

УДК 621.7.044

**В.Я. ЗОРИК, В.В. ТРЕТЬЯК, А.Ю. КОМАРОВ***Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ПРОБЛЕМЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ  
ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИЕМОМ**

Статья посвящена проблемам совершенствования методов проектирования импульсной штамповки. Рассматриваются проблемы использования специальных приемов в вопросах математического моделирования, динамического поведения заготовки, а также методов распознавания образов, которые обеспечивают принятие решений на верхних уровнях детализации технологических процессов. Предложенные новации можно использовать при назначении режимов обработки; адаптации разработанных теоретических основ, прикладных программ. Данная методика может быть адаптирована для методов одноинструментальной штамповки; разработке принципиально новых методов изготовления листовых деталей, в том числе при совмещении методов одноинструментальной и двухинструментальной штамповки, а также при совмещении операций на одном штампе.

**импульсная штамповка, методы проектирования, специальные приемы, совмещение операций, математическое моделирование**

В настоящее время технологам в области авиационного двигателестроения необходимо решать проблемы получения листовых деталей в условиях постоянно совершенствования их форм и быстрой смены объекта изготовления. При этом следует выделить несколько основных направлений, обусловленных технологическим проектированием.

К ним можно отнести проблему совершенствования методов проектирования импульсной штамповки на базе математического моделирования динамического поведения заготовки, а также методов распознавания образов, обеспечивающих принятие решений на верхних уровнях детализации ТП, особенно при назначении режимов обработки; адаптации разработанных теоретических основ, прикладных программ, для других методов одноинструментальной штамповки; разработке принципиально новых методов изготовления листовых деталей, в том числе при совмещении методов одноинструментальной штамповки и двухинструментальной, а также при совмещении операций на одном штампе.

Это обеспечит возможность проектирования ТП в реальном масштабе времени и органичное вклю-

чение новых методов обработки в жизненный цикл изделия на основе информационных технологий.

Совершенствование теоретических основ технологического проектирования производства листовых деталей взрывом возможно за счет разработки системы посылок и утверждений знаний о закономерностях устойчивости формоизменения при обжиме оболочек; использования результатов математического моделирования динамического поведения заготовки, в т.ч. для назначения оптимального количества и последовательности операций термической обработки и специальных технологических приемов.

При проектировании штампов необходима оптимизация их принципиальных и конструктивных схем. Первые базируются на совершенствовании методов интенсификации течения за счет оптимизации свойств фиксирующих, базирующих и переходных поверхностей рабочего зеркала штампа.

Совершенствование конструктивных схем обуславливается разработкой новых схем взаимодействия элементов штампа, применением новых материалов, исследованием механизма явлений, обуславливающих выход штампов из эксплуатации.

Совершенствование методов расчета на разрушения должно базироваться на изучении механизма разрушения и установлении допустимых для конструкции нагрузений при взрыве. Причины выхода из эксплуатации штампов из-за потери свойств рабочими поверхностями штампа необходимо установить по результатам исследований явления пластического течения в поверхностных слоях, наиболее нагруженных участках и элементах рабочих поверхностей штампа. Это обеспечит аргументированный выбор рациональных методов восстановления поверхностей штампа, в т.ч. нанесения на них различных покрытий.

Разработанные теоретические основы технологического проектирования, созданная система посылок и утверждений может быть использована практически без адаптации для всех методов одноинструментальной штамповки (жидкостью, газом, резиной) благодаря реализованной методологии. Она базируется на системном подходе, его основных принципах, закономерностях, установленных в теории и практике листовой штамповки.

Процессы преобразования (формоизменения) у всех этих методов подобны, отличие в методиках расчета режимов обработки. Они достаточно полно исследованы, и этими результатами можно расширить систему посылок и утверждений, а также блок для расчета режимов в пакете прикладных программ.

Для двухинструментального метода штамповки созданные теоретические основы адаптируются, т.к. методика построения технологических моделей детали, ТП, штампа базируется на аспекте преобразования: пластическом течении материала.

