

## Совершенствование технологии изготовления дисковых заготовок для металлических облицовок компактных летательных аппаратов

© П.В. Круглов, И.А. Болотина

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

*Представлены результаты экспериментальных исследований технологии изготовления дисковых заготовок с конической поверхностью для металлических облицовок компактных летательных аппаратов. Для получения заготовки необходимо создать периодический профиль поперечного сечения заготовки в окружном направлении при точении ее торца. Рассмотрены несколько вариантов последовательности обработки. Погрешности дисковой заготовки, возникающие в процессе производства, снижены по сравнению с погрешностями в ранее проведенных опытах путем применения сложного маршрута обработки с периодическим охлаждением заготовки. Установлено, что для данных тонкостенных дисковых заготовок деформации, вызванные нагревом при механической обработке, существенно влияют на точность. Предложено ввести охлаждение между проходами точения торца. Определена схема обработки и обоснована конструкция заготовки с широким технологическим буртом, обеспечивающая необходимую точность ее изготовления.*

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

**Введение.** Для пробивания прочных преград используют различные средства, среди которых одно из основных — кумулятивные заряды. К современным кумулятивным зарядам относятся, в частности снарядоформирующие заряды (СФЗ) [1–4]. При взрыве такого заряда из металлической сегментной облицовки небольшой толщины (рис. 1) формируется летательный аппарат, который изменяет свою форму в процессе полета [5–7].

Для обеспечения аэродинамической устойчивости полета аппарату стараются придать такую форму, чтобы в хвостовой части сформировались складки, служащие стабилизаторами [8]. Один из способов создания таких складок заключается в том, чтобы у облицовки, установленной в заряд, заранее создать периодическую разнотолщинную структуру в окружном направлении при одновременном уменьшении толщины в радиальном направлении от центра к периферии [9]. В процессе взрывного формирования из более широких областей поперечного сечения облицовки будут образовываться гребни волн складок, а из более узких — впадины.

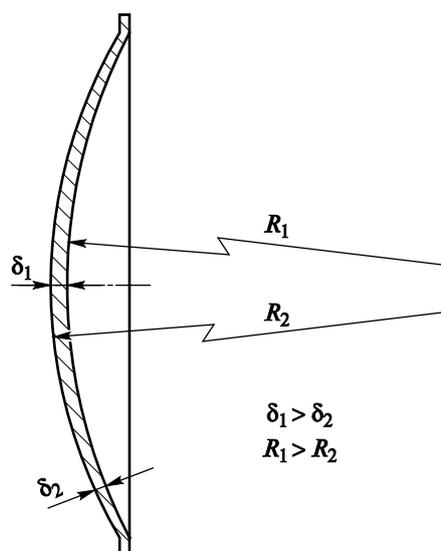


Рис. 1. Сегментная облицовка СФЗ

Особенностью летательного аппарата из таких облицовок является высокая чувствительность к погрешностям изготовления деталей и сборки заряда, влияющая на его отклонение от траектории полета, поэтому точность изготовления облицовки должна быть достаточно высока. Результаты моделирования показывают, что допустимые погрешности отклонения толщины облицовки не должны превышать десятые доли миллиметра [9].

**Постановка задачи.** Для изготовления металлических облицовок предложена технология, состоящая из следующих операций [10]:

- 1) механическая обработка дисковой заготовки с получением необходимого профиля разнотолщинности в окружном и радиальном направлениях;
- 2) штамповка в эластичную матрицу для придания требуемой формы;
- 3) заключительная механическая обработка с обработкой баз под сборку.

Периодический профиль толщины в окружном направлении образуется в результате механической обработки торца дисковой заготовки в приспособлении с регулируемым усилием закрепления.

