



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ
ТЕХНОЛОГИИ

Станислав Димитров Гьошев

ИЗСЛЕДВАНЕ НА УПРАВЛЯЕМИ УДАРНИ ПРОЦЕСИ.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

НА ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователната и научната степен „доктор“

по научна специалност 02.21.07 “Приложение на принципите и
методите на кибернетиката в различни области на науката “

Професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника и автоматика“

Научен ръководител: проф. д-р Димитър Карастоянов

София, 2016 г.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция „Вградени интелигентни технологии“ на ИИКТ-БАН, състояло се на 15 юли 2016 г.

Дисертацията съдържа 144 стр., включващи фигури, таблици, приложения и литература, съдържаща 99 заглавия.

Защитата на дисертацията ще се състои на2016 г. от часа в зала 507 на блок 2 на ИИКТ-БАН на открито заседание на научно жури в състав:

1. Проф. дмн. Галя Ангелова
2. Проф. д-р Тодор Нешков
3. Проф. д-р Любомир Димитров
4. Проф. д-р Костадин Костадинов
5. Проф. д-р Димитър Карастоянов

Материалите за защитата са на разположение на интересуващите се в стая 215 на ИИКТ-БАН, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 25А.

Автор: ***Станислав Димитров Гьошев***

Заглавие: ***ИЗСЛЕДВАНЕ НА УПРАВЛЯЕМИ УДАРНИ ПРОЦЕСИ.***

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.

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

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 направен 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“.

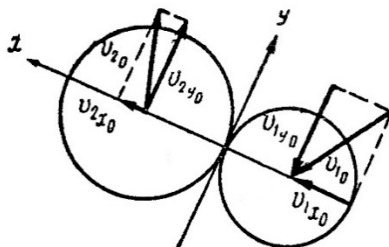
В Глава 4 са направени експерименти за брикетиране на стружки и уплътняване на железен прах. Разгледани са нови методики за брикетиране.

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 шамповане на чукове, брикетиране 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 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).



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

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)

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

Първоначално с 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]

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.а [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 технологите при разработване на технологичния процес за шамповане. Вижда се, че при чук с малка маса на падащите части Q_1 (до 4.5 t) $P_m \geq P_d$. Това означава, че пресметната 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).

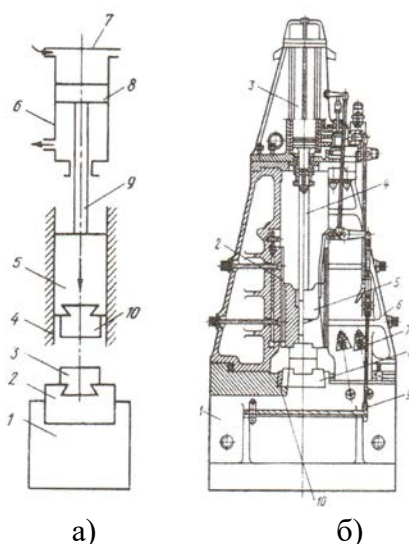
Въз основа на експериментални и теоретични изследвания са получени следните приблизителни изрази [20, 21, 22, 23, 24]:

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 2. а) пневматичен чук за шамповане: 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

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.

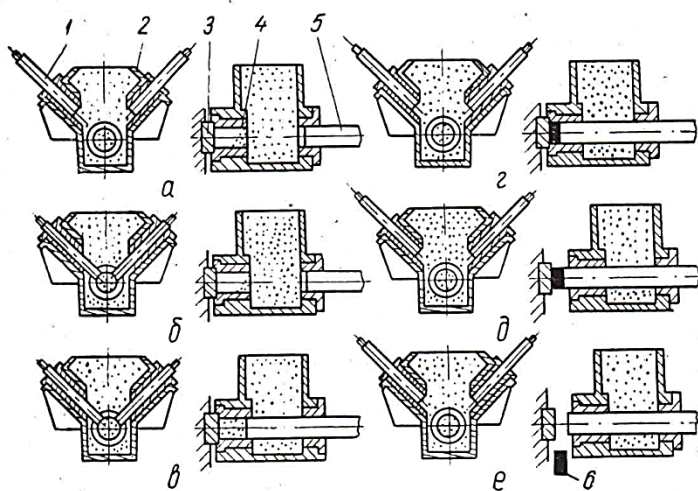
В настоящия момент за получаване на брикети от метални стружки или други метални частици се използват механични или хидравлични преси, комплектовани с устройства за автоматично дозиране. Тези брикети се произвеждат само с цилиндрична форма. Поради нееднаквата структура на насипните стружки, дозиращите 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 брикетирание, 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 3. 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

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

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

За $V_{2,0}$ се получава

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

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:

- б) 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, 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 нагрятата 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 шамповъчен 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

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

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 $e = 0$, $P_{отс} = 0$.

