

размеры образовавшихся частиц. Для этого необходимо усовершенствовать существующую методику разгона так, чтобы в слое после удара возникла плоская ударная волна легко прогнозируемой интенсивности. Результаты численного моделирования, представленные в этой работе, указывают на то, что внутренние механизмы стабилизации полета способствуют выравниванию ударника, если разгон в канале происходит достаточно гладко. Последние усовершенствования методики в виде ниток, натянутых вдоль образующих канала, позволяют минимизировать контакт ударника со стенками [3].

*Рисунки 1, 2 и 4, б используются с любезного согласия авторов статьи [2].*

### Список литературы

1. Асташкин М.В., Баранов В.К., Георгиевская А.Б., Голубинский А.Г., Ириничев Д.А., Мешков Е.Е., Степушкин С.Н., Сюдюков А.Ю., Хатункин В.Ю. Неустойчивость свободной границы слоя воды, ускоряемой волной Тейлора. // Письма в ЖЭТФ, 2014, 99, №. 3, с. 165–168.
2. Баранов В.К., Георгиевская А.Б., Гук Д.Е., Замыслов Д.Н., Макаров С.А., Мешков Е.Е., Степушкин С.Н. Лабораторное компактное устройство для разгона тонких ударников. // Письма в ЖТФ, т.42, №16, 2016, с.1-6.
3. Гук Д.Е. Разработка лабораторного устройства для разгона тонкого ударника до скорости порядка 200 м/с: магистерская диссертация. СарФТИ НИЯУ МИФИ, Саров, 2017.
4. Руденко В.В., Шабуров М.В., Чехунов Е.В. Учебно-исследовательский программный комплекс MASTER по физике сплошных сред. // Труды Региональной конференции по научному программному обеспечению, 2-3 февраля, 2006. Изд-во Политехнического университета, С.-Петербург (2006), с. 121.
5. Jones A. H., Isbell W. M., Maiden C. J. Measurement Of The Very-High-Pressure Properties Of Materials Using A Light-Gas Gun. // J. Appl. Phys. 37, 3493 (1966).
6. A. E. Seigel, Agardograph 91, U. S. Naval Ordnance Laboratory Silver Spring, Md. (1965).
7. CD-ADAPCO, STAR-CCM+ Version 8.02 User Guide (2013).

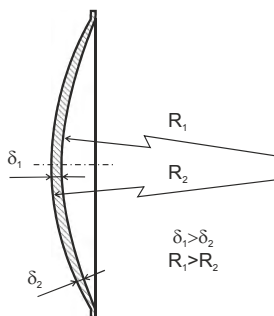
## ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКОВЫХ ЗАГОТОВОК ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕГМЕНТНЫХ ОБЛИЦОВОК КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

*П.В.Круглов*

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Известно, что для проникания в твердые преграды используются кумулятивные заряды, формирующие «ударное ядро». В основе действия такого кумулятивного заряда лежит взаимодействие высокоскоростного компактного элемента, представляющего собой метаемую взрывчатым веществом металлическую сегментную облицовку, с преградой. В конструкции заряда такая облицовка имеет, как правило, сегментную форму, изготавливается из стали, меди, тантала [1,2]. После инициирования шашки взрывчатого вещества облицовка обжимается и приобретает вид удлинённого тела. Для стабилизации ее полета рекомендуется формирование в хвостовой области аэродинамической юбки, имеющей переменный по толщине периодический, многовершинный профиль поперечного сечения. Создание такого профиля «ударного ядра» возможно различными способами, использующими модификации как облицовки [3], так и заряда взрывчатого вещества. Исследования показывают [4], что при модификации облицовки высота таких вершин по ее толщине в окружном направлении должна быть невелика, и в области

периферии облицовки высота не должна превышать долей миллиметра. В работе [4] предлагается получать указанный профиль методами напыления или наплавки, что достаточно трудоемко и не гарантирует достижение указанной точности. Изготовление облицовок с периодической разнотолщинностью требует совершенствования для достижения указанной точности.



**Рисунок 1.** Сегментная облицовка кумулятивного заряда

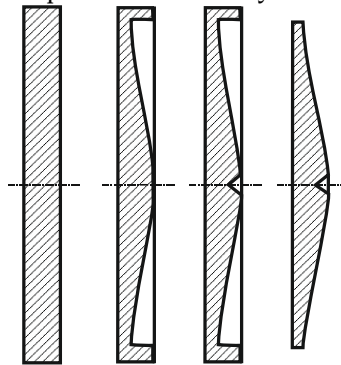
В данной работе предлагается вариант технологии изготовления дисковой заготовки для сегментной облицовки кумулятивного заряда (рис.1), позволяющий сформировать такую заготовку, в которой при уменьшении толщины заготовки от центра к периферии одновременно в окружном направлении образуется переменный по толщине периодический профиль.