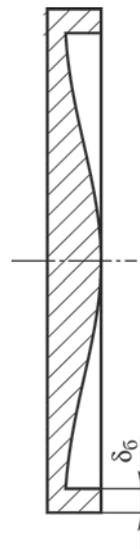
Как показали результаты исследований процесса обработки дисковой заготовки, требуемый профиль получается, если использовать технологию, в которой базирование и закрепление заготовки в приспособлении осуществляется по специальному технологическому бурту, играющему роль технологической базы. Вместе с тем при

оценке толщины полученных дисковых заготовок в окружном направлении с помощью гармонического анализа [11] выявлено существенное доминирование одной из гармоник. Наибольшие амплитуды при этом имеет третья гармоника, что согласуется со схемой закрепления дисковой заготовки в экспериментах — в трехкулачковом патроне. Заготовка под действием сил закрепления деформируется, и после обработки в тех областях заготовки, где она закреплена, толщина оказывается меньше, а между прижимами — больше, что объясняется упругими деформациями заготовки в процессе подрезки торца. Таким образом, причиной появления третьей гармоники служат энергосиловые факторы, возникающие в процессе обработки. Были проведены эксперименты [10], которые показали, что амплитуда третьей гармоники разнотолщинности составляет 0,01 мм, что в 2 раза больше требуемого. В данной работе предложенная ранее технология [10] совершенствуется с целью снизить погрешность толщины облицовки путем изменения последовательности обработки ее поверхностей и уменьшения при этом силы резания и тепловых деформаций.

**Проведение экспериментов и анализ результатов.** Эксперименты проводили с дисковыми заготовками из латуни марки Л63 толщиной  $\delta_3 = 4$  мм и диаметром  $d_3 = 75 \dots 90$  мм. Заготовки обрабатывали на токарном станке 1А62. Деталь имеет диаметр  $d_d = 68$  мм, толщину в центре  $\delta_1 = 2,0 \dots 2,5$  мм, а на периферии  $\delta_2 = 1,5 \dots 2,1$  мм. В процессе закрепления заготовки в трехкулачковом патроне усилие закрепления устанавливали моментным ключом. При обработке глубина  $t$  резания увеличивалась от 1,5 мм в центре до 2,5 мм на периферии диска. Частота вращения шпинделя  $n = 240 \text{ мин}^{-1}$ , поперечная подача  $s = 0,125$  мм/об. Ширина  $\delta_6$  технологического бурта составляла 2,5...11,0 мм на сторону (рис. 2 и 3).

Для изготовления конической поверхности детали рассматривали несколько схем, которые кратко описаны ниже. После получения конической поверхности выполняли переустанов заготовки с закреплением в центрах и точение наружной цилиндрической поверхности (удаление технологического бурта) до диаметра детали  $d_d = 68$  мм.

Особенностью схем, представленных в данной работе, является переустанов заготовки между проходами с ее поворотом в азимутальном направлении на  $60^\circ$ . Такое действие позволяет снизить амплитуду третьей гармоники разнотолщинности заготовки, поскольку при каждом проходе толщина заготовки в зоне закрепления кулачками снижается



**Рис. 2.** Дисковая заготовка с технологическим буртом шириной  $\delta_6$

больше, чем толщина в зоне между кулачками. В рассматриваемых схемах припуск удаляли за два-три прохода. Глубину резания при каждом проходе выбирали в зависимости от числа проходов так, чтобы весь припуск при этом был снят.

Рассмотрим подробнее схемы обработки дисковой заготовки.

*Схема 1.* На дисковой заготовке диаметром  $d_3 = 75$  мм протачивают торец от периферии к центру, оставляя технологический бурт шириной  $\delta_6 = 3,5$  мм, после чего заготовку переустанавливают с поворотом в азимутальном направлении на  $60^\circ$  и тот же торец протачивают повторно.

*Схема 2.* На дисковой заготовке диаметром  $d_3 = 75$  мм протачивают торец 1 от центра к периферии (далее во всех схемах), заготовку переустанавливают на обработанный торец с поворотом в азимутальном направлении на  $60^\circ$  и протачивают торец 2 первым проходом, оставляя бурт шириной  $\delta_6 = 3,5$  мм. После этого заготовку переустанавливают с поворотом еще на  $60^\circ$  и торец 2 протачивают вторым проходом.

