2.015667	0.536825	3.0271	5.691779	238.6704	449.2253	21514.43
1	P4	7.37522	2310.821	14.71	0.17	2.012	0.540225	3.5303	6.534872	248.036	459.1349	21074.69
2	P5	6.99422	2284.346	15.526	0.193	2.039	0.629885	3.699	5.872498	223.0712	354.1457	20833.24
3	P6	7.36929	2296.861	14.414	0.159	2.015	0.506777	3.4249	6.7582	247.6373	488.6515	20947.37
Средно 3.5 гр		7.246243	2297.343	14.88333	0.174	2.022	0.558962	3.5514	6.388523	239.5815	433.9774	20951.77
1	P1	7.37616	2236.851	13.916	0.222	2.038	0.723821	4.0105	5.540737	248.0993	342.7635	20400.08
2	P2	7.32333	2301.987	13.841	0.183	2.045	0.600769	4.075	6.782975	244.5581	407.0752	20994.12
3	P3	7.17439	2261.286	14.534	0.232	2.053	0.767601	4.0088	5.222505	234.7117	305.7731	20622.93
Средно 4 гр		7.291293	2266.708	14.097	0.212	2.045333	0.697397	4.031433	5.848739	242.4564	351.8706	20672.38

От Таблица 25 се вижда, че най-голяма средна плътност $\rho = 6.388 \text{ gr/sm}^3$ се получава при използване на прах с маса 3.5 gr, специфична енергия $E_c = 434 \text{ J/sm}^3$ и скорост на удара $V_y = 7.246 \text{ m/s}$. При това, максималната плътност от трите експеримента е $\rho^{\max} = 6.758 \text{ gr/sm}^3$, а минималната плътност е $\rho^{\min} = 5.872 \text{ gr/sm}^3$.

Трябва да се обърне внимание на факта, че масата на получаваните цилиндрични образци G е с около 0.5 gr по-малка, от първоначалната маса на поставения в матрицата материал. Това се обяснява с условията на експеримента, при който при

действието на силни въздушни струи, излизащи от двигателя, част от праховите частици излизат от матрицата и се разпръсват в околното пространство. За да не става объркване, при сравняване на Фиг.78 и Таблица 25, надписаните стойности за група образци на Фиг.78 трябва да бъдат намалени с 0.5 gr.

Рентгеновите снимки на образците не дават добра представа за структурата им, поради малкия размер на праховите частици. За изясняване на структурата и големината на въздушните пори е необходимо, структурата да се наблюдава с електронен микроскоп.



Фигура 29. *Диаграми на път, скорост и ускорение за един случай на уплътняване на железен прах*

На Фиг.79 са показани диаграмите за изменение на път, скорост и ускорение за един удар, при уплътняване на железен прах. При сравняване на диаграмите за ускорението при брикетиране ($a = 1680 \text{ m/s}^2$) – Фиг.73 и при уплътняване на железен прах ($a = 2325 \text{ m/s}^2$) Фиг.79, се вижда, че ускорението, а от там и силата на удара при уплътняване на прах е с 38.4 % по-голяма, от съответните стойности за получаване на брикети.

4.6. Пластична деформация на брикети от стружки на Al – сплав

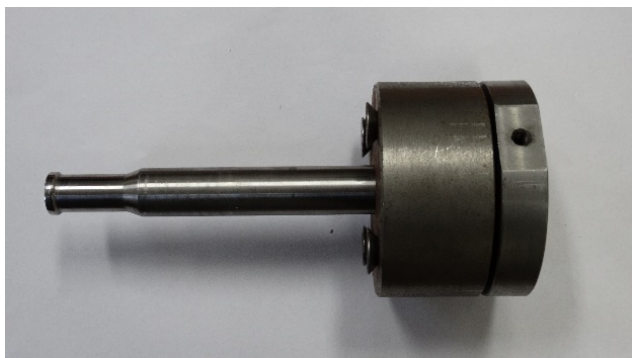
4.6.1. Проведени са експерименти за обратно изтичане на студено.

Използва се същата матрица, както при брикетиране, с диаметър $D_m = 20 \text{ mm}$ и специално конструиран поансон с диаметър на деформиращата част $d_n = 16 \text{ mm}$ – Фиг.80. За заготовки се използват три брикета от почистени стружки и три брикета от замърсени стружки. Опитите са проведени при работа на двигателя в Режим 4, максимална енергия на удара $E_y = 240 \text{ J}$. В резултат на деформацията се получават цилиндричен детайл тип «втулка с дъно», с дебелина на стената 2 mm и височина $0.5\text{-}2 \text{ mm}$ – Фиг.81. Получаваната вертикална стена е с малка плътност и неравно чело. На Фиг.82 е показана снимка от рентгенов томограф на един детайл, получен чрез ударно обратно изтичане.

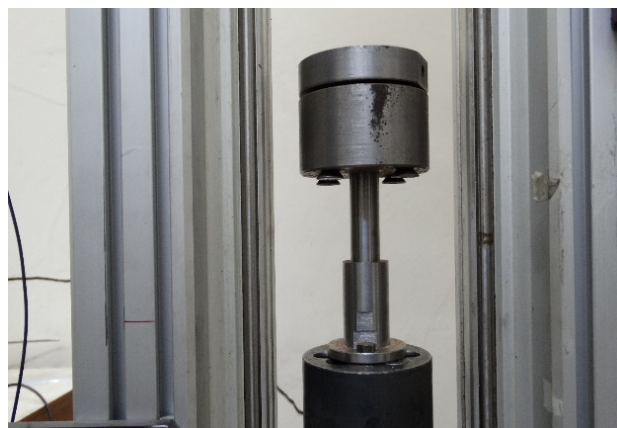
За да изледва възможността за постигане на максимална пластична деформация, детайлите от Фиг.80 са подложени на деформация със същия инструмент на хидравлична преса с максимална сила $P_{\max} = 400 \text{ kN}$ – Фиг.82. Скоростта на преместване на поансона е 10 mm/min . Максималната сила на деформиране беше установена на 190 kN .

