

В.С. Кривцов, В.К. Борисевич

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
"Харьковский авиационный институт", Украина*

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

В статье освещена история создания обработки материалов импульсными источниками энергии, ее современное состояние и трудности, встречающиеся на пути внедрения в промышленность этих технологических процессов. Далее указаны проблемы и задачи, которые должны решить производственные, научные и управленческие работники для совершенствования научных исследований и расширения сферы производства с помощью этих технологий.

импульсные технологии, взрыв, электрогидравлика, магнитноимпульсная технология, газодетонационные процессы, сварка, нанесение покрытий, научный потенциал, бассейны

В последние годы в научных кругах, и, в особенности, в различных инстанциях административных управленческих органов появилась тенденция, а точнее недоверие, к полезности и экономической целесообразности применения, особенно взрывчатых веществ, как импульсных источников энергии, для технологических процессов металлообработки.

Это, очевидно, связано в первую очередь с боязнью «возможных» террористических актов, а также «случайных взрывов».

Ну и не последним фактором является значительно уменьшающаяся стоимость изделий, полученных этими способами, что сказывается на ценообразовании и, в некоторой степени, на уменьшение прибылей предпринимателей.

Но заранее нужно сказать, что за более чем сорокалетие активного применения этих технологий (до 1985 г. все увеличивавшихся в объемах) нам не известны случаи исчезновения взрывчатки или ее применения не по назначению (имеются в виду нарушения, которые могут возникнуть в цехах и на участках импульсной обработки материалов). Не известно так-

же не одного случая случайных или специальных взрывов и тем более производственных травм на заводах и в различных НИИ.

Нет совершенно и оснований отмены таких технологий из-за получения некондиционных или некачественных деталей – только наоборот.

Немного истории и статистики.

Исследовательские работы в области высокоскоростного кратковременного и мощного приложения нагрузки к деформируемому телу начались под руководством Р.В. Пихтовникова в конце сороковых и в начале 50-х годов прошлого столетия.

Первый результат этих исследований – получение деталей ударом твердого тела. Это докторская диссертация Р.В. Пихтовникова, защищенная в 1952 году. К тому же времени относится и начало серьезной заинтересованности промышленных предприятий в этом технологическом процессе.

Особенно стали интересоваться «взрывными делами» предприятия военно-промышленного комплекса, да и с ними легче было работать, так как у них есть труднодеформируемые (трудноизготавливаемые) объекты производства, и они обладали необходимыми для исследований средствами – это предприятия Минавиапрома, Миноборонпрома, судостроения, радиопромышленности и т.д. Опора была на них.

И не случайно первые серьезные внедренческие работы были осуществлены в Министерстве судостроения на Северодвинском заводе. К этим работам были привлечены ученые НИИТМ Минобщемаша под руководством профессора, д.т.н. С.М. Поляка, НИИ Минсудпрома под руководством в последующем профессора, д.т.н. В.Г. Степанова и ХАИ под руководством профессора, д.т.н. Р.В. Пихтовникова.

И представьте себе: просто ОТ-Ч, толщиной 16 мм, два сваренных, каждый по 4 м высоты, крейсерских барбета диаметром 8 м из брони толщиной 80 мм, просто заряд 1,2 кг аммонита и просто диаметр изделия 1260 мм. И что же? Такая масса вместе с водой прыгает на 1,2 м. Конечно, технология была совершенствована, конструкция бассейна изменена – и все пошло. И никто не ожидал на производстве, что такие серьезные изделия, да еще из различных титановых сплавов можно изготовить целыми с минимальной длиной сварных швов (только для получения за-

готовки) с выштамповками и без уникального прессового и очень дорогого оборудования.

Затем Запорожье и Москва, Киев и Воронеж, Днепропетровск и Пермь, Омск и Казань, Арсеньев и Минск, Ташкент и Мариуполь, Николаев и Санкт-Петербург, Самара, Комсомольск-на-Амуре, Рыбинск, Новосибирск, Нижний Новгород, Белгород, Сумы и многие, многие другие наши города и предприятия. Уже значительно позже, в 1986 г., эта работа оценена Премией Совета Министров СССР. Наградами были удостоены представители производства и науки Москвы и Киева, Санкт-Петербурга и Харькова, Запорожья и Днепропетровска, Николаева и Новосибирска.

Появилось много информации о разработке и внедрении этих технологических процессов в дальнем зарубежье: в Англии, Германии, США и других странах.

А наука тоже не дремала. Только в ХАИ с 1961 по 1990 г. было проведено 18 всесоюзных конференций и крупных семинаров, символом которых было скульптурное произведение Вутетича «Перекуем мечи на орала». Только в научной школе ХАИ было защищено более 200 кандидатских и 30 докторских диссертаций, только внедренческие работы ХАИ дали возможность получить предприятиям страны экономический эффект около 1 млрд. руб., было построено на заводах несколько крупных цехов по импульсной металлообработке. Одним словом эпоха мирного взрыва состоялась и процветала. А, кроме того, развивались все сопутствующие взрыву технологические процессы: электрогидравлические, магнитно-импульсные, газодетонационные (в том числе и нанесение покрытий), деформирование сжиженными газами, сварка взрывом и ее разновидности и возможности. А упрочнение, а прессование порошков, резка проката и брикетирование стружки, а исследования в области получения плотноупакованных структур. Это же оставлять только в истории нельзя. И не оставаться же нам без этих видов обработки материалов, которые могут сделать гораздо больше того, что можно сделать на кузнечно-прессовом оборудовании.

Теперь о некоторых предпосылках необходимости развивать технологии импульсной обработки материалов.

Максимальная отдача промышленности Украины по объему выпускаемой продукции относится к 1990-91 г.г. Не будем анализировать причины

последующего падения производства товаров различного назначения. Но сейчас мы выпускаем менее 50% того, что выпускали в те годы и то, в основном, за счет легких отраслей промышленности, часть которых принадлежит иностранным инвесторам.

Почему же произошло такое «невероятие»?

А.Ф. Филиппенко в статье «Потенциал экономического развития в Украине» в газете «Урядовий кур'єр» № 211 от 14.11.2000 г. характеризует этот фактор.

В современных условиях удвоение энергетических мощностей в мире происходит каждые 12 лет, объема промышленной продукции – каждые 15 лет.

При этом в готовый продукт переходит не более 30% потребляемых сырьевых ресурсов, которые из года в год становятся все дороже.

На единицу конечного продукта у нас расходуется значительно больше сырья и материалов, чем в любой передовой стране в мире (так, например, количество стали, на единицу конечного продукта у нас, расходуется в 1,75 раза больше, чем в США) – и так почти по всем показателям.

И это не потому, что по составу и разнообразию сырьевых ресурсов Украина опережает такие развитые страны, как США, Канада, Япония, Великобритания, Китай, Франция и т.д., а в недрах страны, в том числе, включая морские шельфы, разведано более 8 тысяч месторождений примерно 100 видов полезных ископаемых: нефть, железные, марганцевые, титановые, урановые и т.д. руды, уголь, сера, ртуть, сода, минеральные воды и в больших количествах (кроме меди и некоторых других цветных металлов). Однако нельзя же с таким «КИМ» использовать эти ресурсы, да еще и загрязнять атмосферу.

Новейшие технологии – это национальное богатство любой страны. И очень большой потенциал этого богатства заложен в импульсных технологиях, являющихся одним из главных звеньев технологического прогресса в Украине, которая обладает самым значительным потенциалом накопленной практики и технологии этих процессов в мире.

Кроме того, известно, что в Украине в настоящее время нет современного кузнечно-прессового оборудования, которое могло бы обеспечить выпуск качественной продукции для производства изделий аэрокосмического комплекса, судостроения, общего машиностроения (в том числе

сельскохозяйственного и шахтного оборудования) и т.д. На пальцах можно перечесать наши заводы, выпускающих это оборудование (имеется в виду прессовое и смежное с ним) – это «Тяжмаш» (Краматорск), «Днепропресс» (Днепропетровск), «Прессмаш» (Одесса), «Карпатпрессмаш» (Ивано-Франковск). Мало и далеко не вся номенклатура возможных прессуемых изделий. И не те постели и не та автоматика и не та точность изделий. А где взять средства на покупку нужных современных прессов и другого кузнечно-прессового оборудования, выпускаемого фирмами "Panst" (Германия), Feintoll (Швейцария), Kanon (Италия), Leisfeld и Kasesling (Германия) и т.д. Но это же все дорого! А перестройка своих заводов еще дороже и все это – время. Закупка такого оборудования для Украины стоит не меньше 20 млрд. долларов – больше годового бюджета страны (для того чтобы выпускать продукцию на уровне 1990 г., по качеству). Да и то на этом оборудовании можно изготавливать далеко не все, что может дать импульсная технология.

Какой же выход?

Импульсная технология может все: оборудование дешевле упомянутого выше в десятки раз, хотя с производительностью пока не все в порядке. Экономия ресурсов колоссальная, а упомянутый КИМ может подтянется минимум в $1,5 \div 2$ раза.

Для наших технологических процессов импульсная обработка материалов особенно перспективна. Не будем перечислять все известное, но коротко напомним: все сложные листовые (в особенности пространственные), с малыми деформационными свойствами из высокопрочных труднодеформируемых материалов, и крупногабаритные детали с характерными размерами более 1500 мм и притом высокоточные, сварка материалов, плохо поддающихся сварке, осуществление многослойной сварки листа и упрочнение различных материалов или полностью изделий, получение деталей совмещенными операциями, получение комплектующих и сборка теплообменников, футеровка различных изделий (в т.ч. труб), нанесение различных коррозионных, теплоизоляционных и др. (металлических и неметаллических) покрытий, прессование различной структуры порошков и получение из них изделий, получение материалов с плотноупакованными структурами, имеющими фантастические физические и механические свойства, осуществление нанотехнологий, экономическая

целесообразность объемной штамповки высокого качества и т.д. Для этого все (возможно и другие) технологические процессы импульсной обработки пригодны (каждый в своей области): взрыв, электрогидравлика, магнитно-импульсная, газодетонационная, вакуумная и др. технологии в преобладающем количестве случаев и целесообразны. Только нужно работать.

Как же это можно осуществить?

Как же придать "взрыву" великое мирное будущее?

Нужно сказать, что до 1990 г. в этом направлении мы активно работали в СЭВ. У нас был при ГКНТ СССР на протяжении многих лет Комитет и Совет по координации этих работ, выделялись, теперь можно сказать, довольно большие госбюджетные средства, да и предприятия, при их большой загрузке, выделяли деньги на хоздоговорные работы, благодаря которым за относительно короткие сроки было построено в странах СНГ около 100 участков и цехов, где применялась импульсная технология. Совет ГКНТ, возглавляемый профессором В.М. Кудиновым, помогал на местах внедрению и совершенствованию этих технологических процессов, передавать через образованный нами же Совет СЭВ эту технологию в другие страны (ГДР, Болгарию, Чехословакию, Польшу, частично в Югославию и даже в ФРГ).

В конечном итоге в 1987 г. вышло постановление ЦК КПСС и СМ СССР о строительстве в ХАИ КБ импульсной металлообработки и опытного завода для изготовления опытных образцов этой продукции, оснастки и оборудования в содружестве с серийными предприятиями. Для этого было выделено более 20 млн. рублей: два семизэтажных здания из стекла и бетона (даже с зимним садом), производственный корпус с цехами и вспомогательными помещениями – 10 000 м² и т.д.

Однако, после того, как было потрачено 3,5 млн. руб. на выполнение проекта Гипроавиапромом, строительство (в последующем разрушенного) каркаса одного из корпусов и закупку стекло-алюминиевых конструкций для стен и окон корпуса, работы прекратились.

Предполагалось сделать единый центр в стране, координирующий работы в этом направлении. Было бы здорово, если бы этот проект возобновить за счет средств спонсоров и бюджета Украины.

А что сейчас? Нынешнее состояние промышленности Украины [2] является результатом трех взаимосвязанных глобальных процессов: распада СССР, взаимодействия общегосударственных экономических проблем и последствий неэффективной, необеспеченной ресурсами конверсии.

В отличие от промышленности бывшего СССР образца 90-х годов современная промышленность Украины характеризуется:

- значительным износом производственных фондов;
- снижением объемов производства;
- разрушением традиционных схем научно-технической и производственной кооперации;
- сравнительно небольшим количеством технологически замкнутых циклов производства...

С другой стороны, мы имеем значительный научный, технологический и производственный потенциалы, способные решить задачи модернизации существующих и создания новых образцов технологии, в т.ч. в кооперации с зарубежными партнерами.

Производственное оборудование, обеспечивающее эти технологии, также изнашивается и морально устарело. Таким образом, значительная часть технологий в настоящее время требует восстановления и модернизации.

А кадровый потенциал?

Естественное старение специалистов, вялый процесс омоложения кадров, переток специалистов туда, где больше зарплата, "утечка мозгов" за рубеж, снижение эффективности подготовки кадров в вузах.

Произошел застой в базе знаний, который обусловлен отношением государства к научным разработкам фундаментальным, прикладным и отраслевым.

Например, когда профессор В.К. Борисевич докладывал в Минобразования и науки о работах над плотноупакованными структурами и попросил 20 млн. грн. для того чтобы создать базу для исследований, ему ответили "Никогда о таких суммах даже не мечтайте". А разве это суммы? А американское правительство (по неофициальным данным) только для создания НИИ импульсных технологий в 2005 г. выделило около 75 млн. долларов. К тому же высшая школа Украины (программа Сореса и т.п.) сейчас обеспечивает талантливыми учеными и специалистами наших зарубежных конкурентов...

В работе [2] очень хорошо поставлены задачи государства перед работниками науки и производства в этом вопросе.

Необходимо: отладить серийное производство высокотехнологической продукции, в том числе изготовленной импульсными методами, расширить возможности предприятий для продажи продукции, изготовленной этими методами, и тем самым заинтересовать другие предприятия, сохранить и поддержать в современных условиях имеющийся научно-технический, технологический, производственный и кадровый потенциал в области импульсных дел путем дачи заданий правительством и предприятиями исследователям по разработке соответствующих технологий. Для этого нужно создать научный совет (по типу ГКНТ СССР) при Министерстве образования и науки или при НАН Украины, который смог бы координировать эту работу и давал бы задания исполнителям разрабатывать так необходимые промышленности импульсные технологии.

Обязать при этом контролирующие безопасность ведения взрывных работ органы издать новые правила оформления разрешений на производство взрывных работ на участках заводов, в цехах в различных НИИ и т.д.