*Схема 3.* На дисковой заготовке диаметром  $d_3 = 75$  мм протачивают торец 1 первым проходом, оставляя бурт шириной  $\delta_6 = 3,5$  мм, далее протачивают еще двумя проходами с промежуточными переустановками и поворотом детали на  $60^\circ$ .

*Схема 4.* На дисковых заготовках протачивают торец 1, затем заготовки переустанавливают на обработанный торец, поворачивают в азимутальном направлении на  $60^\circ$  и протачивают торец 2, оставляя бурт. Обрабатывают три заготовки со следующими параметрами:

- а)  $d_3 = 90$  мм,  $\delta_6 = 11$  мм;
- б)  $d_3 = 90$  мм,  $\delta_6 = 2,5$  мм;
- в)  $d_3 = 80$  мм,  $\delta_6 = 6$  мм.

*Схема 5.* На дисковой заготовке диаметром  $d_3 = 90$  мм протачивают торец 1, далее заготовку переустанавливают на обработанный торец с поворотом в азимутальном направлении на  $60^\circ$ , затем, оставляя бурт шириной  $\delta_6 = 11$  мм, протачивают торец 2 за три прохода с поворотом заготовки на  $60^\circ$  и охлаждением до комнатной температуры между проходами. После обработки торца 2 повторно обрабатывают торец 1.

После обработки по указанным схемам толщина деталей в 24 точках в окружном направлении на радиусе 32 мм была измерена компаратором Аббе с точностью 1 мкм. Далее результаты измерений толщины обрабатывались с помощью гармонического анализа по методике, изложенной в работах [12–14]. Амплитуды гармоник разнотолщинности, полученные после гармонического анализа, показаны на рис. 4–6.



Рис. 3. Заготовки с узким (а) и широким (б) технологическим буртом

При использовании схем 1–4 наибольший вклад в разнотолщинность вносит третья гармоника. Исключение составляет схема 5, в которой амплитуда третьей гармоники получилась заметно ниже и практически сравнялась с амплитудами первой и второй гармоник.

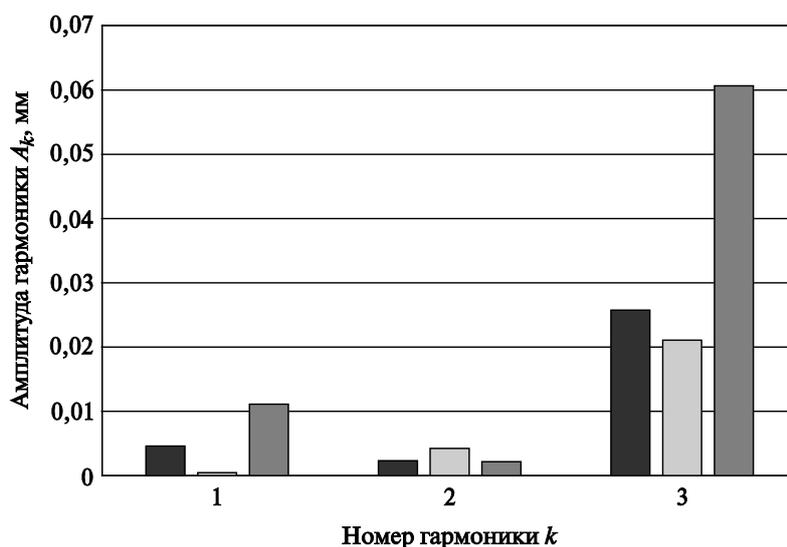


Рис. 4. Амплитуды гармоник разнотолщинности заготовки при обработке по схемам 1 — (■), 2 — (▒), 3 — (■)