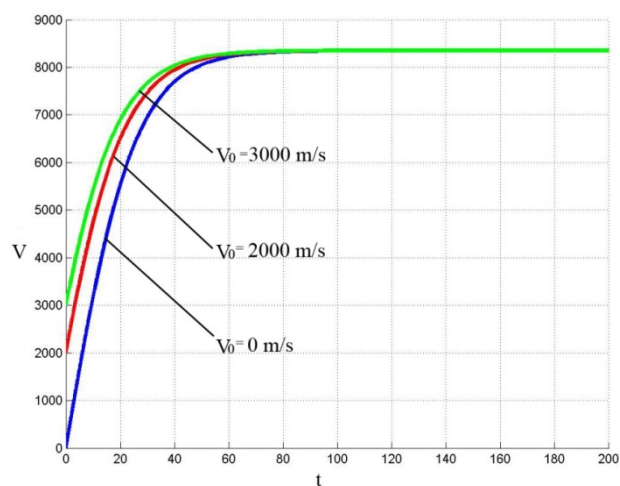
Формула (2.16) може да се използва за определяне силата на отскока, ако по експериментален път са получени данни за височината на отскока h_1 .

2.3.4. Уравнения за движение на чук задвижван с ИРД

А. Силата на съпротивлението зависи от квадрата на скоростта

а) Случай $V < \beta$

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



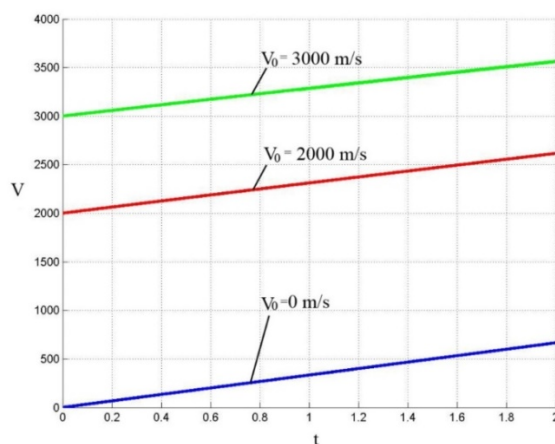
Фигура 4. Графично представяне изменението на скоростта, когато съпротивлението на средата зависи от квадрата на скоростта, при $V < \beta$ и $t \in [0, 200]$

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

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

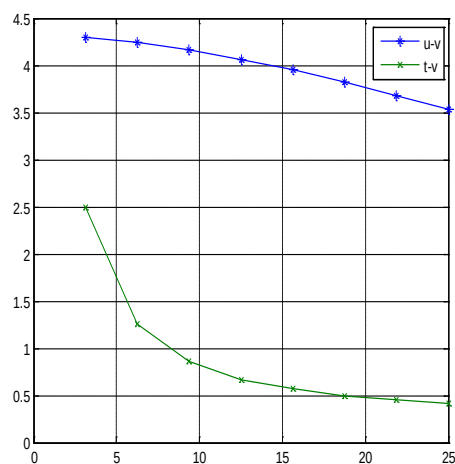
Изследван е цилиндричен оловен образец с диаметър 28 mm и височина 42 mm ($H/D = 1,5$). Материалните характеристики на образца са: модул на еластичност на линейните деформации $E = 17$ GPa; коефициент на Поасон $\nu = 0.42$; константи в зависимостта (1) $k = 38.1391$ MPa, $n = 0.2742$; обемна плътност $\rho = 11340$ kg/m³. 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 $E_k = 47.46$ 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

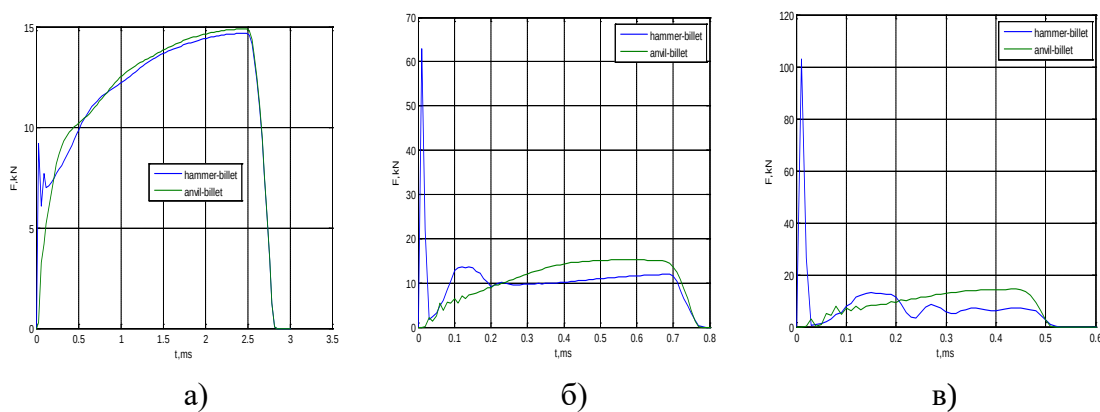
V (m/s)	m (g)	u_{max} (mm)	t^* (ms)	форма
3.125	9720	4.2919	2.49	Б
6.25	2430	4.2464	1.26	Б
9.375	1080	4.1665	0.86	Б
12.5	607.5	4.0643	0.67	Б-Г
15.625	388.8	3.9505	0.57	Б-Г
18.75	270.0	3.8229	0.5	Б-Г



