

УДК 658.512:67.02

DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-34-50

## Эволюционное развитие импульсных технологий в производстве крупногабаритных деталей ракетной техники\*

**В. Ф. Уразбахтин**, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**А. В. Щенятский**, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

**Ф. А. Уразбахтин**, доктор технических наук, профессор, Воткинский филиал ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Воткинский, Россия

*Представлен аналитический обзор исследований создания и развития перспективного метода формообразования крупногабаритных узлов из труднообрабатываемых деталей – штамповки взрывом, начиная с 50-х годов XX века и по настоящее время, по результатам которого установлено следующее.*

*Источником силового воздействия при штамповке взрывом является заряд бризантного взрывчатого вещества. Он является важным фактором проявления критичностей при пластическом деформировании заготовки из титанового сплава. Причины их возникновения может быть достаточно много, и они учтены исследователями, но только каждое в отдельности. В то же время процесс создания силового воздействия является сложным, особенно в условиях водной среды бассейна. Однако в любых условиях процесс штамповки взрывом должен быть управляемым.*

*В передаточной среде в виде воды в бассейне происходит при штамповке взрывом доставка силового воздействия к поверхности заготовки. По сравнению с воздушной средой мощность этого воздействия возрастает весьма значительно за счет более полного использования энергетических возможностей воды. Большинство исследователей сошлись во мнении, что силовое воздействие, состоящее из ударной волны, движения гидротока и газового пузыря, порождают сложность математического моделирования процесса его перемещения.*

*На качество получаемой детали штамповкой взрывом оказывают влияние механические и геометрические характеристики заготовки. Оно определяется способностью материала пластически деформироваться и отражается на прочности, точности геометрических и угловых размеров, а также состоянии поверхности детали, отсутствии дефектов, изломов, гофров. При этом единая оценка качества заготовки и детали пока не установлена.*

*Многопараметричный процесс пластического деформирования при штамповке взрывом в воде сопровождается деформированием не только заготовки, но и матрицы, в ходе которого происходит изменение формы детали, утонение стенок, появление гофров и фланцев вследствие сложного напряженного состояния в различных сечениях детали. Отмечено, что проявляемые свойства при штамповке взрывом, приводящие к изменению соответствующих параметров и характеристик, в совокупности определяют систему, для которой применим системный подход.*

*Данный этап эволюционного развития штамповки взрывом связан с внедрением компьютерных технологий в практику проектирования технологических процессов. Исследования в основном связаны с применением объектно ориентированных методов, разработкой и применением математических моделей, позволяющих автоматизировать процедуры определения параметров режима процесса штамповки с последующим проведением моделирования отдельных действий при штамповке взрывом. При этом необходима оценка выполнения штамповки взрывом как в целом, так и отдельных этапов ее выполнения.*

**Ключевые слова:** штамповка взрывом, импульсные технологии штамповки, заряд бризантного взрывчатого вещества, пластическое деформирование, напряженно-деформированное состояние, давление, импульс, компьютерные технологии.

**Введение**  
**П**ервыми экспериментами по применению энергии взрыва в обработке металлов считаются военные операции, связанные с контактными взрывами: заряды бризантного взрывчатого вещества (БВВ) устанавливались по поверхности конструкции с целью разрушения. Сегодня техническое перевоо-

ружение производства сопровождается внедрением новейших достижений науки и техники, которое приводит к повышению качества, эксплуатационной надежности и снижению себестоимости создаваемой продукции.

Все эти результаты сегодня могут быть автоматизированы, но в этом случае возникает необходимость в создании интеллектуальной

поддержки в виде специальной экспертной системы для принятия оптимальных стратегических решений.

В то же время в конструкциях летательных аппаратов используются труднодеформируемые и труднообрабатываемые титановые сплавы, отличающиеся высокими прочностными, жаропрочными и антикоррозийными свойствами, штамповка взрывом которых является одним из эффективных способов технологической обработки.

Сложность формы создаваемой детали из титанового сплава, значительные габариты и высокие технические требования к точности существенно усложняют процессы и приемы их формообразования штамповкой стандартными методами на оборудовании и оснастке традиционного заготовительно-штамповочного производства. Поскольку обработка стандартными методами титановых сплавов сопровождается пониженной пластичностью, то необходимо создание принципиально нового технологического процесса, основанного на действии импульсных нагрузок и высокоскоростном деформировании материалов. Таким процессом является штамповка взрывом.

Однако в этом случае возникает необходимость выяснения возможности управления процессом штамповки взрывом и получения крупногабаритных деталей ракетной техники, отвечающей требуемым показателям качества.

Решение этой задачи следует начать с анализа работ исследователей, в которых отражены результаты научных изысканий, связанных с процессом получения штамповки взрывом.

**Цель** исследования – анализ возможности управления процессом штамповки взрывом и оценки качества получения крупногабаритных деталей ракетной техники на основе построения специальной многопараметрической и многофункциональной технологической системы.

### Обзор исследований

В отечественной и зарубежной промышленности при создании крупногабаритной детали находят применение листовая штамповка взрывом, в которой энергоносителями являются заряды БВВ.

Идея использования энергии взрыва для обработки металлических сплавов давлением возникла из-за необходимости создания крупногабаритных деталей из сверхпрочных материалов для ракетной техники.

Методы взрывной штамповки в своем развитии прошли во времени три этапа:

- период доказательства возможности пластического деформирования металлических сплавов при высокоскоростном нагружении;

- формирование теоретических основ и накопление информации о возникающих критичностях при экспериментальной отработке процессов обработки металлов высокоскоростным давлением (см., например, Уразбахтина А. Ю., Уразбахтин Ф. А. (2012) Критические ситуации при изготовлении деталей корпусов ракет; Уразбахтин Ф. А., Уразбахтина А. Ю. (2018) Критичность и живучесть объектов познания);

- внедрение информационных (компьютерных и цифровых) технологий в проектирование технологических процессов, основанных на импульсном воздействии (в частности, штамповке взрывом).

**Первый этап** связан с рождением штамповки взрывом как способа обработки металлических сплавов импульсными силовыми воздействиями.

В становление и развитие этого этапа большой вклад внесли ученые, среди которых Р. В. Пихтовников [1], В. Г. Степанов [2], М. А. Анушин [3], В. К. Борисевич, В. В. Селиванов [4], С. М. Поляк, В. В. Третьяк, А. П. Мельничук, а также зарубежные исследователи Дж. С. Райнхард, Дж. Пирсон [5], J. S. Donaldson, W. Johnson [6], S. W. Hollingum [7].

В 1943 г. была впервые сформулирована задача изучения поведения листового металла при больших скоростях деформации. В 1945–1946 гг. был спроектирован пресс, у которого пуансон двигался со скоростью до 2 м/с. Успешной работой на этом прессе экспериментально было установлено, что увеличение скорости деформирования не снижает пластических свойств металла, чем была доказана возможность осуществления скоростной высокопроизводительной вытяжки листового металла.

В 1948–1950 гг. Р. В. Пихтовников предложил проводить штамповку крупногабаритных деталей путем использования энергии БВВ, так как пластичность металла при скоростях до 30 м/с сохраняется неизменной. Его коллега Е. И. Исаченко в 1952 г. выявил в ходе выполнения высокоскоростной штамповки возникновение сил трения, управление которыми можно проводить варьированием вязкости среды между заготовкой [8], а в [9, 10] отмечено отсутствие изменений структуры и физико-механических свойств у металлических сплавов после штамповки взрывом.

В следующее десятилетие был создан ряд экспериментальных установок, на которых опытным

путем окончательно была доказана возможность использования энергии БВВ для обработки металла при производстве деталей больших размеров [11–15].

При этом установлены большие технологические преимущества, связанные с возможностью обработки труднообрабатываемых материалов и получением значительного экономического эффекта за счет значительного снижения затрат на оборудование и оснастку.

Эти утверждения, начиная с 60-х гг. XX столетия, стали основанием для перехода к наиболее длительному *второму этапу* развития технологических методов штамповки взрывом – созданию теоретических основ и экспериментальной проработке процессов обработки металлов давлением с помощью БВВ.

В процессе штамповки (см. рис.) ударная волна 2, создаваемая взрывом заряда БВВ, давит на заготовку 1, придавая ей форму полости матрицы 5. Энергия БВВ передается деформируемой заготовке воздействием через воду 4, находящуюся в бассейне 3, при этом положение заготовки фиксируется прижимной плитой 6.

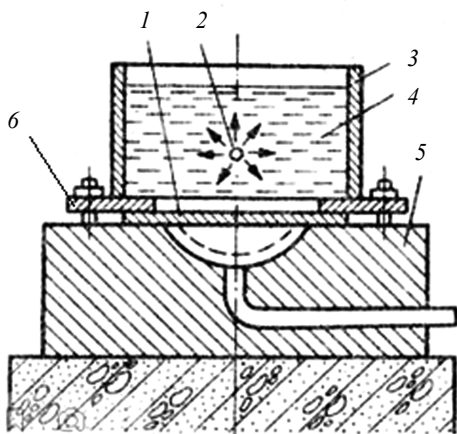


Схема штамповки листового металла взрывом БВВ: 1 – заготовка; 2 – ударная волна; 3 – бассейн; 4 – вода; 5 – полость матрицы; 6 – прижимная плита

Sheet metal stamping scheme blasting explosive: 1 - blank; 2 - shock wave; 3 - pool; 4 - water; 5 is a cavity of the die; 6 - pressure plate

Первые крупные результаты исследований по штамповке взрывом были представлены Н. В. Потехушиным и Р. В. Пихтовниковым с В. И. Завьяловой. В них предложены методы расчета и проектирования процессов штамповки листового металла взрывом, определены схемы процессов штамповки, установлены сущность взрыва зарядов БВВ, механизм и энергетика деформации металлов при взрыве, а также приве-

дены схемы оборудования, технологии и оснастки, используемые в процессе выполнения штамповки взрывом.