Литература

1. Ситало В.Г., Рябовол А.А. Ресурсосберегающие технологии в машиностроении // Технологические системы. – 2001. – № 1 (7). – С. 12-17.
2. Оборонно-промышленный комплекс Украины – современное состояние и реконструкция / В.П. Горбулин, А.С. Довгополый и др. // Технологические системы. – 2001. – № 2 (8). – С. 5-20.

Поступила в редакцию 10.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Гребенников, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

Л.Р. Фёдорова

*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт», Украина*

ПРОФЕССОР Р.В. ПИХТОВНИКОВ КАК ЛИЧНОСТЬ В ИСТОРИИ ХАИ

Отмечается, что профессору Р.В. Пихтовникову были присущи такие черты характера, которые обеспечили его формирование как целостной личности – администратора, педагога, учёного. Акцентируется внимание на видении Р.В. Пихтовниковым перспектив применения технологии обработки материалов взрывом.

любознательность, творчество, сила воли, видение перспектив, отсутствие энергозатрат

Сейчас, когда уже прошло 35 лет со дня смерти Ростислава Вячеславовича Пихтовникова, можно осмыслить всё, что ему удалось сделать для института, для страны, и можно смело утверждать, что он был личностью.

Какие же черты характера были присущи Ростиславу Вячеславовичу как личности?

Огромная любознательность. Причём с детских лет. В смутные годы первой мировой и гражданской войн, на которые пришлось детство Р.В. Пихтовникова, в родной деревне не было школы. Читать выучила старшая сестра. Р.В. Пихтовников перечитал все книги в домашней библиотеке отца, уездного врача.

Жажда новизны и вытекающие отсюда стремления к знаниям и творчеству. Постоянное желание придумывать новое, мастерить. На более серьёзном уровне эта черта оформилась в стремление делать что-то лучше, вскрывать неиспользованные резервы, экспериментировать.

Логично, что эти черты характера привели Р.В. Пихтовникова к определённомu и правильномu выбору направления деятельности – деятельности технолога.

Выбору помогло стечение обстоятельств – организация Харьковско-го авиационного института (1930 г.), куда он попал с первым набором, после окончания рабфака.

Такие качества, как добросовестность, ответственность за порученное дело, очевидно, пришли к Р.В. Пихтовникову генетически. Ведь земские врачи начала прошлого века просто не могли бы работать без этих качеств в тех условиях.

Сила воли, выдержка давали возможность Р.В. Пихтовникову преодолевать невероятные трудности на пути к достижению цели, в том числе бюрократические барьеры.

В формальном перечислении пунктов биографии Р.В. Пихтовникова значатся просто: защита кандидатской диссертации, защита докторской, организация международного и постоянно действующего семинара, организация проблемной лаборатории, организация цехов взрывной штамповки и т.д. И совершенно не звучат те ужасные моменты, когда Р.В. Пихтовников – первопроходец, сделав большую исследовательскую работу, вдруг понимает, что допущена ошибка. Затрачены деньги, упущено время ...

И он ходит часами из угла в угол, выкуривает сигарету за сигаретой. И думает ... думает.

Выход из положения Р.В. Пихтовников, как правило, находил.

Когда в 1937 году Р.В. Пихтовникова обвинили в том, что он скрывает свою национальность (Ростислав Вячеславович, значит, поляк) со всеми вытекающими отсюда последствиями, он тоже ходил, курил... А потом пришёл к следователю и спросил: «Так что, по Вашему мнению, Вячеслав Михайлович Молотов тоже скрывает свою национальность?» И от него отстали. Или когда один видный учёный громогласно назвал технологию штамповки взрывом авантюрным кинофильмом со взрывом ... Сколько труда потребовалось, чтобы доказать заводам обратное!

И, наконец, главный талант, без которого Ростислав Вячеславович Пихтовников не состоялся бы как личность ни в науке, ни в педагогической, ни в административной деятельности, – это незаурядные организаторские способности.

Административная деятельность. На долю Р.В. Пихтовникова выпали очень трудные периоды работы института. Декан, затем многолетний замдиректора, руководил вместе с сотрудниками, такими же патриотами, первыми шагами деятельности института (с 1935 г.). Труднейшая и ответственная работа по эвакуации института (оборудования, студентов, сотрудников) в 1941 г. в Казань. Налаживание учебного процесса в эвакуации. Сохранение института. Восстановление из руин в 1944 г. после возвращения в Харьков.

Сохранился в памяти разговор Р.В. Пихтовникова с одним из коллег. Проходя мимо свалки искорёженной военной техники, которая образовалась недалеко от руин главного корпуса ХАИ, Р.В. Пихтовников сказал: «Господи, какая мощь у взрыва! И всё для разрушения. А если бы всю эту энергию обратить на созидание». Но тогда было не до этого. Надо было разбирать руины. Однако мысль использовать взрыв для созидания не покинула Р.В. Пихтовникова, и он начал реализовывать её уже в 1948 году, часто в экзотических условиях, на частных квартирах, где однажды провалил пол в ванной комнате.

К началу 50-х годов были восстановлены основные учебные корпуса, созданы условия для нормального учебного процесса и развёртывания научных исследований.

На институтском небосклоне в это время засверкали такие звёзды как профессора И.Г. Неман, И.П. Голдаев, А.И. Борисенко, Я.Л. Геронимус, Б.С. Ковальский, Ю.Н. Алексеев и другие. За период до 1955 года было подготовлено и защищено 14 кандидатских диссертаций. В институте уже работали 1 академик, 7 профессоров, 22 доцента. Защитил докторскую диссертацию и Р.В. Пихтовников.

Из хроники института следует, что Р.В. Пихтовников, будучи заместителем директора, успешно сочетал административную, педагогическую и научную деятельность.

О научной и педагогической деятельности Р.В. Пихтовникова много говорили и говорят. Это уникальный вклад в развитие новых технологий. За 30 лет Ростислав Вячеславович Пихтовников и его школа проделали путь от возникновения идей, их фундаментальных проработок к

обширной реализации в сфере производства. Р.В. Пихтовников создал школу. Под его непосредственным руководством выросли и защитились более 50-ти кандидатов и более 10-ти докторов наук, впоследствии видных учёных, основавших свои направления в науке.

Р.В. Пихтовников хорошо видел перспективы использования импульсных технологий в будущем, а свою технологию листовой штамповки взрывом часто называл «преждевременным ребёнком».

Действительно, технология при жизни Р.В. Пихтовникова нашла применение, в основном, в единичном и экспериментальном производстве в самолётостроении, космическом производстве, судостроении, химическом машиностроении. Особенно полезной оказалась для изготовления крупногабаритных деталей.

Не хватило жизни Р.В. Пихтовникову для внедрения обработки взрывом в другие отрасли с массовым производством.

До сих пор остаются непроработанными вопросы техники безопасности, автоматизации процессов. Нет законченной теории деформирования металлов при сверхвысоких скоростях. Вот уже действительно «преждевременный ребёнок».

Проживи Р.В. Пихтовников как известный украинский прочностник Г.С. Писаренко 96 лет (великолепная книга, посвящённая его жизни и творчеству, вышла в 2006 году в издательстве «Академкнига»), уверена – всё бы это было.

А ведь технология обработки материалов взрывом не требует никаких энергозатрат, громоздкого и трудновыполнимого оборудования.

Все всякого сомнения, востребованность в технологии будет увеличиваться с развитием робототехники и оскудением энергоресурсов Земли. Но это вопрос будущего.

Поступила в редакцию 2.04.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского “ХАИ”, Харьков.

В.К. Борисевич

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

УЧИТЕЛЬ, ПЕДАГОГ И УЧЕНЫЙ – Р.В. ПИХТОВНИКОВ

Описывается роль Р.В. Пихтовникова в становлении научной школы и об отношении его к членам руководимого им коллектива.

ученый, изобретатель, семинары, воспитатель, наука

Ростислав Вячеславович Пихтовников – один из выдающихся ученых и общественных деятелей, работавших в Национальном аэрокосмическом университете "ХАИ" – заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Премии СМ СССР, профессор, доктор технических наук, кавалер ордена Ленина и других Государственных наград. Р.В. Пихтовников связал свою судьбу с ХАИ в год его создания (1930 г.). Он родился в 1907 году, но уже к 1930 г. за его плечами был 8-летний рабочий стаж. Пришел он на учебу, будучи мастером ремонтного участка ХЭМЗа.

До этого он, продолжая работу на заводе, учился вечерами на рабфаке. После окончания в 1935 году ХАИ, его оставляют для административно-педагогической деятельности на кафедре технологии самолетостроения. Одновременно он возглавляет вечернее отделение ХАИ, а затем становится деканом самолетостроительного факультета. С 1942 г., почти на протяжении 25 лет, Р.В. Пихтовников был заместителем директора ХАИ по учебной и научной работе (с 1958 г. заместителем директора и проректором по научной работе). Начиная с тяжелых лет ВОВ и до самой смерти (1972 г.) Ростислав Вячеславович был заведующим кафедрой (вначале технологии самолетостроения, а затем, с 1956 г., технологии металлов и авиационного материаловедения).

Все перечисленное Ростислав Вячеславович выполнял наряду с работой, связанной, с моей точки зрения, с главным своим предназначением - работой выдающегося ученого-изобретателя, которая не может идти в от-

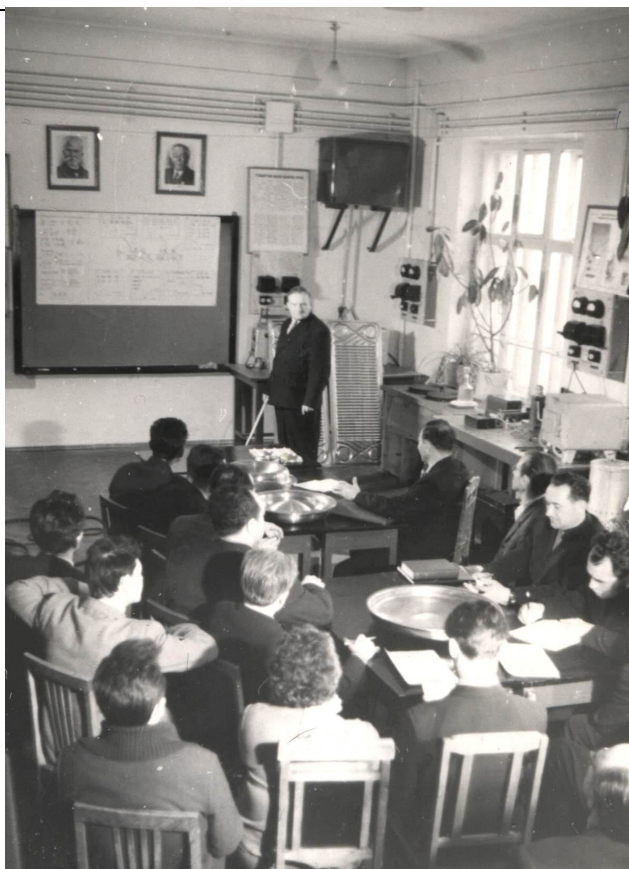


Рис. 1. Р.В. Пихтовников проводит на кафедре научный семинар

рыве от работы воспитателя молодого поколения инженеров-специалистов и ученых. При этом в воспитательной работе Р.В. Пихтовникову помогало личное обаяние. Он щедро передавал свои большие научные знания и опыт своим подопечным, но жестко контролировал исполнение полученных заданий. При этом он также широко использовал специально разработанный им метод коллективного воздействия через лиц из подобранной им группы.

Организованные им, ставшие затем традиционными, еженедельные (обязательные для всех) семинары с привлечением ученых из других кафедр и специалистов из НИИ, КБ и заводов и активная работа в них были также одной из важнейших сторон воспитания молодых ученых. Так формировалась научная школа, которую он возглавил, так были подготовлены в этой школе первые доктора наук Е.И. Исаченков и В.И. Завьялова (Москва), Ю.Н. Алексеев и В.Г. Кононенко (Харьков, ХАИ) и впоследствии многие другие.

Сам Ростислав Вячеславович защитил докторскую диссертацию в 1952 году. Это была первая в истории докторская диссертация о новом направлении в науке и технике, на которое он получил авторское право в 1949 году, и которое развилось в научно-технологическое направление мирового масштаба "Обработка материалов импульсными источниками энергии". Более 30 лет после смерти Р.В. Пихтовникова направление продолжает активно существовать и развиваться. Достаточно сказать, что только в школе на основной базе в "ХАИ" подготовлено и защищено под руководством Р.В. Пихтовникова и его учеников 22 докторских и свыше 200 кандидатских диссертаций. Только на преподавательских должностях в нынешнем аэрокосмическом университете работало и работает 12 докторов и более 130 кандидатов наук – выпускников его школы (кафедры: технология самолетостроения, технологии авиадвигателей, бывшие кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, сопротивления материалов, деталей машин, экономики и организации производства, ныне авиационного материаловедения и ряд других, в том числе 3-го, 4-го, 5-го и 6-го факультетов).

Среди большого количества трудов Р.В. Пихтовникова 3 монографии. Одна из них – "Штамповка взрывом", изданная в издательстве "Машиностроение", г. Москва, является первой в мире комплексной монографией по этому вопросу.

Р.В. Пихтовников не только ученый, хороший учитель и воспитатель молодежи. Студенты и коллеги по службе очень уважали его за человечность и доброту. Но как-то интересно! Эти качества у него проявлялись только по отношению к хорошим студентам или к тем студентам, которые старались быть такими.

То же самое относится к сотрудникам. Неожиданно и незаметно поощрить материально (в основном из своего кармана) или добрым словом, или даже одобряющей улыбкой – это его кредо. А с каким удовольствием он рассказывал о нашем будущем и о нашей "любимой" науке! Жесткий к нерадивым и добрый наставник для старательных, умный – весь в стремлении к созданию нового, хороший семьянин, замечательный организатор и Человек – вот лицо одного из выдающихся ученых нашего родного "ХАИ" – Ростислава Вячеславовича Пихтовникова.



Рис. 2. Р.В. Пихтовников (второй справа) рассказывает ректорату вузов Харькова о достижениях ХАИ в области импульсной металлообработки



Рис. 3. Р.В. Пихтовников (крайний справа) самостоятельно делает бетонную матрицу для получения деталей (в центре аспирант В.К. Борисевич)

Давайте помнить и воплощать в жизнь все то хорошее, чему он учил, творчески на современном уровне развития науки и техники использовать его идеи и разработки.

