

УДК 621. 983. 044

Елисеев Р. В.

## ОПЫТ ГОРЯЧЕЙ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Работа по исследованию горячей взрывной штамповке шаровой опоры поворотного кулака переднего моста автомобилей семейства КрАЗ выполнялась в порядке научно-технического сотрудничества кафедры технологии машиностроения Кременчугского государственного университета (КГУ) и ПО Кременчугский автомобильный завод (КрАЗ). В результате долгосрочной программы сотрудничества выполнен ряд работ по взрывной штамповке, часть из которых кафедрой публиковалась ранее, работа по горячей взрывной штамповке шаровой опоры публикуется впервые.

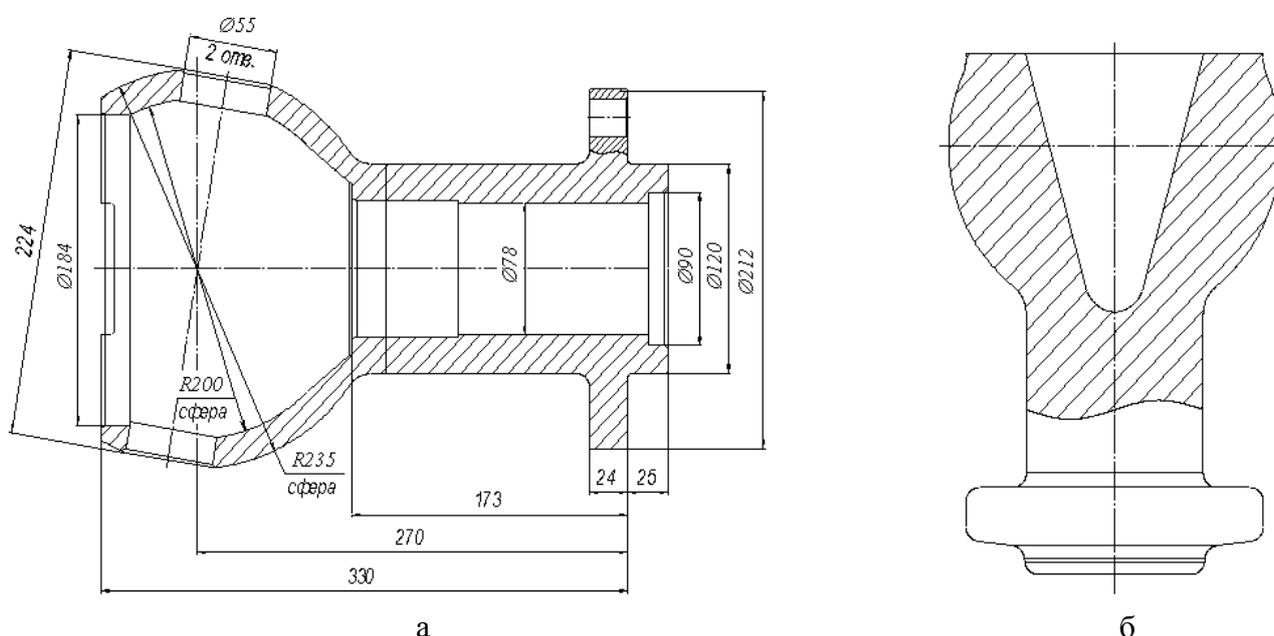


Рис. 1. Деталь «Шаровая опора»:

а – общий вид; б – поковка, изготовленная на ГКМ

По базовой технологии КрАЗа шаровая опора рис. 1, а изготавливается из поковки – (рис. 1, б) на горизонтально-ковочной машине, полученной ПО АвтоКрАЗ по кооперации от Челябинского кузнечнопрессового завода. Масса поковки составляет 59,5 кг, норма расхода материала (сталь 40Х) при изготовлении поковки составляет 70,7 кг. Механическая обработка поковок КрАЗом ведется на специализированном участке цеха. Базовая технология изготовления детали при этом включает более 30 операций, в том числе с применением полуавтоматов, токарногидрокопировальных и алмазно-расточных станков и другого дорогостоящего оборудования. Основной предпосылкой к поиску новой технологии для изготовления детали явился весьма низкий коэффициент использования металла, высокая трудоемкость и, как результат, – высокая себестоимость детали.