Для предприятия и его технологической системы изготовления штамповкой деталей сложной конфигурации важно комплексное решение проблемы, при котором оптимально используются все освоенные предприятием методы штамповки и соответствующие производственные участки [1].

Номенклатуру таких деталей можно разделить на

три массива: когда их получение возможно только по одно- или двух инструментальной схеме штамповки, а также по обеим схемам. Первые два массива деталей являются безальтернативными по использованию метода штамповки, при изготовлении деталей третьего массива необходимо выбирать по соответствующим критериям лучший из альтернативных методов.

Создание новых методов обработки было обусловлено в основном технологическими задачами, которые не поддавались решению традиционными методами. За взрывной штамповкой закрепились безальтернативная номенклатура оригинальных деталей (по сложности формы, точности поверхностей, габаритам, требованию к цельности детали, наличию в детали закрытых полостей для штамповки на прессах и т.д.).

По мере совершенствования взрывной штамповки, создания типовых средств технологического оснащения, а также производственных участков появилась возможность расширить номенклатуру за счет деталей, которые традиционно изготавливались на прессовом оборудовании. Поэтому уже на уровне решения задачи обеспечения технологичности изделий должны анализироваться варианты изготовления деталей традиционными и новыми методами.

При изготовлении безальтернативной номенклатуры взрывной штамповкой дальнейшее совершенствование реализуют как за счет освоения деталей с новыми конструктивно-технологическими свойствами (форм, материалов, гибкости заготовок, точности и т.д.), так и интенсификации технологических процессов. Последняя может осуществляться по двум направлениям: совмещение операций штамповки взрывом и совмещение методов обработки.

В разработанной системе технологического проектирования предусмотрены технологические этапы получения генеральной формы, фрагментов, которые реализуют за несколько операций. Их можно осуществить за один взрыв, т.к. взрывная штампов-

ка обеспечивает принципиальную возможность для параллельного и последовательного их выполнения.

При параллельном выполнении операций материал подвергается деформированию на локальных участках заготовки за одно ее нагружение. В этих процессах объединяют формоизменяющие или разделительные операции, которые характеризуются незначительным временем деформирования и перемещением материала заготовки. Т.е. может осуществляться местная формовка, пробивка отверстий в плоских заготовках, а в трубчатых – местная раздача, формовка, пробивка отверстий, гофрирование.

Так как деформированию подвергается материал на отдельных участках заготовки, то напряженно-деформированное состояние материала на одном участке не оказывает существенного влияния на протекание пластической деформации на другом.

Последовательное совмещение операций позволяет объединить формоизменяющие (вытяжку, раздачу, формовку, отбортовку) и разделительные (пробивка отверстий) на каком-либо участке или всей заготовке.

Первыми выполняют операции вытяжки, раздачи для получения генеральной формы детали, при этом реализуется энергия взрыва, достаточная и для последующих операций.

Совмещение разделительной и формоизменяющих операций позволяет осуществлять процессы, в которых после пробивки выполняется отбортовка.

При таком совмещении (рис. 1) реализуется проштамповка материала на некоторую глубину перед пробивкой и отбортовкой, что значительно расширяет технологические возможности процесса.

В этом случае диаметр пробиваемого отверстия  $d_n$  в полуфабрикате для получения борта значительно больший (а деформация меньшая), чем отверстия  $d_o$  в плоской заготовке. Пробивка отверстий может производиться на кромке пуансона в виде клина, когда заготовка еще не отформована по всей рабочей поверхности матрицы.

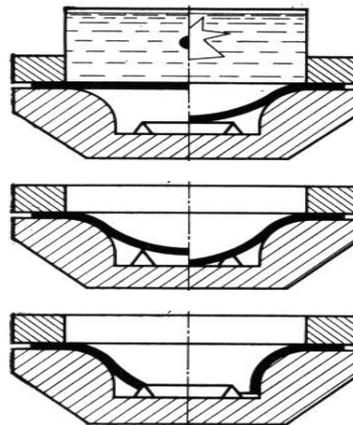


Рис. 1. Схема совмещения операций

Совмещают формоизменяющие и разделительные операции в таком штампе [2, 3], в котором силовые связи между матрицей и пуансоном исключены благодаря его размещению на амортизаторе (из резины и т.д.). Поэтому избыточная энергия заряда, действующая в зоне пробитого отверстия, не действует на матрицу.