Ученик Р.В. Пихтовникова, академик Украинской академии наук и академии инженерных наук Украины, лауреат Государственной Премии Украины, Премии СМ СССР и Премии УАН в области науки и техники, заслуженный изобретатель Украины, д-р техн. наук, профессор В.К. Борисевич.

Поступила в редакцию 12.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет "ХАИ", Харьков

В.С. Кривцов, С.А. Мазниченко, А.Н. Застела, Т.Е. Обрываева

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ИМПУЛЬСНАЯ РЕЗКА ГОРЯЧЕГО МЕТАЛЛА

Коротко изложены материалы наработок, выполненных в Проблемной НИЛ ХАИ, посвященных исследованию импульсных источников энергии в промышленности. Овещены отрасли и сферы применения импульсных нагрузок, реализуемых с помощью удара твёрдого тела-инструмента. Затронуты вопросы перспективного усовершенствования.

импульсная резка, тепловой привод, горючая газовоздушная смесь

С шестидесятых годов прошлого века и до настоящего времени в отечественной и зарубежной практике металлургии и машиностроения остаётся весьма актуальной проблема использования импульсных источников энергии, в частности, для обработки металлов давлением ударом твёрдого тела. Это объясняется тем, что такие энергетические установки, характеризующиеся большими мощностями и значительными давлениями, позволяют выполнять обработку материалов с высокими скоростями деформации. Подобный подход весьма часто является решающим при обработке металлов и сплавов, отличающихся высокой прочностью и малой пластичностью, заготовок с большими размерами поперечного сечения, а также движущихся. При этом обеспечиваются улучшение качества, точность изготавливаемых изделий, сокращение времени рабочего цикла, снижение металлоёмкости оборудования, ликвидация или уменьшение отходов.

Для исследователей и производителей значительный интерес представляет возможность использования импульсных источников энергии, которые в этом случае можно применить для сообщения метательного движения подвижному бойку (твёрдому телу) с установленным на нём инструментом. Накопленная в процессе разгона бойка кинетическая энергия в последующем может быть израсходована на выполнение полезной работы – резку горячей заготовки. Количество энергии выражается известным, действительным для движущегося тела, соотношением, из которого сле-

дует, что тело будет обладать энергией тем большей, чем выше скорость его движения.

Таким образом, инструмент-нож, установленный на твёрдом теле-бойке относительно небольшой массы, может обладать значительным запасом энергии, если его разогнать до соответствующей скорости с помощью импульсного источника энергии – специального привода. Поэтому оборудование, построенное с использованием этого принципа, имеет по сравнению с другими устройствами большую энерговооружённость, т.е. значительную удельную (на единицу массы) мощность единичного рабочего цикла.

Импульсное деформирование (разрезание) горячего металла вдавливанием жесткого инструмента, перемещающегося с относительно высокой скоростью, благодаря повышенным энергиям и значительным давлениям на поверхности разрезаемой заготовки характеризуется энергетическими, технологическими и эксплуатационными преимуществами.

На протяжении длительного времени коллектив ученых и инженеров ХАИ занимался решением проблем высокоскоростной обработки давлением, сформировавшихся в ключевых отраслях промышленности, в частности, металлургии и машиностроении в том числе, авиационной и оборонной сферах. Итогом выполненной работы явились результаты многолетних исследований и разработок, посвящённых созданию технологии и оборудования для высокоскоростной поперечной резки горячих сортовых заготовок и относящихся к сфере обработки материалов давлением, в частности, к области импульсных воздействий на обрабатываемый материал ударом твёрдого тела.

Работы выполнены в специализированном подразделении – Проблемной научно-исследовательской лаборатории по использованию импульсных источников энергии в промышленности, вошедшей в семидесятипятилетнюю историю Харьковского авиационного института (ныне Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина), под научным руководством одного из основоположников «школы ХАИ» в области импульсной обработки металлов давлением доктора технических наук, профессора В.Г. Кононенко.

Высокий уровень научных исследований и промышленных разработок в 1975 году отмечен Государственной премией Украины в области науки и техники.

Научные и проектные работы посвящены вопросам ударной импульсной

резки ножами заготовок из горячего металла в металлургии и машиностроении. Материалы освещают обширные теоретические и экспериментальные исследования технологии и процесса динамической резки горячего металла пластинчатыми или клиновидными ножами, особенности работы газовоздушного привода, проектные разработки высокоскоростного оборудования – машин импульсной резки, а также итоги опытно-промышленных, промышленных испытаний и эксплуатации изготовленных образцов режущих агрегатов и серийных комплексов для импульсного разделения на части сортовых горячих стальных заготовок в технологических линиях непрерывного литья, прокатном и заготовительном производствах.

В перечне технологических операций обработки давлением при производстве сортового металла (литьё заготовок, в том числе непрерывным способом) и его переработке (прокатке, ковке) в металлургической и машиностроительной отраслях, т.е. когда заготовки имеют относительно высокую температуру (850...1150 °С) и зачастую находятся в движении, значительную долю составляют разделительные операции. Суть подобных действий заключается в необходимости отделять от исходной заготовки части требуемой для дальнейшей обработки (прокатки,ковки, штамповки) мерной длины, а также отрезать дефектные концы, отбирать пробы и т. п.

Принцип накопления кинетической энергии массой механической системы, объединённой с установленным на ней деформирующим инструментом, и последующего расходования этой энергии за короткое время на выполнение полезной работы можно считать наиболее целесообразным при создании импульсного оборудования ударного действия и, в частности, для реализации высокоскоростного способа резки горячих заготовок поперечным ударом пластинчатого или клиновидного ножа.

Скоростная резка характеризуется большими скоростями и ускорениями деформаций. Такое течение процесса практически не зависит от характера источника энергии и свойств передаточной среды и его можно считать общим при импульсном нагружении горячих заготовок и при высокоскоростной резке в частности. Однако при этом необходимо знание свойств их материала при скоростном нагружении и температурно-скоростных зависимостей его сопротивления деформированию при температурах деформации.

Изучение и анализ картины течения металла в зоне резания, определение усилия резки и работы деформирования при известных граничных условиях позволило перейти к проектированию оборудования, инструмента

для импульсной резки горячих заготовок, а также технологии скоростного их разделения на мерные части, пригодные для последующей переработки. Численные значения этих величин являются основой и исходными данными для определения кинематических, динамических и прочностных характеристик технологического процесса резки, оборудования в целом и отдельных его элементов, а также инструмента-ножей.

Специфика импульсного процесса высокоскоростной резки обуславливает наличие специального привода, предназначенного для придания энергии движению подвижным массам-бойкам с установленным на них инструментом для резки. Создание такого привода сопряжено с выбором принципа действия, анализом возможных схем преобразования и передачи энергии, определением качественных и количественных его характеристик, их оптимизацией, выработкой компоновочных и конструктивных схем привода, термо- и газодинамическими расчетами и т.д.

В результате многих экспериментальных исследований и промышленной эксплуатации импульсного режущего оборудования различного назначения, в том числе и для резки горячих стальных заготовок в линиях прокатки и непрерывного литья, установлено, что наиболее целесообразно в качестве силового привода подвижных частей режущего агрегата применять тепловой аperiодический двигатель внутреннего сгорания (который характеризуется изменяемым относительно длительным временем между соседними циклами) с использованием принципа превращения в его окислительной камере потенциальной (химической) энергии энергоносителя в тепловую с последующим переходом её в процессе дальнейшего преобразования в кинетическую энергию движения подвижных масс с инструментом.

Реализация этого кинематического принципа нашла отражение в созданных образцах опытного, а затем и промышленного, в том числе серийного, оборудования для импульсной резки горячих металлических заготовок. Машины импульсной резки (МИР) – уникальны и не имеют мировых аналогов. МИР лишены свойственных общепринятым режущим устройствам недостатков и позволяют значительно улучшить работу технологических линий получения и переработки сортовых заготовок. Наиболее эффективно применение МИР как режущего агрегата в составе оборудования машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Существующая тенденция увеличения производительности МНЛЗ за счет роста скорости вытягивания слитка до 10 и более м/мин позволяет сделать вывод, что только

МИР можно применять в качестве агрегата резки на таких скоростях. МИР в составе автоматизированных комплексов дают возможность решить многие прикладные задачи и производственные проблемы в металлургической и машиностроительной отраслях. В промышленности эксплуатируется свыше 30 единиц импульсного оборудования ударного действия с тепловым приводом.

Разработанная технология высокоскоростной резки на части горячих металлических заготовок динамическим внедрением ножей и импульсное режущее оборудование, реализующее эту технологию – весьма широкая область применения основных принципов обработки материалов давлением с приложением нагрузки ударом твёрдого тела. Однако они далеко не исчерпывают всех потенциальных возможностей скоростных силовых процессов и технологий.

Тепловой импульсный привод, в котором в качестве базового использован принцип химико-механического преобразования энергии, основанный на сжигании сжатой топливовоздушной горючей смеси с последующим расширением продуктов горения для разгона подвижного рабочего органа (твёрдого тела) с инструментом, как показали исследования и обширная практика промышленного применения, наиболее эффективен и приемлем в конструктивном и эксплуатационном аспектах.

Созданный и отработанный привод и обслуживающие его системы, кроме применения в составе оборудования для резки горячего металла, вполне пригодны к использованию в устройствах для осуществления других разновидностей технологических процессов, основанных на ударном воздействии движущегося с большой скоростью инструмента на обрабатываемую среду.

Одним из перспективных и востребованных направлений применения высокоскоростного деформирования является резка сортового и профильного проката в холодном состоянии на заготовки для дальнейшего получения деталей механической обработкой, а также ковкой или штамповкой после предварительного нагрева.

В результате проведенных в ХАИ теоретических и экспериментальных исследований была разработана технология и создано опытно-промышленное оборудование для резки холодного сортового проката с энергоприводом внутреннего сгорания аperiодического действия, работающего на горючей газовоздушной смеси топлива (углеводородные газы) и сжатого воздуха.

Тепловой привод, аналогичный машинам для «горячей» резки, использован при создании оборудования для осуществления, например, процессов, сопутствующих утилизации отработанных тепловыделяющих элементов атомных электростанций (ТВЭЛ АЭС). Так, в настоящее время в эксплуатации на территории СНГ находится около 50 ядерных блоков АЭС. Выработка ресурсных возможностей элементов оборудования на этих станциях обусловила возникновение проблемы их демонтажа, утилизации и захоронения. Одной из главных задач при этом является порезка и утилизация высокорadioактивных трубчатых элементов, составляющих конструкцию энергоблоков: трубопроводов, ТВЭЛов и т.п., для которых применение известных технологий разделения неэффективно вследствие низкого коэффициента заполнения утилизационного контейнера.

С учётом специфики условий АЭС при разделке технологических каналов следует соблюдать такие требования как полное дистанционное управление оборудованием, адаптивность к условиям и системам АЭС, минимальные габариты и масса, простота переналадки во всем диапазоне сечений технологического канала и т.п. В этой связи в ХАИ была создана импульсная режущая установка с тепловым газовоздушным приводом и дистанционным управлением для утилизации тепловыделяющих элементов ядерного реактора. В машине реализована технологическая схема, в соответствии с которой отрезаемую часть вначале сплющивают, а затем отделяют сдвиговым деформированием с одновременным сплющиванием следующего участка канала. Такая схема, как показали экспериментальные исследования, оказалась наиболее рациональной при разделке изделий трубчатой формы.

Исследования резки горячих металлических заготовок двухсторонним внедрением клиновидных ножей получили развитие при создании технологии и оборудования для разделения ударом коротких клиновидных ножей холодного проката на заготовки для дальнейшей металлообработки. Проведенные экспериментальные работы показали перспективность этого способа для получения заготовок из пластичных сталей, а также относительно хрупких сталей с повышенным содержанием углерода, марганца и т.п. Таким образом, доказана возможность получения заготовок для дальнейшей прокатки, облойной штамповки длинномерных изделий, а также и для штамповки в торец. В процессе работ выявлены характерные особенности процесса разделения холодного проката ударом коротких ножей с

большим углом клиновидности.

Для резки термомеханически упрочненного проката в ХАИ предложен метод импульсной резки и разработаны технология и оборудование для его реализации. При создании оборудования использован принцип механического сжатия с помощью кривошипно-шатунного взводящего механизма энергонесущего газа (воздуха, азота) с последующим его расширением для придания рабочему органу достаточно высокой скорости.

При изготовлении деталей из металлических заготовок в авиационной, машиностроительной и других отраслях, связанных с металлообработкой, образуется большое количество стружки чёрных и цветных металлов. Использование (утилизация) стружки в рассыпном виде сопровождается целым рядом проблем.

Установлено, что положительный эффект скоростного деформирования начинает сказываться при скоростях инструмента от 10...12 м/с. При скоростях около 20 м/с из титановой стружки и стружки жаропрочных сплавов образуются брикеты, плотность которых достигает 0,8...0,9 плотности сплошного металла.

Значительный положительный опыт создания и применения технологии импульсного брикетирования сыпучих материалов, в том числе и стружки из разнообразных чёрных металлов и цветных сплавов (также титановых), а также проектирования и изготовления оборудования для выполнения этой технологической операции накоплен в ХАИ, где выполнен комплекс соответствующих исследований и опытно-конструкторских работ.

Энергетические возможности импульсного метода и созданного в ХАИ оборудования дают возможность образовывать из стружки не только брикеты высокой прочности и плотности, пригодные для переплава, но и формировать целый ряд изделий. Например, изготавливать из стружки чёрных металлов вкладыши-пробки для защиты дна глухонных изложниц при заливке в них стали, получать расходные электроды из титановой губки, а также брикеты из стружки титановых сплавов.

Таким образом, импульсное формование брикетов из стружки металлов и сплавов самой широкой номенклатуры, изготовление заготовок и изделий из стружки и других сыпучих материалов – одно из прогрессивных направлений в решении важной народнохозяйственной задачи – эффективной утилизации дорогостоящих отходов машиностроительных отраслей промышленности, т.е. экономии вторичных ресурсов металла.

Среди исследованных в ХАИ технологических процессов высокоскоростной обработки материалов давлением с применением импульсного оборудования с тепловым приводом можно выделить использование этих машин для реализации процессов объёмной штамповки деталей.

Увеличение скорости деформирования изменяет условия течения металла. Значительно возрастает скорость истечения материала, заметными становятся сопутствующие эффекты в очаге деформации и по границам скольжения, что способствует лучшему заполнению полости штампа и уменьшению контактного трения, существенно сокращается время деформирования, т.е. многопереходную штамповку можно выполнять в течение одного цикла без промежуточных подогревов.

