

## Технология изготовления дисковых заготовок переменной толщины для компактных летательных аппаратов

© П.В. Круглов, И.А. Болотина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Предложен вариант технологии изготовления дисковой заготовки для сегментной облицовки кумулятивного заряда, позволяющий сформировать такую заготовку, в которой при уменьшении ее толщины от центра к периферии одновременно в окружном направлении образуется переменный по толщине периодический профиль. Дисковую металлическую заготовку закрепляют в трехулачковом патроне и выполняют подрезку торца диска с уменьшением толщины вдоль образующей от центра к периферии. Под воздействием сил закрепления дисковая заготовка деформируется и после обработки ее поперечное сечение имеет трехгранный периодический профиль. Проведены эксперименты по обработке дисковых заготовок при различных значениях силы закрепления в приспособлении. Получены зависимости разнотолщинности диска от усилия закрепления в приспособлении. После гармонического анализа толщины поперечного сечения определены значения амплитуд гармоник разнотолщинности в окружном направлении на разном расстоянии от центра дисковой заготовки.*

**Ключевые слова:** гармонический анализ, деформация заготовки, технологическая наследственность

**Введение.** Известно, что для проникания в твердые преграды используются кумулятивные заряды, формирующие «ударное ядро». В основе действия такого кумулятивного заряда лежит взаимодействие высокоскоростного компактного летательного аппарата, представляющего собой метаемую взрывчатое веществом металлическую облицовку, с преградой. В конструкции заряда такая облицовка имеет, как правило, сегментную форму и изготавливается из стали, меди, тантала [1–3]. После инициирования шашки взрывчатого вещества облицовка обжимается и приобретает вид удлиненного тела. Для стабилизации ее полета рекомендуется формировать в хвостовой области аэродинамическую юбку, имеющую переменный по толщине периодический, многовершинный профиль поперечного сечения. Создание такого профиля «ударного ядра» возможно различными способами, основанными на модификации как облицовки [4–6], так и заряда взрывчатого вещества [7]. Исследования показывают [8], 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 десятых долей миллиметра. В работе [8] предлагается получать указанный профиль мето-

дами напыления или наплавки, что достаточно трудоемко и не гарантирует достижения указанной точности. Требуется усовершенствовать процесс изготовления облицовок с периодической разнотолщинностью для достижения заданной точности [9].

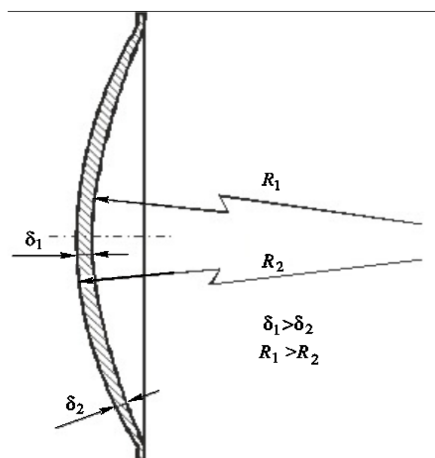
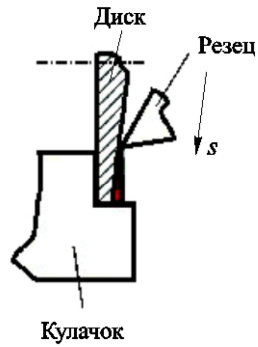


Рис. 1. Сегментная облицовка кумулятивного заряда

В данной работе предложен 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 в окружном направлении образуется переменный по толщине периодический профиль.

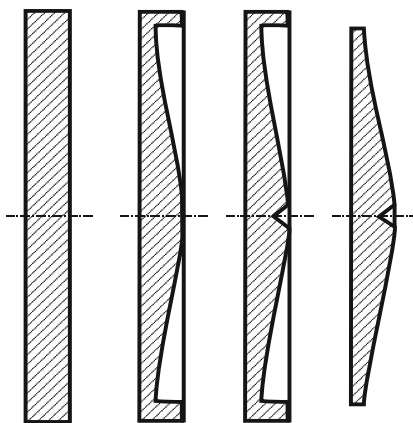
**Методы решения.** Для изготовления облицовки предлагается использовать технологический процесс, включающий в себя операции получения дисковой заготовки (штамповкой или отрезкой от круга), механической обработки дисковой заготовки, штамповки — формовки в эластичную матрицу для придания сегментной формы детали. Требуемый профиль поперечного сечения детали 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 наследоваться деталью после штамповки.