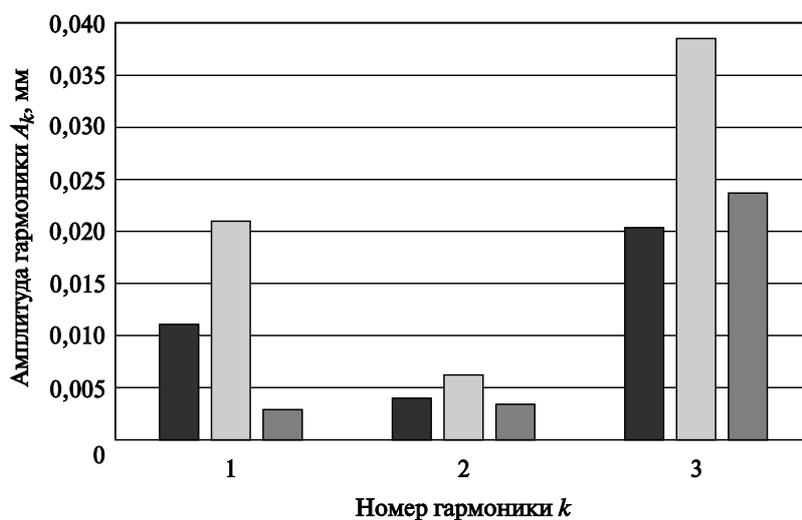


Рис. 5. Амплитуды гармоник разнотолщинности заготовки при обработке по схемам 4а — (■), 4б — (□), 4в — (▒)

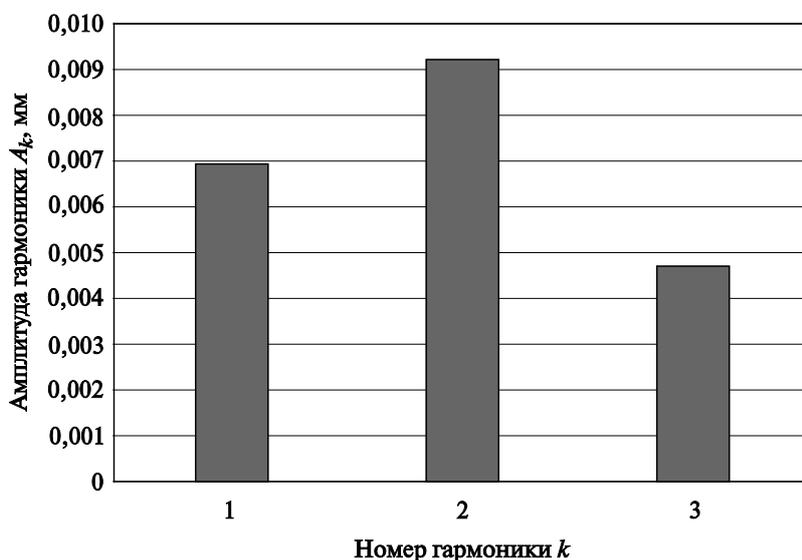


Рис. 6. Амплитуды гармоник разнотолщинности заготовки при обработке по схеме 5

Для сравнения на рис. 7 показаны амплитуды третьей гармоники разнотолщинности облицовки при различных схемах обработки. Наиболее эффективной оказалась схема 5, позволяющая снизить амплитуду третьей гармоники до 0,005 мм, т. е. до значения более чем в 3 раза меньше амплитуды  $A_3$  при использовании других схем.