От първоначалните шест детайла се получиха четири със сравнително добро качество, по два от всяка група – Фиг.83. При детайл АМЗ (брикет от замърсени стружки) се вижда, че в центъра на дъното се е получил отвор, който се е оформил в края на деформацията. Според нас това се дължи на много голямата степен на деформация на материала на дъното (дебелината на дъното е едва 0.26 mm). В резултатна това, маслото от смазката на матрицата е образувало малка капка, която под действие на голямото налягане от челото на поансона, е пробила тънката стена на втулката. Това обяснява силния пукот, който се чу в края на деформацията на този брикет. [98]

На Фиг. 82 е показана снимка от рентгенов томограф на детайл, получен от брикет АЗ. И в този случай дъното на детайла е с малка дебелина, но понеже се използват обезмаслени стружки, не се получава разрушаване на материала. От Фиг.82а се вижда, че материалът по височина на стената не е уплътнен добре и има напречни на стената неплътности, въпреки голямата деформация на дъното. Това се получава поради сравнително голямата дебелина на вертикалната стена (2 mm) и малката степен на деформация, получена при обратно изтичане. [99]

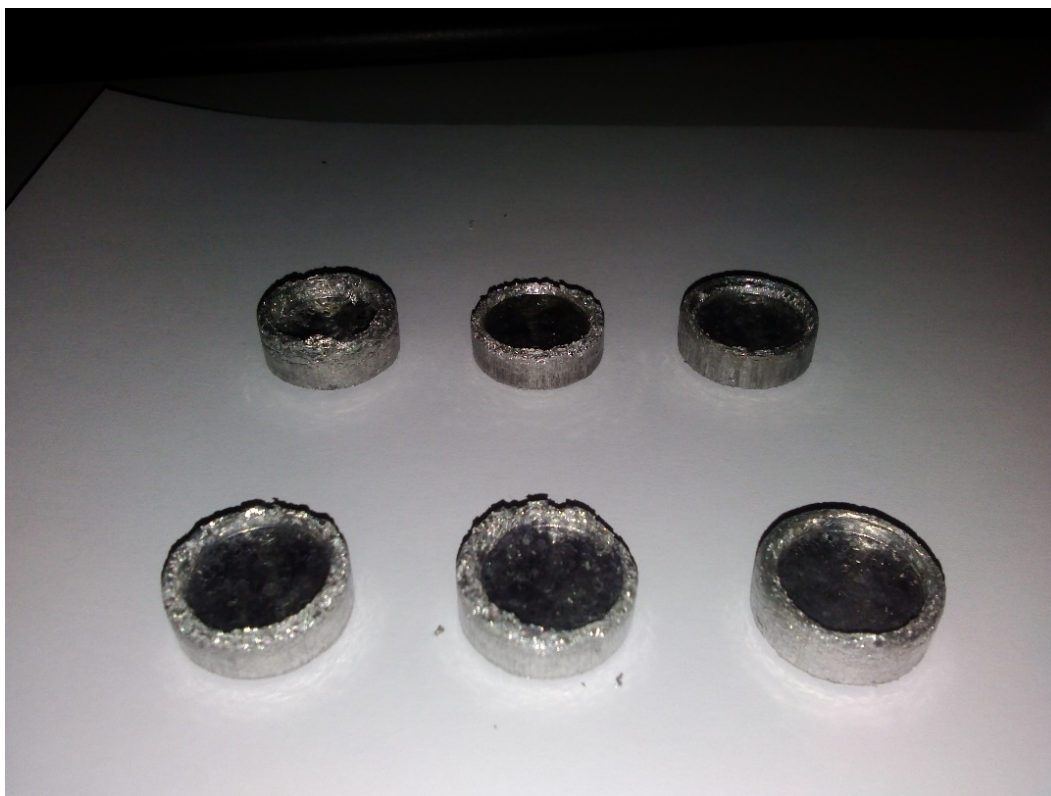


а)

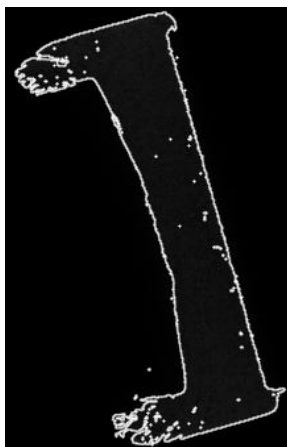


б)

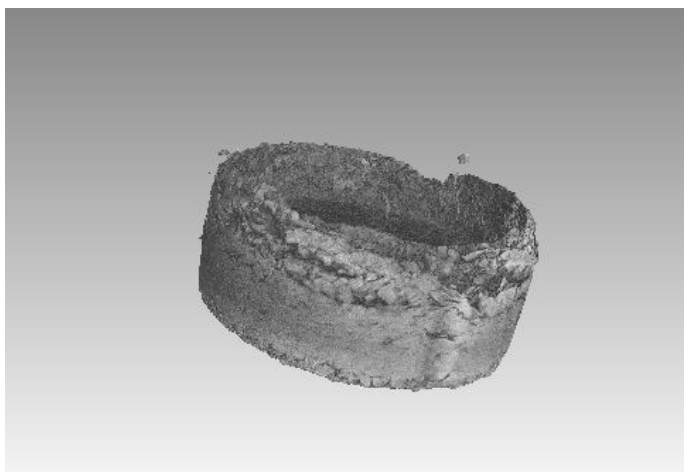
Фигура 80. Инструментална екипировка за пластична деформация с обратно изтичане: а – поансон; б – общ вид на щампата



Фигура 81. Детайл получен от брикет на Al – сплав с ударно обратно изтичане



а)



б)

Фигура 82. Снимки от рентгенов томограф на детайл, получен от брикет на Al – сплав с ударно обратно изтичане: а - напречен разрез през центъра; б – 3-D изображение