Фигура 6. 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 е 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 образца е бъчвообразна. Като причина за това може да се посочи наличието на сравнително голямо триене по контактните повърхнини и



Фигура 7. Изменение на контактните сили действащи върху бойника и Върху наковалнята за времето на деформация: а) $V = 3.125 \text{ m/s}$, б) $V = 12.5 \text{ m/s}$, в) $V = 21.875 \text{ m/s}$

възможност за по-големи радиални премествания в средната по височина част на образца. 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 образца става гъбообразна.

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

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].

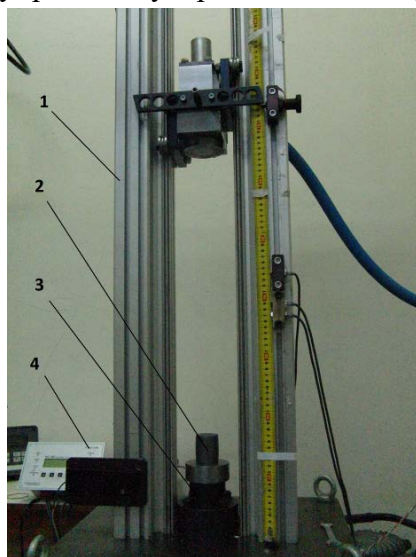
Ако към падащата част се приложи допълнителна сила P' , се създават условия за изменение на параметрите на ударния и деформационен процеси [48]. Като се изменят големината на допълнителната сила P_d може да се променят параметрите на ударния процес, до предварително зададени стойности. Този вид удар 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]. Тази идея е реализирана от инж.Петър Бодуров [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 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 датчиците работят в определени граници – до 10 g, до 100 g, до 1000 g ,..., до 100000 g, където g е земното уск 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]

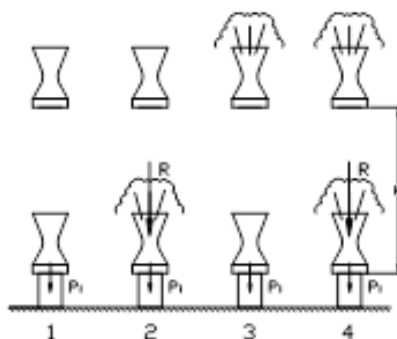
3.1.1. Опитна уредба

За провеждане на експериментите се използва стенд показан на фиг.39. За получаване ефекта на управляем удар се използва студен ракетен двигател



Фигура 8. Стенд за изследване на ударни процеси: 1 – колони; 2 – образец; 3 – долна твърда плоча; 4 – електронно устройство за избор режима на работа

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 9. 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.

3.1.4. 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. Технологиата 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”.

• 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 $\epsilon > 15.5 \%$ ($E_c \geq 3.0 \text{ J/cm}^3$). 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 $\epsilon < 15.5 \%$ ($E_c < 3.0 \text{ J/cm}^3$) 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-голями стойности на тягата на ракетния двигател да се получат по-голями разлики в степента на деформация ϵ . Това ще се изследва при провеждане на полупромишлените експерименти от програмата на настоящия проект.

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

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

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.2.5. Разликата $\Delta\epsilon$ се определя от зависимостта

$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{ky} - \varepsilon_{oy} , \quad (3.9)$$

където ε_{ky} и ε_{oy} са относителните деформации, %, при комбиниран удар и при обикновен удар, съответно.