Учитывая сказанное, Для исследований УГТ КрАЗ по согласованию с кафедрой КГУ была предложена технология, в соответствии с которой заготовка под механическую обработку шаровой опоры выполняется из двух частей – шара и стебля, соединяемых сваркой трением (рис. 2). Шаровую часть планировалось изготавливать с помощью энергии взрыва из катаной трубы. Расчетная масса шаровой части детали составляет 23 кг.

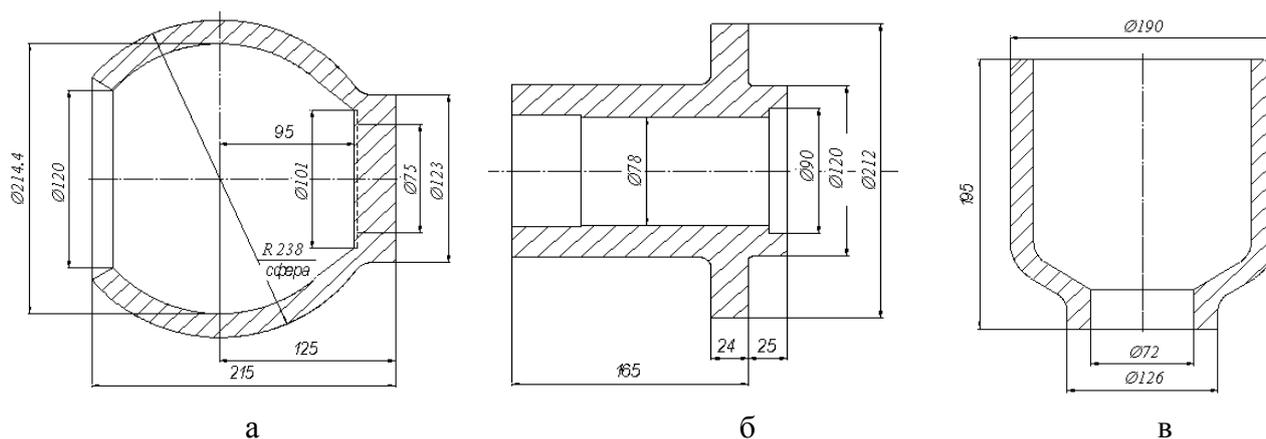


Рис. 2. Разделение детали на 2 части – стембель и сферу:  
 а – сфера; б – стембель; в – заготовка для изготовления сферы

Теория и практика штамповки с использованием энергии взрыва была обоснована Пихтовниковым Р. В. [1]. В начале 60-х годов наступление космической эры дало мощный толчок широкому промышленному внедрению идей автора. Первые исследования по горячей листовой штамповке с использованием энергии взрыва, были проведены в Харьковском авиационном институте Кочетовым П. П. В его опытной установке взрыв выполнялся в закрытой камере. Передача энергии заряда взрывчатого вещества (ВВ) осуществлялась непосредственно через воздух. Было установлено, что при деформировании стали 20, нагретой до ковочных температур, со скоростями 50–200 м/с заметного снижения пластичности, как предсказывала наука, не происходит. Металлографические исследования также не обнаружили никаких негативных последствий от высокоскоростного деформирования. Таким образом, принципиально дорога горячей штамповке взрывом была открыта. Но неизбежный выход воздушной ударной волны в рабочее пространство по соображениям техники безопасности ограничил эту работу лабораторией.

Медзяновским Э. Б. проведены исследования по взрывному формообразованию тонко-листовых вольфрама и молибденовых сплавов ( $O = 0,8\text{--}2,5$  мм) с нагревом раскалённым песком. Заготовку при этом удавалось нагреть всего до 360–380 °С. Кроме того, в связи с выходом в рабочую зону продуктов детонации ВВ и пыли, образующейся измельченным при взрыве песком, делает схему нетехнологичной.

Как более перспективная для разработки была выбрана схема горячей взрывной штамповки метанием передающей среды. Кафедра имела опыт по применению этой схемы для формообразования деталей из плоских заготовок [2, 3].

Целями исследования являются:

- 1) разработка методик, для расчетов работ деформирования, определения размеров и формы заготовки, величины заряда ВВ, его вида и форме;
- 2) проведение экспериментов по отработке оптимальных параметров процесса штамповки;
- 3) исследование деформированного состояния заготовок, отштампованных взрывом;
- 4) изготовление опытной партии деталей для проведения стендовых испытаний;
- 5) разработка технического проекта прессы взрывного действия;
- 6) баланс энергий и расчет величины заряда ВВ.