Такое совмещение эффективно при получении (рис. 2) осесимметричных деталей из плоских заготовок (диффузоры, мембраны, диафрагмы и т.д.) и оболочковых с различными рифтами и горловинами (резервуары, бачки и т.д.).

Совмещение методов обработки направлено на реализацию преимуществ одно- и двухинструментальной схемы штамповки и исключение недостатков каждого из методов.

Взрывной штамповкой реализуют высокую точность поверхностей, сложную их форму, получают крупногабаритные детали (в т.ч. из сварных полуфабрикатов), детали с закрытыми полостями, а также детали из заготовок высокой гибкости. Для импульсных методов обработки устойчивость процессов формообразования выше, чем у статических методов.

Благодаря блокированию пуансоном перемещений заготовки в купольной части при деформировании на прессах по двухинструментальной схеме устойчивость формообразования, обусловленная сосредоточением утонений, становится выше.



Рис. 2. Детали, полученные совмещением операций

Минимальные утонения в ней позволяют реализовать многопереходную вытяжку на нескольких матрицах с последовательным уменьшением диаметра полуфабриката и увеличением его высоты. Такую вытяжку нельзя осуществить импульсными методами.

Но блокирование пуансоном перемещений материала прижатых участков заготовки играет отрицательную роль при формовке. Пластическое течение сосредоточено в узкой зоне у ребра матрицы, ресурс пластичности в остальной части фрагмента не используется.

Поэтому процессы формовки, устойчивость формообразования при которых исследована в работе при взрывной штамповке, следует выполнять импульсными методами.

При получении высоких деталей ( $H > 1,2 \div 1,4 R_0$ ) с дном, генеральная форма которых имеет сложные поверхности с фрагментами, образующими закрытые полости, совмещают два метода. Высокий полуфабрикат изготавливают по двухинструментальной схеме, а все сложные поверхности (в т.ч. высокой точности) – взрывом (рис. 3).

При жестком пуансоне малые радиусы ( $r \approx \delta$ ) сопряжения в донной части деталей выполняют при малых нагрузках на матрицу; при взрывной штамповке высокие давления, потребные для оформления радиуса, действуют на большую часть матрицы, что снижает их стойкость.

Однако на свободном участке между пуансоном и матрицей устойчивость формообразования, обусловленная складкообразованием ниже, чем при взрыве.



Рис. 3. Деталь, полученная за счет использования специальных приемов



Рис. 4. Панель, изготовленная совмещением методов штамповки

Поэтому при реализации совмещения методов для деталей типа панелей (рис. 4) в начале взрывом получают генеральную форму (причем при малых толщинах материала их формуют пакетом из  $3 \div 4$  штук), а затем на прессе оформляют радиусы сопряжений.

Успешная апробация этих технологий с совмещением методов (отраженная в специальных технологических приемах) подтверждает эффективность совмещения.

Необходим алгоритм проектирования на основе анализа конструктивно-технологических свойств деталей, которые нельзя изготовить без снижения показателей качества деталей ни одним методом.

Для комплексного решения проблемы получения штамповкой листовых деталей сложной конфигурации наиболее трудная задача – выбор наилучшего варианта среди альтернативных, т.е. при анализе массива деталей, которые могут изготавливаться как по одно-, так и двухинструментальной схеме.

На этом уровне проектирования необходимо исследовать свойства технологической системы (ТС) производства деталей всеми методами штамповки; ТС взрывной штамповки в нее входит как один из компонентов. Альтернативные варианты ТП получают благодаря технологическому проектированию, реализованному в этих компонентах.

Так как проектирование в них проводилось блочно, то все процедуры и алгоритмы остаются неизменными.