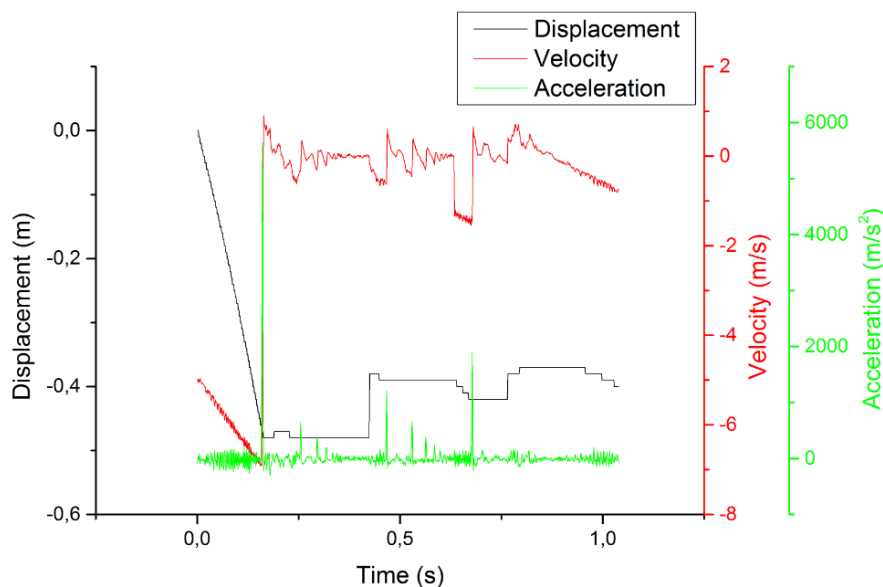
Изводи

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 $\Delta \varepsilon$ между относителните степени на деформация ε при „обикновен удар” и „комбиниран удар” – фиг.42. Зависимостта $E_c - \varepsilon$ 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 $\Delta \varepsilon$ се влияе силно от отношението H_0/D_0 . Най-голяма е тази разлика при $H_0/D_0 = 1.2$ като достига стойност $\Delta \varepsilon_{\max} = 84.1 \%$, 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 $\Delta \varepsilon$ – 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 $h = 1.1 \text{ m}$ при Режим 1 (обикновен удар - $V_y = 3.8 \text{ m/s}$) и Режим 2 (контролиран удар - $V_y = 3.6 \text{ m/s}$). 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.



Фигура 10. Изменение на пътя, скоростта и ускорението при скорост : а – обикновен удар ($V_y = 3.8 \text{ m/s}$); б – управляем удар ($V_y = 3.6 \text{ m/s}$)

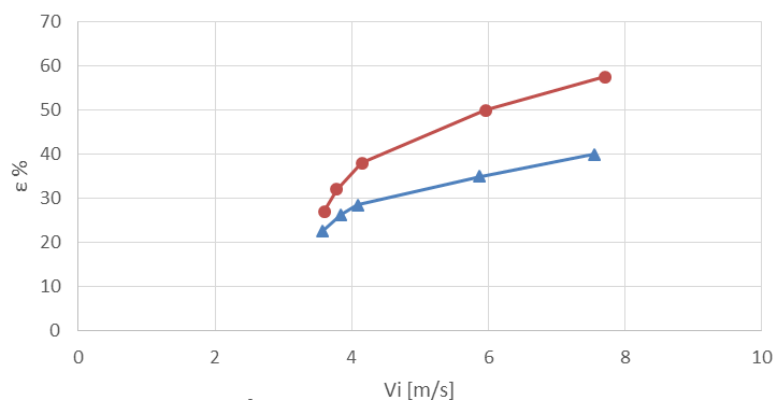
- Времето t_y за протичане на ударния процес до неговото затихване при контролиран удар е с 0.022 s (0.8 %) по-малко, от времето при обикновен удар. Това е един от ефектите на деформация с контролиран удар. Той зависи от тягата на ракетния двигател – колкото по-голяма е тягата, толкова по-голяма ще бъде 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 $E = 17.6 \text{ GPa}$ (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.

• 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.

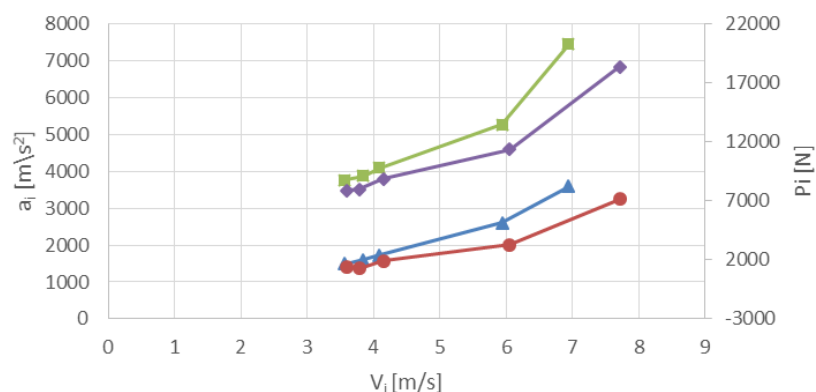
Важен резултат от това изследване е установеното нарастване на степента на деформация ε при сплескване с контролиран удар, в сравнение с деформацията при обикновен удар, при една и съща енергия на удар (скорост на удар) – Фиг.49. Вижда се, че с нарастването на скоростта на удар този ефект нараства: разликата $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{уп}} - \varepsilon_o$, 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 11. Зависимост $\varepsilon - V_y$ при обикновен удар и при комбиниран удар