При штамповке с применением традиционного кузнечно-штамповочного оборудования время действия нагрузки на заготовку и время ее деформирования совпадают, что обуславливает при расчете методы, использующие условие равновесия внешних и внутренних сил. При штамповке взрывом время действия нагрузки на заготовку и время её формирования не совпадают, что обуславливает при расчете потребной величины заряда ВВ. применять

энергетический метод, в соответствии с которым  $E = W$ , где:  $E$  – энергия заряда,  $W$  – работа пластической деформации, (коэффициент полезного использования энергии взрыва – КПД). КПД – самый важный параметр процесса. Даже приближенное его зачение значительно облегчают начать доводку новой технологии. В этом весьма полезным может быть многолетний опыт исследования и применения энергии взрыва в машиностроении. Так, известны экспериментальные обобщенные данные о КПД при взрывной раздаче трубчатых заготовок без их подогрева: для труб с внутренним диаметром 25–75 мм КПД составил 0,32–0,20 (меньшие значения относятся к большим диаметрам). Здесь КПД получены при открытых торцах деформируемой трубы, и, следовательно, не являются максимальными, т. к. при взрыве в замкнутом объеме часть энергии, направленной к торцам, не будет потеряна. Чаще при разработке новых техпроцессов ведется полный расчёт.

Энергия, выделенная зарядом  $E$ , определяется соотношением:

$$E = A \cdot Q \cdot C \cdot K, \text{ кДж}, \quad (1)$$

где  $C$  – теплота взрыва ВВ;  $A$  – механический эквивалент тепла;  $Q$  – масса заряда;  $K$  – коэффициент неполноты детонации заряда, для взрыва в воде  $K = 0,92$ .

Деформированное состояние заготовки и расчет работы деформации

Расчет работы деформации и потребную для этого величину заряда ВВ можно выполнить после изучения распределения составляющих деформаций и интенсивностей деформаций  $e_i$  в каждой точке заготовки. Соотношение между составляющими деформации в направлении высоты заготовки  $e_1$ , ширины  $e_2$ , толщины  $e_3$ , определяется условием сохранения объема металла и может быть записано в виде:

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0. \quad (2)$$

При раздаче трубчатой заготовки с незаземленными краями деформации по высоте отсутствуют:  $e_1 = 0$ . Тогда из предыдущего соотношения следует:  $e_2 = -e_3 = \ln(D_i / D_0)$ .

Как видно, в этом случае величина утонения в каждой точке отштампованной детали определяется соотношением диаметра заготовки  $D_0$  и диаметра  $D_i$  шарового пояса, определяемого его высотой над экватором сферы. В общем случае выражение для расчета удельной (единичной) работы деформирования при формообразовании детали имеет вид:

$$de_i = \int \sigma_i \cdot de_i, \quad (3)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжения, значение которого для каждой точки объема деформированной заготовки определяется интенсивностью деформации  $e_i$ . При степенном законе упрочнения эта зависимость  $\sigma_i(e_i)$  имеет вид:

$$\sigma_i = B e_i^A,$$

где  $A$  и  $B$  – коэффициенты аппроксимации кривой упрочнения для металла при заданных температурно-скоростных условиях. Интегрируя последнее выражение в пределах от 0 до  $e_{i\max}$ , выражение для расчета удельной работы деформирования примет вид:

$$a_{\text{деф}} = B \cdot (e_i)^{(1+A)} / (1+A). \quad (4)$$

Если значение интенсивности деформации усреднить по объему деформированного металла –  $e_{i\text{ср}}$ , то для определения суммарной работы  $W_{\text{деф}}$  в последнем выражении следует вместо  $e_i$  подставить  $e_{i\text{ср}}$  и умножить его на объем деформированной заготовки  $V$ :

$$W_{\text{деф}} = V \cdot B \cdot (e_{i\text{ср}})^{(1+A)} / (1+A). \quad (5)$$

Выражение интенсивности деформации через составляющие деформаций имеет вид:

$$e_i = \sqrt{2/3} \cdot ((e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2)^{0,5}. \quad (6)$$