Технологическую операцию механической обработки выполняют на токарном станке при закреплении в трехкулачковом патроне (рис. 2). В качестве заготовки используют дисковую заготовку, полученную вырубкой в штампе или отрезкой из круга соответствующего диаметра. При закреплении тонкостенной дисковой заготовки в трехкулачковом патроне она деформируется под воздействием сил закрепления, и при тчении торцевой поверхности толщина заготовки в окружном направ-



**Рис. 2.** Подрезка торца диска при закреплении в трехкулачковом патроне (заливкой отмечена опасная зона при обработке;  $s$  — направление подачи инструмента)

лении будет переменной. Подрезку торца выполняют подрезным резцом за один или несколько проходов от центра к периферии с постепенным увеличением глубины резания. Получаемая торцовая поверхность будет не плоской, а конической, поскольку у сегментной облицовки толщина в центре детали (в куполе) должна быть больше, чем в области периферии. Для облицовок диаметром до 100 мм 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 небольшая (1...3 мм) и велика вероятность задеть резцом кулачки при обработке периферийной области (см. рис. 2). 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 станет базой и не будет стачиваться в процессе подрезки торца (рис. 3). Ширина бурта для надежного закрепления зависит от обрабатываемого материала, толщины заготовки, диаметра, ее подбирают опытным путем.



**Рис. 3.** Поперечное сечение заготовки на разных переходах обработки

Для последующего удаления технологического бурта на поверхности заготовки формируют центровое отверстие, заготовку переустанавливают в центры и бурт стачивается проходным резцом за несколько проходов (рис. 4).



Рис. 4. Заготовка с буртом (слева) и после обработки без бурта (справа)

**Проведение экспериментов.** Для отработки технологии были проведены эксперименты для получения дисковых деталей диаметром 68 мм, толщиной в центре 3,0...2,5 мм, на периферии 1,5...2,1 мм. В качестве исходных дисковых заготовок использовали 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. Обработку выполняли на токарном станке 1А62. Заготовку устанавливали в трехкулачковом патроне, закрепление выполняли моментным ключом с фиксированным моментом на ключе, при этом силу закрепления регистрировали в каждом эксперименте. Значения момента на ключе при закреплении принимали равными 25; 40; 55; 70; 85 Н·м, эти значения в дальнейшем пересчитывали в силы закрепления. 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 (см. рис. 4). После подрезки торца в заготовке сверлили центровое отверстие, заготовку переустанавливали в центры и стачивали технологический бурт проходным резцом за несколько проходов. При центровке и точении бурта изменений толщины периферийной области диска не происходит.

После обработки для оценки результатов экспериментов выполняли измерения толщины в окружном направлении на радиусе 32 мм (при радиусе заготовки 34 мм) через  $15^\circ$  в 24 точках, у одной из заготовок измеряли толщину в окружном направлении на радиусе 27 мм. Измерения проводили в размеченных точках заготовки на компараторе Аббе с ценой деления 1 мкм. Результаты заносили в таблицу и

затем обрабатывали в табличном редакторе Excel. По результатам измерений определяли толщину в окружном направлении (рис. 5) и разнотолщинность как разницу между текущим значением толщины и минимальным значением в данном направлении.