— Ordinary Impact — Controlled Impact

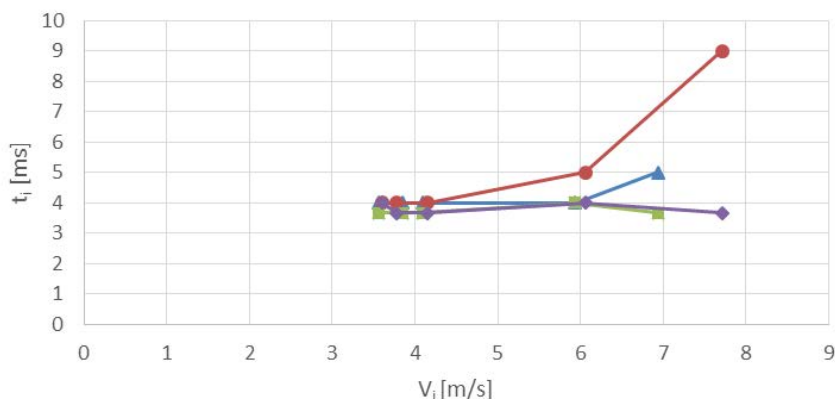
Нарастването на ε при деформация с управляем удар е свързано с по-малко ускорение на удар a_y и сила на удар P_y , в сравнение с обикновен удар – фиг.50. Този ефект е съществен при $V_y \geq 5 \text{ m/s}$, като с нарастване на скоростта на удар разликите $\Delta a_y = a_o - a_{\text{уп}}$; $\Delta V_y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



Фигура 12. 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 13. 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 деформирания 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_o 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 алуминий [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.

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.

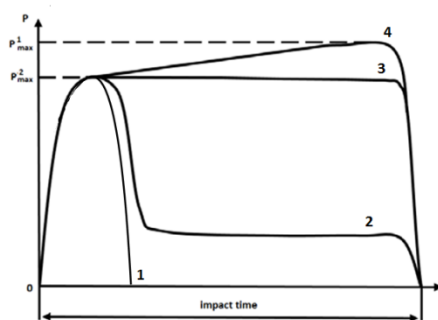
4.4. Резултати от 2-ра серия лабораторни експерименти за брикетиране с удар на метални стружки

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, който работи със сгъстен 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 66. 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.40.

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

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

4.4.2. Методика за брикетирене на стружки

➤ За провеждане на експериментите за брикетирене 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

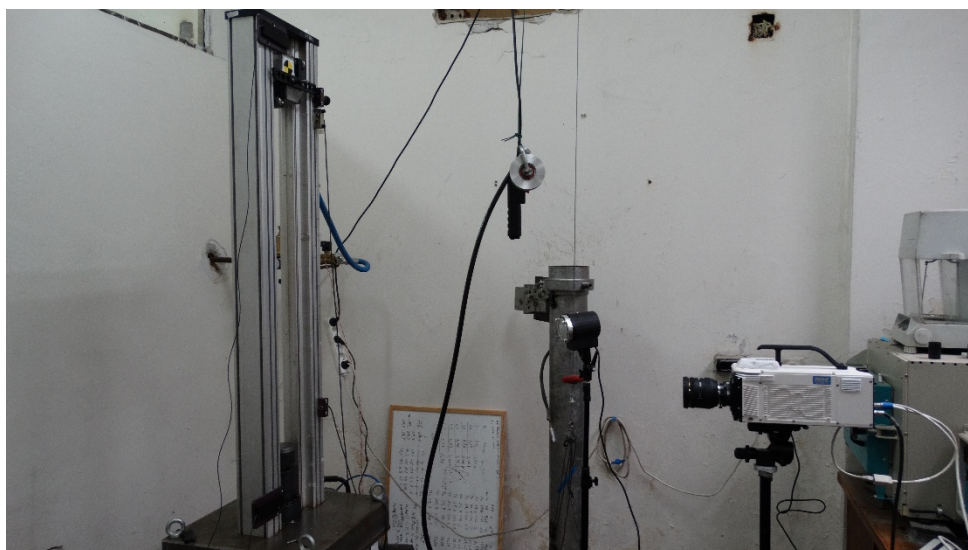
$$P_y = m \cdot a_y, \text{ N}. \quad (4.7)$$

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 (брикетирене, 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 $5 \mu\text{m}$. 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 14. 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

$$\rho_{бр} = \frac{G_{бр}}{\Theta}, \text{ gr/sm}^3. \quad (4.8)$$

➤ На Фиг.70 е показана инструменталната екипировка, използване за брикетирание. Диаметърът на отвора на матрицата, в който се насипват стружките, е $D_m = 20 \text{ mm}$. Диаметърът на поансона $D_n = 19.6 \text{ mm}$. 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.