Фигура 83. Снимка на експериментална установка за деформиране чрез обратно изтичане на брикети от Al – сплав на хидравлична преса



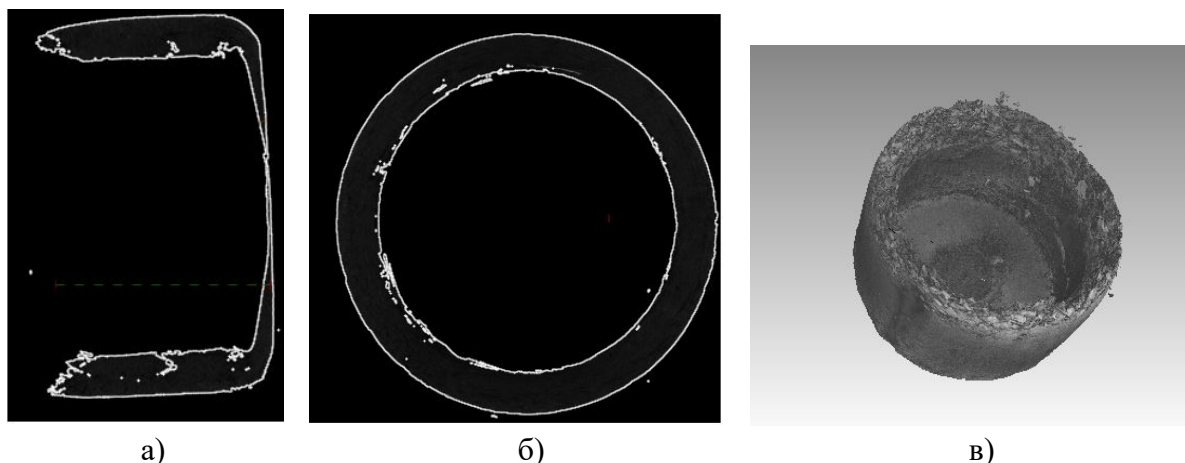
а)



б)

Фигура 84. Общ вид на детайли получени на хидравлична преса, чрез деформиране с обратно изтичане на брикети от Al – сплав: а – поглед от горе; б – поглед от страни

Резултатите от тези експерименти показват, че за да се докажат възможностите на този вид деформационен процес при деформация на брикети от стружки – фиг. 84, трябва да се проведат допълнителни изследвания. Също така е очевидно, че за да се получи добра плътност след деформацията в стените на детайла, където действат големи опънови напрежения, е необходимо към стружките да се прибави свързващо вещество. Областта на дъното на детайла, където напреженията при деформация са на натиск, понася голяма степен на деформация без следи от разслояване или разрушаване на материала, въпреки липсата на свързващо вещество – фиг. 85.



Фигура 30. Снимки от рентгенов томограф на детайл от Al – сплав (брикет A3) след пластична деформация на хидравлична преса: а – вертикално сечение, през центъра на детайла; б – напречно сечение в средата на детайла по височина; в – 3-D изображение

За да се изследва поведението на брикетите от Al – сплав при деформация с преобладаващи напрежения на натиск, един брикет (A4) беше деформиран чрез сплескване. Използвана е машина за изпитване на опън-натиск Instron (Лаборатория “Изпитване на материалите”, ТУ-София) с максимална сила 100 kN. Началните височина и диаметър на брикета са $H_0 = 5.06 \text{ mm}$, $D_0 = 20.08 \text{ mm}$. Размерите след деформацията са $H = 4.2 \text{ mm}$, $D = 22.74 \text{ mm}$. Максималната сила на деформация е 98 kN. Получената относителната степен на деформация ε се пресмята по формулата [99]

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H}{H_0} \cdot 100, \% \quad (4.9)$$

и в случая $\varepsilon = 16,99 \%$. По околната повърхнина на деформирания брикет не се забелязват пукнатини, а в обема му няма следи от разслояване на материала, както се вижда и от снимката направена с

4.7. Изводи

4.7.1. За резултатите от брикетиране.

- При брикетиране с комбиниран удар на омаслени стружки от предоставената Al – сплав, се получи средна плътност на брикетите $\rho = 2.53 \text{ gr/sm}^3$, при специфична енергия на удара $E_c = 150 \text{ J/sm}^3$. Тази стойност съвпада с резултатите от предишни изследвания публикувани в [1], [2] които показват, че ако се използва по-голяма специфична енергия на удара $E_c > 150 \text{ J/sm}^3$ и по-голяма тяга R на ракетния двигател, може да се получи плътност на брикета, много близка до плътността на монолитен метал, при брикетиране с комбиниран удар. При това, плътността на получаваните брикети не зависи от вида и големината на стружките (Фиг.71а и Фиг.71б)

- Големата плътност на брикетите от Al – сплав дава възможност за получаване на детайли от тях, чрез следваща пластична деформация с преобладаващи максимални напрежения на натиск (сплескване, обемно щамповане, право изтичане). Неотговорни детайли може да се получават чрез механична обработка на брикетите, но тази технология трябва да се изследва допълнително, по отношение на допустимите режими на рязане.

- Получените чрез комбиниран удар брикети от замърсени чугунени стружки, са с много малка плътност: $\rho = 2.08 \text{ gr/sm}^3$ при брикетиране с един удар и $\rho = 2.34 \text{ gr/sm}^3$ при брикетиране с два удара (Таблица 23, Таблица 24). Не се наблюдава разлика между плътността на брикети получени от замърсени и от почистени стружки.

- Според нас, причината за малката плътност на брикетите от чугунени стружки е тяхната форма и размер. От Фиг.85 се вижда, че разположението на стружките е такова, че възпрепятства излизането на въздуха извън брикета. С това може да се обясни и еднаквата плътност на брикетите от замърсени и почистени стружки: влиянието на остатъците от смазочно-охлаждаща течност върху плътността на брикетите следва да се прояви, след отстраняване на по-голямата част от въздуха и установяване на по-плътен контакт между отделните стружки.