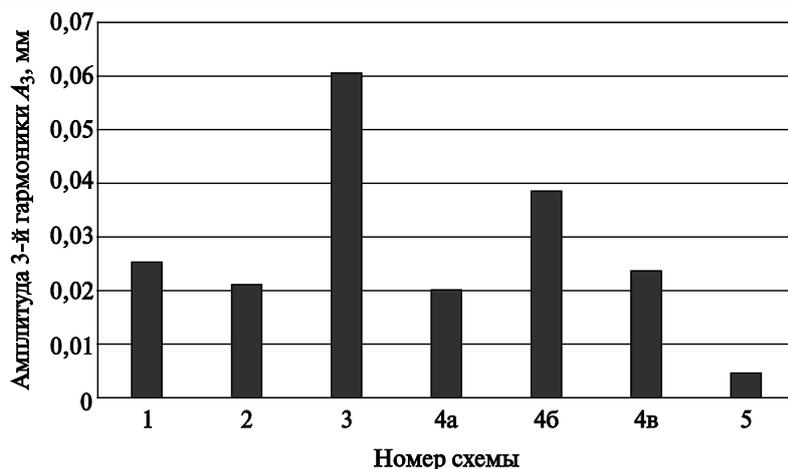


Рис. 7. Амплитуды третьей гармоники разнотолщинности заготовок, обработанных по различным схемам

При обработке была выявлена следующая особенность: на конической поверхности детали после второго прохода остались необработанные участки (рис. 8). Эти участки располагались в зоне закрепления кулачками при первом проходе (показаны стрелками). Второй проход выполнялся после поворота детали в азимутальном направлении на  $60^\circ$  и переустановки. Появление таких следов свидетельствует о том, что деформации в результате закрепления тонкостенной детали велики и при снятии небольшого припуска при втором проходе разнотолщинность не ликвидируется, т. е. необходим еще один, третий проход (рис. 9).



Рис. 8. Деталь с необработанными зонами между переходами



Рис. 9. Дисковая заготовка для облицовки компактного летательного аппарата после обработки

Наилучший эффект схемы 5 может быть объяснен дополнительной, повторной обработкой торца 1 после обработки торца 2, а также охлаждением заготовки в перерывах между проходами, поскольку термические деформации заготовки, возможно, будут велики.

Оценим тепловое расширение латунных дисковых заготовок диаметром  $d_3 = 68 \dots 90$  мм. С учетом того что термический коэффициент линейного расширения латуни составляет  $\alpha = 1,9 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ , увеличение периметра  $\Delta L$  детали при ее начальной температуре  $T_1 = 20$  °С и достижении в процессе обработки температуры  $T_2 = 100$  °С может составлять  $0,32 \dots 0,43$  мм. Пренебрегая тепловой деформацией кулачков, предположим, что удлинение  $\Delta L$  периметра приводит к равномерно распределенному изгибу периферийной области заготовки в поперечном направлении между кулачками. Поскольку удлинение — величина достаточно малая, примем, что прогиб заготовки между кулачками равен удлинению участка периметра между ними. Исходя из вышесказанного, получим, что разнотолщинность заготовки в области кулачков и в зоне между ними ориентировочно составляет  $0,10 \dots 0,14$  мм. Если оценить амплитуду третьей гармоники как  $1/6$  разнотолщинности, то тепловое расширение способно изменять амплитуду третьей гармоники на  $0,018 \dots 0,023$  мм. Поэтому охлаждение заготовки между обработками позволяет уменьшить влияние тепловых деформаций на разнотолщинность детали и повысить точность обработки.

Сравнивая между собой результаты обработки по схеме 2 заготовок, имеющих различную ширину технологического бурта, установили, что предположение о влиянии ширины технологического бурта на точность обработки, высказанное в работе [10], экспериментально подтверждается. Таким образом, для повышения жесткости заготовки и, как следствие, уменьшения поперечных упругих деформаций в процессе резания, приводящих к появлению периодической разнотолщинности, необходимо использовать широкий технологический бурт.