Для изготовления такой облицовки предлагается использовать технологический процесс, включающий в себя операции получения дисковой заготовки (штамповкой или отрезкой от круга), механической обработки дисковой заготовки, штамповки – формовки в эластичную матрицу для придания сегментной формы детали. Требуемый у детали профиль поперечного сечения в радиальном и окружном направлениях (уменьшение толщины от центра к периферии и периодические колебания толщины в окружном направлении) будет формироваться на операции механической обработки, и, затем, будет наследоваться деталью после штамповки.

Технологическая операция механической обработки выполняется на токарном станке при закреплении в трехкулачковом патроне. В качестве заготовки используется дисковая заготовка, полученная вырубкой в штампе или отрезкой из круга соответствующего диаметра. При закреплении тонкостенной дисковой заготовки в трехкулачковом патроне она деформируется под действием сил закрепления и при точении торцевой поверхности толщина заготовки в окружном направлении будет переменной. Подрезка торца выполняется подрезным резцом за один или несколько проходов от центра к периферии с постепенным увеличением глубины резания. Получаемая торцевая поверхность будет не плоской, а конической, так как у сегментной облицовки толщина в центре детали (в куполе) должна быть больше, чем в области периферии. Для облицовок до 100 мм диаметром толщина в периферийной области не превышает 1.3 мм. Проблемами при механической обработке по указанной схеме являются надежное закрепление заготовки в трехкулачковом патроне, поскольку ширина закрепления (1.3 мм) небольшая и велика вероятность задеть резцом кулачки при обработке периферийной области. Для решения указанной проблемы предлагается выбирать дисковую заготовку заведомо большего диаметра (на 10-25%), и формировать коническую поверхность при подрезке торца с оставлением технологического бурта, который будет выступать базой и не будет стачиваться в процессе подрезки торца (рис.2). Ширина бурта для надежного закрепления зависит от обрабатываемого материала, толщины заготовки, диаметра и подбирается опытным путем.

Для последующего удаления технологического бурта на поверхности заготовки формируется центровое отверстие, заготовка переустанавливается в центры и бурт проходным резцом стачивается за несколько проходов (рис.3).

Для отработки технологии были проведены эксперименты для получения дисковых деталей диаметром 68 мм, толщиной в центре 2..2,5 мм, на периферии 1,5..2,1 мм. В качестве исходных дисковых заготовок использовались круги диаметром 75 мм, толщиной 4 мм, выполненные из латуни Л63. Латунь имеет близкие к меди технологические свойства и меньшую стоимость, что определило выбор материала для эксперимента. Обработка выполнялась на токарном станке 1А62. Заготовка устанавливалась в трехлачковом патроне, закрепление выполнялось моментным ключом с фиксированным моментом на ключе при этом сила закрепления регистрировалась в каждом эксперименте. Значения момента на ключе при закреплении принимались равными 25; 40; 55; 70; 85 Н·м, которые в дальнейшем пересчитывались в усилия закрепления.



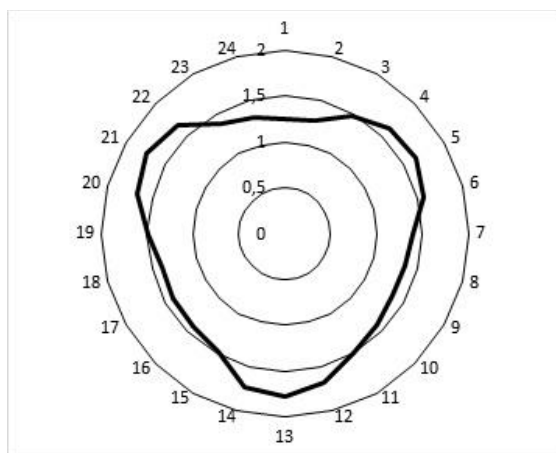
**Рисунок 2.** Поперечное сечение заготовки на разных переходах обработки



**Рисунок 3.** Заготовка с буртом (слева) и после обработки без бурта (справа)

При обработке глубина резания увеличивалась от 1,5 мм в центре до 2,5 мм на периферии диска. Частота вращения шпинделя  $n=240$  об/мин, поперечная подача  $s=0,125$  мм/об. Ширина технологического бурта составила 3,5 мм на сторону (рис. 3). После подрезки торца в заготовке сверлилось центровое отверстие, заготовка переустанавливалась в центры и технологический бурт стачивался проходным резцом за несколько проходов. При центровке и точении бурта изменений толщины периферийной области диска не происходит.