- Сравняването на резултатите от брикетиране със сложен удар на чугунени стружки с малки размери (Фиг.71а) и на използваните в това изследване стружки (Фиг.71б, Таблица 23, Таблица 24) показва, че при дребни стружки се получава много по-голяма плътност (около $\rho = 5.3 \text{ gr/sm}^3$), при същата специфична енергия на удара $E_c \approx 100 \text{ J/sm}^3$ – Фиг. 73. Необходимо е допълнително изследване за доказване на влиянието вида и едрината на чугунените стружки, върху плътността на брикетите.

4.7.2. За резултатите от уплътняване на метален прах

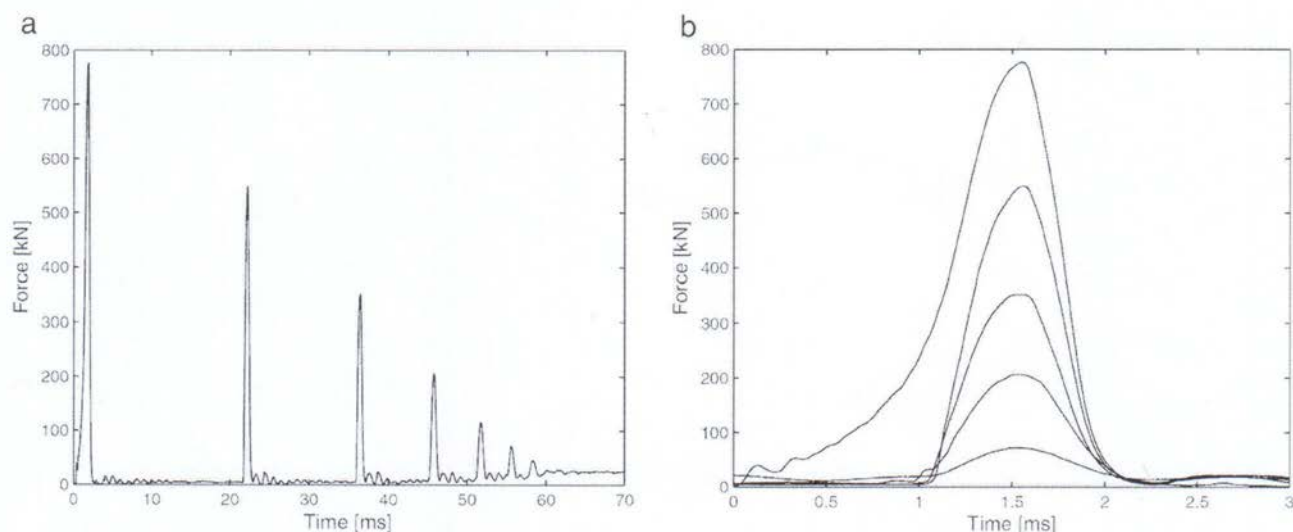
- При специфична енергия $E_c = 488 \text{ J/sm}^3$ и скорост на удара $V_y = 7.37 \text{ m/s}$ е получен цилиндричен образец от железен прах с плътност $\rho = 6.7582 \text{ gr/sm}^3$ – Таблица 25. Тези параметри на ударния процес трябва да се приемат като най-добри за уплътняване на предоставения железен прах, при използваната тяга $R = 226 \text{ N}$ на ракетния двигател.

- В работата [7] е показано, че при уплътняване на железен прах със скорост на удара 15 m/s, е получен цилиндричен образец с размери $H = 20 \text{ mm}$, $D = 25 \text{ mm}$ и плътност $\rho = 7.4 \text{ gr/sm}^3$, при плътност на монолитен материал $\rho = 7.5 \text{ gr/sm}^3$. Основна роля в този случай играе голямата енергия на удара, която се получава в резултат на високата скорост на удара (в съответствие с формула (1)), сумиран с ефекта от високоскоростния удар. Тъй като в РБългария има високоскоростен чук (произведен и експлоатиран от фирма „Б+К“ ООД), на който може да се постигне скорост на удара 6-18 m/s [6], е възможно да се внедри подобна технология.

4.8. Възможност за внедряване на брикетиране и уплътняване на метални прахове със сложен удар

Получените резултати в настоящото и предишни наши изследвания, както и световния опит показват, че ударните машини (чукове) може да се използват успешно, за получаване на брикети от метални стружки и за уплътняване на метални прахове. И в двата случая се получава по-голяма плътност, отколкото при използване на хидравлични или механични преси. Ефектът от тези технологии се увеличава значително, ако се използва сложен (комбиниран) удар. Нашите изследвания показват, че в този случай се получава:

- Нарастване до 27% на ефекта при пластична деформация [14] и до 20 % при брикетиране [1], в сравнение с обикновен удар, в резултат на което се подобряват технико – икономическите показатели на производството.
- Увеличава се трайността на инструменталната екипировка, поради намаляване на силата на удара и премахване (или голямо намаляване) на големината и броя на отскоците след удар [14]. На фиг.86 [7] е показано изменението на силата, действаща върху инструментите през време на един обикновен удар.



Фигура 31. Изменение на силата действаща през време на обикновен удара и на следващите отскоци, при уплътняване на железен прах със $V_y = 15 \text{ m/s}$ и енергия на удара $E_y = 2.7 \text{ kJ}$ [7]: а-изменение на силата за един удар; б- само на максималните стойности на силата

Сравняване на Фиг.86 с Фиг.66 и Фиг.68, дават нагледна представа, за различния характер на натоварване на инструментите. При обикновен удар –Фиг.86, натоварването е динамично пулсиращо, с големи стойности на максималните сили и шест отскока след удара. При сложен удар и при същата конструкция на инструмента броят на отскоците е само два и максималната сила при тях е много по-малка от максималната сила на удара - Фиг.68, Фиг.66. Ако се подбере подходяща тягата R на ракетния двигател, може да се получи удар без отскок – фиг.66, което води до качествено изменение на характера на натоварване на инструментите. Този ефект нараства и поради установения от нас факт [14], че една и съща степен на деформация се постига при комбиниран удар с по-малка сила на удара, отколкото при обикновен удар.