Ход процесса штамповки деталей, происходящий на экспериментальной установке, описан А. В. Памфиловым в [16].

Ученые из вузов в 1969 г. включились в исследование и поделились своим видением процессов при импульсной штамповке деталей [17, 18]. Ими были отражены следующие положения: особенности развития взрыва БВВ в ограниченном объеме с жидкостью при наличии препятствий в виде жесткой стенки; действие подводного взрыва в различных по габаритам бассейнах с позиций передачи энергии заготовке; оценки совершаемых работ при формообразовании деталей с учетом напряженно-деформируемых состояний; возможности моделирования процесса гидровзрывной вытяжки с помощью критериев подобия; штампуемость металлов и сплавов при вытяжке взрывом; расчет массы заряда БВВ, энергия которого воздействует на заготовку, и разработка различных способов на основе пробного эксперимента.

Борисевич В. К. в 1979 г. представляет методику численного расчета поведения заготовки, подвергаемой штамповке-вытяжке, в которой учитываются перемещения фланцевой части и возникающие силы трения при высокоскоростном деформировании [19]. Вместе с В. Я. Зорикомон заметил при штамповке взрывом возникновение по всей поверхности заготовки высоких давлений, управление которыми позволяет создавать сложные крупногабаритные детали повышенной точности. Кроме того, деформирование заготовки под нагрузкой сопровождается наличием пиковых значений параметров детонации, расширением продуктов взрыва за зоной реакции многофронтной ячеистостью структуры детонации [20].

Афанасенковым А. Н., Котовой Л. И. и Кукибом Б. Н. предложена формула относительной работоспособности промышленного БВВ, используемого при штамповке взрывом, в которой отражена зависимость между теплотой и объемом продуктов взрыва [21]. В [22] утверждается, что именно критичность динамического давления является причиной разрушения материала заготовки.

Теоретическое исследование штамповки взрывом проведено в [23] с помощью программного комплекса «Динамика-2», в математической модели которой отражено описание динамического деформирования заготовки, взаимодействующей с водой и матрицей.

В 2004 г. Б. Д. Христофоровым установлено, что параметры ударной волны и продуктов взрыва заряда БВВ зависят от объемной плотности энергии газов БВВ, образовавшихся при подрыве заряда БВВ в воде со скоростью меньшей, чем скорость ударной волны. При такой скорости не успевает произойти отдача энергии ударной волны [24]. А. П. Мельничук установил влияние энергетических параметров приложенного импульса на процесс формообразования при штамповке взрывом оболочки и определил рациональные значения параметров нагружения давлением  $p_{\max}$  и продолжительностей импульса  $t_{\max}$  [25]. В [26] определена номенклатура технологических параметров штамповки, которая характеризует деформированное состояние заготовки, геометрические размеры возникающих гофров, значения работы по деформированию детали.

Энергия, возникающая при взрыве заряда БВВ, расходуется на перенос ударной волны и движение гидротока [27, 28]. При этом замечено, что около заряда БВВ в воде появляется сферическая ударная волна. У движущегося в ней газового пузыря на поверхности возникает область разряжения. Вследствие этого считается необходимым учитывать влияние газового пузыря при оценке усилия, используемого в штамповке взрывом.

В 2007 г. значительный теоретический вклад в развитие штамповки взрывом внесли харьковские исследователи во главе с В. К. Борисевич. Они предложили описания различных схем процесса создания силового воздействия при штамповке взрывом [29] на основе уравнений, описывающих двухфазную газожидкую среду, установили зависимости силы и импульса как функции времени, а также экспериментально нашли эффективный радиус заряда БВВ.

Кривцов В. С., используя систему дифференциальных уравнений, оценил напряженно-деформированное состояние сферической оболочки, полученной штамповкой взрывом. Рассматривалось два случая деформирования: 1) движение заготовки под действием импульсного давления; 2) соударение заготовки и матрицы с последующим пружинением [30]. Для тонкостенных деталей уравнения напряженно-деформированного состояния составлены в [31].

По мнению В. В. Третьяка [32], деформирование при штамповке взрывом происходит поэтапно: деформирование свободно провисающего участка материала (до касания куполом дна матрицы); «растекание» купола по дну матрицы (до образования пространственного равнове-

ронного угла); вытяжка и калибровка угловой зоны. Каждый из этих этапов характеризуется предельными значениями параметров.

Воробьев Ю. С. предложил экспериментально-теоретическую методику определения динамической характеристики материала, отражающей зависимость напряжения  $\sigma$  от деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $\dot{\varepsilon}$  и температуры  $t^0$ , в виде

$$\sigma = \sigma_{ct} \left\{ K(\dot{\varepsilon}) + \left[ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ct}} - K(\dot{\varepsilon}) \right]^m \right\}, \quad K(\dot{\varepsilon}) = 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^n,$$

где  $\sigma_{ct}$ ,  $\varepsilon_{ct}$  – статические пределы текучести и деформации соответственно;  $D$ ,  $n$ ,  $m$  – параметры скоростного упрочнения материала [33]. (Взято точно, как в источнике.)

Добрушин Л. Д. [34] считает, что скоростное деформирование конструкционных материалов состоит из деформации при обычной интенсивности и локальной деформации. В этом случае расчет формообразования изделия следует проводить в два этапа: сначала для малых деформаций на основе нелинейной волновой теории движения, затем для более развитых деформаций.

Авторы, создавая информационную и расчетную модели технологической системы штамповки взрывом, в [35] заметили, что процесс взрывной обработки металлических сплавов сопровождается нагревом заготовки и фазовыми превращениями материала.

Перспективы и возможности применения импульсных технологий в создании сложных листовых деталей из высокопрочных и труднодеформируемых материалов с повышенными прочностными характеристиками и минимальными материальными и временными затратами оценены в [36].

Нарыжный А. Г. [37], отмечая быстропротекающий характер и высокую интенсивность процесса деформирования при импульсной штамповке, предполагает, что погрешности изготовления возникают и накапливаются за счет внешнего давления, ударного взаимодействия с матрицей и разгрузки напряжений натяга.

Зайцев В. Б. с соавторами разработал методику расчета оптимальных параметров технологического процесса формообразования таких деталей, в которой выполнение взрывной штамповки высокоточных оболочек двойной кривизны проводится с предварительной вытяжкой [38].

Комаров А. Ю. [39], соглашаясь с тем, что из-за возникшего удара происходит трехэтапное

деформирование, обращает внимание на «выключение» пятна контакта из-за больших сил трения после касания поверхности матрицы и заготовки. При малой пластичности, или сложном рельефе детали, или при большой глубине вытяжки из-за сил трения может произойти разрыв материала. Для исключения возникновения этих критичностей предлагается осуществлять предварительную вытяжку листовой заготовки, а выполнение самой штамповки проводить с использованием преобразующих экранов для торможения отдельных участков заготовки.

Борисевич В. К. утверждает:

а) при штамповке взрывом появление дефектов типа пучности или непроштамповки можно избежать варьированием параметров передающей среды;

б) работа механизма деформирования заготовки и образования дефектов на детали сопровождается динамическим изгибом и ударом по поверхности матрицы;

в) материал в очаге пластичности находится в состоянии, близком к всестороннему сжатию;

г) образование окончательной формы детали происходит одновременно с накоплением остаточных деформаций в несколько этапов [40].

Кириченко Л. Р. указал на необходимость автоматизации проектирования процессов штамповки взрывом [41]. При внедрении этих процессов с использованием накопленного опыта практики штамповки был создан банк данных процессов изготовления типовых деталей, обладающих общими элементами и их свойствами для проектирования технологических процессов взрывной штамповки, которые используются при разработке комплексных деталей, включающих все типы элементов у деталей этой группы [42].

Бахмет А. Г. предложил при определении совершаемой работы пластического деформирования в зависимости от параметров материала заготовки  $B$  и  $m$  использовать закон изменения напряжения  $\sigma$  от деформации  $\varepsilon$  в форме

$$\sigma = B\varepsilon^m,$$

в которой учитывались тангенциальная, радиальная и меридианная деформации [43].

Для оценки качества получения крупногабаритных листовых деталей штамповкой взрывом Ревенко А. С. в [44] предложил использовать специальный комплексный показатель, который учитывает несколько свойств создаваемой детали. К сожалению, автор ограничился только общими рассуждениями и не привел описаний

конкретных свойств, необходимых для оценки качества.

Процессы, вызванные действием внешней нагрузки при подводном взрыве в ограниченном объеме (бассейне), многофакторны и состоят из трех этапов [45, 46]. На первом этапе нагружение определяется ударной волной, которая сначала имеет сферическую, а после отражения от стенки – цилиндрическую форму. Для второго этапа характерно образование газового пузыря, отражение от которого сопровождается появлением в волнах интерференции. Особенностью третьего этапа является образование кавитационных разрывов и волн разгрузки.

Наличие многофакторности и возникновение импульсных процессов в результате действия силового импульса в заготовке деформации растяжения – сжатия и изгиба – сдвига, сопровождающегося нагревом детали и разупрочнением деформируемой матрицы, подтверждено в [47].