**Заключение.** За счет изменения конструкции заготовки, технологических параметров и последовательности обработки поверхностей удалось в 2 раза снизить погрешность толщины поперечного сечения металлической облицовки компактного летательного аппарата по сравнению с погрешностью, полученной в предыдущих опытах. Анализ результатов экспериментов показал, что существенную роль в формировании погрешности толщины тонкостенной заготовки играют тепловые процессы. Выбор заготовки с широким технологическим буртом, применение охлаждения и многопроходной обработки поверхностей позволяют снизить амплитуду третьей гармоники разнотолщинности поперечного сечения заготовки облицовки и достичь требуемых показателей точности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Селиванов В.В., ред. *Боеприпасы*. В 2 т. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 506 с.
- [2] 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).
- [3] Круглов П.В., Колпаков В.И. Закономерности взрывного формирования удлиненных высокоскоростных элементов из стальных сегментных облицовок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 12. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>
- [4] Михалев А.Н. Формируемые взрывом снаряды: аэродинамические свойства и методики формирования (обзор по данным зарубежных работ). *ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Препринт*. Санкт-Петербург, 2004, № 1775, 38 с.
- [5] Bugiel H.G. *Insert for a projectile-forming charge*. US patent 4590861, 27.05.1985, p. 6.
- [6] Aubry J., Durand R.J., Kerdraon A.L., Solve G. *Core-forming explosive charge*. US patent 4922825, 08.05.1990, p. 7.
- [7] Weimann K. *Arrangement for production of explosively formed projectiles*. US patent 4982667, 08.01.1991, p. 7.
- [8] Liu J., Gu W., Lu M., Xu H., Wu S. Formation of explosively formed penetrator with fins and its flight characteristics. *Defense Technology*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 119–123. DOI: 10.1016/j.dt.2014.05.002 (дата обращения 16.02.2018).
- [9] 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.
- [10] Круглов П.В., Болотина И.А. Технология изготовления дисковых заготовок переменной толщины для компактных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1674>
- [11] Гаврилов А.Н. *Точность производства в машиностроении и приборостроении*. Москва, Машиностроение, 1973, 567 с.
- [12] 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. Тр. междунар. конф.* Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2002, с. 254–257.
- [13] 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. Тр. междунар. конф.* Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2003, с. 477–480.
- [14] 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. Тр. междунар. конф.* Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005, с. 645–648.

Статья поступила в редакцию 06.03.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Круглов П.В., Болотина И.А. Совершенствование технологии изготовления дисковых заготовок для металлических облицовок компактных летательных аппаратов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-8-1787>

*Статья подготовлена по материалам доклада,  
представленного на XLII Академических чтениях по космонавтике,  
посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся  
отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства,  
Москва, 23–26 января 2018 года*

**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: [kp17@bmstu.ru](mailto:kp17@bmstu.ru)

**Болотина Ирина Алексеевна** — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 20 печатных трудов в области технологии машиностроения. Имеет 8 авторских свидетельств на изобретения.

## Improvement in the technology of manufacturing disk workpieces for metal lining of compact aircrafts

© P.V. Kruglov, I.A. Bolotina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article presents the results of experimental studies of the manufacturing technology for disk workpieces with a conical surface for metal lining of compact aircrafts. To obtain the workpiece, it is necessary to create a periodic profile of the cross section of the workpiece in the circumferential direction when turning its end. Several variants of the work sequence are considered. The errors of the disk workpiece occurring in the production process are reduced comparing with the errors in the previous experiments with a complex treatment route and periodic cooling the workpiece. It was found that deformations of these thin-walled disk workpieces due to machining heating significantly affect the accuracy. Cooling is proposed to introduce between the end-turning passes. The treatment scheme is determined and the design of the workpiece with a wide technological shoulder is justified, ensuring the necessary accuracy of its manufacture.*