На высокоскоростном оборудовании можно изготавливать детали высокой точности с минимальными штамповочными уклонами и входными радиусами в результате действия больших кратковременных деформирующих усилий. Именно этим обеспечивается возможность затекания металла в глубокие и узкие полости при малых радиусах закругления.

Весьма перспективным может оказаться использование высокоскоростных типов энергоприводов для выполнения операций свободнойковки или горячей штамповки деталей за один или даже несколько переходов, поскольку применённая пневматическая скоростная система возврата бойка в исходное положение позволяет значительно сократить подготовительное время рабочего цикла.

Весьма перспективна разработанная в ХАИ схема машины с верхним расположением энергопривода и системой быстрого возврата бойка в верхнее положение посредством пневматических цилиндров. Такую импульсную машину можно применять для горячейковки или штамповки, в том числе за несколько циклов, поскольку система быстрого пневмовозврата позволяет осуществить законченный технологический процесс за любое число ударов.

Многократное импульсное силовое воздействие на обрабатываемый материал в течение короткого периода времени даёт возможность выполнить технологическую операцию, на которую требуются затраты значительной энергии, с помощью машины относительно небольшой мощности, но за несколько рабочих циклов. Работа по такой технологической схеме позволяет спроектировать и применить менее громоздкое и с меньшей массой оборудование, чем одноударная импульсная машина, а высо-

коэнерговооруженный газовоздушный энергопривод с электрическим зажиганием может совершать рабочие циклы с относительно высокой частотой – 12...15 циклов в минуту.

Представляют значительный промышленный интерес многие другие прикладные задачи металлургической и машиностроительной отраслей, разрешить которые с достаточной эффективностью возможно только с применением высокоскоростных воздействий. Сюда следует отнести, в частности, и большое количество проблем изготовления заготовок и деталей из труднодеформируемых материалов, относящихся к номенклатуре авиационно-космической техники и других смежных производств.

Существует множество ещё не решённых задач или не исследованных в полном объёме проблем как в теоретическом аспекте, так и в экспериментально-эксплуатационном. Также имеется солидный пласт недостаточно исследованных проблемных вопросов, касающихся особенностей поведения материалов при ударном приложении нагрузок, получения изделий высокоскоростной ковкой и объёмной штамповкой из горячих заготовок, исследования свойств цельных материалов и разнообразных сыпучих сред в процессе скоростного формоизменения при различных температурно-скоростных условиях. Многие задачи высокоскоростного деформирования применительно к разделительным процессам, в том числе резке горячего металла, также ждут своего решения.

Поступила в редакцию 10.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Гребенников, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

УДК 539.3

Ю.С. Воробьев¹, М.В. Чернобрылко¹, А.В. Ярыжко¹,
Д.И. Степанченко¹, Н.Ю. Евченко²

¹*Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного
НАН Украины, Харьков*

²*Национальный технический университет
"Харьковский политехнический институт", Украина*

ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА СКОРОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассматриваются задачи скоростного деформирования элементов конструкций в упругопластической стадии при воздействии импульсных нагрузок. Эффективный анализ напряженно-деформированного состояния требует комплексного использования теоретических, экспериментальных и численных методов. Динамические характеристики материалов определяются на основе обработки результатов экспериментальных исследований. Численный анализ проводится методами конечных разностей и в некоторых случаях методом конечных элементов. При этом используются динамическая деформационная теория пластичности. Теоретические результаты сравниваются с экспериментальными. Приводятся примеры практического использования результатов.

скоростное деформирование, динамические характеристики материалов, упругопластическое деформирование, эксперимент, метод конечных разностей, МКЭ, технологические процессы

Для выбора рациональных параметров процессов обработки материалов и элементов конструкций с использованием импульсных источников энергии необходим анализ особенностей их скоростного деформирования в каждом конкретном случае [1, 2].

В отделе нестационарных механических процессов Института проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной Академии наук Украины ведутся фундаментальные и прикладные исследования в области динамической прочности элементов конструкций и сложных механических систем под действием вибрационных, подвижных и кратковременных нагрузок [3, 4].

При математическом моделировании скоростных процессов деформирования в упругопластической стадии применяется динамическая дефор-

мационная теория пластичности, которая позволяет использовать эмпирические зависимости для динамических характеристик материала [5, 6].

Удается провести численные исследования скоростного деформирования элементов конструкций с использованием метода конечных элементов.

Комплексные исследования в области скоростного деформирования элементов конструкций невозможны без экспериментальных данных о динамических характеристиках материалов, которые отражают зависимости напряжений σ от деформаций ε , скоростей деформаций $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$ и температуры T : $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$.

Деформации и скорости деформаций регистрируются малобазными фольговыми, проволочными или полупроводниковыми (кремниевыми) тензодатчиками. Они являются практически безынерционными. Фольговые датчики работают до деформаций порядка $\varepsilon = 0,02 - 0,1$ (до 10%) в диапазоне температур от -200 до $+5000$ °С. Ускорение измеряется пьезо-керамическими датчиками. Для измерения перемещений используются бесконтактные токовихревые датчики. Датчики параметрического типа работают в составе мостов с активной и реактивной составляющими (рис. 1).

Сигналы с датчиков поступают на тензоизмерительный компьютеризированный комплекс "Тензодин-12", предназначенный для регистрации, обработки и хранения полученной информации. Его основой является широкополосная тензометрическая восьмиканальная станция (ШТС-8), работающая на несущей частоте. Она обеспечивает линейность частотной характеристики всех каналов в диапазоне от 40 Гц до 200 кГц. Отклонение

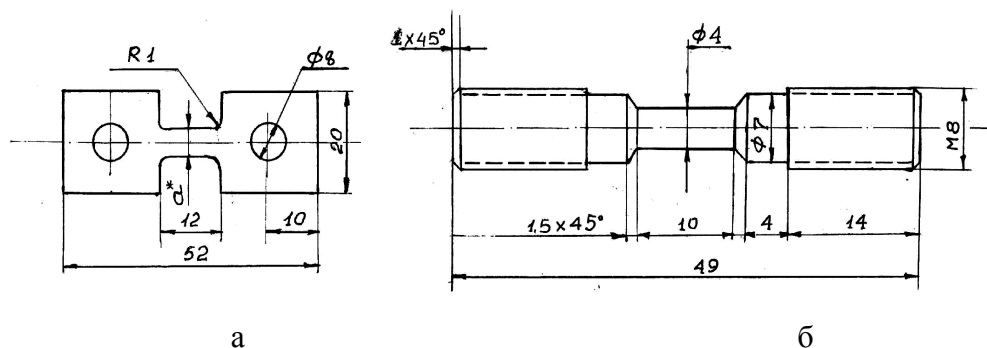


Рис. 1. Линейные плоские и цилиндрические образцы

от линейной амплитудной характеристики до 3%. Сигналы с тензометрической станции через аналого-цифровой преобразователь поступают на персональный компьютер, где с помощью специальной программы осуществляется обработка и визуализация информации в необходимом виде. Длина линий, соединяющих прибор с объектом исследования до 40 м. Коэффициент усиления $k = 1000$. Общая погрешность измерений до 7%.

Для определения динамических характеристик материала используется вертикальная разгонная установка (рис. 2).

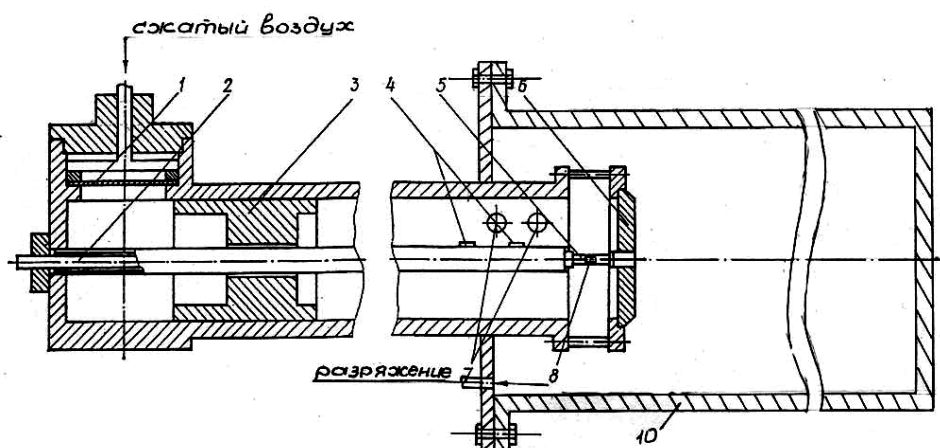


Рис 2. Установка для испытания линейных образцов

Линейные плоские или цилиндрические малобазные образцы (рис. 1) испытываются в условиях скоростного одноосного растяжения. Сжатый воздух воздействует на круглую пластину (1) с нанесенным на нее концентратором. Концентратор прорывается при заданном давлении, что обеспечивает изменение скоростей ударника в широком диапазоне (10 – 300 м/с). Ударник (3) под действием сжатого воздуха движется в корпусе диаметром 125 мм до встречи с наковальней (6). Образец (5), закрепленный в наковальне и стержне-динамометре (2), нагружается при воздействии ударника о наковальню. При этом синхронно регистрируются упругие деформации динамометра тензодатчиками (4), упругопластические деформации образца фольговыми тензодатчиками (8) и скорость ударника парой токовихревых датчиков (7) и контактными датчиками, работающими на разрыв. Рабочая часть установки закрыта защитным кожухом, в котором создается разрежение, порядка 10 Па. Диаметр стержня-динамомет-

ра рассчитан так, что он деформируется только в упругой области и дает усилие деформации образца $N(t)$, по которому определяется напряжение в образце $\sigma(t)$. А датчик на образце дает деформацию его рабочей части $\varepsilon(t)$. Таким образом, зависимость $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ может быть построена по результатам непосредственных измерений без предварительных предположений о характере деформаций образца. Часто пользуются предположением о постоянной скорости деформации образца на основании того, что кинетическая энергия ударника на порядок и более превосходит энергию деформации образца. Однако записи процесса показывают, что это предположение справедливо не на всех стадиях деформирования образца. При скоростях ударника, обеспечиваемых сжатым воздухом, реализуются скорости деформации порядка $6 \cdot 10^2 - 10^4 \text{ с}^{-1}$.

Для уточнения динамических характеристик материала учитывается изменение его сечения в процессе деформации. Большие деформации (более 10%) при образовании шейки и разрыве образца определяются как разность перемещений двух сечений, отнесенная к расстоянию между этими сечениями $\varepsilon \approx \frac{\Delta u}{\Delta x}$.

По результатам измерений строится пространственная зависимость в координатах σ , ε , $\dot{\varepsilon}$. (рис.3). Она наглядно демонстрирует путь деформации образца и объясняет возможность больших остаточных деформаций при скоростном нагружении конструкции.

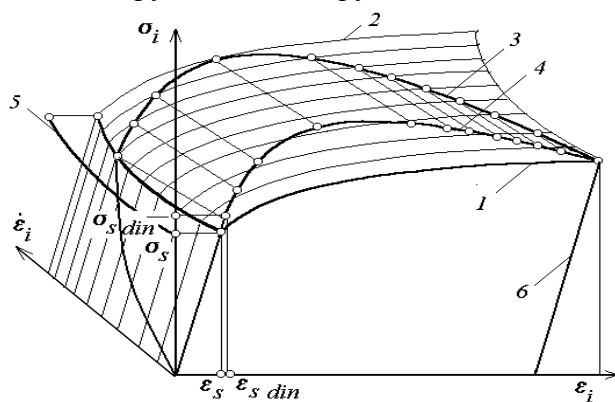


Рис. 3. Зависимость между интенсивностями напряжений, деформаций и скоростей деформаций

Для удобства использования в расчетах результаты измерений обрабатываются и представляются в виде степенной зависимости [1]:

$$\sigma_i = \sigma_{ct} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] + \sigma_{ct} \left\{ \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{ct}} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \right\}^m ; \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sigma_{ct} K(\dot{\varepsilon}_i) + \sigma_{ct} \left[\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{ct}} - K(\dot{\varepsilon}_i) \right]^m ,$$

где σ_{ct} , ε_{ct} – статические пределы текучести по напряжениям и деформациям; D , n , m – параметры скоростного упрочнения материала; коэффициент

ент $K(\dot{\varepsilon}_i) = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$ может быть использован для определения дина-

мических пределов текучести, прочности и др. по их статическим значениям $\sigma_{dt} = \sigma_{ct} \cdot K(\dot{\varepsilon}_i)$.

Установка позволяет также при соединении ударника с деформируемой конструкцией проводить испытание удара, например, оболочек о грунт или жидкость.

Для высокоскоростного ударного и аэродинамического нагружения элементов конструкций использовалась горизонтальная разгонная установка (рис. 4). В режиме ударного нагружения сжатый воздух поступает в камеру высокого давления (1). При заданном давлении прорывается

диафрагма (2) и ударник движется по стволу диаметром 125 мм. Объект испытания (10) и монтажная плита (11) находится в расширительной камере (12), соединенной со стволом фланцем (6). Камера диаметром 1,6 м и длиной 2,2 м с толщиной стенки $\delta = 0,014$ м позволяет разместить объекты испытания достаточ-

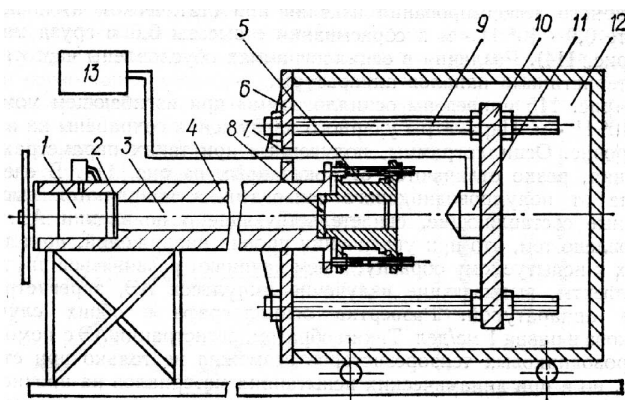


Рис. 4. Установка для испытания элементов конструкций при ударном нагружении

ных размеров. Камера обеспечивает разрежение до 10 Па и защиту помещения. Сжатый воздух позволяет достичь скоростей ударника до 300 м/с.