Согласованию должны подлежать исходные данные для проектирования ТП: параметры конструкторско-технологических свойств деталей (отраженные в их моделях) и свойства ТП, обуславливающие маршрут обработки и затраты (материальные и временные) на его реализацию; программа выпуска остается идентичной для сравниваемых вариантов.

Методика построения модели детали сложной формы базировалась на системных принципах, системно-структурном анализе и закономерностях пластического течения, т.е. она приемлема не только для взрывной штамповки, но и для других методов. Поэтому конструктивно-технологические свойства деталей будут отражены одинаковыми параметрами.

Для каждого из методов (импульсных, штамповкой резиной, жидкостью, а также штамповкой по двухинструментальной схеме) из номенклатуры листовых деталей сложной формы необходимо выделить возможную номенклатуру, например, по организационно-техническим критериям. В их качест-

ве могут быть использованы критическая для метода программа выпуска  $N$ , площадь штампуемой заготовки  $F$  или их произведение  $NF$ .

Затем из возможной номенклатуры выделяют допустимую, например, по технологическим критериям, обуславливающим возможность получения деталей: по предельному формоизменению, точности, допустимому утонению.

Эффективная номенклатура для метода определяется, например, по технико-экономическим показателям с учетом других критериев.

С учетом свойств технологической системы для получения штамповкой деталей устанавливают оптимальную номенклатуру для каждого метода в конкретных производственных условиях.

Таким образом, приоритетность альтернативного варианта будет обусловлена показателями качества: объекта преобразования (детали), процесса преобразования (ТП), средств технологического оснащения СТО (оснастки, оборудования). Показатели качества детали обусловлены ее конструкторско-технологическими свойствами, отражающими: форму, ее сложность, габариты, гибкость заготовки, точность поверхностей, отклонения от формы, а также механическими свойствами материала.

Показатели качества ТП обусловлены надежностью получаемых форм и размеров, производительностью, степенью механизации, себестоимостью, коэффициентом использования материала [5].

Показатели качества СТО обусловлены их стойкостью, стоимостью, затратами (временными, материальными), универсальностью и т.д.

Многокритериальный подход к оценке ТП предполагает наличие множества целей, что свидетельствует о неопределенности цели. Построение дерева целей (цели нулевого порядка) – первый этап функционального анализа при выборе варианта ТП.

Цель разрабатываемых ТП можно представить как функцию, которая осуществляется через штамповочные операции. В качестве основных функций рассматривают: получение деталей, соответствующую

щих ТУ; обеспечение необходимых значений показателя технического уровня процесса и т.д.

Цель нулевого уровня детализируется на последующих уровнях и расчленяется на цели, направленные на обеспечение: качества детали, технического уровня ТП, а также экономических показателей ТП.

Качество изделий на втором уровне детализации должно удовлетворять требованиям смежных участков (механообработки, сборки и т.д.), а также обеспечить потребительские свойства: форму, ее точность, шероховатость, утонение, свойства металла и т.д.

Благодаря уточнению потребительских свойств, их детализации могут быть цели и третьего ранга.

Технолог выбирает наилучший вариант ТП по набору значений критериев оценки для всех альтернативных вариантов, т.е. реализуется процедура принятия решений в условиях недостатка информации.

Выбор оптимального технологического решения относится к классу задач, характеризующихся множеством целей и множеством путей достижения этих целей.

В условиях неопределенности, являющихся следствием многокритериальной оценки ТП, выбор предпочтительного варианта сложно свести к точно поставленным задачам математического программирования. "Снимают" неопределенность за счет ввода гипотез. Формирование гипотез выполняют формализацией неформальных ситуаций. Поэтому анализ задач принятия решений в условиях неопределенности не завершается математическими методами, мнение эксперта (специалиста в предметной области) подчас решающее.

Проблема принятия решений рассматривают в теории принятия решений.

Сужают множество допустимых вариантов, используя эффективные компромиссы Парето, гарантированные оценки Гермейера, выбор решений на основе нечеткого описания.

Наиболее надежным способом сравнения вари-

антов является метод порогов несравнимости и компенсационных оценок [4].