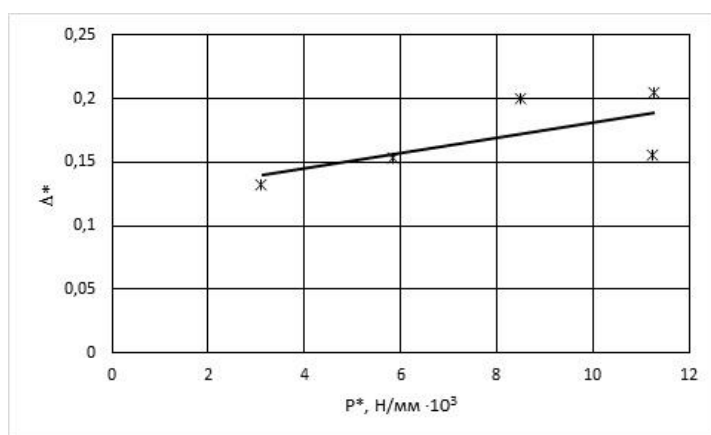
После обработки для оценки результатов экспериментов выполнялись измерения толщины в окружном направлении на радиусе 32 мм (при радиусе заготовки 34 мм) через 15 градусов в 24 точках, у одной из заготовок измерялась толщина в окружном направлении на радиусе 27 мм. Измерения проводились в размеченных точках заготовки на компараторе Аббе с ценой деления 1 мкм. Результаты заносились в таблицу и затем обрабатывались в Excel. По результатам измерений определялась толщина в окружном направлении (рис. 4) и разнотолщинность, как разница между текущим значением толщины и минимальным значением в данном направлении.



**Рисунок 4.** Распределение толщины заготовки на радиусе 32 мм

Для изучения профиля поперечного сечения в окружном направлении в данной работе использовался гармонический анализ. Согласно методике использования данного подхода, применительно к анализу геометрии кумулятивных зарядов [5, 6] проводилось изучение толщины и разнотолщинности в окружном направлении. В работах [5, 6] гармонический анализ использовался с целью снижения погрешностей поперечного сечения кумулятивных облицовок конической формы. В данной работе предложено с помощью гармонического анализа выявить одну из старших гармоник, в частности, третью, для контроля и управления ее значением на разных операциях изготовления облицовки.

Результаты гармонического анализа значений разнотолщинности облицовки в окружном направлении на радиусе 32 мм от центра показывают, что амплитуда третьей гармоники имеет наибольшее значение среди первых трех гармоник и превышает амплитуду первой гармоники в 3,2 раза, а второй более чем на порядок. Это показывает, что предложенный способ механической обработки формирует заготовку с необходимой периодической структурой погрешности – разнотолщинности, при которой будет создан трех-вершинный профиль толщины в окружном направлении.



**Рисунок 5.** Зависимость относительной разнотолщинности  $\Delta^*$  заготовки на радиусе 32 мм от величины  $P^*$

Следующим шагом является изучение влияния усилия закрепления на величину разнотолщинности. Результаты представлены на рисунке 5. Экспериментальные результаты позволяют построить линейную зависимость

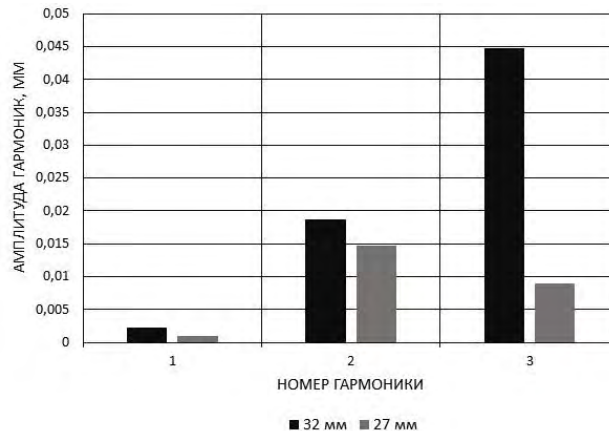
$$\Delta^* = 0,006P^* + 0,1211,$$

где  $\Delta^* = \frac{\Delta}{\delta}$  - отношение разнотолщинности  $\Delta$  к толщине детали  $\delta$ ,

$P^* = \frac{P}{\delta}$  - отношение силы закрепления  $P$  к толщине детали  $\delta$ .