- Получаване на брикети с плътност близка до плътността на монолитен метал, което позволява получаване от брикетите на детайли чрез методите на студена или гореща пластична деформация или чрез рязане. Тази технология е ефективна, при брикетиране на стружки от пластични метали (Al, Al-сплави, Cu, Pb и др.) или при брикетиране на стружки от скъпи материали (Ti - сплави).

Заклучение

В разработената дисертация са направени обзор, анализ и систематизация на методи и средства за реализация на високоскоростни управляеми ударни процеси при деформация на метали, брикетиране и уплътняване на метални материали, както и забиване на пилоти.

Предложени са методики и алгоритми за пластична и еластична деформация на метални заготовки, брикетиране на алуминиеви и чугунени стружки, уплътняване на железен прах.

Извършени са експерименти на лабораторен стенд за управляеми високоскоростни удари с ракетни задвижване, компютърно управление и комуникационна система. С високоскоростна камера са заснети резултатите от експериментите и са определени траекториите, скоростите и ускоренията при различни режими на работа. С компютърен 3Д индустриален томограф са изследвани вътрешната структура и плътността на получените метални материали - заготовки и брикети.

Определени са оптимални параметри на управляемите ударни процеси и на третираните метални материали с цел получаване на най-добри физикомеханични свойства. Точният им подбор и прилагане могат значително да повишат качеството на продукцията и да повишат енергийната ефективност, с което реално да се намалят времената и разходите в производството.

Приноси в дисертационния труд

С оглед на работата извършена в дисертацията и резултатите, получени в хода на изследванията и изложени по-горе, могат да бъдат формулирани следните научно-приложни приноси:

1. Анализирани и систематизирани са в своята пълнота различните високоскоростни решения за деформация на метали, брикетиране на метален скрап и забиване на пилоти
2. Предложен е подход за теоретично изследване на управляеми ударни процеси, уравнения на движение при външни сили и модели за динамиката на удари между тела
3. Проведени са редица експерименти за деформация на метални заготовки, брикетиране на метални стружки и уплътняване на метален прах
4. Резултатите от експериментите са верифицирани, анализирани и оптимизирани с цел повишаване качеството на продукцията и енергийната ефективност.
5. Разработена е методика за оценка физикомеханичните свойства на металните материали при различни параметри на ударните процеси
6. Определени са траекториите, скоростите и ускоренията при различни режими на работа и са изследвани вътрешната структура и плътността на получените заготовки и брикети.

Списък на използвана литература

1. Бодуров П., Относно възможността за прилагане на ракетни двигатели при високоскоростни чукове, *Машиностроене*, 4, 1973, с.160-162.
2. Бодуров П., Високоскоростен чук, Автско свидетелство 24567/12.04.1978, с приоритет от 05.08.1968.
3. Бодуров П., Устройство за забиване на пилоти, Патент на Република България 65331/2008.
4. Бодуров П., Й.Генов, Съоръжения за деформиране на металите с помощта на ракетни двигатели, Научна конференция за обработване на металите чрез пластична деформация, Плевен, 1976, Първа част, с.82-90.
5. Нютон И., Математические начала натуральной философии, Москва, Наука, 1989.
6. Гольдсмит В. , Удар.Теория и физические свойства соударяемых тел, Москва, Наука, 1972, 447 с.
7. Goldsmith W., The Coefficient of Restitution, *Bull. Appl. Mech*, 2, 1952, p.10
8. Minamoto H., Kawamura S., Effects of material strain rate sensitivity in low speed impact between two identical spheres, *Int. J. of Impact Engineering*, May 2009, vol.36 issue 5, p.680-686.
9. Cristophorou A.P., Yigit A.S., Effect of flexibility on low-velocity impact response, *J. of Sound and Vibr.*, 1998, 217 (3), pp.563-578.
10. Richardson M.O.W., Wisheart M.J., Review of low-velocity impact properties of composite materials, *Composite, A*, 1996, 27(12), pp.1123-1131.
11. Zhou G., Davies G.A.O., Impact response of thick glass fiber reinforced polyester laminates, *Int. J. of Impact Eng.*, 1995, 16(3), pp.357-374.
12. Clifton R.J., Response of materials under dynamic loading, *Int.J.Solid.Struct.*, 2000,37, pp.105-113.
13. Stronge W.G., *Impact mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
14. Graham G.A.C., Contribution to Hertz's theory of elastic impact, *Int.J.Eng.Sci*, 1973, 11, pp.409-413.
15. X.Zhang, Loc Vu-Quoc, Modeling the dependence of the coefficient of restitution on the impact velocity in elastic-plastic collision, *Int. J. of Impact Eng.*, 2002, 2, pp.317-341.
16. Chuan-Yu Wu, L.Y.Li, C. Thornton, Energy dissipation during normal impact of elastic and elastic-plastic spheres, *Int. J. of Impact Eng.*, 2005, 32, pp.593-604.
17. Wu C.Y., Finite element analysis of particle impact problems, PhD thesis, University of Aston in Birmingham, 2001.
18. Александров Е.В., Соколинский В.Б., Прикладная теория и расчеты ударных систем, М., Наука, 1969, 200 с.
19. Whirley R.G., Engelmann B.E., DYNA2D, a nonlinear, explicit, two-dimensional finite element code for solid mechanics: user manual, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, 1992.
20. Hunter S.C., Energy absorbed by elastic waves during impact, *J.Mech.Phys.Solids*, 1957, 8, pp.162-171.
21. Reed J., Energy losses due to elastic waves propagation during an elastic impact, *J.Phys.D*, 1985, 18, PP.2329-2337.