Цыбулько А. Е. в [48] ввел и обосновал критерии прочности материала заготовки, подвергающейся пластическому деформированию при штамповке взрывом. Они представлены в линейной форме и отражают возникновение локализованной пластической деформации в общей пластической деформации. В их основу положена гипотеза, что ответственными за переход материала в предельное состояние являются максимальные нормальные напряжения, хотя при этом прочность всей детали определяется локальной прочностью.

С 2008 г. начался *третий этап* развития импульсных видов штамповки. Особенностью этапа является качественный переход от информации в виде фактов к обобщенным знаниям о штамповке взрывом – происходило внедрение компьютерных технологий.

Была разработана математическая модель проектирования импульсных процессов штамповки [49], в которой объект обладает иерархической структурой познания с уровнями

метод обработки → этап обработки →  
→ операция – переход.

Бычков С. Я. предлагает алгоритм выбора типа метода обработки с помощью импульсной технологии, наиболее приемлемый для создания листовой детали. Автоматизированный выбор учитывает габариты детали и заготовки, абсолютную и относительную толщину, объем проштамповки, минимальный относительный радиусгиба детали, механические характеристики пластической деформации, максимальное требуемое давление [50]. В [51] разработана про-

цедура проектирования технологического процесса взрывной штамповки, основанная на методах синтеза и адресации. Синтез проводится на уровне формирования методов функционирования с учетом унификации, стандартизации технологического процесса и хранения в базе данных. Выполнение адресации связано с возможностью извлечения данных из специально организованной базы.

В рамках внедрения компьютерных технологий элементами информационных систем поддержки принятия решения по организации штамповки взрывом в [52] создан комплексный подход по использованию математических методов с целью снижения материальных и временных затрат на подготовку производства деталей из листового материала. Предполагается, что суть проектирования процессов взрывной штамповки и оснастки состоит в структурном и параметрическом синтезе. В структурном синтезе установлена последовательность элементов «срабатывания» процессов при штамповке взрывом. При параметрическом синтезе происходит формирование потребных свойств элементов. На основе такого подхода составлена методика выбора типовой схемы матрицы для взрывной штамповки конической детали.

В [53] предложена еще одна информационная система поддержки принятия решений по формированию технологического процесса листовой штамповки взрывом, которая состоит: из блока подготовки данных (графическая информация, конструкторско-технологические признаки детали); процедур выбора рациональной принципиальной схемы штамповки (вид заготовки, передающая среда, основные операции, фиксация заготовки); рационального маршрута технологии (переходы, термообработка, спецоперации). В системе предусмотрен определенный порядок выбора рациональной операционной технологии [54, 55].

В [56] предлагается ввести конструктивно технологические элементы, составляющие иерархическую структуру системы. Все эти элементы образуют модель базы знаний со схемой проектирования процессов. В [57] объекты в системе проектирования процессов взрывной штамповки дополняются элементами оснастки и оборудования вместе с апробированными технологическими процессами. В итоге состояния таких объектов дополняются перечнем свойств со своими оценками и правилами, которые определяют его поведение. Предложены различные варианты записи нагружающего импульса давления в формирующей камере при гидродинамической штамповке в виде

$$p = p \frac{t}{nt_{\max}} ; p = p_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{t_{\max}}\right);$$

$$p = p_{\max} \left[ \sin\left(\pi \frac{t}{t_{\max}}\right)^m \right],$$

отличающиеся формой, значением давления и продолжительностью действия.

Здесь  $n = \frac{tp}{t_{\max}}$  – коэффициент, определяющий рабочую область импульса;  $p_{\max}$  – максимальное давление;  $t_{\max}$  – продолжительность импульса давления;  $p, t$  – текущие значения давления и времени импульса;  $t_p$  – продолжительность рабочей (реализуемой) области импульса давления;  $m$  – коэффициент, определяющий угол наклона синусоиды.

Кроме того, были продолжены исследования физических процессов в штамповке взрывом.

Мельничук А. П. предлагает оценивать с помощью технологических и энергосиловых параметров скорость соударения заготовки с матрицей и упругую деформацию матрицы [58]. В то же время в [59] отмечено, что при объемной штамповке значительная длительность нагружения заготовки ударной волной приводит к благоприятному распределению напряжений и деформаций в заготовке, но существенным становится влияние на нагружение заготовки схлопывающегося газового пузыря.

В [60] с целью внедрения компьютерных технологий выделены основные направления совершенствования технологического проектирования штамповки взрывом деталей сложной пространственной конфигурации:

- математическое моделирование динамического поведения заготовки;
- применение методов распознавания образов;
- накопление информации для принятия решений о режимах обработки; адаптация теоретических основ и прикладных программ для других методов штамповки;
- разработка принципиально новых методов изготовления листовых деталей.

В [61] предложен алгоритм синтеза математических моделей проектирования процессов импульсных технологий при создании деталей. Алгоритм предусматривает классификацию математических моделей по функциональному признаку, создание обучающей выборки с набором технологических операций, выделение набора типовых деталей с массивом технологиче-

ских признаков. Непосредственно синтез проводится с помощью сетей Кохонена.

В [62] для принятия технологических решений по изготовлению детали из листовой заготовки создана еще одна процедура, основанная на классификациях по конструкторско-технологическим признакам детали и схемам импульсных процессов, – определение деформационного поля, возникающего в заготовке при штамповке взрывом.

В целом применение методов штамповки позволяет расширить технологические возможности обработки труднодеформируемых сплавов в холодном состоянии при получении деталей сложной формы [63]. Прием получения штамповкой взрывом сложных деталей с минимальным количеством сварных швов предложен в [64].

Прием разработки группового технологического процесса создания листовой детали импульсной штамповкой изложен в [65]. Для этого группа деталей заменяется одной комплексной деталью, содержащей все поверхности каждой из деталей, вошедшей в группу.

Борисевич В. К. утверждает, что штамповку взрывом лучше проводить в стационарных бассейнах. Для обеспечения прочности стенок бассейна при динамическом деформировании заготовки предлагается их делать многослойными [66]. А. И. Снегирева предложила математическую модель железобетонной матрицы компенсационным слоем для выполнения гидровзрывной штамповки, которая содержит уравнения движения слоев конструкции и матрицы в целом [67]. Экспериментально установлено, что слои матрицы совместно работают только на первоначальном этапе деформирования. Затем наблюдается отделение наружного кольца с бетоном от внутреннего кольца. Она представила результаты экспериментальных исследований работы железобетонной матрицы для выполнения штамповки взрывом труднодеформируемых сверхпрочных металлических сплавов. В мелкосерийном производстве экономически целесообразно использовать такие матрицы, хотя возникают критичности, связанные с их применением: образуются трещины в бетонном слое, происходят локальные разрушения. Аппроксимация полученных результатов позволила определить формулу зависимости возникающих напряжений в матрице от деформации  $\Delta_{np}$  в виде

$$\sigma = 0,363\Delta_{np} - 0,74.$$

Емкость бассейна должна состоять из двух цилиндрических обечаек, между которыми рас-

полагается среда, выполняющая роль демпфирующего элемента. Днище такого бассейна должно быть достаточно прочным и жестким.

В [68] предложен алгоритм построения зеркала матрицы, с помощью которого уточняется месторасположение деформированных вогнуто-выпуклых участков заготовки в зависимости от состояния поверхности матрицы.

Расчеты экономической эффективности импульсной штамповки показали приоритет за ней при учете номенклатуры деталей, длительности процесса формообразования, материалоемкости, сложности, продолжительности подготовки производства и др. [69].

Троцко О. В. [70] при штамповке взрывом медных гильз кристаллизаторов показал, что не требуется процедура калибровки детали из-за интенсивности деформационно-скоростного упрочнения материала, нет необходимости в дополнительной обработке внутренней поверхности; при этом достигается равномерность деформаций по толщине заготовки.

В [71] исследована возможность создания гидродинамической штамповкой попарно деталей конусной формы, на основе которой создана методика оценки напряженно-деформированного состояния оболочек и математическая модель для расчета технологических режимов штамповки.

В другой методике В. В. Третьяк провел расчет операций технологического процесса импульсной штамповки с использованием баз знаний и данных в виде техпроцессов-аналогов [72]. В этой базе данных отыскиваются аналоги, имеющие наибольшее число совпадающих дискретных элементов, определенных на предшествующих этапах (по видам заготовки, основной операции, передающей среде, по составу элементов генеральной формы), затем эти аналоги адаптируются к условиям конкретной решаемой задачи.

В ходе анализа методик расчета зарядов БВВ для проведения штамповки взрывом установлено, что выбор заряда является многофакторной задачей, в которой одновременно учитываются свойства взрывчатого вещества и параметры заготовки [73].

В [74] предложена другая механико-математическая модель технологической системы гидродинамической штамповки взрывом, в которой учтено проявление таких свойств, как сжимаемость, кавитация жидкости, характер упругопластического деформирования заготовки, а также контактное взаимодействие. Эта модель позволяет анализировать процессы от начала образования и до создания детали.

Мельничук А. П. предлагает повысить точность изготовления тонкостенных деталей гидродинамической штамповкой путем управления напряженным состоянием материала на конечной стадии изготовления. В качестве параметра управления используется скорость создания заготовки с поверхностью матрицы с учетом возникновения пружинения материала заготовки [75].

