

УДК: 623.452.31

**АНАЛИЗ ТОЧНОСТНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕХНОЛОГИЙ  
ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПО ТОЛЩИНЕ МЕНИСКОВЫХ  
КУМУЛЯТИВНЫХ ОБЛИЦОВОК**

**ANALYSIS OF PRODUCTION ACCURACY CAPABILITIES  
MENISCUS LINERS**

*В.Д. Баскаков, О.В. Зарубина, К.А. Карнаухов, чл.-корр. РАН В.А. Тарасов*

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

*V.D. Baskakov, O.V. Zarubina, K.A. Karnaukhov, V.A. Tarasov*

Для повышения точности попадания в цель высокоскоростных удлиненных поражающих элементов в их кормовой части целесообразно формировать четко выраженные складки при взрыве снарядоформирующих зарядов. Одним из перспективных способов создания складчатой кормовой части является применение в снарядоформирующих зарядах менисковых кумулятивных облицовок с переменной толщиной в окружном и радиальном направлениях. В статье представлены результаты экспериментальных исследований разнотолщинности облицовок при их локальном утонении в краевой области с помощью электрохимической и механической обработки.

**Ключевые слова:** снарядоформирующий заряд, менисковая кумулятивная облицовка, удлиненный поражающий элемент, складки.

To increase accuracy of hitting explosively formed projectile in their stern need to form clearly defined folds during explosion of projectile-forming charges. One promising way to create a folded stern is to use meniscus liners with a thickness in the circumferential and radial directions in projectile-forming charges. The article presents the results of experimental studies of liners thicknesses with their local thinning in the edge region using electrochemical and mechanical processing.

**Keywords:** projectile-forming charge, meniscus liner, explosively formed projectile, folds.

Для поражения бронированной техники весьма перспективными являются боеприпасы, оснащенные снарядоформирующими зарядами (СФЗ), при взрыве которых из низкопрофильных облицовок образуются высокоскоростные удлиненные поражающие элементы (УПЭ) [1]. Для повышения точности попадания таких УПЭ в преграду в их кормовой части целесообразно формировать складки, выполняющие функции «стабилизатора» [2]. При этом складки можно получить различными способами, в том числе, применяя в СФЗ менисковые кумулятивные облицовки переменной толщины как в окружном, так и в радиальном направлениях [3, 4].

Проведенные исследования показывают, что для одновременного обеспечения аэродинами-

ческой устойчивости УПЭ на полете к преграде и сохранения его целостности максимальный перепад толщины облицовки в области, ответственной за формирование складок, не должен превышать 20 %, а саму область следует располагать в краевой части облицовки [4]. При этом окружную разнотолщинность облицовки в областях постоянной толщины целесообразно обеспечить при изготовлении минимально возможной, что будет способствовать дополнительной стабилизации УПЭ при полете к преграде [2, 5]. Кроме того, технологии профилирования облицовок по толщине не должны существенно повышать трудоемкость их изготовления, а также должны обеспечивать нанесение рельефа как со стороны наружной, так и со стороны внутрен-

ней поверхности облицовки. В этой связи, круг возможных рациональных технологий профилирования представляется весьма ограниченным и ориентированным на высокопроизводительные методы съема металла.

В статье рассматривается вопрос — обоснования рациональной технологии изготовления менисковых облицовок переменной толщины в окружном и радиальном направлениях на основе сравнительного анализа точностных возможностей электрохимической (ЭХО) и механической размерных обработок облицовок по толщине.

### Анализ точностных возможностей электрохимической обработки

ЭХО подвергались облицовки толщиной  $\delta = 2,3$  мм, диаметром основания  $d = 60$  мм с радиусом кривизны  $R_0 = 50$  мм. Разностенность (окружная разнотолщинность) менисковых облицовок, изготовленных штамповкой из дисковых заготовок в инструментальном штампе, до ЭХО не превышала  $P_\delta = 0,03$  мм. Материал облицовок — низкоуглеродистая пластичная сталь.