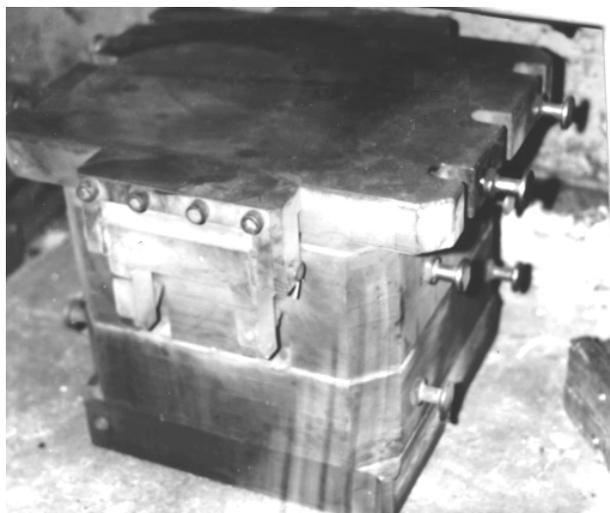
Для плоского деформированного состояния, когда  $e_1 = 0$  и  $e_3 = -e_2 = e$ ,  $e_i = 1,15 e$ .

При осреднении по объему заготовки интенсивностей деформаций, рассчитанных для каждой точки, можно получить значение средней интенсивности деформации  $e_{icp}$ . Учитывая громоздкость приведенных расчетов, для экспериментальной отработки процессов взрывной штамповки подобных деталей значение  $e_{icp}$  с достаточной точностью можно заимствовать из предыдущих исследований. Так, для рассматриваемой задачи по нашим расчётам  $e_{icp} = 0,432$ .

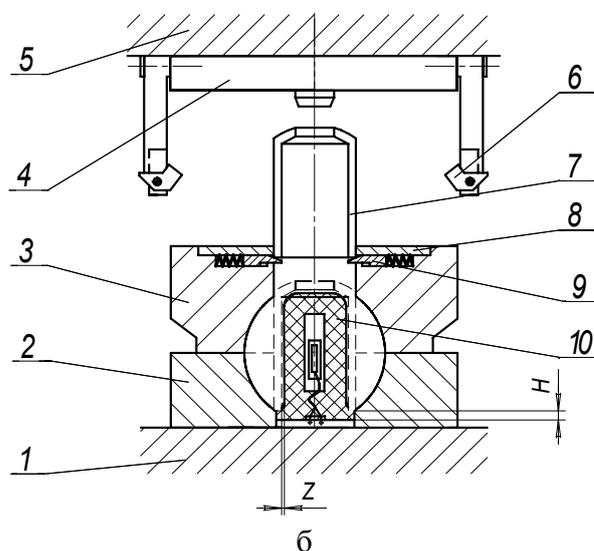
Влияние температуры на сопротивление пластической деформации и показатели пластичности. Для энергетического расчета необходимо знать величины сопротивления деформации в зависимости от степени деформации. Эту зависимость обычно выражают в виде экспериментальных кривых упрочнения, полученных для различных температур.

Влияние скорости на сопротивление деформации в связи с физико-химическими процессами, сопровождающими пластическую деформацию различных сплавов, изучены недостаточно. Известные экспериментальные исследования Губкина С. И. показывают, что во всем диапазоне температур повышение скорости деформации повышает сопротивление деформированию. Отмечается также, что это повышение наиболее сильно сказывается в области температур деформации с полным разупрочнением сплава. В расчетах рекомендуется применять значения скоростных коэффициентов Губкина С. И. Этот коэффициент показывает, во сколько раз увеличивается напряжение текучести при увеличении скорости деформации. При штамповке взрывом для  $T = 0,7 \text{ Тпл}$  принимают  $K_d = 1,75-2,5$ .

Для рассматриваемой задачи, подставив скоростной коэффициент  $K_d = 2,125$  и объем деформируемой части заготовки  $V = 3436 \text{ см}^3$  в формулу для определения работы деформирования, получим её значение:  $A_{деф} = 15340 \text{ кДж}$ . Приняв из опыта предыдущих работ  $K_{ПД} = 0,3$ , получаем ориентировочное значение массы заряда ВВ – 0,25 кг.