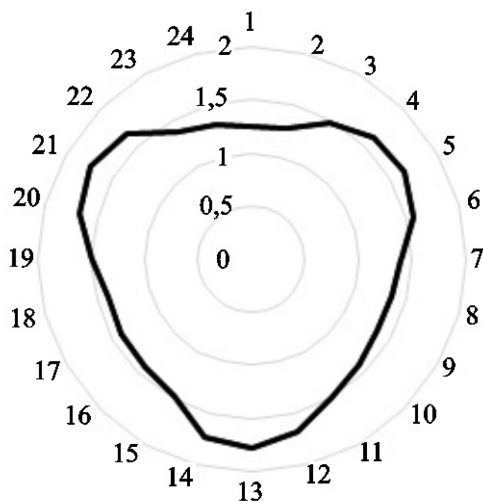


Рис. 5. Толщина заготовки на радиусе 32 мм

**Анализ результатов экспериментов.** Для изучения профиля поперечного сечения в окружном направлении в данной работе использовали гармонический анализ [10]. Согласно методике использования данного подхода применительно к анализу геометрии кумулятивных зарядов [10–12] осуществлялось изучение толщины и разнотолщинности в окружном направлении. При описании периодической функции с помощью ряда Фурье можно выявить наибольшие амплитуды гармоник и объяснить причины их появления. В работах [10–12] гармонический анализ использовали 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 различных операциях изготовления облицовки.

Результаты гармонического анализа значений разнотолщинности облицовки в окружном направлении на радиусе 32 мм от центра представлены на рис. 6. 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 трехвершинный профиль толщины в окружном направлении.

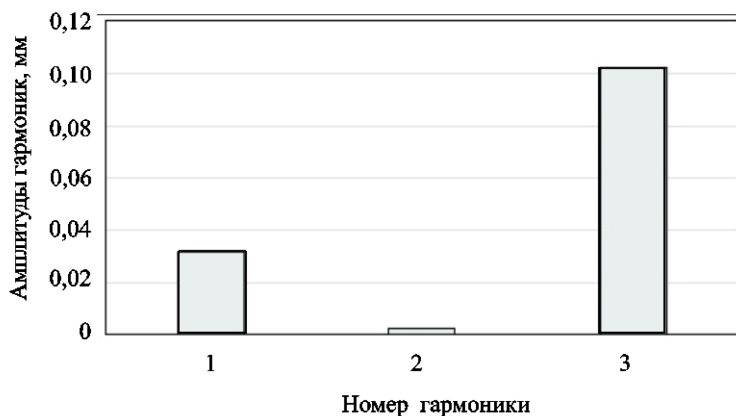


Рис. 6. Амплитуды гармоник разнотолщинности заготовки после ее гармонического анализа

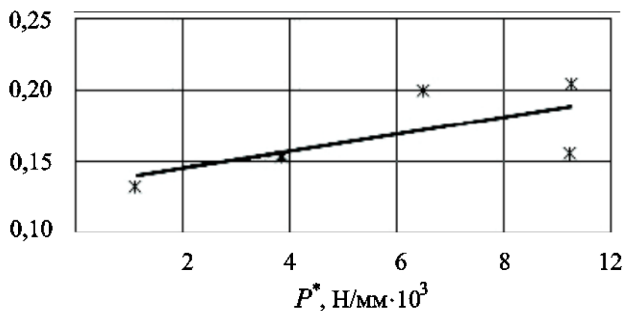


Рис. 7. Зависимость относительной разнотолщинности  $\Delta^*$  заготовки на радиусе 32 мм от силы  $P^*$

Следующим шагом является изучение влияния силы закрепления на разнотолщинность. Результаты исследований представлены на рис. 7. Экспериментальные результаты позволяют построить линейную зависимость

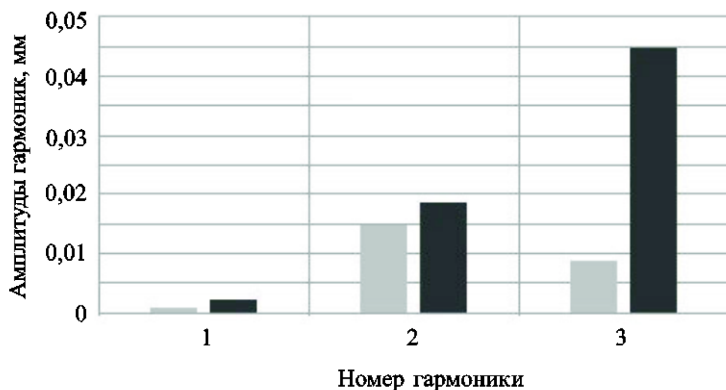
$$\Delta^* = 0,006P^* + 0,1211,$$

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. Отметим, 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 27 и 32 мм (рис. 8).