Фигура70. *Инструментална екипировка за брикетиране на метални стружки*

➤ За определяне първоначалната маса на стружките в един брикет, се използват данните от диаграмите на Фиг.48. 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.

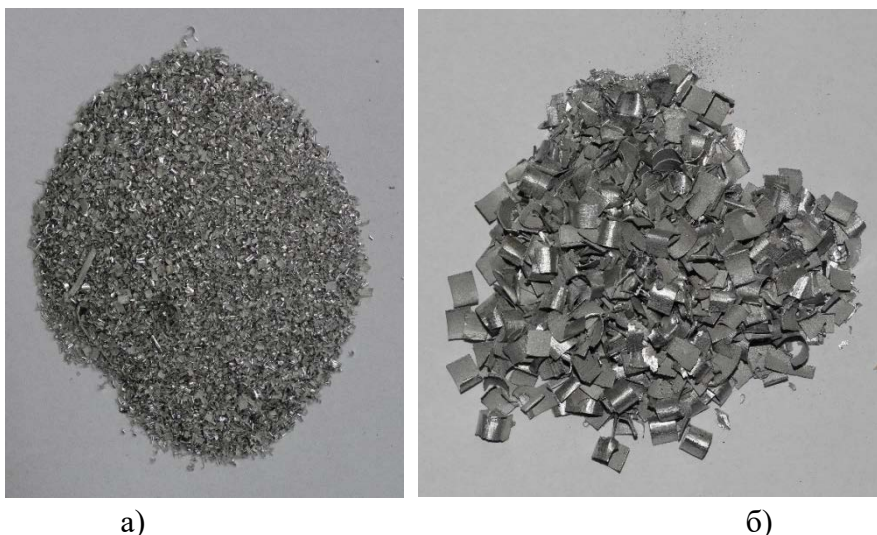
➤ Доставените стружки са с останала по тях смазочно-охлаждащата течност на машините за механична обработка, на които са получени. Част от тези стружки бяха почистени (обезмаслени), а другата част останаха в състояние на доставка. Това е направено с цел, да се изследва възможността за получаване на брикети без почистване на стружките.

➤ Поради наличие на хлябина 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.



а)

б)