а



б

Рис. 3. Экспериментальный штамп:

а – общий вид; б – вариант конструкции штампа

Экспериментальный штамп (рис. 3) состоит из двух полуматриц 2, 3 и верхней крышки 4. Нижняя полуматрица 2 крепится на подштамповой плите, расположенной на подвижном столе пресса, верхняя крышка штампа 4 закреплена на неподвижной траверсе пресса 6. Наличие 2-х захватов 5 с защелками позволяет верхнюю полуматрицу 3 оставлять в сборе с нижней 2 внизу (рис. 3, б) или же защёлкивать её на крышке – вверху. Две плоскости разъема штампа предусмотрены для обеспечения возможности раздельного ввода расположения

в штампе блока передающей среды с зарядом ВВ и нагретой заготовки. В дальнейшем для краткости характеристики текущего положения частей штампа будем называть только положение верхней полуматрицы (ВПМ): «ВПМ – внизу» или «ВПМ – сверху».

В качестве замыкающего устройства, предотвращающего раскрытие штампа во время взрыва применялся гидравлический пресс модели ПО 5443. К недостатку пресса при использовании его для заданной серии экспериментов следует отнести малую скорость рабочего хода. Так, замыкание штампа после установки в нем нагретой заготовки выполняется в течение 90 с, что приводит к некоторому охлаждению заготовки перед штамповкой. Этот фактор нами учитывался нагревом заготовки до более высоких температур.

#### 1. Штамповка с использованием для передачи энергии взрыва формовочной смеси.

Блок ПС в этой серии выполнялся из литейной формовочной смеси. Внутри блока выполнена цилиндрическая полость для размещения в ней ВВ. После установки электродетонатора, полость закрывалась пробкой из смеси. При изменении формы заряда полость блока дорабатывалась с помощью плоского шаблона. Цикл штамповки по этой схеме выполняется в течение двух ходов пресса. Исходное положение: «ВПМ – сверху»; В этом положении в нижнюю полуматрицу устанавливается блок передающей среды с зарядом ВВ 10 (рис. 3, б). Затем стол пресса с нижней полуматрицей и блоком ПС поднимается вверх. После смыкания штампа, защелки захватов освобождают верхнюю полуматрицу, и стол опускается вниз. В положении «ВПМ – внизу» нагретая заготовка устанавливается на подпружиненные ползушки. При втором смыкании штампа заготовка проталкивается внутрь штампа. Причем, как только смыкание штампа произошло, подаётся импульс для подрыва заряда. Стол опускается вниз, деталь извлекается из штампа. После очистки штампа цикл можно повторить.

Рассмотренная схема штамповки позволяет получить заданные детали, однако наблюдалась высокая нестабильность результатов, вызванная недостаточно точной центровкой блока ПС и деформируемой заготовки, что приводит к разрыву блока и неравномерной нагрузке на заготовку. В результате этого появляются меридиональные трещины в заготовке. Кроме того, недоштаповка нижней части заготовки часто требует второго перехода, что при данной схеме с проталкиванием заготовки практически невозможно. Все вышесказанное потребовало исследований второй схемы – штамповки с применением в качестве передающей среды – воды.

#### 2. Исследование штамповки с использованием для передачи энергии взрыва воды.

Основу блока передающей среды здесь составляет тонкий цилиндрический асбестовый стакан 8 (рис. 4, а), выполненный прессованием.