В [76] доказано, что импульсной штамповкой можно создавать детали со сложным контуром, у которых допуски на погрешность изготовления с учетом сложности детали и размеров поверхности по сравнению с традиционной штамповкой удается уменьшить в три раза.

В алгоритме расчета параметров штамповки взрывом днищ летательных аппаратов [77] предполагается, что формообразование крупногабаритных деталей сопровождается повышением точности штамповки, сокращением затрат на изготовление оснастки и оборудования. За интегральную оценку процесса листовой штамповки принимается работа, затраченная на деформирование заготовки, и коэффициент полезного действия.

На основе исследования процесса газозрывной импульсной штамповки, основанной на преобразовании химической энергии БВВ в работу пластического деформирования материала, в [78] построена математическая модель, в которой проводится расчет физических и технологических параметров, а также коэффициент полезного действия используемой установки.

Трустенко С. Ф. и Сытик В. А. [79] показали, что наиболее подходящим вариантом изготовления деталей является штамповка с использованием воды в качестве передаточной среды; деформирование происходит за счет высоких скоростей и больших удельных давлений.

Влияние предварительного нагрева заготовок на выполнение штамповки взрывом рассмотрено в [80]. При испытаниях на установке с газовым нагревателем достигнуто: существенное повышение качества детали; компактность и дешевизна; целенаправленность и простота внесения изменений в технологические режимы штамповки; приемлемость использования объемного перехода в целом.

В [81] подчеркнута, что компьютерным моделированием можно осуществлять поиск потребной энергии деформирования, а также отслеживание появления дефектов в нетиповой номенклатуре сложной листовой детали при проведении импульсной штамповки.

Исследователи во главе с И. А. Ковальчук в [82] рассмотрели возможности внедрения в практику проектирования импульсных технологий на базах знаний и экспериментов.

Третьяк В. В. на основе своего комплекса провел проектирование технологического процесса штамповки взрывом с учетом интеллектуальной функции – оценки полноты и противоречивости опытных данных [83].

Исследования, связанные со штамповкой взрывом, продолжают и в настоящее время, но, к сожалению, с меньшей интенсивностью. Они направлены на расширение сферы применения и уточнение выявленных ранее свойств.

В [84] рассматривается применение энергии взрыва при ремонте технических средств в условиях труднодоступных районов арктического региона и указывается на экономическую целесообразность этого процесса.

В 2018 г. на возможность применения взрывных технологий обработки применительно к металлическим и порошковым материалам указали Е. М. Климова и А. С. Мещеряков [85].

В [86] установлено, что комбинирование интенсивной пластической деформации при сварке и штамповке взрывом с последующей термической обработкой позволяет получать в конечном итоге изделия высокого качества, полностью соответствующие требованиям по прочности связи и допускам формы.

Анализ достоинств и недостатков основные операций импульсной штамповки позволил И. Л. Чижову построить рациональную технологическую схему с точки зрения внедрения процессов автоматизации [87].

В конструкторском бюро химавтоматики в [88] поделились опытом применения штамповки взрывом при изготовлении сборочных единиц для жидкостных ракетных двигателей.

В [89] предлагаются промышленные технологии, основанные на использовании энергии взрыва для изготовления различных изделий в специальных взрывных камерах.

Способы расчета железобетонных матриц для гидровзрывной штамповки, работающих под действием взрывных нагрузок, предложенные в [90], основаны на использовании коэффициентов динамичности. При этом учтен процесс твердения бетона, вызванный давлением при взрыве.

Методика поиска нужных параметров и величин взрывного воздействия на металл, которые отражают проявления свойств и форму создаваемого изделия, предложена в [91].



В [92] установлено, что высокоскоростное пластическое деформирование всегда сопровождается поступательным движением дислокаций, которые приводят к возникновению дефектов и снижению динамического предела текучести.

Возможность взрывного формообразования алюминиевых сплавов 2024-T4, 2024-T6, 6061-T4, 6061-T6, 7075-T4 и 7075-T6 доказана в [93].

Такова траектория эволюционного развития технологии штамповки взрывом при получении деталей из листового металлического материала.

### Выводы

1. Процесс получения крупногабаритных деталей ракетной техники штамповкой взрывом является многопараметрическим и многофункциональным.

2. Для управления этим процессом необходимо построение технологической системы, состоящей из таких элементов, как заряд бризантного взрывчатого вещества, передаточной среды, заготовки, оснастки и готовой детали.

3. Для оценки качества функционирования такой системы необходим комплекс показателей, учитывающих возникновение критических состояний, возникающих как в элементах, так и во всей системе в целом, которые выявлены исследователями штамповки взрывом.

### Библиографические ссылки

1. Пихтовников Р. В., Завьялова В. И. Штамповка листового металла взрывом. М. : Машиностроение, 1964. 177 с.
2. Гидровзрывная штамповка элементов судовых конструкций / В. Г. Степанов, П. М. Сипилин, Ю. С. Навагин, П. Н. Панкратов. Л. : Судостроение, 1966. 291 с.
3. Штамповка взрывом. Основы теории / под ред. М. А. Анучина. М. : Машиностроение, 1972. 152 с.
4. Селиванов В. В., Кобылкин И. Ф., Новиков С. А. Взрывчатые технологии. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 648 с.
5. Райнхард Дж. С., Пирсон Дж. Взрывная обработка металлов. М. : Мир, 1966. 390 с.
6. Donaldson J.S., Johnson W. (1965) Sheet metal forming using a water hammer type process: a preliminary assessment of newforming technique. *Advances in metal forming tool design and Res.* Oxford-Paris, Pergamon Press, 1965, 100 p.
7. Hollingum S.W. (1967) Research and Developments in explosive forming. *Machinery and production engineering*, 1967, no. 2825, 110 p.
8. Исаченков Е. И., Пихтовников Р. В. К вопросу влияния скоростей деформирования в процессе штамповки деталей из листа // Вестник машиностроения. 1952. № 7. С. 10–12.
9. Штамповка подводным взрывом. М. : НИИМАШ. Серия: С-Х-3. Технология обработки давлением, 1967. 43 с.
10. Завьялова В. И., Нечаев В. Н., Поликарпова А. П. Изменение структуры и физико-механических свойств сплавов после штамповки взрывом // Труды Института НИИТиОП. 1967. № 246. 14 с.
11. Алексеев Ю. Н. Вопросы пластического течения металлов. Харьков : Изд-во Харьковского гос. ун-та, 1958. 100 с.
12. Кононенко В. Г. Обработка металлов взрывом // Кузнечно-штамповочное производство. 1960. № 7. С. 15–16.
13. Навагин Ю. С. Использование энергии подводного взрыва для листовой штамповки. Л. : ДНТП, 1960. 110 с.
14. Томленов А. Д. Теория пластических деформаций металлов. М. : Машгиз, 1951. С. 105.
15. Потехушин Н. В. Штамповка листового металла взрывом. Челябинск : Южноуральское книжное изд-во, 1964. 60 с.
16. Памфилов А. В. Детали штампуется взрыв. Тула : Приокское книжное издательство, 1967. 83 с.
17. Импульсная штамповка деталей в машиностроении / В. А. Степанченко, В. И. Климентьев, В. П. Россихин [и др.]. Киев : Изд-во Укр. науч.-иссл. ин-та науч.-техн. информации и техн.-экон. исследований, 1969. 108 с.
18. Штамповка листовых деталей импульсными источниками энергии / Е. И. Исаченков, И. А. Кондрашов, Е. В. Морозова, О. В. Шалыгина. М. : МАИ, 1970. 22 с.
19. Борисевич В. К., Сабелькин В. П., Солодякин С. Н. О численном моделировании процесса взрывной штамповки на ЭВМ // ПМТФ. 1979. № 2. С. 166–174.
20. Борисевич В. К., Зорик В. Я. Критические импульсные технологии изготовления листовых деталей и их адаптация в условиях конверсии предприятий // Технологические системы. 2000. № 4. С. 36–41.
21. Афанасенков А. И., Котова Л. И., Кухиб Б. Н. О работоспособности промышленных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 3. С. 115–125.
22. Деформационные процессы при обработке металлов взрывом. Методики расчета массы удлиненных зарядов взрывчатых веществ / В. В. Калашников, В. Д. Суханов, Н. И. Лаптев, Д. А. Деморецкий, М. В. Ненашев // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Физико-математические науки. 2001. № 13. С. 109–113.
23. Экспериментально-теоретическое исследование процессов гидровзрывной штамповки оболочных элементов конструкции / В. Г. Баженов, В. В. Егунов, С. В. Крылов, С. А. Новиков, Ю. В. Батьков // Прикладная механика и техническая физика. 2002. Т. 43, № 5. С. 176–181.
24. Христофоров Б. Д. Влияние свойств источника на действие взрыва в воздухе и в воде // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 6. С. 115–120.