В режиме аэродинамического нагружения установка обеспечивает двухступенчатый разгон потока за счет двух диафрагм (2, 8). На пути аэродинамического потока может быть установлен турбулизатор.

Для ударного испытания образцов и элементов конструкций на растяжение и сжатие при сравнительно небольших скоростях ударника используется ударный стенд со свободно падающим грузом.

Проводились экспериментальные исследования специальных образцов и элементов конструкций, а также натуральных объектов [1, 3, 4].

Скоростное деформирование элементов конструкций под действием кратковременных нагрузок различной физической природы проходит в упругопластической стадии. При этом необходимо учитывать динамические характеристики материалов типа $\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$, которые находятся экспериментально.

Такие процессы сопровождаются большими перемещениями и деформациями, изменением формы и структуры материала. Задача является существенно нелинейной и физически, и геометрически. Аналитические решения возможны только в отдельных редких случаях [1]. Численные исследования также связаны с большими проблемами.

При математическом моделировании упругопластических процессов скоростного деформирования элементов конструкций кроме известных уравнений равновесия используются зависимости динамической деформационной теории пластичности:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x - \varepsilon_0 &= \psi(\sigma_x - \sigma_0); \\
 \varepsilon_y - \varepsilon_0 &= \psi(\sigma_y - \sigma_0); \\
 \varepsilon_z - \varepsilon_0 &= \psi(\sigma_z - \sigma_0); \\
 \gamma_{xz} &= 2\psi\tau_{xz}; \\
 \gamma_{yz} &= 2\psi\tau_{yz}; \\
 \gamma_{xy} &= 2\psi\tau_{xy}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

При больших деформациях используются зависимости вида:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} \right)^2 \right); \\
\varepsilon_\varphi &= \frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{r \partial \varphi} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{r \partial \varphi} \right)^2 \right); \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right), \\
\gamma_{r\varphi} &= \frac{\partial u}{r \partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{r \partial \varphi} \frac{\partial u}{\partial r} + \left(\frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) + \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \frac{\partial w}{\partial r} \right); \\
\gamma_{z\varphi} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{r \partial \varphi} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{r \partial \varphi} + \frac{u}{r} \right) \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{r \partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{r \partial \varphi} \right); \\
\gamma_{zr} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) + \frac{\partial w}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial r} \right).
\end{aligned} \tag{3}$$

Процессы скоростного деформирования при кратковременных нагрузках происходят практически адиабатически. При этом возникает связанная задача термоупругопластического деформирования, для решения которой необходимо дополнительно учесть уравнения баланса энергии. Для решения таких задач используются методы конечных разностей в неявной форме [2, 6, 7]. В связи со сложностью математических моделей задача решается по частям, изменяющимся в пространстве и во времени. В зоне пластических деформаций и возможных разрушений используются трехмерные модели с учетом динамических свойств материалов и пошаговый итерационный вычислительный процесс. На каждом шаге разностной сетки, как по пространственным координатам, так и по временной, проверяются величины интенсивностей деформаций, скоростей деформаций и напряжений, и сопоставляются с динамическим пределом текучести. В зависимости от результатов проверки осуществляется переход от соотношений для упругой к соотношениям для пластической стадии деформирования и дробление или увеличение шага. В зоне, где превышен динамический предел прочности, используются критерии прочности материала. В зоне упругих деформаций для тонкостенных конструкций используются волновые уравнения типа

Тимошенко. В области, куда не дошла волна деформаций, могут быть использованы обычные уравнения для тонкостенных конструкций.

Некоторые задачи оказывается удобно решать с помощью модифицированного метода конечных элементов, учитывающего динамические характеристики материалов. На рис. 5 представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния стального цилиндра под действием локальной ударной нагрузки. Параметры нагрузки следующие: масса – 0,35 кг; высота сбрасывания груза – 0,5 м; время воздействия нагрузки – 0,001 с; сила – 1095,5 Н, скорость соударения – 3,13 с.



Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние цилиндра под действием локальной ударной нагрузки

Использование всех приемов позволяет решать задачи скоростного деформирования. К ним относятся задачи динамической прочности элементов конструкции под действием кратковременных нагрузок и задача определения рациональных характеристик технологических процессов с импульс-

ными источниками энергии: задача скоростного деформирования, проникновения, пробития или разделения, образование неразъемных соединений (сварка и сварка-пайка взрывом), задача упрочнения, ремонтно-восстановительных работ или очистки.

Комплексное теоретическое и экспериментальное исследование скоростного деформирования элементов конструкций с учетом динамических характеристик материалов позволяют выявлять основные закономерности этих процессов в конкретных случаях. Сопоставление резуль-

татов численных и экспериментальных исследований обеспечивает их достоверность.

Результаты фундаментальных и прикладных исследований позволяют проводить анализ и выбор рациональных параметров эффективных технологических процессов по формообразованию, разделению и соединению элементов конструкций, использующих импульсные источники энергии. Приводятся примеры анализа реальных конструкций и технологических процессов.

Литература

1. Скоростное деформирование элементов конструкций / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
2. Колодяжный А.В., Чернобрышко М.В. Термокинетический анализ соударения плоских и цилиндрических слоев // Проблемы машиностроения. – 1999. – Т. 2. – С.78-80.
3. Теоретико-экспериментальный анализ разделения элементов конструкций при локальном импульсном нагружении / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, М.В. Чернобрышко, В.Г. Яреченко, Л. Крушка // Проблемы прочности. – 2002. – № 5. – С. 100-104.
4. Испытания металлических материалов при магнитно-импульсном нагружении / Ю. Воробьев, А. Колодяжный, М. Чернобрышко, К. Вакуленко, Л. Крушка // Biuletyn WAT. – 2003. – Nr 05(LII). – S. 177-185.
5. Vorobiev Yu.S., Chernobryvko M.V. Nonlinear high-strain-rate elastic-plastic deformation of structural elements under impulsive loading // The Int. Conf. on Nonlinear Dynamics. – Kharkov, 2004. – P. 164-167.
6. Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В., Крушка Л. Особенности численного анализа скоростного деформирования элементов конструкций под действием локальных импульсных нагрузок // ix KNT «Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizy, projektowania i wytwarzania». – Warsaw, Poland, 2005. – P. 545-551.
7. Ярышко А.В., Чернобрышко М.В., Воробьев Ю.С. Воздействие локальной ударной нагрузки на цилиндрическую оболочку // Автомобильный транспорт. – 2005. – Вып. 17. – С. 89-91.

Поступила в редакцию 15.03.2007

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

Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, А.Ю. Бондаренко

*Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт», Украина*

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Проведен анализ существующих методов магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов, предложенных мировыми промышленными фирмами. Дана краткая характеристика индукторных систем прямого пропускания тока и индукционных систем, разработанных в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», и приведены результаты их экспериментальной апробации.

магнитно-импульсное притяжение, электродинамические усилия, индукторная система, экран, листовая заготовка, магнитно-импульсная установка

Разработки инструментов для магнитно-импульсного притяжения листовых металлов инициированы производственными операциями по реставрации кузовных покрытий легковых автомобилей и корпусов самолётов. Речь идёт о выравнивании металлических поверхностей с вмятинами, появляющимися по тем или иным причинам в процессе эксплуатации. Причём, как показывает опыт, наибольший интерес вызывает возможность применения, так называемой, внешней рихтовки без разборки корпуса и нарушения существующего лакокрасочного покрытия [1].

Следует отметить, что фирмой «Beulentechnik AG» (Швейцария) предложен довольно обширный ряд механических способов внешней рихтовки вмятин в автомобильных кузовах [2]. Однако, их практическое осуществление требует очень высокой квалификации исполнителя и не обладает достаточной надёжностью с точки зрения сохранности ремонтируемого элемента. Последнее замечание означает, что в процессе реставрации возможно и его разрушение.

Наиболее реальными для практики представляются магнитно-импульсные комплексы для внешней рихтовки корпусов самолётов, созданные на протяжении последних 35...40 лет фирмами «Boeing» и «Elec-

troimpact» (США) [3]. Физический принцип, положенный в их основу сводится к использованию «медленного» и «быстрого» магнитных полей. Первое свободно проникает сквозь обрабатываемый металл. Второе, вследствие достаточно высокой частоты, концентрируется в рабочей зоне индуктора-инструмента. Суперпозиция этих полей позволяет достичь притяжения заданного участка с вмятиной в течение определённого временного интервала. Для практической реализации данного предложения необходимы два источника электромагнитной энергии, достаточно сложные высоковольтные системы управления и синхронизации генерируемых токовых импульсов. Эти факты существенно снижают надёжность работы комплекса для устранения вмятин в целом и значительно увеличивают его стоимость.

Задача о притяжении листовых металлов с помощью силового воздействия со стороны электромагнитных полей может быть решена и с использованием самых разнообразных технических решений, выдвинутых в разное время разными авторами и отличных от вышеупомянутых предложений фирм «Boeing» и «Electroimpact» (США).

К таковым, например, можно отнести различные вариации способа, описанного в монографии [4] и заключающегося в создании медленно нарастающего магнитного поля, резко прерываемого при достижении заданного уровня напряжённости. При этом в обрабатываемой заготовке наводятся вихревые токи, экранирующие внутреннее поле и препятствующее его уменьшению. Направление индуцированных токов таково, что возникающие электродинамические усилия притягивают заготовку к индуктору, вызывая её деформирование.

Разработки в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», появляются на страницах научной периодики, начиная с 2004 года [5 – 10]. Апробированные технические решения по практической реализации выполненных разработок защищены патентами [6, 7].

Здесь следует упомянуть впервые экспериментально обнаруженное явление, сущность которого состоит в изменении направления электродинамического силового воздействия на тонкостенные листовые металлы при вариации рабочей частоты токового импульса в обмотке инструмента-

индуктора. Так, в диапазоне «условно» высоких частот имело место известное в традиционной магнитно-импульсной обработке металлов отталкивание заготовки от индуктора. При понижении частоты до определённого значения часть обрабатываемого листа, находящаяся под рабочей зоной индуктора, притягивалась. При проведении экспериментов лист с вмятиной размещался выпуклостью наружу по отношению к индуктору. Силовое воздействие со стороны низкочастотного магнитного поля приводило к выравниванию поверхности деформированного листа [9, 10].

Все вероятные гипотезы о природе обнаруженного эффекта находятся в стадии теоретической и экспериментальной проработки. Понимание физики протекающих процессов позволит создавать рабочие инструменты для выполнения производственных операций не только по устранению вмятин, но и технологий комбинированного плана, осуществляющих электромагнитную формовку изделий, как отталкиванием, так и притяжением заданных участков обрабатываемого объекта.

Однако, в рамках настоящей работы ограничимся описанием принципиальных аспектов применимости лишь определённого класса магнитно-импульсных методов притяжения, представляющих собой технические решения, в основе которых лежит закон Ампера о силовом взаимодействии параллельных проводников с токами.

Наиболее простое и технически реализуемое предложение использует, так называемое «прямое пропускание» тока через обрабатываемый объект. Это решение предполагает непосредственный электрический контакт с листовым металлом в заданной зоне притяжения.

В соответствии со схемой на рис. 1, токопровод индуктора и участок объекта обработки подключаются к источнику мощности (магнитно-импульсная установка). В такой схеме они представляют собой параллельные проводники, по которым текут одинаково направленные токи. Их взаимодействие приводит к появлению мощных электродинамических усилий, расчет которых приведен в работе [11]. Если токопровод индуктора прочно зафиксирован, то деформации будет подвержен участок листового металла, который должен притягиваться к индуктору.

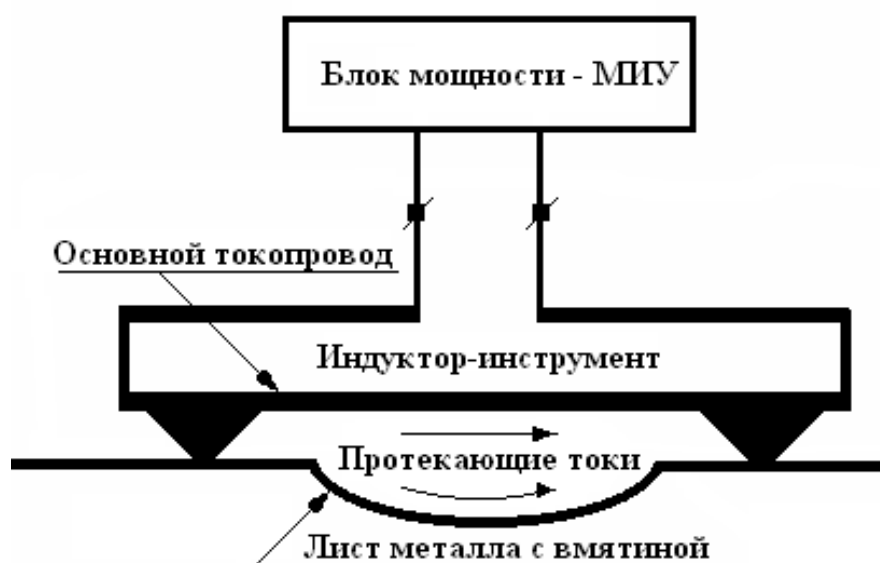


Рис. 1. Индукторная система с прямым пропусканием тока через обрабатываемый объект

Индукторная система с электрическими контактами в заданной зоне притяжения листового металла была апробирована экспериментально на магнитно-импульсной установке МИУ-15. В качестве объекта обработки были взяты стальные пластины с толщиной $0,5 \div 0,8$ мм. Было зафиксировано частичное выравнивание вмятин диаметром $25 \div 30$ мм. Их глубина уменьшалась от 1,5 до $0,5 \div 0,6$ мм.

Безусловно, данная схема индукторной системы для выравнивания вмятин в листовых металлах наряду с достоинствами (это простота конструкции инструмента, наличие одного источника мощности и др.) обладает и недостатком, связанным с наличием электрических контактов в зоне притяжения. Этот факт существенно снижает значимость данного предложения в практическом использовании.

Более перспективными и практичными представляются решения, не требующие никаких электрических или механических контактов в заданной зоне притяжения поверхности листового металла. Их практическая реализация также предполагает взаимное притяжение проводников с индуцированными сигналами одинакового направления. Фактически, это тот же принцип, что и в схеме с «прямым пропусканием» тока в зоне притя-

жения, но есть и существенное отличие. Вместо «прямого пропускания» тока через металл обрабатываемого объекта в нём возбуждаются токи Фуко от дополнительного элемента – экрана. Индукторные системы такого типа были названы индукционными индукторными системами. Принцип действия этих инструментов для магнитно-импульсного притяжения заданных участков поверхности тонкостенных листовых заготовок можно раскрыть с помощью схемы на рис. 2.