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

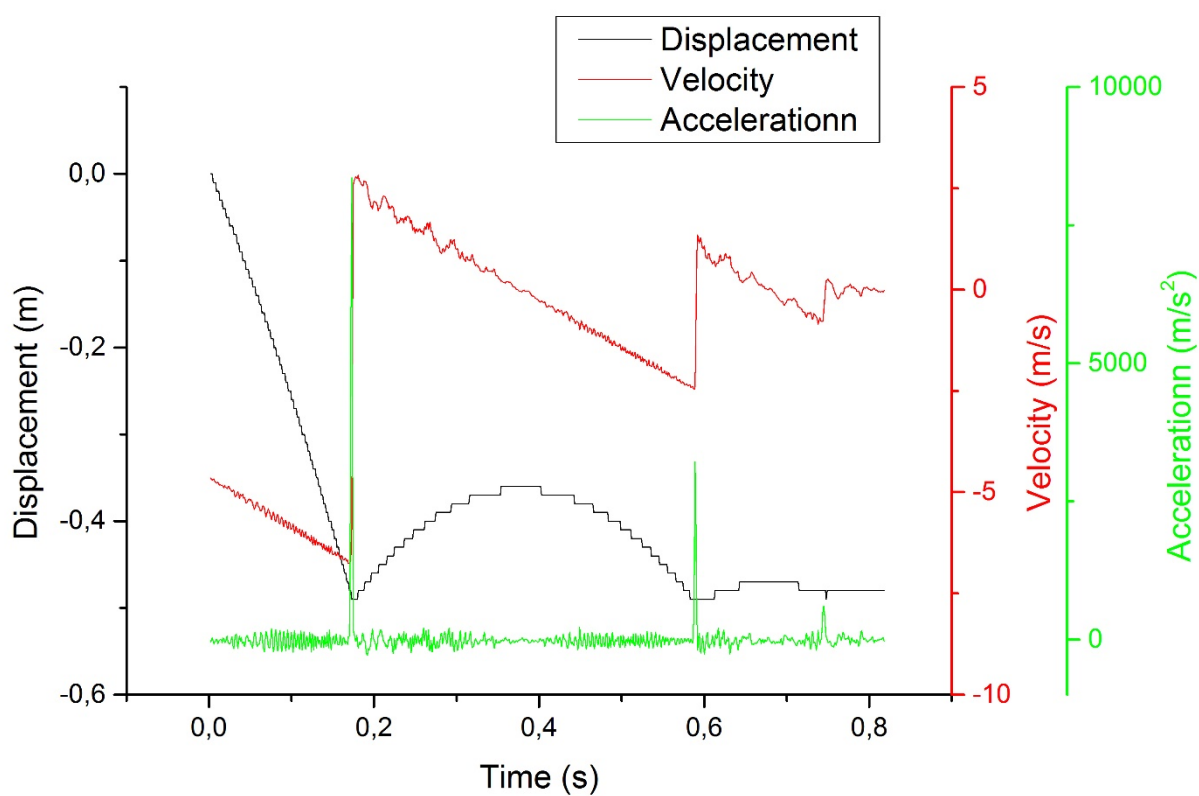


а)

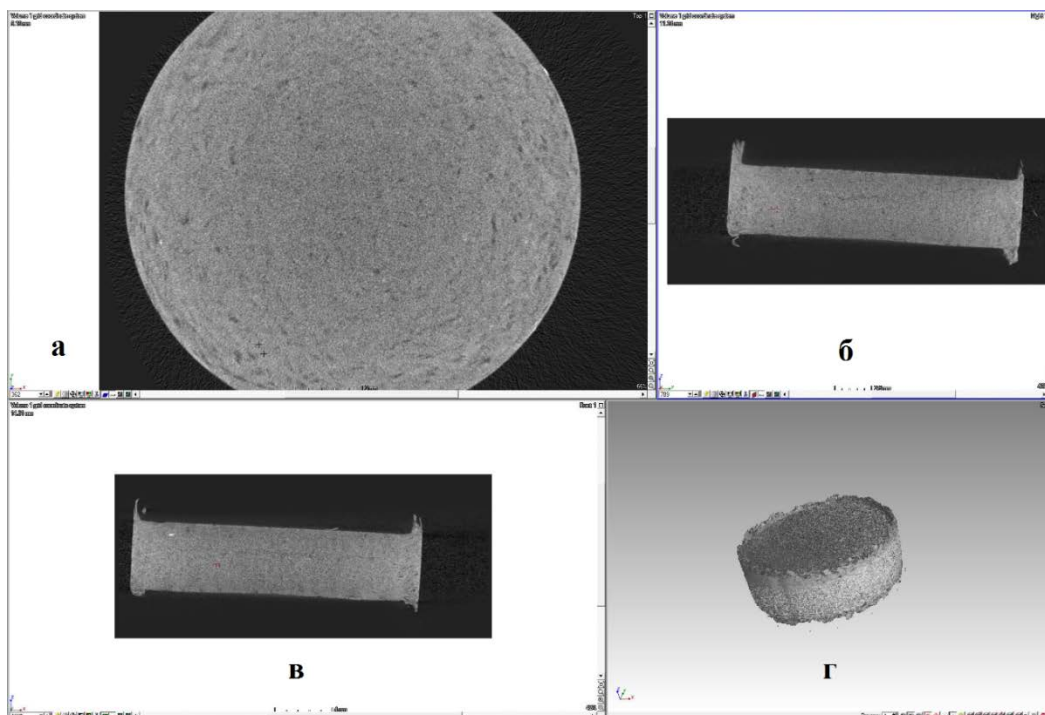


б)

Фигура 72. а – брикети от алуминиеви стружки (А1 – А4 от почистени стружки; АМ1 – АМ4 от стружки във вид на доставка); б – брикети от чугуnenи стружки (Ч1 – Ч4 от почистени стружки; ЧМ1 – ЧМ4 от стружки във вид на доставка)



Фигура 73. Диаграми на път, скорост и ускорение за един случай на брикетиране със сложен удар