25. Мельничук А. П. Исследования процессов гидродинамического формообразования тонкостенных осесимметричных оболочек при оформлении основного контура на примере сферического наконечника трубопроводов воздушных систем ЛА // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2004. № 4(12). С. 11–19.
26. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. Т. 5. Обработка металлов методом пластического деформирования. Одесса : ОНПУ, 2004. 522 с.
27. Борисевич В. К., Бутко В. И., Шкалова А. В. Силовые потоки при подводном взрыве в ограниченном пространстве // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2005. № 6 (22). С. 29–32.
28. Уразбахтин В. Ф., Уразбахтин Ф. А. Интегрированная оценка критичности основного энергоносителя в штамповке взрывом крупногабаритных деталей ракеты // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2021. Т. 19, № 2. С. 104–113.
29. Раско С. П., Овчаренко А. Г. Эксплуатационная безопасность конденсированных взрывчатых веществ. Бийск : Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та имени И. П. Ползунова, 2006. 147 с.
30. Определение напряженно-деформированного состояния тонкостенных сферических оболочек / В. С. Кривцов, А. П. Брагин, А. П. Мельничук, С. А. Полтарушников // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11(47). С. 73–82.
31. Мельничук А. П. Исследование процессов гидродинамической штамповки: обоснование определения напряженно-деформированного состояния тонкостенных осесимметричных оболочек // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 3 (50). С. 41–46.
32. Третьяк В. В., Клыгина И. В., Комаров А. Ю. Математическое моделирование импульсных технологий с использованием специальных приемов // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 10 (46). С. 12–15.
33. Проблемы анализа скоростного деформирования элементов конструкции при импульсном нагружении / Ю. С. Воробьев, М. В. Чернобрышко, А. В. Ярышко, Д. И. Степанченко, Н. Ю. Евченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11(47). С. 35–43.
34. Скоростное деформирование элементов конструкций заготовок и материалов в технологиях взрывной обработки металлов давлением / Л. Д. Добрушин, А. В. Колодяжный, С. Н. Солодянский, В. Г. Ярещенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11 (47). С. 83–92.
35. Борисевич В. К., Драгобецкий В. В., Тонцок О. В. Многофакторность физических явлений при взрывной металлообработке // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11 (47). С. 62–72.
36. Кривцов В. С., Борисевич В. К. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки металлов // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11(47). С. 10–17.
37. Нарыжный А. Г. Факторы и этапы, определяющие точность импульсной штамповки осесимметричных деталей // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11(47). С. 125–131.
38. Отработка опытной технологии изготовления высокоточных оболочек двойной кривизны / В. Е. Зайцев, А. М. Андриенко, В. П. Сабелькин, С. Г. Домбровская // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11(47). С. 142–149.
39. Проектирование импульсных технологий с использованием специальных приемов / А. Ю. Комаров, В. В. Третьяк, В. Я. Зорик, И. В. Клыгина // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11(47). С. 168–172.
40. Борисевич В. К., Нарыжный А. Г., Молодых С. И. Влияние передающей среды на деформирование и точность детали при импульсной штамповке // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11(47). С. 173–181.
41. Кириченко Л. Р. Конкурентоспособность технологий импульсной обработки материалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11 (47). С. 240–244.
42. Методы проектирования технологических процессов взрывной штамповки для получения листовых деталей / В. Я. Зорик, В. В. Третьяк, В. П. Павличенко, И. В. Скорченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11 (47). С. 255–261.
43. Бахмет А. Г. Расчет работы пластического деформирования для импульсного обжима // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11 (47). С. 292–295.
44. Ревенко А. С. Совершенствование квалиметрического подхода к процессам штамповки крупногабаритных листовых деталей в современных системах управления качеством // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11 (47). С. 305–311.
45. Борисевич В. К., Невешкин Ю. А. Определение особенностей формирования внешней нагрузки на заготовку при объемной штамповке взрывом // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 9 (56). С. 15–17.
46. Невешкин Ю. А., Остапчук В. В., Соломяный А. У. Определение сил при гидровзрыве в ограниченном объеме. Расчет сил от действия ударных волн // *Металлофизические новейшие технологии*. 2015. Т. 37, № 2. С. 221–232.
47. Борисевич В. К., Молодых С. И., Третьяк В. В. Проблемы многофакторного моделирования импульсных процессов при изготовлении оболочек двойной кривизны // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 1 (48). С. 44–49.
48. Цыбулько А. Е., Романенко Е. А. Новые критерии прочности материалов с локализованной и развитой пластической деформацией в условиях сложного напряженного состояния // *Вестник машиностроения*. 2008. № 9. С. 17–21.

49. Третьяк В. В. Объектный подход к проектированию ресурсосберегающих импульсных технологий // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2006. № 3 (29). С. 26–30.
50. Третьяк В. В. Особенности моделирования технологии взрывной штамповки в объектном представлении // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 4 (40). С. 13–17.
51. О концепции использования технологических критериев для выбора импульсных технологий листовой штамповки / С. А. Бычков, В. К. Борисевич, В. С. Кривцов, А. П. Брагин // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 11 (47). С. 222–231.
52. Зорик В. Я., Третьяк В. В. Разработка проектирующей системы для синтеза технологической оснастки импульсных процессов взрывной штамповки // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2008. № 39. С. 168–175.
53. Третьяк В. В., Филипповская Л. А. Информационная система компьютерной поддержки принятия технологических решений в листовой штамповке взрывом // *Вестник двигателестроения*. 2008. № 1. С. 63–67.
54. Разработка учебного программного комплекса для расчета параметров импульсной объемной штамповки / В. В. Третьяк, А. И. Долматов, А. С. Федорова, С. В. Бреус // *Вестник двигателестроения*. 2014. № 2. С. 176–180.
55. Расчет параметров импульсного деформирования объемных деталей с использованием спрут технологий / А. В. Онопоченко, В. В. Третьяк, Н. И. Цывинда, И. В. Скорченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013. № 4(101). С. 17–20.
56. Третьяк В. В. Синтез и оптимизация импульсных процессов с использованием объектного подхода // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2007. № 9 (45). С. 158–162.
57. Стадник С. А., Третьяк В. В. Особенности использования импульсных технологий для изготовления деталей авиационных двигателей // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 10 (57). С. 8–11.
58. Мельничук А. П. Исследование процессов гидродинамической штамповки: обоснование определения напряженно-деформированного состояния тонкостенных осесимметричных оболочек // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 3 (50). С. 41–46.
59. Процессы обработки металлов взрывом / А. В. Крупин, С. Н. Калюжин, Е. У. Алтабеков [и др.]. М. : *Металлургия*, 1996. 336 с.
60. Зорик В. Я., Третьяк В. В., Комаров А. Ю. Проблемы совершенствования технологического проектирования импульсной штамповки за счет использования специальных приемов // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2008. № 9 (56). С. 8–14.
61. Третьяк В. В. Реализация алгоритмов синтеза для расчета импульсных технологий // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 8 (65). С. 26–30.
62. Третьяк В. В. Математическая модель классификационной обработки данных для принятия технологических решений при изготовлении деталей импульсными способами из плоской заготовки // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 6 (63). С. 30–36.
63. Третьяк В. В., Комаров А. Ю., Стадник С. А. Особенности расчета напряженно-деформированного состояния заготовки листовых деталей сложной конфигурации для импульсных технологий // *Вестник НТЦ «ХПП»*. 2009. № 31. С. 110–111.
64. Третьяк В. В., Комаров А. Ю., Стадник С. А. Вопросы синтеза и оптимизации технологических процессов импульсной обработки // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 4 (61). С. 9–13.
65. Разработка групповых технологических процессов при изготовлении листовых деталей импульсной обработкой с использованием компьютерных информационных технологий / В. В. Третьяк, О. В. Мананков, Д. А. Овчар, А. В. Онопоченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 3 (60). С. 17–20.
66. Разработка механизированной промышленной установки для изготовления заготовок деталей авиационных двигателей методом импульсной штамповки / В. К. Борисевич, В. В. Третьяк, В. Ф. Мозговой, А. А. Брунак // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 1 (58). С. 38–47.
67. Снегирева А. И., Кретова Д. А. Расчет усовершенствованной матрицы при импульсном нагружении // *Градостроительство и архитектура*. 2017. Т. 7, № 4. С. 20–24.
68. Третьяк В. В. Математическая модель и алгоритм построения зеркала матрицы при расчете напряженно-деформированного состояния заготовки под действием импульсных нагрузок // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 7 (64). С. 7–11.
69. К оценке экономической эффективности методов изготовления сложных деталей с помощью импульсных источников энергии / В. К. Борисевич, В. Н. Голованов, В. В. Третьяк, Ю. А. Невешкин // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2009. № 9 (60). С. 187–193.
70. Троцко О. В., Драгобецкий В. В., Мороз Н. Н. Гидровзрывная штамповка медных гильз кристаллизаторов для непрерывной разливки стали // *Обработка материалов давлением*. 2010. № 2 (23). С. 131–136.
71. Кривцов В. С., Мельничук А. П., Зайцев В. В. Особенности описания напряженно-деформированного состояния тонкостенных деталей конусной формы при гидродинамической штамповке // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2010. № 3 (70). С. 5–10.
72. Третьяк В. В. Алгоритм и его реализация в расчетах параметров технологических процессов импульсной штамповки // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2010. № 8 (75). С. 11–14.