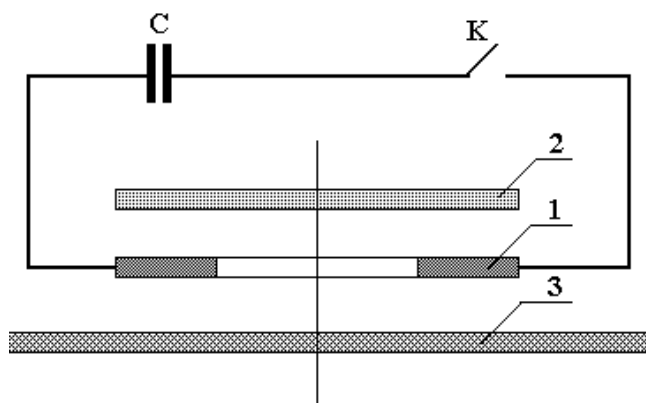


Рис. 2. Индукционная индукторная система

Конструктивно, такая система может включать плоский одновитковый цилиндрический соленоид-индуктор – 1; дополнительный элемент, обеспечивающий возникновение сил притяжения, это экран – 2 и листовую заготовку – 3, определённый участок которой следует деформировать в направлении к поверхности индуктора. Все три составляющие укладываются параллельными слоями: экран – индуктор – листовая заготовка. Последняя размещается так, чтобы участок, подлежащий деформированию, находился в рабочей зоне системы.

Индукционная индукторная система работает следующим образом. Предварительно заряженный емкостной накопитель энергии – С, после срабатывания коммутатора – К, разряжается в цепи с подключённым индуктором – 1. Протекание тока в витке индуктора возбуждает вихревые токи в экране и листовой заготовке. Направления этих токов одинаковы. В соответствии с законом Ампера, при фиксированном положении индуктора и экрана заготовка будет притягиваться в направлении к рабочей поверхности индуктора.

Необходимо подчеркнуть обязательное условие практической работоспособности индукционных индукторных систем. Как следует из физического осмысления закона Ампера, силовое взаимодействие между плоскими проводящими листами, в металле которых возбуждаются одинаково направленные индуцированные токи, возможно лишь в режиме интенсивного проникновения электромагнитного поля индуктора сквозь эти листы. Только в этом случае при нулевом поле между ними возникают силы магнитного давления извне, обуславливающие их взаимное притяжение.

Если, например, требуется устранить вмятину в металлическом листе, её следует расположить в области под витком индуктора, которая в дальнейшем будет называться рабочей зоной системы. Тогда силовое взаимодействие индуцированных токов позволит притянуть соответствующий участок этого листа к плоскости жёсткой поверхности индуктора и устранить вмятину.

На первый взгляд из априорных физических соображений предпочтительной представляется система, в которой экран и обрабатываемая листовая заготовка абсолютно идентичны (металл, толщина одинаковы). Они находятся на одинаковом расстоянии от индуктора-источника магнитного поля. Система симметрична как с геометрической, так и электродинамической точек зрения. Индуцируемые вихревые токи должны быть равными. Как следует из математической формулировки закона Ампера, они должны обеспечивать возбуждение наибольших сил электродинамического взаимодействия.

Для проведения модельных экспериментов была изготовлена индукционная индукторная система с одним витком цилиндрической геометрии и плоским дополнительным экраном из стального листа толщиной ~ 1 мм. Система подключалась к выходу магнитно-импульсной установки МИУ-20.

Результаты экспериментов по притяжению участка плоской заготовки к индуктору при рабочей частоте магнитно-импульсной установки ~ 5 кГц и запасённой энергии ёмкостного накопителя ~ 7 кДж представлены на рис. 3.

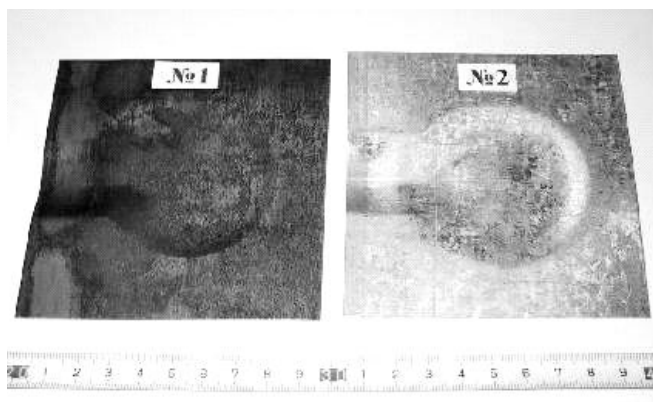


Рис. 3. Экспериментальные образцы из различных марок сталей толщиной 1 мм после воздействия на них импульса магнитного поля индукционной индукторной системы

Заканчивая изложение вопросов принципиальной действенности разработок методов и инструментов для магнитно-импульсного притяжения заданных участков листовых металлов, выполненных в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт», следует выделить основные направления работ проводимых в настоящее время:

- повышение эффективности индукционных индукторных систем за счет изменения геометрии основных конструктивных составляющих (виток индуктора, дополнительный экран и др.) и создание работоспособных инструментов, позволяющих проводить эффективную рихтовку элементов автомобильных кузовов;
- исследование физики процессов притяжения металлических листовых заготовок в диапазоне низкочастотных магнитных полях и разработка оборудования и технологии для решения широкого класса производственных задач.

Литература

1. Бажинов А.В., Батыгин Ю.В., Чаплыгин Е.А. Использование энергии импульсных магнитных полей в автомобильной промышленности // Сб. науч. тр. Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Х.: ХНАДУ, 2005. – Вып. 16. – С.349-353.

-
2. Материалы компании «Beulentechnik AG» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.beulentechnik.com>.
 3. Материалы компании «Electroimpact» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electroimpact.com>.
 4. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. – Л: Энергоиздат, 1981. – 199 с.
 5. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // Електротехніка і електромеханіка. – 2004. – №2. – С. 80-84.
 6. Пат. 74909 України, МПК В21Д26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Ю.В. Батигін, В.І. Лавінський, В.Л. Хавін. – № 2004010542; Заявл.26.01.04; Опубл. 15.02.06, Бюл. № 2.
 7. Пат. 775676 України, МПК В21Д26/14. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок / Ю.В. Батигін, В.І. Лавінський, В.Л. Хавін, Л.Т. Хименко. – № 2004010512; Заявл. 23.01.04; Опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.
 8. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий; 2-е изд., перераб. и доп. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
 9. Batygin Yu.V., Lavinsky V.I., Khimenko L.T. Direction Change of the Force Action upon Conductor under Frequency Variation of the Acting magnetic Field // Proc. of the 1st International Conference on High Speed Metal Forming. –Dortmund, Germany, 2004. – P.157-160.
 10. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. Изменение направления силового воздействия на проводник при вариации частоты действующего магнитного поля // Вестник науки и техники. – 2004. – № 2-3 (17-18). – С.18-22.
 11. Батыгин Ю.В., Бондаренко А.Ю. Анализ электродинамических усилий в системе плоский индуктор прямого пропускания тока – обрабатываемая заготовка // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ „ХПІ”, 2006. – № 37. Тем. вип. „Техніка і електрофізика високих напруг. – С. 55-62.

Поступила в редакцию 12.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Рудаков, Национальный политехнический университет «ХПИ», Харьков.

А.И. Долматов, С.Е. Маркович

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«ХАИ», Украина*

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Рассмотрены вопросы разработки концепции автоматизированного универсального комплекса, позволяющего формировать детонационно-газовые покрытия с заданным градиентом физико-механических свойств, посредством активного контроля и управления энергетическими параметрами процесса напыления по заданной программе в режиме реального времени.

газотермические покрытия, поверхностный слой, автоматизированный комплекс, детонационно-газовое напыление

Введение

Современные технологии детонационно-газового напыления покрытий позволяют решать широкий спектр задач в производстве и ремонте авиационной техники. Использование данных процессов обеспечивает существенное увеличение долговечности и надёжности изделий без существенного изменения их себестоимости, что особенно актуально в условиях возрастающей конкуренции. Обеспечение заданного комплекса эксплуатационных свойств зачастую вызывает большие трудности, поскольку требования зачастую противоречивы, что делает проблему использования специальных защитных покрытий весьма актуальной.

В области детонационно-газового нанесения покрытий, обладающих рядом уникальных характеристик, внедрение автоматизации процессов напыления и контроля, а также элементов нанотехнологий позволяет вывести данную методику защиты и восстановления изделий на качественно новый уровень, обеспечивающий возможность формирования поверхностных слоёв с заданным градиентом физико-механических свойств.

Полная автоматизация управления и наличие механизмов обратной связи позволяет обеспечить стабильность параметров процесса, что даёт

возможность решать вопросы априорного прогнозирования эксплуатационных характеристик изделий.

1. Постановка задачи и цели исследования

При разработке параметров технологического процесса и оборудования для детонационно-газового напыления одной из наиболее актуальных задач является обеспечение формирования защитных покрытий с заданным градиентом физико-механических свойств и стабильности эксплуатационных характеристик изделий, что приводит к необходимости разработки концепции создания универсального автоматизированного комплекса, позволяющего реализовать преимущества детонационно-газового метода, посредством активного контроля и управления энергетическими параметрами процесса напыления по заданной программе в режиме реального времени.

2. Методики прогнозирования физико-механических характеристик системы покрытие-подложка

Разработка оптимальных технологических процессов напыления должна выполняться с выбором рационального соотношения между скоростью и температурой напыляемых частиц.

Изменяя состав взрывчатой смеси, глубину загрузки порошка, длину ствола можно изменять энергетические параметры частиц и, таким образом, управлять процессом напыления и свойствами покрытия. Оптимизация процесса детонационного напыления требует детальной информации о динамике поведения продуктов детонации и напыляемых частиц в стволе детонационной установки, что подчёркивает актуальность задач математического моделирования динамики двухфазного потока в стволе детонационной установки.

В теоретических исследованиях многофазных течений наибольшее распространение получил подход, при котором каждая фаза описывается своей системой уравнений сплошной среды. Связь между фазами определяется дополнительными членами, характеризующими изменение массы, количества движения и энергии при межфазном взаимодействии. Такой

подход имеет широкую область применяемости, обладает достаточной простотой, наглядностью и позволяет использовать известные методы решения, разработанные в гидродинамике гомогенных сред [1, 2]. Этот подход является оптимальным для решения поставленной задачи и позволил разработать методику расчёта параметров продуктов детонации и частиц порошка в зависимости от времени по длине ствола, учитывающую силовое и тепловое взаимодействие частиц порошка с детонационной волной и продуктами детонации. Расчётная модель имеет следующие допущения [2, 3]:

- 1) давление создается только газом, влиянием частиц пренебрегается;
- 2) твердые частицы, являясь сферами одного и того же радиуса, равномерно расположены в стволе и не взаимодействуют между собой и стенками ствола, частицы являются инертными и не вступают в химическую реакцию с продуктами детонации;
- 3) в любом поперечном сечении все параметры постоянны;
- 4) массообмен между газом и порошком отсутствует;
- 5) объемом, занимаемым частицами, можно пренебречь;
- 6) вследствие высокой теплопроводности материала частиц их температура по всему объему постоянна;
- 7) гравитационными и электрическими силами можно пренебречь.

Модель построена на основании законов сохранения газа и псевдогаза частиц и дополняется уравнением состояния смеси с учетом диссоциации молекул [1, 2]. Разработанная методика устанавливает зависимости между технологическими параметрами процесса напыления (состав смеси и расход газов, дистанция напыления, глубина загрузки порошка, длина ствола, физико-механические свойства материала частиц, гранулометрический состав порошка) и энергетическими параметрами (скорость, температура частиц, степень проплавления частиц и т.д.), что позволяет перейти к прогнозированию физико-механических свойств материала покрытия и эксплуатационных свойств композиции покрытие-подложка в целом.

В качестве одной из наиболее актуальных прикладных задач является разработка методики управления напряжённо-деформированным состоянием поверхностного слоя изделия с газотермическим покрытием, в частности - задача разработки методики расчёта величины и распределения остаточных напряжений в системе покрытие-подложка при импульсном

процессе напыления с учётом вклада кинетической энергии частиц и начального поля остаточных напряжений. Была разработана и апробирована методика расчёта величины и распределения остаточных напряжений в системе покрытие подложка для поверхностей произвольной конфигурации, позволяющей учитывать влияние следующих факторов [4, 5]:

- 1) физико-механических свойств материалов покрытия и подложки;
- 2) размеров и формы частиц напыляемого материала;
- 3) кинетической энергии частиц напыляемого материала;
- 4) температурного поля системы покрытие-подложка;
- 5) начальных остаточных напряжений, сформированных на этапе предварительной обработки поверхности перед напылением покрытия.

Алгоритм решения данной задачи включает несколько этапов.

1. Экспериментальные исследования, целью которых является выявление прочности, пористости, модулей упругости материала покрытия.

2. Определение начальных остаточных напряжений в поверхностных слоях напыляемой детали, сформировавшихся в процессе предварительной обработки поверхности.

3. Моделирование нестационарного процесса воздействия теплового потока на деталь со стороны единичного пятна покрытия с частотой, соответствующей скорострельности установки и промежутку времени между напылением покрывающих слоёв.

4. Определение параметров процесса ударного взаимодействия частицы и подложки, в результате которого происходит деформация частицы и подложки, формирование исходного поля остаточных напряжений.

5. Определение остаточных напряжений в системе подложка-покрытие при снятии закрепления с учётом поля начальных остаточных напряжений и термических напряжений.

Модель рассматривает процессы первичного нагружения и разгрузки. Напряжённое состояние поверхностных слоев определяется по величине остаточной деформации при линейном упрочнении и при степенном упрочнении материала в области пластических деформаций [4, 5]. Методика расчета величины распределения остаточных напряжений в системе покрытие-подложка приведена на рис. 1.