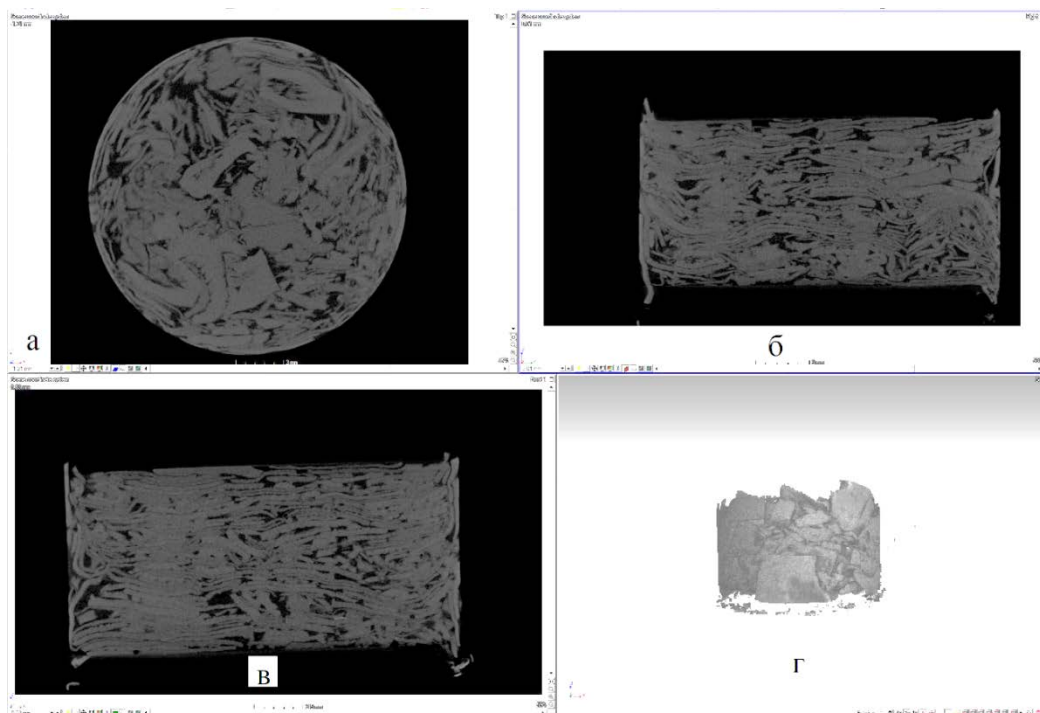
Фигура 74. Снимки от Рентгенов Томограф на брикет от Al – сплав: а – напречно сечение в средата на брикета по височина; б, в – взаимноперпендикулярни вертикални сечения, през центъра на брикета; г – 3-D изображение

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.

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_s , която е над два пъти по-малка от необходимата енергия за получаване на брикет с максимална плътност, в съответствие с Фиг.68б.



Фигура 15. 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

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.75 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.71a) 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.

4.8. Възможност за внедряване на брикетиране и уплътняване на метални прахове със сложен удар

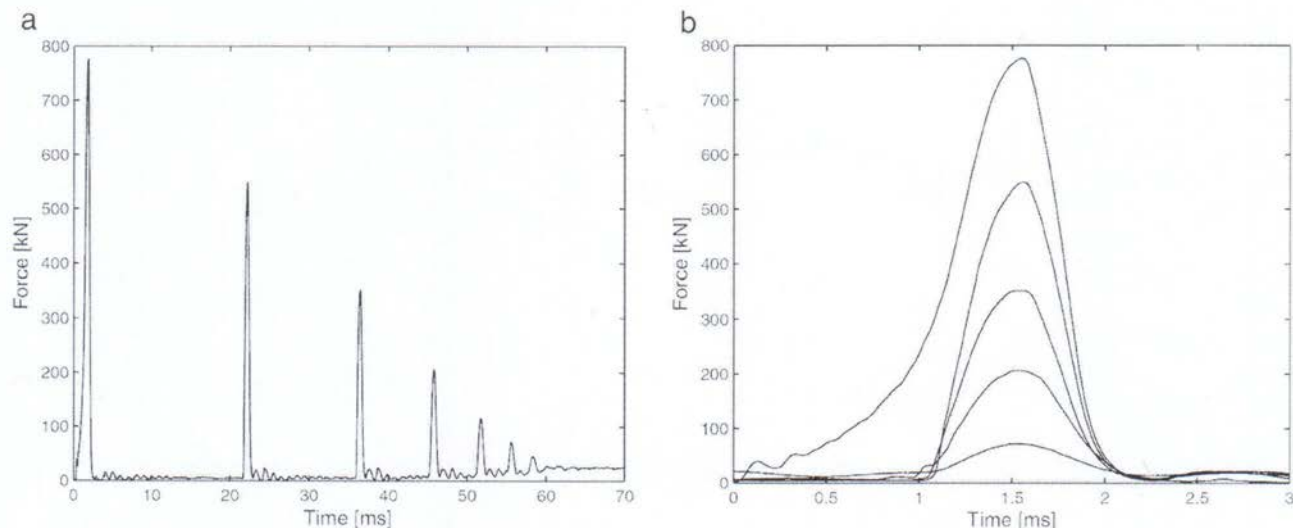
Получените резултати в настоящото и предишни наши изследвания, както и световния опит показват, че ударните машини (чукове) може да се използват успешно, за получаване на брикети от метални стружки и за уплътняване на метални прахове. И в двата случая се получава по-голяма плътност, отколкото при използване 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 техникo – 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.

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).



Фигура 86. Изменение на силата действаща през време на обикновен удар 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

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.

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.

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, Автроско 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 высокоскоростые 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.