73. Третьяк В. В., Онопченко А.В. Оптимизация расчетов заряда в технологических процессах взрывной штамповки // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2010. № 4. С. 30–37.
74. Нарыжный А. Г. Смешанная модель технологической системы гидродинамической штамповки // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2010. № 6 (73). С. 13–16.
75. Мельничук А. П. Повышение точности тонкостенных деталей трубопроводов воздушных систем летательных аппаратов, изготавливаемых гидродинамической штамповкой // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 6 (83). С. 11–16.
76. Третьяк В. В. Особенности импульсной штамповки объемных деталей авиационной техники // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 2 (79). С. 42–46.
77. Третьяк В. В., Онопченко А. В., Лоза Т. В. Расчет параметров импульсных процессов в объектном представлении // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 7 (84). С. 92–95.
78. Третьяк В. В. Математическая модель для расчета параметров газо-взрывной штамповки // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 9 (86). С. 160–163.
79. Глушенко С. Ф., Сытник В. А. Формообразование деталей взрывными процессами по условиям точности сборки агрегатов летательных аппаратов // *Вестник Самарского гос. аэрокосмического ун-та*. 2012. № 5 (36). С. 108–112.
80. Расчет параметров технологии штамповки взрывом оболочек деталей с нагревом заготовок в объектном представлении / В. К. Борисевич, В. В. Третьяк, А. В. Онопченко, Т. Г. Зейниев // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. 2012. № 55. С. 28–36.
81. Невешкин Ю. А., Онопченко А. В., Третьяк В. В. Моделирование процессов импульсной объемной штамповки // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 8 (95). С. 253–256.
82. Ковальчук И. А., Третьяк В. В., Мананков О. В. Перспективные использования SPRUTTEXRO для разработки конструкции и технологии изготовления поковок с помощью импульсных технологий // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 9 (96). С. 29–33.
83. Возможности использования интерактивного программного комплекса классификации листовых деталей для изготовления импульсными технологиями / В. В. Третьяк, В. Д. Сотников, С. В. Худяков, А. С. Федорова // *Вестник двигателестроения*. 2015. № 2. С. 166–171.
84. Седнев В. Л. Применение и оценка эффективности способов обработки металлов взрывом при выполнении зада в труднодоступных районах Арктического региона // *Арктика: экология и экономика*. 2016. № 2 (22). С. 98–106.
85. Климова Е. М., Мещеряков А. С. История развития технологии взрывной обработки металлических и других материалов, в частности порошковых // *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2018. Т. 2. С. 245–246.
86. Применение высокоэнергетических импульсных технологий для изготовления медного толсто-стенного изделия электротехнического назначения / В. В. Семашко, Л. В. Судник, Г. В. Смирнов [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов*. Минск, 2018. С. 115–124.
87. Чижев И. Л. Импульсная штамповка // *Academy*. 2019. № 9 (48). С. 10–11.
88. Изготовление деталей для жидкостных ракетных двигателей с помощью штамповки взрывом / А. А. Витковская, Г. Н. Власова, А. С. Севостьянов [и др.] // *Современные технологии производства в машиностроении*. Воронеж, 2020. С. 59–62.
89. Римшин В. И. Взрывные камеры // *Эксперт: теория и практика*. 2021. № 2 (11). С. 51–56.
90. Кретов Д. Л., Мурашкин В. Г., Снегирёва А. М. Методика расчета кольцевых железобетонных матриц на импульсные нагрузки // *Эксперт: теория и практика*. 2021. № 1 (10). С. 14–18.
91. Цечоева А. Х., Гатиев М. Ш., Сурхоева Х. И. Взрывные методы обработки труднообрабатываемых материалов // *Наука и бизнес: пути развития*. 2021. № 12 (126). С. 63–66.
92. Малащенко В. В., Гладкая А. Д., Малащенко Т. И. Влияние скорости пластической деформации на механические свойства функциональных сплавов // *Химическая термодинамика и кинетика*. Великий Новгород, 2021. С. 157–158.
93. Yildiz R.A.(2022) Взрывное формование труб из закаленных алюминиевых сплавов // *Физика горения и взрыва*. 2022. Т. 58, № 6. С. 121–134.

## References

1. Pikhtovnikov R.V., Zavyalova V.I. (1964) *Shtampovka listovogo metalla vzryvom* [Sheet metal stamping by explosion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 177 p. (in Russ.).
2. Stepanov V.G., Sipilin P.M., Navagin Yu.S., Pankratov P.N. (1966) *Gidrovzryvnaya shtampovka jelementov sudovyh konstrukcij* [Hydro-explosive stamping of elements of ship structures]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1966, 291 p. (in Russ.).
3. Anuchin M.A. (1972) *Shtampovka vzryvom. Osnovy teorii* [Stamping by explosion. Fundamentals of theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 152 p. (in Russ.).
4. Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. (2008) *Vzryvchatye tehnologii* [Explosive technologies]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2008, 648 p. (in Russ.).
5. Rajnhard Dzh.S., Pirson Dzh. (1966) *Vzryvnaya obrabotka metallov* [Explosive processing of metals]. Moscow, Mir Publ., 1966, 390 p. (in Russ.).
6. Donaldson J.S., Johnson W. (1965) Sheet metal forming using a water hammer type process: a preliminary assessment of newforming technigque *Advances mach tool design and Res.* Oxford-Paris, Pergamon Press, 1965, 100 p.

7. Hollingum S.W. (1967) Research and Developments in explosive forming. *Machinery and production engineering*, 1967, no. 2825, 110 p.
8. Isachenkov E.I., Pihtovnikov R.V. (1952) [On the influence of deformation rates in the process of stamping sheet parts]. *Russian engineering research*, 1952, no. 7, pp. 10-12 (in Russ.).
9. *Shtampovka podvodnym vzryvom* [Stamping by underwater explosion (S-X-Z series Pressure treatment technology)]. Moscow, NIIMASH Publ., 1967. 43 p. (in Russ.).
10. Zavyalova V.I., Nechaev V.N., Polikarpova A.P. (1967) *Izmenenie struktury i fiziko-mekhanicheskikh svoystv splavov posle shtampovki vzryvom* [Changes in the structure and physico-mechanical properties of alloys after stamping by explosion. Proceedings of the Institute]. Moscow, NIITiOP Publ., 1967, no. 246, 14 p. (in Russ.).
11. Alekseev Yu.N. (1958) *Voprosy plasticheskogo techeniya metallov* [Questions of plastic flow of metals]. Kharkiv, publishing house of Kharkiv State University, 1958, 100 p. (in Russ.).
12. Kononenko V.G. (1960) [Metal blasting]. *Kuznechno-shtampovnoye proizvodstvo*, 1960, no. 7, pp. 15-16 (in Russ.).
13. Navagin Ju.S. (1960) *Ispol'zovanie jenergii podvodnogo vzryva dlja listovoj shtampovki* [Using the energy of an underwater explosion for sheet stamping]. Leningrad, DNTP Publ., 1960, 110 p. (in Russ.).
14. Tomlenov A.D. (1951) *Teorija plasticheskikh deformacij metallov* [Theory of plastic deformations of metals]. Moscow, Mashgiz Publ., 1951, 105 p. (in Russ.).
15. Potekushin N.V. (1964) *Shtampovka listovogo metalla vzryvom* [Sheet metal stamping by explosion]. Cheljabinsk, Juzhnoural'skoe kn. izd-vo Publ., 1964, 60 p. (in Russ.).
16. Panfilov A.V. (1967) *Detali shtampuet vzryv* [Details are stamped by an explosion]. Tula, Prioksky Book Publ., 1967, 83 p. (in Russ.).
17. Stepanchenko V.A., Klimentyev V.I., Rossikhin V.P. (1969) *Impul'snaja shtampovka detalej v mashinostroenii* [Pulse stamping of parts in mechanical engineering]. Kiev, Ukr. nauch. explore. in-t scientific. tech. information and technology econ. research, 1969, 108 p. (in Russ.).
18. Isachenkov E.I., Kondrashov I.A., Morozova E.V., Shalygina O.V. (1970) *Shtampovka listovykh detalej impul'snymi istochnikami jenergii* [Stamping of sheet parts with pulsed energy sources]. Moscow, MAI Publ., 1970, 22 p. (in Russ.).
19. Borisevich V.K., Sabelkin V.P., Solodyankin S.N. (1979) [On numerical simulation of the process of explosive stamping on a computer]. *PMTF*, 1979, no. 2, pp. 166-174 (in Russ.).
20. Borisevich V.K., Zorik V.Ya. (2000) [Critical impulse technologies for manufacturing sheet parts and their adaptation in the conditions of conversion of enterprises]. *Tekhnologicheskie sistemy*, 2000, no. 4, pp. 36-41 (in Russ.).
21. Afanasenkov A.I., Kotova L.I., Kahib B.N. (2001) [On the operability of industrial explosives]. *Fizika gorenija i vzryva*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 115-125 (in Russ.).
22. Kalashnikov V.V., Sukhanov V.D., Laptev N.I., Demoretsky D.A., Nenashev M.V. (2001) [Deformation processes in the processing of metals by explosion. Methods for calculating the mass of elongated explosive charges]. *Journal of Samara State technical university. Ser. physical and mathematical sciences*, 2001, no. 13, pp. 109-113 (in Russ.).
23. Bazhenov V.G., Egunov V.V., Krylov S.V., Novikov S.A., Batkov Yu.V. (2002) [Experimental and theoretical study of the processes of hydro-explosive stamping of shell elements of the structure]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*, 2002, vol. 43, no. 5, pp. 176-181 (in Russ.).
24. Khristoforov B.D. (2004) [The influence of the properties of the source on the effect of an explosion in air and in water]. *Fizika gorenija i vzryva*, 2004, vol. 40, no. 6, pp. 115-120 (in Russ.).
25. Melnichuk A.P. (2004) [Studies of the processes of hydrodynamic shaping of thin-walled axisymmetric shells in the design of the main contour on the example of a spherical tip of pipelines of air systems of aircraft]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2004, no. 4 (12), pp. 11-19 (in Russ.).
26. Novikov F.V. and Yakimov A.V. (eds.) (2004) *Fiziko-matematicheskaja teorija processov obrabotki materialov i tehnologii mashinostroenija* [Physical and mathematical theory of materials processing processes and mechanical engineering technology. Processing of metals by plastic deformation]. Odessa, ONPU, 2004, vol. 5, 522 p. (in Russ.).
27. Borisevich V.K., Butko V.I., Shkalova A.V. (2005) [Force flows during an underwater explosion in a confined space]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2005, no. 6 (22), pp. 29-32 (in Russ.).
28. Urazbakhtin V.F., Urazbakhtin F.A. (2021) [Integrated assessment of the criticality of the main energy carrier in the explosion stamping of large-sized rocket parts]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2021, vol. 19, no. 2, pp. 104-113 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-104-113
29. Rasko S.P., Ovcharenko A.G. (2006) *Ekspluatatsionnaya bezopasnost' kondensirovannykh vzryvchatykh veshchestv* [Operational safety of condensed explosives]. Biysk, Publishing House of the Altai State Technical University. I.P. Polzunov University, 2006, 147 p. (in Russ.).
30. Krivtsov V.S., Bragin A.P., Melnichuk A.P., Poltarushnikov S.A. (2007) [Determination of the stress-strain state of thin-walled spherical shells]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 73-82 (in Russ.).
31. Melnichuk A.P. (2008) [Investigation of hydrodynamic stamping processes: justification for determining the stress-strain state of thin-walled axisymmetric shells]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 3 (50), pp. 41-46 (in Russ.).