Для получения переменной толщины в окружном и радиальном направлениях менисковой облицовки с помощью ЭХО была разработана и изготовлена оснастка (рис. 1), которая состояла из стального электрода-инструмента 1 с центральным отверстием, предназначенным для подачи электролита; корпуса 2 со сквозными отверстиями на цилиндрической части для прокачки электролита; основания 3, сопрягаемого с поверхностью облицовки и обеспечивающего обтекание электролитом обрабатываемой периферийной части заготовки;

прижима 4 и отбойника 5. На нижней поверхности основания 3 были выполнены каналы для симметричной подачи электролита через электрод-инструмент. В качестве прижима 4 использовался стальной пуансон, аналогичный тому, который использовался для штамповки облицовок. Отбойник 5 был предназначен для равномерного стекания электролита в вертикальном положении через гарантированный зазор (рис. 1). Электролит прокачивался по внутренним каналам оснастки и не просачивался через сопрягаемые зазоры деталей. Корпус 2, основание 3, отбойник 5 были изготовлены селективным лазерным спеканием из пористого полиамида [6]. ЭХО, по рекомендациям работы [4], подвергались зоны менисковой облицовки, расположенные за контуром вписанного шестиугольника.

Для обработки стальных менисковых облицовок в качестве электролита использовался водный раствор NaCl с концентрацией 150 г/л. Скорость подачи электролита составляла 1500 м/мин., что предотвращало скапливание в межэлектродном зазоре продуктов химических реакций [7, 8].

Обработка проводилась при комнатной температуре на станке ПАУЗ-1 при следующих технологических условиях и режимах: рабочее напряжение 15 В; сила тока 4 А; время обработки 8,5 мин. Толщина менисковых облицовок после ЭХО измерялась в контрольных точках, расположенных на обработанных поверхностях.

Математическое ожидание толщины менисковых облицовок в контрольных точках после ЭХО составляла  $m_\delta = 2,05$  мм, а дисперсия  $\sigma_\delta = 0,0007$ . Окружная разнотолщинность в зонах обработки достигала значения  $P_\delta = 0,15$  мм.

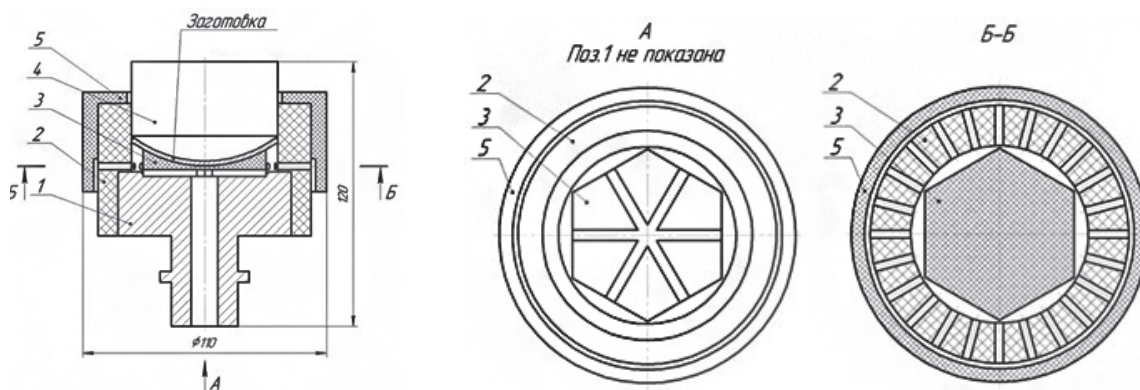


Рис. 1. Схема приспособления для ЭХО менисковой облицовки:

1 — электрод-инструмент; 2 — корпус; 3 — основание; 4 — прижим; 5 — отбойник

В целом, проведенные исследования ЭХО позволили сделать вывод о том, что данный метод обработки является весьма производительным для формирования зон уменьшений толщины на стальных менисковых облицовках, однако ЭХО способствовала увеличению окружной разнотолщинности  $P_8$  облицовок, что негативно скажется на точность попадания УПЭ в преграду, а также на их целостность [1–4]. Кроме того, ЭХО малоэффективна для размерной обработки деталей из химически стойких металлов, в том числе сплавов на основе тантала, рекомендуемых в качестве перспективных материалов для менисковых облицовок.