22. Wu C.Y., L.Y.Li, C.Thornton, Rebound behaviour of spheres for plastic impacts, *Int. J. of Impact Eng.*, 2003, 28, pp.929-946.
23. Li L.Y, Wu C.Y., Thornton C., A theoretical model for the contact of elastoplastic bodies, *Proc I Mech E*, 2001, 216C, pp.421-431.
24. Stronge W.J., Theoretical coefficient of restitution of planar impact of rough elastoplastic bodies, *Impact Waves Fract*, ASME, AMD, 1995, 205, pp.351-362.
25. Thornton C., Coefficient of restitution for collinear collision of elastic-perfectly plastic bodies, *ASME J. of Appl. Mech.*, 1997, 64. 383-386.
26. Thornton C., Ning C., A theoretical model for the stick/bounce behaviour of adhesive, elastic-plastic spheres, *Powder Technol.*, 1998, 99, pp.154-162.
27. Jonson K.L., *Contact mechanics*, Cambridge, Cambridge University Press, 1985.
28. Jonson K.L., An experimental determination of the contact stresses between plastically deformed cylinders and spheres, In: *Engineering plasticity*, Cambridge, Cambridge University press, 1968, pp.341-361.
29. Mesarovic S.D.J., Thornton C.A., Adhesive contact of elastic-plastic spheres, *J. Mech. Phys. Solids*, 2000, 48, pp.2009-2033.
30. Goldsmith W., Lyman P.T., The penetration of hard-steel spheres into plane metal surfaces, *ASME J. of Appl. Mech.*, 1960, 27, pp.717-725.
31. Jaquelin E., Laine J.P., Bennani A., Massenzio M., A modeling of an impacted structure based on constraint modes, *J. of Sound and Vibration*, 2007, 301, 3-5, pp.789-802.
32. Jaquelin E., Laine J.P., Bennani A., Massenzio M., The anti-oscillator model parameters linked to the apperent mass frequency response function, *J. of Sound and Vibration*, 2008, 312, 4-5, pp.630-643.
33. Pashah S., M.Mssenzio, E.Jaquelin, Prediction of structural response for low velocity impact, *Int. J. of Impact Eng.*, 2008, 35, pp.119-132.
34. Jaquelin E., On the rigid projectile model for low velocity impacts, *Int. J. of Impact Engeneering*, 2009, 36 pp.1006-1011.
35. Shivakumar K.N., Elber W., Prediction of impact force and duration due tu low-velocity impact on cirkular composites laminates, *J. of App. Mech.*, September, 1985, 52, pp.674-680.
36. Abrate S., Modeling of impacts on composite structure, *Composite Structures*, 2001, 51, pp.129-138.
37. Александров Е.В., Соколинский В.Б., *Прикладная теория и расчеты ударных систем*, М., Наука, 1969, 200 с.
38. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Эремянец В., *Удар. Распространение волн деформации в ударных системах*, М., Наука, 1985, 356 с.
39. I.Kleis, I.Hussainova, Investigation of particle-wall impact process, *Wear*, 1999, 233-235, pp.168-173.
40. Walton O.R., Numerical simulation of inelastic, frictional particle – particle interaction, In: *Particulate Two-phase flow*, Stoneham, 1993, pp.884-911.
41. Пенчев Т., Генов Й., Камбуров В., *Технологии за обработване чрез пластична деформация*, С., 2007, 117 с.

42. Беляев Ю.В., Возможности улучшения энергосиловых характеристик удара кузнечных молотов, Кузн.-штамп. п-во, 1981, 4, с.21-24.
43. Беляев Ю.В., Силы и распределение энергии при обработке материалов ударным воздействием, Вестник машиностроения, 1974, 4, с.70 – 73.
44. Беляев Ю.В., Экспериментальное исследование нагрузок соударяющихся деталей молотов во время удара, Кузн. – штам. п-во, 1967, 2, с.26 – 30.
45. Беляев Ю.В., Наибольшие нагрузки соударяющихся деталей молотов, Кузн.штамп.п-во, 1970, 8, с.31 – 33.
46. Согришин Ю.П., Гришин Л.Г., Воробьев В.М., Штамповка на высокоскоростных молотах, М., Машиностроение, 1978, 166 с.
47. Денисенко Г.М., Кирпичев Б.А., Совершенствование оборудования ударного действия, Кузнечно-штамповочное п-во, 1981, 4, с.9 -11.
48. Bakhtar F., The economics of high energy rate forming, Engineer, 1969, 277, No 5902, pp.362-366
49. Glanvill-Jones, Progress in high –energy -rate –forging, J. Inst. Of Metals, 1969, IX, vol.97, pp.257-270.
50. Согришин Ю.П., Гришин Л.Г., Тулянкин Ф.В. и др., О связи скоростных параметров оборудования с технологическими параметрами процессов горячей штамповки, Технология легких сплавов, 1970, 5, с.55-60.
51. HERF makes stronger gears, Amer. Mash., 1971, 115, 5, pp.68-70.
52. Охрименко Я.М., Тюрин В.А., Неравномерность деформации при ковке, М., Машиностроение, 1969, 184 с.
53. Непершин Р.И., Даценко В.И., Маттяж В.А., Расчет усилия при высокоскоростном пресовании, Кузн. Штам. П-во, 1972, 2, с.1-4.
54. Shut A., Turner T.V., Extrusion by a true impact process, Int. J. of Mech., 1963, 5, pp.267-273.
55. Cole B.N., Bghtar F., Dynamic effects in very high speed impact extrusion, Int. J. Mash. Tool Des., 1963, 3, pp.77-95.
56. Bodurov P., Penchev T., Industrial Rocket Engine and its Application for Propelling of Forging Hammers, J. of Mater. Processing Technology, 2005, 161, pp.504-508.
57. Барпер М., А. Жмотт и др., Ракетные двигатели, Оборонгиз, 1962.
58. Морголенко А.С., В.П.Цыганов, Г.Д.Селиванов, Новые высокоскоростные кузнечно-пресовые машины, Кузн.штамп.п-во, 1978, 3, с.31-33.
59. Степанов В.Г., Шавров И.А., Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов, Ленинград, Машиностроение, 1975.
60. Георгиев А., Пилотно фундирание, Техника, София, 1973, 154 с.
61. Дзингов Г.А., Божинов Б.И., Пилотно фундирание, С., Техника, 1979, 356 с.
62. Petrasovitz D., Forming of densified zones around piles driven in sand and its effect on bearing capacity, 8th Int. Congr. on Soil Mech. And Found., Moskwa, 1973, v.2.1, pp.187-192.
63. Гамал Ел Дин, Зависимост несущей способности свай от свойств глин, Международны конгрес по механике грунтов и фундаментостроение, Мексико, 1966, с.260 – 269.