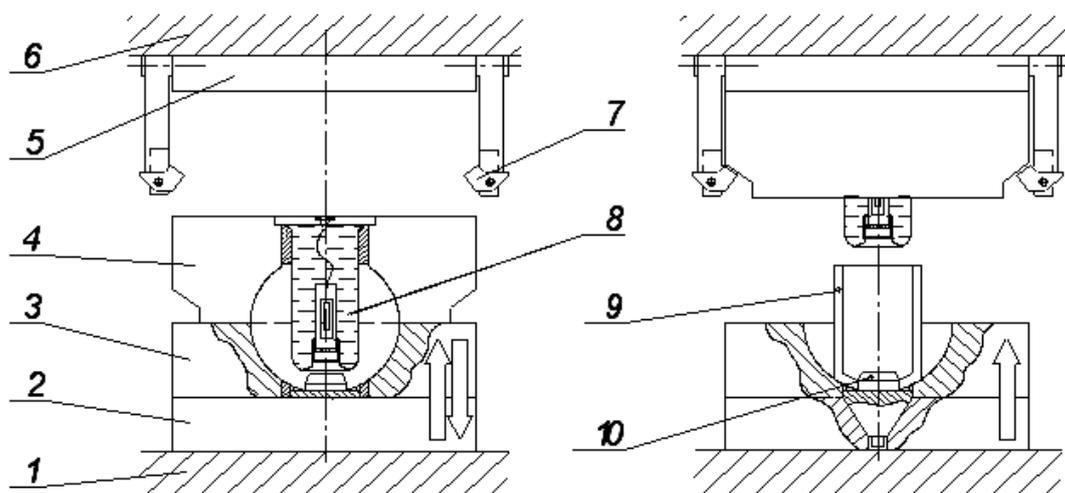


Рис. 4. Цикл изготовления сферы из трубчатой заготовки:

а – установка блока ПС с зарядом ВВ; б – установка заготовки

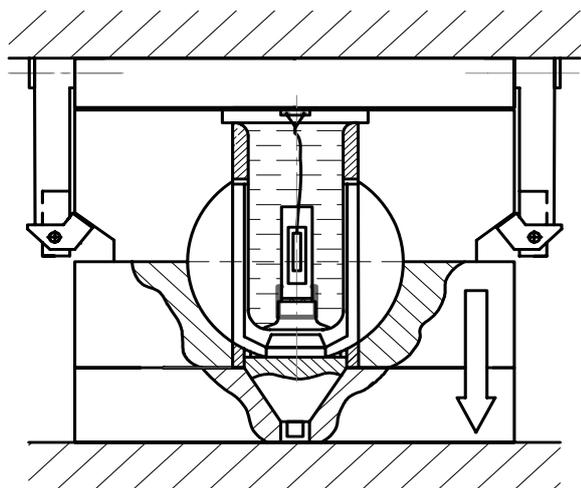


Рис. 5. Штамп сомкнут перед взрывом



Рис. 6. Отштампованная сферическая часть

Заряд ВВ помещён в хлорвиниловой трубке и с помощью присоски крепится к доньшку стакана. Вода в стакан заливается после проверки правильности его расположения, при этом контролируется высота заряда относительно доньшка стакана и соосность трубки с зарядом ВВ и стакана. Внутри штампа стакан подвешивается своей фланцевой частью. При ВПМ – внизу нагретая заготовка устанавливается в штамп (рис. 4, б). При последующем смыкании штампа инициируется взрыв (рис. 5). На рис. 6 показана отштампованная сферическая часть заготовки.

### ВЫВОДЫ

В результате обобщения имеющихся теоретических положений по применению энергии взрыва для штамповки разработаны методики расчета работы деформирования, величины заряда ВВ, формы и расположения его внутри трубчатой заготовки. Выполнены эксперименты по поиску рациональной схемы взрывной штамповки. Разработаны и прошли опытную проверку несколько вариантов технологии штамповки сферической части детали «Шаровая опора». Результаты экспериментальных работ позволили определить оптимальный технологический процесс: однопереходная горячая штамповка взрывом с применением в качестве передающей среды – воды. В условиях опытного производства изготовлена партия деталей в количестве 20 штук, для проведения ходовых испытаний. Разработано техническое задание на проектирование специального пресса взрывного действия.

В настоящее время кафедрой под руководством профессора Драгобецкого В. В. ведутся дополнительные теоретические исследования и работы по проектированию взрывного пресса.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пихтовников Р. В. Штамповка-вытяжка и обтяжка взрывом : дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук / Р. В. Пихтовников. – М., А.Н. СССР, 1952.
2. Драгобецкий В. В. Нові напрями удосконалення властивостей металевих виробів методами вибухового оброблення / В. В. Драгобецкий. – *Машинознавство*. – 2002. – № 6. – С. 38–42.
3. Драгобецкий В. В. Практика и перспективы создания прогрессивных технологий импульсной металлообработки : сборник трудов IX международной научно-технической конференции / В. В. Драгобецкий. – Севастополь – Донецк : *Машиностроение и техносфера XXI в.* – 2002. – Том 1. – С. 187–191.

Елисеев Р. В. – аспирант КГУ.

КГУ – Кременчугский государственный университет им. Остроградского, г. Кременчуг.

E-mail: tety7777@mail.ru