### Точностные возможности технологии изготовления облицовок на основе предварительной механической обработки дисковых заготовок

Альтернативным способом изготовления менисковой облицовки переменной толщины в окружном и радиальном направлениях в краевой области являлся технология предварительной механической обработки плоских дисковых заготовок с последующей штамповкой менисков двумя способами: в инструментальном штампе и пластичным металлом (свинцом).

Механической обработке подвергались плоские дисковые заготовки толщиной  $\delta = 2,2$  мм и диаметром  $d = 60$  мм. Их окружная разнотолщинность не превышала  $P_8 = 0,03$  мм.

Съем металла на плоских дисковых заготовках за контуром вписанного шестиугольника был реализован на фрезерно-гравировальном станке «Роутер 3020».

Фрезерование проводилось при следующих технологических режимах: частота вращения шпинделя  $n = 5000$  об/мин, подача фрезы  $s = 40$  мм/мин, боковой съем металла при каждом проходе составлял не более 1 мм. Рабочий ход обрабатывающего инструмента состоял из поступательного движения вдоль сторон вписанного шестиугольника. Боковой съем осуществлялся последовательно в направлении от периферии к центру плоской дисковой заготовки. Фрезерование проводилось двузубой торцевой фрезой диаметром 4 мм. Номинальная глубина снимаемого металла на заготовках составляла 0,4 мм. Каждая заготовка обрабатывалась новой фрезой (рис. 2).

Заготовка 4 располагалась на опорной плите 5 и координировалась на столе 1 станка с помощью штифта 2. Закрепление заготовки осуществлялось с помощью прижима 6, болта 7, гайки 8 и упора 9. Для обеспечения доступа фрезы 3 к любому краю заготовки осуществлялось ее перекрепление при обработке (рис. 2).

Исследование предварительной механической обработки плоских дисковых заготовок показало, что математическое ожидание толщины в зонах обработки составляло  $m_8 = 1,83$  мм, а дисперсия  $\sigma_8 = 0,0005$ . Окружная разнотолщинность в зонах обработки принимала значение  $P_8 = 0,1$  мм. Такое высокое значение окружной разнотолщинности могло быть связано с нестабильностью упругого отжатия фрезы от заготовки вследствие малой жесткости технологической системы, а также с износом фрезы.

После механической обработки дисковые профилированные заготовки подвергались штамповке. Наиболее очевидной технологией формообразования низкопрофильной менисковой облицовки из плоской профилированной по толщине заготовки являлась штамповка в инструментальном штампе (рис. 3). Для нее характерны два следующих основных недостатка.

1. На промежуточной стадии штамповки (рис. 3, б) сила со стороны пуансона на заготовку передается через ее центральную часть, что приводит, в итоге, к утонению менисковой облицовки в куполе и утолщению в основании. С такой меридиональной разнотолщинностью сложно бороться. Для ее снижения можно, например, применять для штамповки дисковые заготовки с уменьшением толщины в направлении от центра к краю по линейному закону [9]. Однако реализация такого

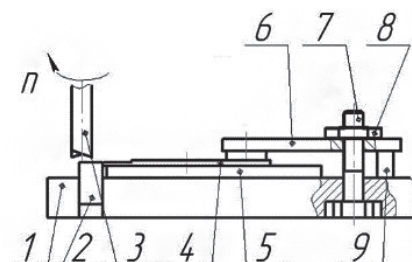


Рис. 2. Технологическая схема обработки плоской дисковой заготовки фрезерованием: 1 — стол станка; 2 — координирующий штифт; 3 — фреза; 4 — плоская дисковая заготовка; 5 — опорная площадка; 6 — прижимная планка; 7 — болт; 8 — гайка; 9 — упор

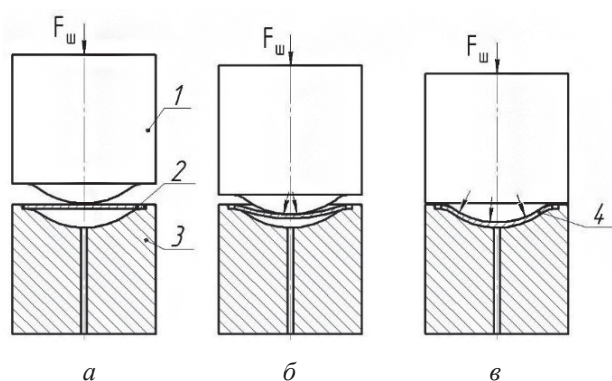


Рис. 3. Стадии штамповки менисковой облицовки в инструментальном штампе: а — исходное положение оснастки и заготовки; б — промежуточная стадия штамповки; в — завершающая стадия штамповки; 1 — пуансон; 2 — заготовка; 3 — матрица; 4 — отштампованная облицовка