**Рис. 8.** Амплитуды гармоник разнотолщинности детали в окружном направлении на расстоянии 27 (■) и 32 (■) мм от центра

Как показали результаты анализа, значения амплитуд первой и второй гармоник незначительно увеличиваются, а значения амплитуд третьей гармоники на расстоянии 27 и 32 мм от центра отличаются более чем в 4 раза. Амплитуды первой и второй гармоник растут при увеличении расстояния от центра. Это 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. Такое незначительное увеличение второй гармоники в эксперименте коррелирует с пропорциональным увеличением толщины заготовки от центра к периферии при получении конической поверхности в условиях «изогнутости» заготовки.

Большой интерес вызывает значительное изменение амплитуды третьей гармоники. Можно предположить, что такая разница (более чем в 4 раза) вызвана значительным отклонением заготовки в процессе обработки в осевом направлении под воздействием сил резания, поскольку жесткость заготовки снижается в периферийных областях вследствие, во-первых, увеличения расстояния от точек закрепления и, во-вторых, в результате уменьшения толщины заготовки от центра к периферии. Дальнейшим путем снижения амплитуды третьей гармоники будет поиск способов снижения силы резания в процессе подрезки торца.

В качестве следующей операции технологического процесса изготовления облицовки предлагается применять штамповку дисковой

заготовки в эластичную матрицу, поскольку в дальнейшем детали потребуется придать нужную форму при условии сохранения толщины заготовки и наследования деталью разнотолщинности, сформированной на этапе механической обработки.

**Заключение.** В работе показано, что при изготовлении металлических дисковых заготовок путем механической обработки можно 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 позволит 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.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств. *Наука и образование*, 2012, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (дата обращения 10.12.2016).
- [2] Колпаков В.И., Бандурин И.Н. Особенности формирования высокоскоростных компактных элементов из тяжелых сплавов плоской детонационной волной. *Инженерный вестник*, 2014, № 12. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/744352.html> (дата обращения 10.12.2016).
- [3] Селиванов В.В., ред. *Боеприпасы*. Т. 1. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [4] Bugiel H.G. *Insert for a projectile-forming charge*. US patent 4590861, 27.05.1985, p. 6.
- [5] Aubry J. et al. *Core-forming explosive charge*. US patent 4922825, 08.05.1990, p. 7.
- [6] Weimann K. *Arrangement for production of explosively formed projectiles*. US patent 4982667, 08.01.1991, p. 7.
- [7] Liu J., Gu W., Lu M., Xu H., Wu S. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics. *Defense Technology*, 2014, no. 10, pp. 119–123. DOI 10.1016/j.dt.2014.05.002
- [8] Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Тарасов В.А. Анализ влияния периодических возмущений на формирование высокоскоростных стержневых элементов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 8, с. 8–14.



- [9] Гаврилов А.Н. *Точность производства в машиностроении и приборостроении*. Москва, Машиностроение, 1973, 567 с.
- [10] Круглов П.В., Тарасов В.А., Баскаков В.Д. Научные основы проектирования технологии изготовления прецизионных кумулятивных зарядов. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. III Харитоновские тематические научные чтения: труды Международной конференции*. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2002, с. 254–257.
- [11] Круглов П.В., Тарасов В.А., Баскаков В.Д. 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*. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2003, с. 477–480.
- [12] Круглов П.В., Тарасов В.А., Баскаков В.Д. Математическое моделирование явлений технологической наследственности при изготовлении кумулятивных зарядов. *Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. VII Харитоновские тематические научные чтения: труды Международной конференции*. Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005, с. 645–648.

Статья поступила в редакцию 20.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Круглов П.В., Болотина И.А. Технология изготовления дисковых заготовок переменной толщины для компактных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1674>

*Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XLI Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 24–27 января 2017 г.*

**Круглов Павел Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных публикаций в области технологий специального машиностроения. e-mail: [cm12@sm.bmstu.ru](mailto:cm12@sm.bmstu.ru)

**Болотина Ирина Алексеевна** — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет 8 авторских свидетельств на изобретения, автор более 20 печатных трудов в области технологии машиностроения. e-mail: [cm12@sm.bmstu.ru](mailto:cm12@sm.bmstu.ru)