Для выбора варианта ТП необходимо получить оценки для частных критериев ТП, агрегировать эти оценки в комплексные критерии, сформировать решающее правило выбора предпочтительного варианта. Для построения оценочных шкал для частных критериев и агрегирования их в комплексные признаки используют методы компенсации, а при выборе предпочтительной альтернативы – метод порогов несравнимости.

Такой подход к выбору предпочтительного варианта ТП приемлем для процессов штамповки; выбранный ТП – оптимальный только для конкретных условий, отраженных в системе критериев оценки процессов и мнения экспертов [5].

Применение имитационного моделирования в проектировании процессов штамповки деталей позволит оценить эффективность разработанных технологических решений, и неудачные можно исправить еще до реализации ТП, т.е. до изготовления штампа. Оно обеспечит решение задач оптимизации значений частных критериев оценки ТП; выбор оптимального варианта ТП на основе значений частных критериев оценки ТП и при различных управлениях [6, 7].

Построение имитационных моделей - процедура неформальная и имеет феноменологическую основу. В ней используют основные уравнения пластического течения металла и соответствующие граничные условия для решений.

Используемые модели характеризуются векторами входных, управляющих и выходных параметров. Входные параметры не меняются в ходе выполнения моделирования (это параметры конструктивно-технологических свойств детали).

Параметры управления – это те, которые выбирает разработчик ТП для реализации технологической задачи, т.е. параметры технологических переходов, оборудования, конструкции штампа, режимы штамповки и т.д.

Выходные параметры определяются целями проектирования и содержат несколько групп параметров оценки ТП. Это критерии, характеризующие технический уровень детали и собственно ТП.

Имитационные модели можно внедрять постепенно, используя их на первом этапе наряду с существующими методами проектирования, так как никаких принципиальных изменений сложившихся путей проектирования имитация не предусматривает. Период до их внедрения может быть использован для оценки адекватности моделей и их корректировки.

Основная цель – нахождение оптимального набора значений управляющих параметров. На компьютере получают результаты стандартных расчетов различных вариантов. Технолог по этим результатам выбирает наилучшее решение, руководствуясь правилами выбора (своими, интуитивными или сформулированными).

Рассмотренные основные направления совершенствования технологического проектирования и совмещение методов одно- и двухинструментальной штамповки позволят более эффективно решать проблему получения листовых деталей сложной пространственной конфигурации.

По результатам исследований предложено несколько схем использования импульсного процесса с вариантами специальных приемов.

Проведено математическое моделирование процесса деформирования сложных деталей авиационных двигателей. Технологический процесс разделяется на несколько этапов, а этапы рассматриваются изолированно, без учета влияния предыстории деформирования.

Метод позволяет значительно снизить максимальные деформации, что существенно при выполнении технических требований, предъявляемых к детали.

## Литература

1. Пихтовников Р.В., Завьялова В.И. Штамповка листового металла взрывом. – М.: Машиностроение, 1964. – 175 с.
2. Борисевич В.К., Зорик В.Я. Совмещение методов импульсной обработки при закреплении труб в трубных досках // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Х.: ХАИ, 2000. – Вып. 22 (5). – С. 94-02.
3. Штамповка взрывом / М.А. Анучин, О.Д. Антоненков, Ю.П. Жбанков и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 152 с.
4. Сироджа И.Б. Структурно-аналитический метод распознавания образов с разнотипными признаками // Математические методы анализа динамических систем. – 1981. – Вып. 5. – С. 91-107.
5. Зорик В.Я., Филипковская Л.А., Третьяк В.В. Информационная технология классификационной обработки данных в проектировании техпроцессов листовой штамповки взрывом // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії: Тематичний збірник наукових праць. – Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия, 2001. – С. 286-289.
6. Борисевич В.К., Молодых С.И. Количественный анализ областей эффективного применения импульсных методов штамповки // Технологические системы. – 2002. – С. 137-141.
7. Молодых С.И. Технологические аспекты импульсной штамповки // Авиационно-космическая техника и технология. – 1999. – № 14. – С. 68-71.

*Поступила в редакцию 12.05.2008*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.