32. Tretyak V.V., Klyachina I.V., Komarov A.Yu. (2007) [Mathematical modeling of pulse technologies using special techniques]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 10 (46), pp. 12-15 (in Russ.).
33. Vorobyev Yu.S., Chernobryvko M.V., Yarizhko A.V., Stepanchenko D.I., Evchenko N.Yu. (2007) [Problems of analysis of high-speed deformation of structural elements under pulsed loading]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 35-43 (in Russ.).
34. Dobrushin L.D., Kolodyazhny A.V., Solodyansky S.N., Yareschenko V.G. (2007) [High-speed deformation of structural elements of blanks and materials in technologies of explosive metal processing by pressure]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 83-92 (in Russ.).
35. Borisevich V.K., Dragobetsky V.V., Tonko O.V. (2007) [Multifactorial nature of physical phenomena in explosive metalworking]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 62-72 (in Russ.).
36. Krivtsov V.S., Borisevich V.K. (2007) [The state and prospects of using pulsed energy sources for technological processes of metal processing]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 10-17 (in Russ.).
37. Narizhny A.G. (2007) [Factors and stages determining the accuracy of pulse stamping of axisymmetric parts]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 125-131 (in Russ.).
38. Zaitsev V.E., Andrienko A.M., Sabelkin V.P., Dombrovskaya S.G. (2007) [Development of experimental technology for manufacturing high-precision shells of double curvature]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 142-149 (in Russ.).
39. Komarov A.Yu., Tretyak V.V., Zorik V.Ya., Klygina I.V. (2007) [Designing pulse technologies using special techniques]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 168-172 (in Russ.).
40. Borisevich V.K., Naryzhnyj A.G., Molodyh S.I. (2007) [The influence of the transmitting medium on the deformation and accuracy of the part during pulse stamping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 173-181 (in Russ.).
41. Kirichenko L.R. (2007) [Competitiveness of technologies of pulse processing of materials]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 240-244 (in Russ.).
42. Zorik V.Ja., Tret'jak V.V., Pavlichenko V.P., Skorchenko I.V. (2007) [Methods of designing technological processes of explosive stamping for obtaining sheet parts]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 255-261 (in Russ.).
43. Bahmet A.G. (2007) [Calculation of plastic deformation operation for pulse crimping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 292-295 (in Russ.).
44. Revenko A.S. (2007) [Improving the qualimetric approach to the processes of stamping large-sized sheet parts in modern quality management systems]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 305-311 (in Russ.).
45. Borisevich V.K., Neveshkin Ju.A. (2008) [Determination of the features of the formation of the external load on the workpiece during volumetric stamping by explosion]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 9 (56), pp. 15-17 (in Russ.).
46. Neveshkin Ju.A., Ostapchuk V.V., Solomjanyj A.U. (2015) [Determination of forces during hydraulic explosion in a limited volume. I. Calculation of forces from the action of shock waves]. *Metallofizika. Noveishie tekhnologii*, 2015, vol. 37, no. 2, pp. 221-232 (in Russ.).
47. Borisevich V.K., Molodyh S.I., Tret'jak V.V. (2008) [Problems of multifactor modeling of pulse processes in the manufacture of shells of double curvature]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 1 (48), pp. 44-49 (in Russ.).
48. Cybul'ko A.E., Romanenko E.A. (2008) [New criteria for the strength of materials with localized and developed plastic deformation under complex stress conditions]. *Vestnik mashinostroeniya*, 2008, no. 9, pp. 17-21 (in Russ.).
49. Tret'jak V.V. (2006) [Object approach to the design of resource-saving pulse technologies]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2006, no. 3 (29), pp. 26-30 (in Russ.).
50. Tret'jak V.V. (2007) [Features of modeling explosive stamping technology in object representation]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 4 (40), pp. 13-17 (in Russ.).
51. Bychkov S.A., Borisevich V.K., Krivcov V.S., Bragin A.P. (2007) [On the concept of using technological criteria for the selection of pulsed sheet stamping technologies]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 11 (47), pp. 222-231 (in Russ.).
52. Zorik V.Ja., Tret'jak V.V. (2008) [Development of a design system for the synthesis of technological equipment for pulsed processes of explosive stamping]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannyye tekhnologii*, 2008, no. 39, pp. 168-175 (in Russ.).
53. Tret'jak V.V., Filipkovskaja L.A. (2008) [Information system of computer support for technological decision-making in sheet stamping by explosion]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2008, no. 1, pp. 63-67 (in Russ.).
54. Tret'jak V.V., Dolmatov A.I., Fedorova A.S., Breus S.V. (2014) [Development of a training software package for calculating the parameters of pulsed volumetric stamping]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2014, no. 2, pp. 176-180 (in Russ.).
55. Onopchenko A.V., Tret'jak V.V., Cyvinda N.I., Skorchenko I.V. (2013) [Calculation of parameters of pulsed deformation of bulk parts using SPRUT technologies]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2013, no. 4 (101), pp. 17-20 (in Russ.).
56. Tret'jak V.V. (2007) [Synthesis and optimization of pulse processes using an object approach]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2007, no. 9 (45), pp. 158-162.
57. Stadnik S.A., Tret'jak V.V. (2008) [Features of the use of pulse technologies for the manufacture of air-

craft engine parts]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 10 (57), pp. 8-11 (in Russ.).

58. Mel'nichuk A.P. (2008) [Investigation of hydrodynamic stamping processes: justification for determining the stress-strain state of thin-walled axisymmetric shells]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 3 (50), pp. 41-46 (in Russ.).

59. Krupin A.V., Kaljuzhin S.N., Altabekov E.U. (1996) *Processy obrabotki metallov vzryvom* [Processes of metal processing by explosion]. Moscow, Metallurgy Publ., 1996, 336 p. (in Russ.).

60. Zorik V.Ja. Tret'jak V.V., Komarov A.Ju. (2008) [Problems of improving the technological design of pulse stamping through the use of special techniques]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, no. 9 (56), pp. 8-14 (in Russ.).

61. Tret'jak V.V. (2009) [Implementation of synthesis algorithms for calculating pulse technologies]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 8 (65), pp. 26-30 (in Russ.).

62. Tret'jak V.V. (2009) [Mathematical model of classification data processing for making technological decisions in the manufacture of parts by pulsed methods from a flat billet]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 6 (63), pp. 30-36 (in Russ.).

63. Tret'jak V.V., Komarov A.Ju., Stadnik S.A. (2009) [Features of the calculation of the stress-strain state of the billet of sheet parts of complex configuration for pulse technologies]. *Vestnik NTTs*, 2009, no. 31, pp. 110-111 (in Russ.).

64. Tret'jak V.V., Komarov A.Ju., Stadnik S.A. (2009) [Issues of synthesis and optimization of technological processes of pulse processing]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 4 (61), pp. 9-13 (in Russ.).

65. Tret'jak V.V., Manankov O.V., Ovchar D.A., Onopchenko A.V. (2009) [Development of group technological processes in the manufacture of sheet parts by pulse processing using computer information technologies]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 3 (60), pp. 17-20 (in Russ.).

66. Borisevich V.K., Tret'jak V.V., Mozgovoij V.F., Brunak A.A. (2009) [Development of a mechanized industrial installation for manufacturing blanks of aircraft engine parts by pulse stamping method]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 1 (58), pp. 38-47 (in Russ.).

67. Snegireva A.I., Kretova D.A. (2017) [Calculation of an improved matrix under pulsed loading]. *Urban construction and architecture*, 2017, vol. 7, no. 4, pp. 20-24 (in Russ.).

68. Tret'jak V.V. (2009) [Mathematical model and algorithm for constructing a matrix mirror when calculating the stress-strain state of a workpiece under the action of pulsed loads]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 7 (64), pp. 7-11 (in Russ.).

69. Borisevich V.K., Golovanov V.N., Tret'jak V.V., Neveshkin Ju.A. (2009) [To assess the economic efficiency of methods for manufacturing complex parts using pulsed energy sources]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 9 (60), pp. 187-193 (in Russ.).