С увеличением силы закрепления увеличивается и значение разнотолщинности, что можно объяснить увеличением деформации заготовки в поперечном направлении. Следует отметить, что для уточнения данной зависимости для большего диапазона толщин и разных материалов необходимы дополнительные эксперименты.

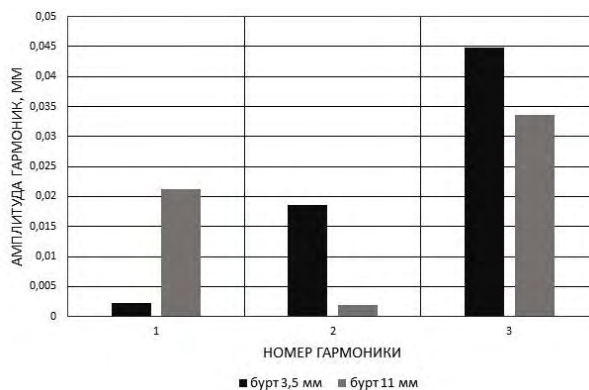
Для одной из деталей был проведен гармонический анализ разнотолщинности в окружном направлении на разном расстоянии от центра 32 и 27 мм (рис.6). Как показали результаты анализа, значения амплитуд первой и второй гармоник незначительно увеличиваются, а значения амплитуд третьей гармоники на расстоянии 32 и 27 мм от центра отличаются более чем в 4 раза. Амплитуды первой и второй гармоник растут при увеличении расстояния от центра, что объясняется тем, что первая гармоника описывает смещение центра заготовки относительно центра измерений в радиальном направлении и при одинаковых условиях измерений оно одинаково невелико, а вторая гармоника характеризует изогнутость заготовки вдоль одной из диаметральных линий, и связана, скорее всего, с особенностями прокатки листа, из которого была изготовлена заготовка.



**Рисунок 6.** Амплитуды гармоник разнотолщинности детали в окружном направлении на расстоянии 32 и 27 мм от центра

Можно предположить, что значительное изменение амплитуды третьей гармоники (более чем в 4 раза) вызвано значительным отклонением заготовки в процессе обработки в осевом направлении под действием сил резания, поскольку жесткость заготовки снижается в периферийных областях вследствие, во-первых, увеличения расстояния от точек закрепления, и, во-вторых, из-за уменьшения толщины заготовки от центра к периферии. Дальнейшим путем снижения амплитуды третьей гармоники будет поиск способов повышения жесткости заготовки перед подрезкой торца.

Для повышения жесткости заготовки предлагается увеличение ширины технологического бурта, что подразумевает использование заготовки с изначально большим диаметром (диаметр обработанной детали, как и в предыдущих экспериментах, не изменен, т.е. 68 мм). На рисунке 7 представлены результаты расчета амплитуд гармоник при различной ширине технологического бурта. Анализ показывает, что при увеличении ширины 3,5 мм до 11 мм амплитуды второй и третьей гармоник разнотолщинности снижаются.



**Рисунок 7.** Амплитуды гармоник разнотолщинности детали при различной ширине бурта

Следующей операцией технологического процесса изготовления облицовки предлагается штамповка дисковой заготовки в эластичную матрицу, поскольку потребуется придание нужной формы детали с условиями сохранения без изменения толщины заготовки и наследования деталью разнотолщинности, сформированной на этапе механической обработки.

Таким образом, в работе показано, что при изготовлении дисковых заготовок для металлических сегментных облицовок кумулятивных зарядов путем механической обработки возможно сформировать периодический профиль толщины в поперечном сечении заготовки при одновременном уменьшении толщины диска от центра к периферии. Для этого предложено использовать заготовку большего диаметра с технологическим буртом, который служит базой при обработке и позднее удаляется. Наличие такого технологического бурта позволяет закрепить заготовку при обработке торца без риска повреждения приспособления для обработки.