уменьшения толщины требует специальной технологической оснастки и должна предшествовать профилированию заготовки по толщине в крайних областях, что может привести к существенному ухудшению технико-экономических показателей производства менисковых облицовок.

2. На заключительной стадии штамповки (рис. 3, в) сформировавшаяся переменность толщины облицовки вдоль меридиана в совокупности с геометрическими погрешностями дисковой заготовки и штамповой оснастки не позволяет обеспечить плотное прилегание облицовки к рабочим поверхностям штампа. Если дисковая заготовка имеет области разной толщины, то ее неприсоединение к сферическим поверхностям пуансона и матрицы усилится, что приведет к значительным отклонениям формы облицовки от номинального мениска.

Для исключения неравномерного прилегания заготовки к поверхностям штампа весьма перспективна технология штамповки менисковых облицовок из дисковых профилированных заготовок, основанная на использовании пластичной передаточной среды (свинца) (рис. 4) [10, 11].

Эта технология характеризуется меньшими, по сравнению со штамповкой в инструментальном штампе, затратами на технологическую оснастку, простой адаптации практически к любой серийности производства, а также плотным прилеганием штампуемой детали к рабочей поверхности матрицы.

Штамповка облицовок в инструментальном штампе проводилась на прессе КУРЬ63, а свинцом — на прессе Д2430Б. На заключительной стадии штамповки давление на облицовку составляло 40 МПа и 100 МПа, соответственно. Зоны обработки дисковых заготовок располагались со стороны пуансона или свинца. Частота появления в разряде толщины в зонах механической обработки облицовок после штамповки двумя разными методами представлены на рис. 5.

Анализ полученных результатов показывает, что при штамповке в инструментальном штампе происходит увеличение математического ожидания толщины периферийной части на величину  $\Delta m_g = 0,05$  мм (рис. 5, а), т.е. фланец менисковой облицовки после штамповки в инструментальном штампе увеличивается по толщине. При штамповке свинцом толщина в области механической обработки облицовки практически не изменяется ( $\Delta m_g = 0$ ) и приблизительно равна толщине зон механической обработки дисковых профилированных заготовок (рис. 5, б).

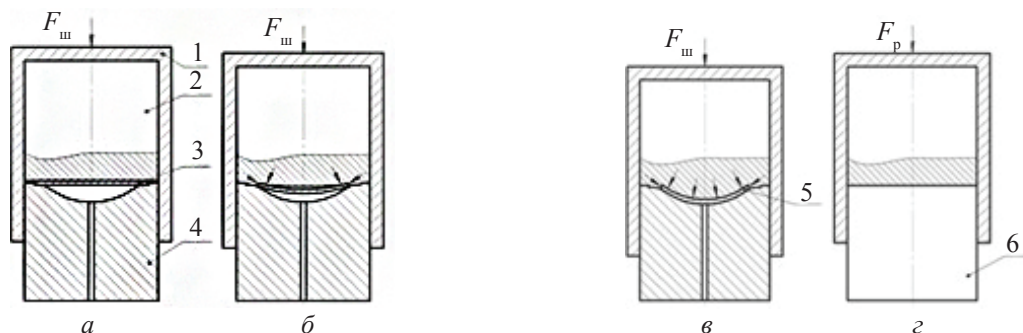


Рис. 4. Стадии штамповки менисковой облицовки свинцом: а — исходное положение оснастки и заготовки; б — промежуточная стадия штамповки; в — завершающая стадия штамповки; г — разглаживание свинца; 1 — контейнер; 2 — свинец; 3 — заготовка; 4 — матрица; 5 — разглаживатель свинца