64. Kezdi A., Bemerkungen zur Anwendung der Pfahlgründungen, Internationales Simposium, Weimar, 1977.
65. Глотов Н.М. и др., Свайные фундаменты, Транспорт, 1975.
66. Божинов Б., Напрегнато състояние на на пилотите през време на забиването, Строителство, 1970, 10.
67. Meyerhof G.G., Uplift resistance of inclined anchors and piles, 8th Int. Congr. on Soil Mech. And Found., Moskwa, 1973, v.2.1, pp.187-192.
68. Полищук В.А. и др., Проектирование и применение свай, Киев, 1967, 140 с.
69. Wang Z. J., L. D. Cheng. Effect of material parameters on stress wave propagation during fast upsetting, Transactions of nonferrous metals society of China, 18, (2008), 1189–1195.
70. Wang Z. J., L. D. Cheng. Experimental research and numerical simulation of the dynamic cylinder upsetting, Material Science and Engineering A, 499, (2009), 138–141.
71. Hallquist J. O. LS-DYNA Theory manual, (2006).
72. Belytchko T. et al. Nonlinear finite elements for continua and structures. John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
73. Rojek J. et al. Advances in FE explicit formulation for simulation of metal forming processes, J. of materials processing technology, 119, (2001), 41-47.
74. A.M.S. Hamouda, Effect of energy losses during an impact event on the dynamic flow stress, Journal of Materials Processing Technology, 2002,124, 209-215.
75. Согришин Ю.П., Гришин Л.Г., Воробьев В.М., Штамповка на высокоскоростных молотах, М., Машиностроение, 1978.
76. Bodurov P., Penchev T., Industrial Rocket Engine and its Application for Proppeling of Forging Hammers, Journaj of Materials Processing Technology, 2005, v.161, 3, 504-508.
77. Penchev T., Karastoyanov D., Altaparmakov I., Experimental Study on “Controlled Impact” Effect in Plastic Deformation Processes, Advanced Materials Research, 2013, v.772, 3-8.
78. Penchev T., Altaparmakov I., Experimental Investigations on “Controlled Impact” Effect, Proceedings of International Conference METAL’13, 15-17.05.2013, Brno, Czech Republic.
79. Penchev T., Karastoyanov D., Experimental Study of Upsetting and Die Forging with Controlled Impact, Proceedings of International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE’14), 17-18 April, 2014, Lisbon, Portugal.
80. Гьошев С., Пенчев Т., Карастоянов Д., Приложение на високоскоростна камера за определяне параметрите на ударни процеси, Национална Конференция „Машиностроене и машинознание“, 09 – 10. 09.2014, Варна.
81. Bodurov P., Penchev T., Industrial Rocket Engine and its Application for Proppeling of Forging Hammers, Journaj of Materials Processing Technology, 2005, v.161, 3, 504-508.
82. Бодуров П., Относно възможността за прилагане на ракетни двигатели при високоскоростни чукове, Машиностроене, 4, 1973, с.160-162.
83. Penchev T., Karastoyanov D., Altaparmakov I., Experimental Study on “Controlled

Impact” Effect in Plastic Deformation Processes, “Advanced Materials Research”, 2013, v.772, 3-8.

84. Penchev T., Altaparmakov I., Experimental Investigations on “Controlled Impact” Effect, Proceedings of International Conference METAL’13, 15-17.05.2013, Brno, Czech Republic.

85. Penchev T., Karastoyanov D., Experimental Study of Upsetting and Die Forging with
86. Controlled Impact, Proceedings of International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE’14), 17-18 April, 2014, Lisbon, Portugal.

87. Chuan-Yu Wu, Long-Yuan Li, Colin Thortnton, Energy dissipation during normal impact of elastic-plastic spheres, International Journal of Impact Engineering, 2005, 32, p. 593-604.

88. Penchev T., Altaparmakov I., Experimental Investigations on “Controlled Impact” Effect, International Conference METAL 2013, Brno, 15-17.05, 2013.

89. Пенчев Т., Алтъпармаков И., Експериментално изследване на брикетиране с удар на метални стружки, Международна научна конференция МТФ’2012, 18-20.10. 2012, ТУ-София, България.

90. Степанов В.Г., Оборудование для обработки металлов высокоэнергетическими методами, Ленинград, Машиностроение, 1978,

91. Степанов В.Г., Шавров И.А., Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов, Ленинград, Машиностроение, 1975.

92. Bodurov P., Penchev T., Industrial Rocket Engine and its Application for Propelling of Forging Hammers, Journal of Material Processing Technology, 2005, 161, 504-508.

93. Gustavson G. at all., Experimental studies and modeling of high –velocity loaded iron-powder compacts, Powder Technology, 2014, 268, 293-305.

94. Doremus P. at all., High-velocity and conventional compaction of metallic powders: comparison of process parameters and green compact properties, Proc. IMechE 224 E, 2010, 117-185.

95. Scoglund P., High density PM parts by high-velocity compaction, Powder Metallurgy, 2001, 44, 199-202.

96. Dore F. at all., High velocity compaction: Overview of material, Applications and Potential, Materials Science Forum, Trans Tech Publications, 2007, 293-296.