**Ключевые слова:** *harmonic analysis, workpiece deformation, technological heredity, work sequence*

### REFERENCES

- [1] Selivanov V.V., ed. *Boepripasy. V 2 tomakh. Tom 1* [Ammunition. In 2 volumes. Vol. 1]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 506 p.
- [2] Kolpakov V.I. *Nauka i obrazovanie: elektronnyy nauchno-tehnicheskii zhurnal — Science and Education: Electronic Scientific and technical Journal*, 2012, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (accessed December 10, 2016).
- [3] Kruglov P.V., Kolpakov V.I. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 12. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1714>.
- [4] Mikhalev A.N. *Formiruemye vzryvom snaryady: aerodinamicheskie svoystva i metodiki formirovaniya (obzor po dannym zarubezhnykh работ)* [Projectiles formed by the blast: aerodynamic properties and methods of formation (overview of foreign works)]. *Ioffe Institute Publ. Preprint*. St. Petersburg, 2004, no. 1775, 38 p.
- [5] Bugiel H.G. *Insert for a projectile-forming charge*. US patent no. 4590861, 27.05.1985, 6 p.
- [6] Aubry J., Durand R.J., Kerdraon A.L., Solve G. *Core-forming explosive charge*. US patent no. 4922825, 08.05.1990, 7 p.
- [7] Weimann K. *Arrangement for production of explosively formed projectiles*. US patent no. 4982667, 08.01.1991, 7 p.
- [8] Liu J., Gu W., Lu M., Xu H., Wu S. *Defense Technology*, 2014, vol. 10, no. 2, pp. 119–123. DOI:10.1016/j.dt.2014.05.002 (accessed February 16, 2018).
- [9] Asmolovsky N.A., Baskakov V.D., Tarasov V.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 8, pp. 8–14.
- [10] Kruglov P.V., Bolotina I.A. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 9. Available at: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1674>

- [11] Gavrilov A.N. *Tochnost proizvodstva v mashinostroenii i priborostroenii* [Precision of production in machine building and instrument making]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 567 p.
- [12] Kruglov P.V., Tarasov V.A., Baskakov V.D. Nauchnye osnovy roektirovaniya tekhnologii izgotovleniya pretsizionnykh kumulyativnykh zaryadov. [Scientific foundations of the manufacturing technology design for the precision shaped charges.]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii III Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya "Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny"* [Proceedings of the international conference III Kharitonov Thematic Scientific Readings "Extreme states of matter. Detonation. Shock Waves"]. Sarov, FGUP "RFYaTs-VNIIEF" Publ., 2002, pp. 254–257.
- [13] Kruglov P.V., Tarasov V.A., Baskakov V.D. Analiz nasledstvennykh preobrazovaniy tekhnologicheskikh pogreshnostey pri izgotovlenii kumulyativnykh zaryadov. [Analysis of hereditary transformations of technological errors in the manufacture of shaped charges.]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii V Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya "Veshchestva, materialy i konstruksii pri intensivnykh dinamicheskikh vozdeystviyakh"* [Proceedings of the international conference V Kharitonov Thematic Scientific Readings "Substances, materials and structures under intensive dynamic effects"]. Sarov, FGUP "RFYaTs-VNIIEF" Publ., 2003, pp. 477–480.
- [14] Kruglov P.V., Tarasov V.A., Baskakov V.D. Matematicheskoe modelirovanie yavleniy tekhnologicheskoy nasledstvennosti pri izgotovlenii kumulyativnykh zaryadov. [Mathematical modeling technological heredity phenomena in the manufacture of shaped charges.]. *Trudy mezhdunarodnoy konferentsii VII Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya "Ekstremalnye sostoyaniya veshchestva. Detonatsiya. Udarnye volny"* [Proceedings of the international conference VII Kharitonov Thematic Scientific Readings "Extreme states of matter. Detonation. Shock Waves"]. Sarov, FGUP "RFYaTs-VNIIEF" Publ., 2005, pp. 645–648.

**Kruglov P.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Technologies of Space-Rocket Building, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 40 research publications in the field of specialized machinery technology.  
e-mail: kpv17@bmstu.ru

**Bolotina I.A.**, Assistant, Department of Technologies of Space-Rocket Building, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 20 research publications and 8 inventor's certificates in the field of manufacturing engineering.