После гармонического анализа толщины поперечного сечения в окружном направлении получены зависимости толщины от усилия закрепления в приспособлении. Увеличение силы закрепления приводит к увеличению амплитуды третьей гармоники разнотолщинности детали. Определены значения амплитуд гармоник разнотолщинности в окружном направлении на разном расстоянии от центра дисковой заготовки. Показано, что изменение значений амплитуд первой и второй гармоник разнотолщинности незначительно, а амплитуда третьей гармоники увеличивается от центра к периферии, что вызвано снижением жесткости заготовки в периферийной области. Показано, что увеличение ширины технологического бурта при подрезке торца диска приводит к снижению амплитуд гармоник разнотолщинности заготовок металлических сегментных облицовок кумулятивных зарядов.

### Список литературы

1. В.И. Колпаков. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств // Наука и образование, 2012, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (дата обращения 10.12.2016).
2. В.В.Селиванов, ред. Боеприпасы. т.1 // Москва, Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2016, 506 с.
3. H.G. Bugiel. Insert for a projectile-forming charge. US patent 4590861, 27.05.1985, р. 6.
4. Н.А.Асмоловский, В.Д.Баскаков, В.А.Тарасов. Анализ влияния периодических возмущений на формирование высокоскоростных стержневых элементов // Известия высших учебных заведений. Серия Машиностроение, 2013, № 8, с. 8-14.
5. В.А.Тарасов, В.Д. Баскаков, П.В.Круглов. Научные основы проектирования технологии изготовления прецизионных кумулятивных зарядов // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. III Харитоновские тематические научные чтения: Труды международной конференции. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, 2002. с. 254-257.

6. В.А.Тарасов, В.Д. Баскаков, П.В.Круглов. Анализ наследственных преобразований технологических погрешностей при изготовлении кумулятивных зарядов // Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях. V Харитоновские тематические научные чтения: Труды международной конференции. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, 2003. с.477-480.

## ДЕТОНАЦИОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ В ПОЛУЧЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

*В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер*

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

### Резюме

Созданное в ИГиЛ СО РАН оборудование нового поколения – детонационный комплекс ССДС2000 (Computer Controlled Detonation Spraying), позволяет наносить покрытия из широкого спектра материалов на различные подложки. ССДС2000 может работать на различных газовых топливах (ацетилене, пропан-бутане, МАФе, и др.). Приводятся свойства получаемых покрытий и примеры применения детонационного напыления в авиационном моторостроении, нефтегазовой индустрии и других отраслях промышленности, а также в создании научного оборудования.

**Ключевые слова:** детонационное напыление, газовая смесь, детонационный комплекс, покрытия.

### Введение

Явление газовой детонации широко известно и находит применение в различных технологиях, в частности в детонационном напылении (ДН). Эта технология появилась в середине прошлого века в США [1], несколько позже в России [2] и с тех пор применяется в машиностроении и других отраслях промышленности в целях получения функциональных покрытий, повышения ресурса работы и восстановления деталей. Обзор публикаций по ДН приведен в [3, 4]. Рабочий орган установки ДН включает ствол в виде трубы, в которой реализуется детонационное сжигание газовой смеси топливо + окислитель с образованием продуктов, имеющих температуру до 4500 К и массовую скорость за фронтом детонации до 1300 м/с. Вводимые в ствол порошковые частицы под воздействием высокотемпературного высокоскоростного газового потока нагреваются, как правило, до плавления, и разгоняются до скорости около полукилометра в секунду. При столкновении таких частиц с подложкой формируется прочное и плотное покрытие. Преимущество ДН перед другими газотермическими методами (плазменное и газопламенное напыление, HVOF, HVOF) заключается в высокой адгезии и низкой пористости получаемых покрытий, кроме того, напыляемые детали не деформируются.

В настоящей работе рассматриваются особенности детонационного комплекса ССДС2000, дающие возможность получать высококачественные покрытия, приводятся свойства ряда покрытий и их применения.

### 1. Детонационный комплекс ССДС2000 и используемые топлива

На базе многолетних исследований газовой детонации в ИГиЛ СО РАН создано оборудование нового поколения – детонационный комплекс ССДС2000 (Computer Controlled Detonation Spraying) [5 -7], позволяющее наносить покрытия из самого широкого спектра материалов на различные подложки. Основные элементы комплекса показаны на рисунках 1а, б, в. Рабочий орган (пушка) может также размещаться на промышленном роботе (рисунок 1д). Процесс ДН схематически показан на рисунке 2. В отличие от других газотермических технологий ДН является импульсным