97. Поляков А.П., Влияние параметров динамического нагружения на характер распространения ударных волн в порошке, Изв. ВУЗ, Цветная металлургия, 2009, № 1, 30-34.

98. Penchev T., Karastojanov D., Monov V., Control System for “Controlled Impact” Laboratory device, Proceedings of the Third IEEE International Conference on Information Science and Technology, March 23-25, 2013, Jiangsu, China, 215-219.

99. Согришин Ю.П., Гришин Л.Г., Воробьев В.М., Штамповка на высокоскоростных молотах, М., Машиностроение, 1978.

Декларация за оригиналност на резултатите

Декларирам, че дисертацията съдържа оригинални резултати, получени, при проведени от мен, научни изследвания с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител.

Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са коректно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящият дисертационен труд не е прилаган за придобиване на научна степен в друго висше учулище, университет или научен институт.

Подпис:.....

/инж. Станислав Гьошев/

Публикации на докторанта по темата на дисертацията

На Международни конференции в чужбина:

1. S. Gyoshev, D. Karastoyanov, L. Doukovska, I. Kalaykov., Inter Criteria Decision Making Approach for Metal Chips Briquetting., Fifth International Symposium on Business Modeling and Software Design, 6-8 July 2015, Milan, Italy, pp 297-301, ISBN 978-989-758-111-3
2. Gyoshev S., Penchev T., Karastoyanov D., High speed briquetting of metal chips using rocket engine., INASE in Zakynthos, Greece, July 16-20, 2015, pp 172-177, ISSN: 1790-5117, ISBN: 978-1-61804-321-4.
3. Gyoshev S., Karastoyanov D., Penchev T., Experimental study of iron metal powder compacting by controlled impact, ICSD 2015 : 17th International Conference on Soil Dynamics, 6 – 7 August, 2015, Amsterdam, Netherlands, pp 114-117, eISSN: 1307-6892
4. Gyoshev S., Karastoyanov D., Penchev T., Study the Influence of the Type of Cast Iron Chips on the Quality of Briquettes Obtained with Controlled Impact, ICSD 2015 : 17th International Conference on Soil Dynamics, 6 – 7 August, 2015, Amsterdam, Netherlands, pp 118-121, eISSN: 1307-6892

На Международни конференции у нас:

5. Gyoshev S., High speed briquetting of metal chips and powders. International Conference Robotics, Automation and Mechatronics'15 RAM 2015, Sofia, Bulgaria, November 05, 2015., pp. 55-59, ISSN 1314-4634
6. С. Гьошев, Изследване и лабораторни експерименти на ефекта от брикетиране на алуминиеви и чугунени стружки., XXV МНТК – АДП 2016, 23 -26 юни 2016 г. Созопол, България,
7. Gyoshev S., Study of parameters of controlled impact by impact deformation of elastic materials., John Atanasoff Celebration Days, International Conference “Robotics, Automation And Mechatronics” RAM 2014, November 5-7 2014, Sofia, Bulgaria, p. 46-50, ISSN 1314-4634
8. Gyoshev S., Penchev T., Advanced computing for high speed briquetting of metal chips and powders. International Conference Robotics, Automation and Mechatronics'15 RAM 2015, Sofia, Bulgaria, November 05, 2015., pp. 44-49, ISSN 1314-4634
9. 15. С. Гьошев, Д. Карастоянов., Експериментално изследване на процеса „уплътняване на железен прах“, XXIV МНТК – АДП 2015, 18 -21 юни 2015 г. Созопол, България, стр. 140-147, ISSN 1310-3946

В Списание у нас

10. Гьошев С., Пенчев Т., Карастоянов Д., Приложение на високоскоростна камера за определяне параметрите на ударни процеси., Националната конференция по Машиностроене и машинознание, Варна 2014, 8-9 Септември, стр. 95-100, ISBN: 987-619-167-178-6, Списание Механика на машините, книга 1, 2015, бр.109, стр. 38-41, ISSN 0861-9727

Цитати:

1. Цитиран труд:

D. Karastoyanov, L. Doukovska, S. Gyoshev, I. Kalaykov., Inter Criteria Decision Making Approach for Metal Chips Briquetting., Fifth International Symposium on Business Mideling and Software Design, 6-8 July 2015, Milan, Italy, ISBN 978-989-758-111-3, pp 292-296

Място на цитиране:

Пенчев Т., Стоименов Н., Алтапърмаков И., Управляем удар: експериментални резултати при пластична деформация, 28-ма Международна научна конференция на Машинно-технологичния факултет на Технически университет – София, 11-13 септември 2015 г. Созопол, България, стр. 151-156, ISBN: 987-619-167-178-6

2. Цитиран труд:

С. Гьошев, Д. Карастоянов., Експериментално изследване на процеса „уплътняване на железен прах“, XXIV МНТК – АДП 2015, 18 -21 юни 2015 г. Созопол, България, ISSN 1310-3946, стр. 140-147

Място на цитиране:

Пенчев Т., Стоименов Н., Алтапърмаков И., Управляем удар: експериментални резултати при пластична деформация, 28-ма Международна научна конференция на Машинно-технологичния факултет на Технически университет – София, 11-13 септември 2015 г. Созопол, България, стр. 151-156, ISBN: 987-619-167-178-6

3. Цитиран труд:

S. Gyoshev., Study of parameters of controlled impact by impact deformation of elastic materials., John Atanasoff Celebration Days, International Conference “Robotics, Automation And Mechatronics” RAM 2014, November 5-7 2014, Sofia, Bulgaria, ISSN 1314-4634, pp 46-50

Място на цитиране:

Пенчев Т., Стоименов Н., Алтапърмаков И., Управляем удар: експериментални резултати при пластична деформация, 28-ма Международна научна конференция на Машинно-технологичния факултет на Технически университет – София, 11-13 септември 2015 г. Созопол, България, стр. 151-156, ISBN: 987-619-167-178-6