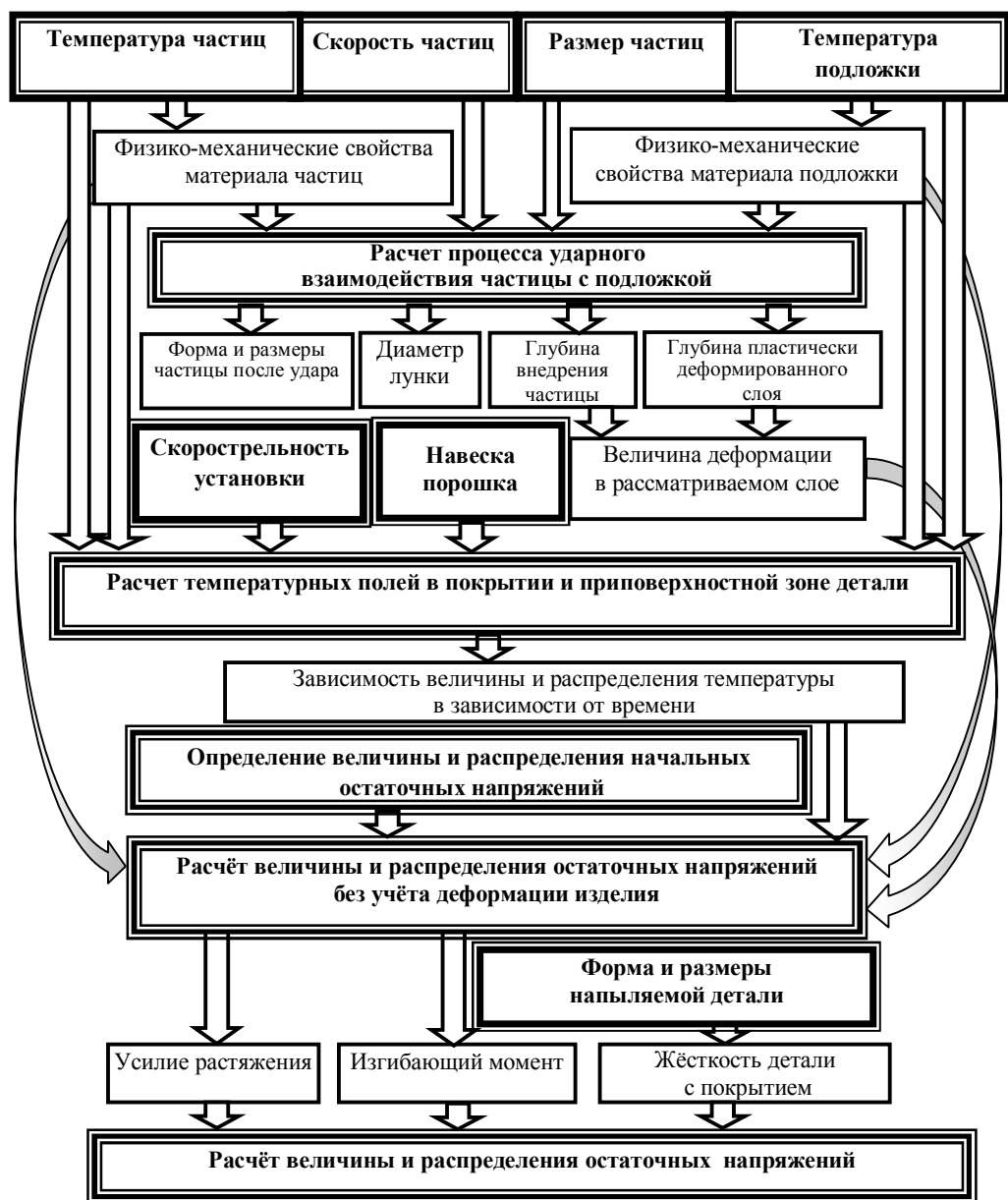


Рис. 1. Методика расчета величины распределения остаточных напряжений в системе покрытие-подложка

Как свидетельствует анализ методики [4 – 5], при одной и той же величине деформации, варьируя температурой деформируемого слоя, можно управлять величиной и знаком остаточных напряжений в системе. Таким образом, для любого слоя может быть определена критическая величина

температуры $T_{кр}$, при которой происходит формирование растягивающих остаточных напряжений.

Для определения степени влияния температурного поля на процесс формирования растягивающих остаточных напряжений в системе покрытие-подложка, введён температурный критерий:

$$M_T = \frac{T}{T_{кр}}, \quad (1)$$

где T – температура напыляемого слоя.

Как свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, для формирования сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое детали с покрытием величина критерия должна быть $M_T < 1$. Следует отметить, что с учётом погрешности измерений, рекомендуемая величина критерия составляет $M_T < 0,95$.

Использование данной методики позволяет в автоматизированной системе управления детонационным комплексом, путём сравнения входящего сигнала (от прибора активного контроля температуры пятна) с эталонным сигналом, соответствующим критической температуре пятна, предотвращать (посредством управления технологическими параметрами) возникновение в напыляемом слое растягивающих остаточных напряжений вследствие заброса температур.

С.В. Сергеевым была разработана математическая модель, описывающая механизм соударений и пластического деформирования частиц и подложки с учетом наложения в процессе формирования покрытия нестационарных температурно-силовых полей и позволяющая оценить величину адгезионной и когезионной прочности покрытия [6] (рис.2). Данная методика включает расчёт процесса ударного взаимодействия частицы и подложки, в результате которого происходит деформация подложки, сближение атомов частицы и подложки, создание активных центров на поверхности подложки, влияющих на величину контактной температуры и моделирование нестационарного процесса циклического воздействия теплового потока на деталь со стороны единичного пятна покрытия с частотой, соответствующей скорострельности установки, с учетом величины контактной температуры как одного из краевых условий.

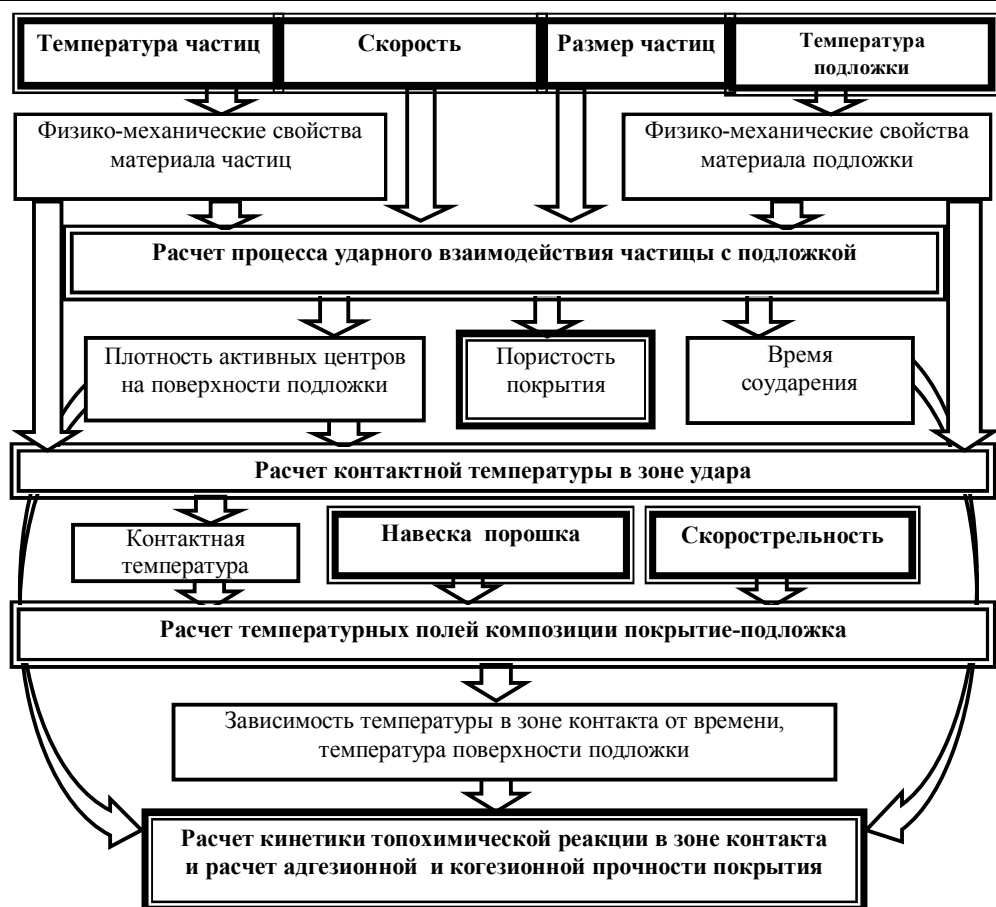


Рис. 2. Методика расчета прочностных свойств детонационных покрытий [6]

Разработанный математический аппарат и созданное на его основе программное обеспечение на языке программирования Delphi позволяет решить задачу априорного прогнозирования физико-механических свойств композиции покрытие-подложка, обеспечить стабильность параметров, реализовать механизмы обратной связи и перейти к построению процесса, управляемого в режиме реального времени.

3. Реализация концепции универсального автоматизированного комплекса

Аппаратная реализация концепции универсального автоматизированного комплекса выполнена на базе установки УДК-III. Принципиальная

схема представлена на рис. 3. Экспериментальная установка снабжена водоохлаждаемым стволом 1 постоянного сечения. Внутри ствола соосно расположена охлаждаемая трубка подачи порошка в ствол установки, связанная с дозатором 7.

Управление подводом газов в цикле работы реализуется при помощи блока электроклапанов, управляемых непосредственно от блока управления 3, выполненного на базе персонального компьютера.

Установка имеет электронную систему зажигания, смонтированную в блоке 8, которая управляется через блок управления 3. Поджиг газов осуществляется свечой зажигания.

Узел подачи рабочих газов связан с источниками продувочного и рабочих газов 4.

Блок автоматического управления 3 позволяет устанавливать и изменять параметры процесса напыления в режиме реального времени. Блок управления позволяет в автоматическом режиме в процессе напыления менять состав горючей смеси, глубину загрузки порошка и длину ствола (посредством регулирующего модуля 9) по установленной программе, что обеспечивает получение покрытий с заданным законом изменения свойств по толщине. Для контроля скорости был использован модуль, использующий в качестве чувствительных элементов фоторезисторы (рис. 4).

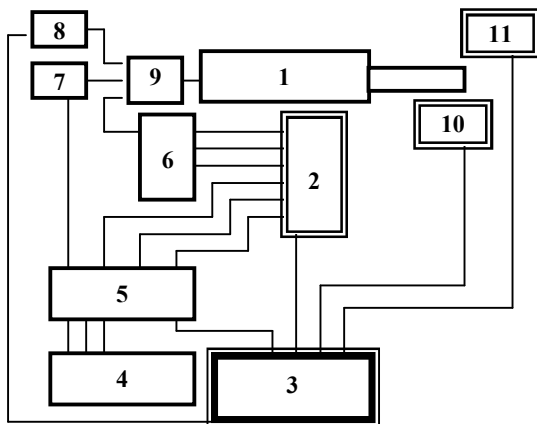


Рис. 3. Схема автоматизированного детонационного комплекса на базе УДК-III

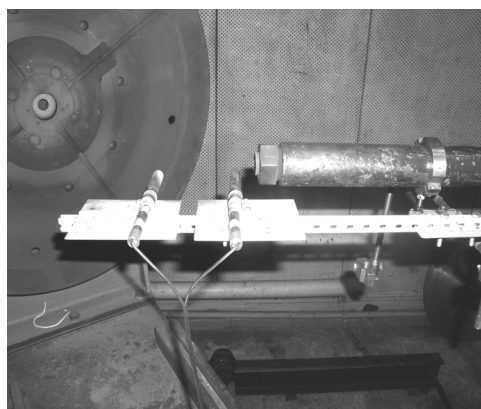


Рис. 4. Устройство для определения скорости частиц

Модуль работает по принципу последовательной регистрации фронта частиц и используется непосредственно при напылении изделий, предоставляя возможность оперативного контроля процесса напыления по параметру «скорость частиц».

Для контроля температуры частиц в процессе напыления покрытий разработан модуль, использующего в качестве чувствительного элемента фоторезистор марки СФЗ-1 и работающего по принципу яркостного пирометра (рис. 5).

Конструкция прибора даёт возможность также использовать его непосредственно при напылении изделий. Приспособления для крепления приборов позволяет регулировать их взаимное расположение, расстояние до оси ствола, угол наклона относительно оси ствола, расстояние до напыляемого изделия.

Для контроля работы системы прибор для измерения скорости частиц и прибор для контроля температуры объединены в единый измерительный комплекс, который предоставляет возможность оперативного контроля процесса напыления по параметрам «скорость частиц» и «температура частиц» (рис. 6).

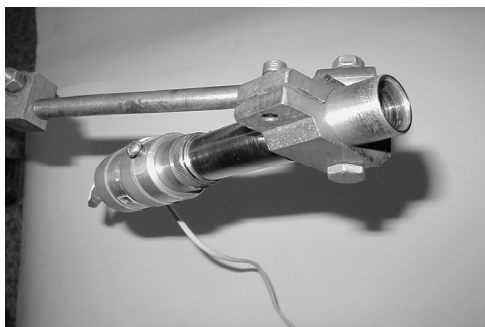


Рис. 5. Прибор для измерения температуры частиц



Рис. 6. Измерительный комплекс на работающей установке

Заключение

Разработанный математический аппарат и созданное на его основе программное обеспечение позволяет осуществлять связь с представленными элементами контроля энергетических параметров процесса, управлять технологическими параметрами процессов напыления и обработки покры-

тий через исполнительные механизмы детонационного комплекса (или обрабатывающего оборудования) с целью получения заданного комплекса свойств поверхностных слоёв системы покрытие-подложка. Программное обеспечение позволяет при подключении модулей расчёта напряжённо-деформированного состояния поверхностных слоёв после лезвийной или абразивной обработки поверхности, осуществлять по измеряемым энергетическим параметрам процесса напыления корректировку режимов обработки с целью обеспечения заданного комплекса свойств композиции покрытие-подложка.

Литература

1. Долматов А.И., Симоненко В.А., Прохоров Е.С. Математическое моделирование процесса детонационного напыления покрытий в машинно-ориентируемом производстве / // Тез. докл. 1 Всесоюзного совещания "Алгоритмическое обеспечение машинно-ориентируемого производства". – Х.: ХАИ, 1989. – С. 42.
2. Детонационное нанесение покрытий на детали авиадвигателей и технологического оснащения с последующей магнито-абразивной обработкой / Богуслаев В.О., Долматов А.И., Жеманюк П.Д. и др. – Запорожье: Дека, 1996. – 366 с.
3. Нигматулин Р.Н. Динамика многофазных сред. – М: Наука, 1987. – 464 с.
4. Долматов А.И., Маркович С.Е. Методика расчёта остаточных напряжений в детонационных покрытиях из тугоплавких материалов // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Х.: НТУ"ХПІ", 2004. – Вип. 44. Технології в машинобудуванні. – С. 37-43.
5. Долматов А.И., Маркович С.Е., Мовшович А.Я. Расчёт значений и распределения остаточных напряжений в поверхностных слоях изделий с детонационно-газовыми покрытиями // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С.40-45.
6. Сергеев С.В. Разработка технологии и оборудования для нанесения детонационных покрытий на детали авиационных двигателей и технологическую оснастку: Дис. канд. техн. наук: 05.07.04. – Х., 2001. – 209 с.