## Method for manufacturing disk blanks of variable thickness for compact aircraft

© P.V. Kruglov, I.A. Bolotina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper suggests an alternative technique for disc blanks manufacture for segmented edging of the shaped charge. The method enables us to make such a blank in which as the thickness decreases from the center to the periphery, a periodic thickness profile is formed in the circumferential direction. The disc metal blank is fixed in a three-jaw chuck and the end of the disk is trimmed with a decrease in thickness along the generatrix from the center to the periphery. Under the influence of the clamping forces, the disk blank is deformed and, after processing, its cross section has a three-sided periodic profile. We carried out experiments to process disk blanks for different values of the clamping force in the work tool and obtained the dependencies of the disc thickness on the clamping force. After harmonic analysis of the thickness of the cross section, we determined the amplitudes values of harmonics of different thicknesses in the circumferential direction at different distances from the center of the disk blank.*

**Keywords:** harmonic analysis, blank deformation, technological heredity

### REFERENCES

- [1] Kolpakov V.I. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (accessed December 10, 2016).
- [2] Kolpakov V.I., Bandurin I.N. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 12. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/744352.html> (accessed December 10, 2016).
- [3] Selivanov V.V., ed. *Boepripasy [Ammunition]*. Vol. 1. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [4] Bugiel H.G. *Insert for a projectile-forming charge*. US patent 4590861, 27.05.1985, p. 6.
- [5] Aubry J. et al. *Core-forming explosive charge*. US patent 4922825, 08.05.1990, p. 7.
- [6] Weimann K. *Arrangement for production of explosively formed projectiles*. US patent 4982667, 08.01.1991, p. 7.
- [7] Liu J., Gu W., Lu M., Xu H., Wu S. *Defense Technology*, 2014, no. 10, pp. 119–123. DOI 10.1016/j.dt.2014.05.002
- [8] Asmolovsky N.A., Baskakov V.D., Tarasov V.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 8, pp. 8–14.
- [9] Gavrilov A.N. *Tochnost proizvodstva v mashinostroenii i priborostroenii [Production accuracy in mechanical engineering and instrument making]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 567 p.
- [10] Kruglov P.V., Tarasov V.A., Baskakov V.D. *Nauchnye osnovy proektirovaniya tekhnologii izgotovleniya pretsizionnykh kumulyativnykh zaryadov. [Scientific basis for the design of precision shaped charge manufacturing techniques.]. Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii III Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya [Extreme states of matter. Detonation. Shock waves. Proceedings of the*

International Conference: III Khariton topical scientific conference]. Sarov, FGUP RFYaTs-VNIIEF Publ., 2002, pp. 254–257.

- [11] Kruglov P.V., Tarasov V.A., Baskakov V.D. Analiz nasledstvennykh preobrazovaniy tekhnologicheskikh pogreshnostey pri izgotovlenii kumulyativnykh zaryadov. [Analysis of genetic transformation of technological errors in the production of shaped charges]. *Veshchestva, materialy i konstruksii pri intensivnykh dinamicheskikh vozdeystviyakh. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii V Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya* [Substances, materials and designs at intensive dynamic impacts. Proceedings of the International Conference: V Khariton topical scientific conference]. Sarov, FGUP RFYaTs-VNIIEF Publ., 2003, pp. 477–480.
- [12] Kruglov P.V., Tarasov V.A., Baskakov V.D. Matematicheskoe modelirovanie yavleniy tekhnologicheskoy nasledstvennosti pri izgotovlenii kumulyativnykh zaryadov [Mathematical modeling of technological heredity phenomena in the manufacture of shaped charges]. *Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii VII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya* [Extreme states of matter. Detonation. Shock waves. Proceedings of the International Conference: VII Khariton topical scientific conference]. Sarov, FGUP RFYaTs-VNIIEF Publ., 2005, pp. 645–648.

**Kruglov P.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Rocket-and-Space Engineering Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 research publications in the field of technology of special machinery. e-mail: cm12@sm.bmstu.ru

**Bolotina I.A.**, Assistant Lecturer, Rocket-and-Space Engineering Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University. Author of 8 certificates of authorship and over 20 research publications in the field of mechanical engineering. e-mail: cm12@sm.bmstu.ru