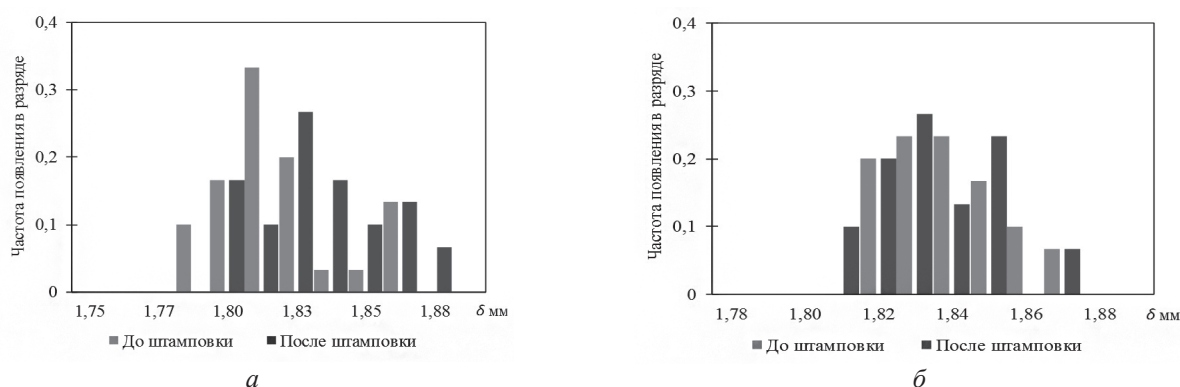


Рис. 5. Частота появления фактической толщины в зонах механической обработки при штамповке в инструментальном штампе (а) и свинцом (б)

### Выводы

Экспериментально установлено, что технология предварительной механической обработки дисковых плоских заготовок по толщине с последующей штамповкой пластичным металлом (свинцом) менисковых облицовок является более высокоточной по сравнению с ЭХО и может быть рекомендована для практической реализации. При этом для снижения окружной разнотолщинности в областях уменьшенной толщины облицовок целесообразно при механической обработке заготовок применять оборудование повышенной жесткости.

### Литература

1. Селиванов В.В., ред. Боеприпасы. В 2 т. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. Т. 1. 506 с.
2. Бабурин М.А., Елисеев С.В., Карнаухов К.А., Тарасов В.А. Обоснование целесообразной формы кормовой части удлиненных ударных ядер // Известия РАН. 2020. № 110. С. 94–99.
3. Асмоловский Н.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. Анализ влияния технологических погрешностей менисковых облицовок на динамику взрывного формирования высокоскоростных стержневых элементов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2015. № 5 (104). С. 72–86.
4. Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Елисеев С.В., Карнаухов К.А., Тарасов В.А. Численный анализ управляемой потери устойчивости пологих менисковых облицовок при высокоскоростном обжати // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2019. № 4. С. 22–39. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-4-22-39.

5. Тарасов В.А., Колпаков В.И., Софьин А.С. и др. Методика оценки влияния погрешностей конструкции снарядоформирующих зарядов на кучность попадания в цель и пробивное действие удлиненных поражающих элементов // Оборонная техника. 2010. № 1–2. 90 с.

6. Литунов С.Н., Слободенюк В.С., Мельников Д.В. Обзор и анализ аддитивных технологий. Часть 1 // Омский научный вестник. 2016. № 145. С. 12–17.

7. Киселев М.Г. Электрофизические и электрохимические способы обработки материалов / Киселев М.Г., Мрочек Ж.А., Дроздов А.В. — Москва: НИЦ ИНФРА-М. Нов. Знание. 2014. 389 с.

8. Конькова А.О. Комплексное моделирование процесса электрохимической обработки // Политехнический молодежный журнал. 2016. № 1. С. 1–8.

9. Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.В. Вытяжка металлофторопластовых втулок из дисковых заготовок переменной толщины // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2015. № 7. С. 16–22.

10. Бабурин М.А., Герасимов Н.В., Зарубина О.В., Тарасов В.А. и др. Анализ формоизменения заготовок при вытяжке полусферических деталей с применением промежуточных деформируемых сред // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 7. С. 21–24.

11. Фёдоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М., Курепин А.Е., Горбунков А.А., Пирозерский А.С. и др. Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой типа полусфера — цилиндр дегрессивной толщины // Физика горения и взрыва. 2017. Т. 53. № 4. С. 122–125.