70. Trocko O.V., Dragobeckij V.V., Moroz N.N. (2010) [Hydro-explosive stamping of copper sleeves of crystallizers for continuous casting of steel]. *Obrabotka materialov davleniem*, 2010, no. 2 (23), pp. 131-136 (in Russ.).

71. Krivcov V.S., Mel'nichuk A.P., Zajcev V.V. (2010) [Features of the description of the stress-strain state of thin-walled cone-shaped parts during hydrodynamic stamping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 3 (70), pp. 5-10 (in Russ.).

72. Tret'jak V.V. (2010) [Algorithm and its implementation in calculations of parameters of technological processes of pulse stamping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 8 (75), pp. 11-14 (in Russ.).

73. Tret'jak V.V., Onopchenko A.V. (2010) [Optimization of charge calculations in technological processes of explosive stamping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 4, pp. 30-37 (in Russ.).

74. Naryzhnyj A.G. (2010) [Mixed model of the technological system of hydrodynamic stamping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, no. 6 (73), pp. 13-16 (in Russ.).

75. Mel'nichuk A.P. (2011) [Improving the accuracy of thin-walled pipeline parts of aircraft air systems manufactured by hydrodynamic stamping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no. 6 (83), pp. 11-16 (in Russ.).

76. Tret'jak V.V. (2011) [Features of pulse stamping of volumetric parts of aviation equipment]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no. 2 (79), pp. 42-46 (in Russ.).

77. Tret'jak V.V., Onopchenko A.V., Loza T.V. (2011) [Calculation of parameters of pulse processes in the object representation]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no. 7 (84), pp. 92-95 (in Russ.).

78. Tret'jak V.V. (2011) [Mathematical model for calculating the parameters of gas-blasting stamping]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no. 9 (86), pp. 160-163 (in Russ.).

79. Tlustenko S.F., Sytnik V.A. (2012) [Shaping of parts by explosive processes according to the conditions of precision assembly of aircraft aggregates]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2012, no. 5 (36), pp. 108-112 (in Russ.).

80. Borisevich V.K., Tret'jak V.V., Onopchenko A.V., Zejniev T.G. (2012) [Calculation of the parameters of the technology of stamping by explosion of shells of parts with heating of workpieces in the object representation]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii*, 2012, no. 55, pp. 28-36 (in Russ.).

81. Neveshkin Ju.A., Onopchenko A.V., Tret'jak V.V. (2012) [Modeling of pulse volumetric stamping processes]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2012, no. 8 (95), pp. 253-256 (in Russ.).

82. Koval'chuk I.A., Tret'jak V.V., Manankov O.V. (2012) [Promising uses of SPRUTTEHRO for the development of the design and manufacturing technology of forgings using pulse technologies]. *Aviatsionno-kosmi-*

*cheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2012, no. 9 (96), pp. 29-33 (in Russ.).

83. Tret'jak V.V., Sotnikov V.D., Hudjakov S.V., Fedorova A.S. (2015) [The possibilities of using an interactive software package for the classification of sheet parts for the manufacture of pulse technologies]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2015, no. 2, pp. 166-171 (in Russ.).

84. Sednev V.L. (2016) [The application and evaluation of methods for metal working by explosion when performing the tasks in the areas of the arctic region difficult of access]. *Arctic, ecology and economics*, 2016, no. 2 (22), pp. 98-106 (in Russ.).

85. Klimova E.M., Meshcheryakov A.S. (2018) *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo". Istoriya razvitiya tekhnologii vzryvnoi obrabotki metallicheskih i drugikh materialov, v chastnosti poroshkovykh* [Proceedings of the international symposium "Reliability and Quality". History of development of technology of explosive processing of metal and other materials, in particular powder]. Penza, 2018, vol. 2, pp. 245-246 (in Russ.).

86. Semashko V.V., Sudnik L.V., Smirnoye G.V. (2018) *Primenenie vysokojenergeticheskikh impul'snykh tekhnologii dlja izgotovlenija mednogo tolstostennogo izdelija jelektrotehnicheskogo naznachenija. Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov. Sbornik nauchnykh trudov* [Application of high-energy pulse technologies for the manufacture of thick-walled copper products for electrical purposes. Modern methods and technologies for creating and processing materials. Collection of scientific works]. Minsk, 2018, pp. 115-124 (in Russ.).

87. Chizhov I.L. (2019) [Pulse stamping]. *Academy*, 2019, no. 9 (48), pp. 10-11 (in Russ.).

88. Vitkovskaya A.A. Vlasova G.N., Sevostyanov A.S. (2020) *Sovremennye tekhnologii proizvodstva v mashinostroenii. Izgotovlenie detalej dlja zhidkostnykh raketnykh dvigatelej s pomoshh'ju shtampovki vzryvom* [Modern manufacturing technologies in mechanical engineering. Manufacture of parts for liquid rocket engines using explosion stamping]. Voronezh, 2020, pp. 59-62 (in Russ.).

89. Rimshin V.I. (2021) [Explosive chambers]. *Expert: theory and practice*, 2021, no. 2 (11), pp. 51-56 (in Russ.). DOI: 10.51608/26867818\_2021\_2\_51

90. Kretov D.L., Murashkin V.G. Snegireva A.M. (2021) [Methods of calculating ring-shaped reinforced concrete matrices with impulse loads]. *Expert: theory and practice*, 2021, no. 1 (10), pp. 14-18 (in Russ.). DOI: 10.51608/26867818\_2021\_1\_14

91. Tsechoeva A.H., Gediev M.S., Surkhaeva H.I. (2021) [Blasting methods for processing difficult-to-cut materials]. *Naukaibiznes: putirazvitiya*, 2021, no. 12 (126), pp. 63-66 (in Russ.).

92. Malashenko V.V., Gladkaya A.D., Malashenko T.I. (2021) *Khimicheskaya termodinamika i kinetika. Sbornik materialov Odinnadtsatoi Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. Vlijanie skorosti plasticheskoy deformatsii na mehanicheskie svoystva funkcional'nykh splavov* [Chemical thermodynamics and kinetics. Collection of materials from the Eleventh International Scientific Conference. Influence of plastic deformation rate on mechanical properties of functional alloys]. Veliky Novgorod, 2021, pp. 157-158 (in Russ.).

93. Yildiz R.A. (2022) [Explosive forming of precipitation-hardened aluminum alloy tubes]. *Physics of gorenje and explosion*, 2022, vol. 58, no 6, pp. 121-134 (in Russ.). DOI: 10.15372/FGV20220611

## Evolutionary Development of Pulse Technologies in the Production of Rocket Large Parts

V.F. Urazbakhtin, Postgraduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.V. Shchenyatsky, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

F.A. Urazbakhtin, DSc in Engineering, Professor, Votkinsk branch of Kalashnikov ISTU, Votkinsk, Russia

*An analytical review of research since the 50s of the XXth century is presented, related to the development of stamping by explosion - a promising method of forming large hard-to-process parts, with the following results is established.*

*The source of the force during explosion stamping is the high explosive charge. It is an important factor of criticalities during plastic deformation of a titanium alloy workpiece. There can be many reasons of their origin, and they are taken into account by researchers, but separately. At the same time, the process of force generation is quite complex, especially in the aquatic medium of the basin. However, the process of explosion stamping must be controlled under any conditions.*

*Force delivery to the workpiece surface takes place during explosion stamping within water transfer medium in the basin. Compared with the air medium, the power of this effect increases significantly due to more complete use of the water energy capabilities. Most researchers agreed that the force effect, consisting of a shock wave, motion of a hydraulic flow and a gas bubble, result in complexity of mathematical modeling of the process of its displacement.*

*Mechanical and geometric characteristics of the workpiece affect quality of the part made by explosion stamping. It is determined by the material ability to be plastically deformed and has the effect in strength, accuracy of geometric and angular dimensions, as well as surface condition of the part, the absence of defects, fractures and corrugations. At the same time, a unified quality assessment of the workpiece and part has not been established yet.*

*The multiparametric process of plastic deformation during explosion stamping in water deforms not only of the workpiece, but also of the matrix, thus altering the part shape, walls thinning, the appearance of corrugations and flanges due to the complex stress state in various sections of the part.*



*It is noted that the properties revealed during the explosion stamping, leading to change in corresponding parameters and characteristics, collectively determine the system to which systematic approach may be applied.*

*A feature of explosion stamping study is the need for an experiment, the success of which is largely determined by the experience of the researcher.*

*This stage of the explosion stamping evolutionary development is associated with the introduction of computer technologies into the practice of technological processes design. Research is mainly related to the use of object-oriented methods, the development and application of mathematical models that allow automating procedures for determining the parameters of the stamping process mode, followed by modeling individual actions during stamping by explosion. At the same time, it is necessary to evaluate the performance of stamping by explosion both as a whole and individual stages of its implementation.*

**Keywords:** explosion stamping, pulse stamping technologies, high explosive charge, plastic deformation, stress-strain state, pressure, pulse, computer technology.

Получено 28.04.2023

#### Образец цитирования

Уразбахтин В. Ф., Щенятский А. В., Уразбахтин Ф. А. Эволюционное развитие импульсных технологий в производстве крупногабаритных деталей ракетной техники // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 2. С. 34–50. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-34-50.

#### For Citation

Urazbakhtin V.F., Shchenyatsky A.V., Urazbakhtin F.A. (2023) [Evolutionary Development of Pulse Technologies in the Production of Rocket Large Parts]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 34-50 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-34-50.