Поступила в редакцию 10.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП "Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения", Харьков.

В.К. Борисевич¹, В.В. Драгобецкий², О.В. Троцко²

*¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

*²Кременчугский государственный политехнический университет
имени М. Остроградского, Украина*

МНОГОФАКТОРНОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ВЗРЫВНОЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

В статье изложены и частично количественно обоснованы новые направления в обработке металлов взрывом. Предпочтение отдается рассмотрению физических явлений на микро- и наноуровнях для создания компактных сред.

фазовое превращение, пластическая деформация, импульсное воздействие, тензор, ударная волна, взрывчатое вещество, диффузия

При взрывном нагружении в материале заготовки возникают возмущения различной природы, приводящие к фазовым превращениям; необратимым пластическим деформациям; обратимому увеличению объема материала под действием теплоты, выделяемой при ударном сжатии; образованию соединений и разрушений. При различных схемах импульсного воздействия может быть достигнуто заданное формообразование, упрочнение, соединение, компактирование, дробление и нарушение сплошности. Характер и интенсивность импульсного воздействия на заготовку даже в одном процессе могут существенно различаться и открывают возможности для изменения геометрических, механических, физических и др. свойств. Возмущения, распространяющиеся с определенными конечными скоростями в виде волн напряжений (нагрузки, разгрузки, а также отраженных), образуют в заготовке области возмущений, которые с течением времени расширяются. Каждой области возмущений соответствует напряженно-деформированное состояние, характеризующееся тензором напряжений и тензором деформаций и определяемое природой возмущения.

Высокие энергетические параметры и импульсный характер взрывного нагружения в своем элементарном приложении чрезвычайно многогранен

и многообразен, и не все его аспекты изучены. В процессах гидровзрывной штамповки помимо необходимого формоизменения достигается значительное упрочнение обрабатываемой заготовки, а в ряде случаев происходит и сварка обрабатываемой заготовки с матрицей. Процесс сварки взрывом также сопровождается упрочнением, пластической деформацией и формоизменением. В процессе взрывного прессования помимо сварки трением, возникающей при адиабатических сдвигах частиц и их жидкофазного спекания, происходят и микропроцессы сварки взрывом частиц.

При прохождении фронта ударной волны через частицу шихты, происходит ее ускорение до определенной скорости, затем она соударяется с другой частицей, и вполне вероятно образование косого соединения. Образование струи происходит в результате столкновения двух поверхностей под углом 2β со скоростью V_k . Вылетающая струя пробивает отверстие в соседней частице с образованием зоны плавления в месте торможения струи.

Прохождение ударных волн в элементарном процессе взрывной обработки приводит: к скачкообразному изменению параметров состояния и движения среды; возрастанию энтропии среды; перемещению частиц среды в направлении фронта волны и т.д.

Таким образом, для описания элементарного процесса взрывной обработки необходимо учитывать факторы, связанные с деформацией, нагревом и фазовыми превращениями.

При выборе и обосновании процессов обработки для конкретных условий производства, возможно, следует считать тот процесс, который при прочих равных условиях обеспечивает наименьшие затраты энергии, необходимой для получения заданных физико-механических свойств изделия. Процесс получения изделий с требуемыми эксплуатационными свойствами следует считать энергетически оптимальным процессом.

Однако в ряде случаев процессы взрывной обработки позволяют получать изделия с уникальными свойствами, недостижимыми другими методами обработки. Кроме того, при состоянии уровня техники на данном этапе развития энергетическую оптимизацию нельзя смешивать с технологически оптимальным процессом, под которым понимают процесс, обеспечивающий минимальные суммарные трудозатраты T_Σ .

Для перехода от элементарных процессов взрывной металлообработки к распространению реальных и выявлению принципиально новых необходимо перейти к рассмотрению процессов, использующих высокоэнергетические источники энергии.

В последние годы интерес проявляют к методу быстрой кристаллизации, суть которого заключается в охлаждении расплавленного металла со скоростью порядка одного миллиона градусов в секунду. Быстро охлажденные сплавы сравнительно гомогенны, поскольку для образования и роста больших зерен не хватает времени. Материалы с гомогенной структурой прочны и имеют высокие температуры плавления. Быстрая кристаллизация может вызывать образование метастабильных фаз: кристаллических аморфных, менее устойчивых фаз, образующихся при медленном охлаждении. Метастабильные фазы обладают рядом нетривиальных свойств. Например, быстрокристаллизующиеся алюминиевые сплавы имеют удельную прочность, равную или превышающую прочность титановых сплавов при умеренных и высоких температурах. Они также необычайно коррозионностойки. Быстроохлажденные алюминиевые сплавы способны заменить титан в деталях компрессоров газотурбинных двигателей, чугун в тормозных дисках автомобильных колес, чугунные корпуса бункеров железнодорожных вагонов и т.д.

Существуют следующие методы получения быстроохлажденных сплавов. Простейший из них – сверхтвердая закалка, при которой капли расплавленного металла выбрасываются на охлаждающую поверхность. Другой метод – распыление, когда мелкораспыленные капли охлаждаются инертным газом. Фирма Prant and Whitney разработала установку, в которой тонкая струя расплава падает на быстровращающийся диск, разбивающий ее на капли, и выбрасывающий их в холодную атмосферу. С помощью этого метода получают мелкодисперсные порошки быстроохлажденного сплава, которые затем спрессовываются путем горячего прессования. General Electric Company объединила плавление, прессование и формовку в единый процесс, в котором с помощью плазменного факела быстроохлажденный сплав используется в качестве тонкого покрытия деталей. Осажденный сплав хорошо противостоит термической усталости.

В одном из наиболее универсальных методов быстрого охлаждения используются лазеры с высокой плотностью энергии. С помощью этого метода достигают скорости охлаждения более десяти миллионов градусов в секунду. Основные преимуществ метода в том, что микроструктура поверхности металла может быть изменена без воздействия на объемную часть. Можно получать и более толстые слои быстрозакаленного металла, выращивая их путем непрерывного нанесения на поверхность легированного порошка с одновременным воздействием на него лазером. Манипулируя лазерным лучом, можно получать достаточно сложные конфигурации.

Сделана попытка осуществления динамической закалки для получения дроби, быстрозакаленного металла путем метания порошка и пластин металлов зарядом взрывчатого вещества на охлаждаемую медную поверхность, омываемую жидкостью, жидким азотом и пр.

Процесс образования метастабильных фаз можно осуществить по следующей схеме: в полости, образованной в высокопрочном сплаве, располагается взрывчатое вещество и метаемое тело. При взрыве заряда метаемая среда разгоняется, и при соударении с охлаждаемой поверхностью тормозится, при этом происходят процессы, характерные для быстрой кристаллизации.

Максимальное давление, возникающее при соударении метаемой среды с твердой поверхностью, можно оценить по формуле

$$p = \rho_o C_o v \left(1 + k \frac{v}{C_o} \right), \quad (1)$$

где ρ_o , C_o – плотность метаемой среды и скорость звука в ней;

v – скорость частиц метаемой среды;

k – постоянная, характеризующая увеличение скорости волны при ударном сжатии.

Давление, необходимое для образования метастабильной фазы, соответствует сотням килобар и достижимо при скоростях соударения, превышающих в несколько раз скорость звука в воздухе. Достигнуть этого можно при использовании импульсных источников энергии. Скорость метаемого тела V_1 составит

$$V_1 = D = \left[\frac{3r}{(k^2 - 1)(3 + r)} \right]^{0,5}, \quad (2)$$

где k – показатель продуктов взрыва; D – скорость детонации; $r = \frac{\rho_o \delta_o}{\rho_1 \delta_1}$;

ρ_o, ρ_1 – плотности взрывчатого вещества и метаемого тела; δ_o, δ_1 – протяжности взрывчатого вещества и метаемого тела.

В зависимости от вида взрывчатого вещества и соотношения масс взрывчатого вещества и метаемого тела скорость V_1 достигает 2500 м/с.

Скорость падения температуры при соударении метаемого тела с поверхностью другого материала при скоростях соударения порядка 1000 м/с в интервале температур 700 – 350 °С составляет до 3,5·10⁶ °С. При таких градиентах температур происходит получение аморфных материалов из расплавов. Такие параметры соударения характерны для процессов сварки взрывом, и ряд исследователей, изучающих структуры зоны соединения сваренных взрывом заготовок, обнаружили в сварном шве включения аморфного металла. На некоторых режимах сварки взрывом в зонах, прилегающих к сварному шву, образуются литые включения. Последние снижают качество и прочность сварного соединения и крайне нежелательны. Для образования слоя из аморфного материала или слоя, обладающего большим количеством аморфных составляющих, режимы соударения должны обеспечить расплавление приконтактных слоев и высокую скорость охлаждения. Количество литых включений увеличивается по мере увеличения скорости детонации D , а, следовательно, и скорости точки контакта. Структура зоны соударения должна быть волнообразной. При соударении без волнообразования литые включения не образуются. Поэтому предельное значение скорости точки контакта должно лежать в пределах зоны волнообразования. Величина сварочного зазора h и параметр сварки r должны соответствовать максимальной скорости соударения. Как правило, при таких режимах сварка не происходит, а образуется псевдоаморфный слой, обладающий рядом уникальных свойств. Таким образом, на стыке процессов сварки взрывом и взрывного упрочнения для ряда материалов возможен процесс быстрой кристаллизации. И этот процесс, вероятно, дает возможность получения монометаллов с поверхност-

ной структурой и свойствами, характерными для биметаллов. Интенсифицировать и стабилизировать процесс нанесения покрытий с псевдоаморфной структурой возможно путем придания упрочняемой поверхности подложки рельефа - треугольного, трапецеидального и др. профилей. При соударении струй образуется мелкодисперсная пелена и распыление струй на массивное тело подложки. В таких условиях скорость охлаждения компонент кумулятивных струй достигает 1 млн. градусов в секунду, и создаются условия для быстрой кристаллизации.

В процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) вопрос фиксации промежуточных продуктов при протекании многостадийных реакций в волне СВС решается при скоростях охлаждения 104 – 105 К/с, близких к скоростям высокоскоростной закалки. В этих условиях происходит получение метастабильных структур и состояний вещества с особыми свойствами. Необходимую скорость охлаждения можно обеспечить при использовании высокоскоростной струи воды, направленной перпендикулярно фронту волны синтеза.

Методы взрывной обработки открывают новые возможности в области получения тонких покрытий толщиной порядка 10^{-6} м.

Покрытия, полученные в процессе совместной пластической деформации при сварке взрывом, по своей прочности сцепления с подложкой превосходят все существующие методы плакирования. Это дает возможность использовать полученные таким образом детали с защитными покрытиями в условиях динамического нагружения. Кроме того, покрытия обладают коррозионной стойкостью, антифрикционностью, гидростойкостью, теплопроводностью, износостойкостью.

Определенные трудности возникают при нанесении покрытий толщиной менее одного мм. В этом случае происходит деформация, коробление, разрывы и т.д. плакирующего слоя, но и что особенно существенно, требуемый заряд взрывчатого вещества по своей геометрии меньше критического диаметра детонации. Для решения проблемы сварки используют дополнительные пластины – спутники, к которым приклеивают фольгу из плакирующего материала. Как правило, после сварки из-за наличия волн растяжения происходит отрыв пластины спутника. Качество плакирующего слоя определяется технологией склеивания. Кроме склеивания покры-

тие на пластину – спутник можно наносить любым другим методом напыления, химическим и т.д. При соударении с подложкой происходит перенос материала покрытия на последнюю. Прочность сцепления при этом превосходит исходную с пластиной – спутником.

Следующим направлением формирования тонких металлических покрытий является сварка взрывом порошков с монолитными металлами.

Для нанесения порошков на металлы ударными волнами применяют схемы, аналогичные одностороннему прессованию. Процесс метания пористого (или сыпучего) слоя, как правило, при теоретическом анализе разбивают на два этапа. На первом этапе разгон происходит в ударной волне, сильно уплотняющей вещество, переводя его в близкое к компактному состоянию. На втором этапе продукты детонации далее ускоряют спрессованный пористый слой. Между взрывчатым веществом и порошком используют защитный слой. Нанесение порошковых покрытий на металлической основе ударно-волновой обработкой производится как в твердом, так и жидком состоянии. Смена механизма формирования слоев от твердого к жидкофазному определяется значениями скорости соударения порошка с подложкой и скоростью скольжения ударной волны вдоль подложки. Для процесса в твердой фазе слой покрытия состоит из спрессованных, деформированных и сваренных между собой частиц исходного порошка, а прочность его сцепления близка к прочности монолита. Соударение порошка со скоростью, превышающей критическую, приводит к образованию слоев из жидкой фазы с формированием литых структур и прочностью сцепления на уровне монолита. Толщина слоев может достигать 200 – 300 мкм.

Монолитная металлическая подложка при импульсной обработке остается холодной. Жидкофазное формирование поверхностных слоев можно рассматривать как динамическую закалку из жидкого состояния. Данному методу присущ ряд особенностей: плавление порошкового материала происходит с высокой скоростью нагрева, что позволяет избежать выгорания и окисления элементов при обработке высоколегированных и порошковых смесей; высокая скорость физико-химических реакций в ударном фронте позволяет получать слои из метастабильных фаз или пересыщенных растворов и соединений из смесей порошков непосредственно за

время обработки; перевод металла порошка в расплавленное состояние и его охлаждение со скоростью порядка 1 млн. градусов в секунду создает условия для быстрой кристаллизации.

В процессе сварки взрывом на режимах $r < r_{\min}$ и $r > r_{\max}$ (r – параметр сварки) соединения свариваемых материалов не происходит, но, тем не менее, на соударяющихся поверхностях образуется тонкий металлический слой. При $r < r_{\min}$ основной механизм образования покрытия связан с фрикционным взаимодействием соударяющихся поверхностей, а при $r > r_{\max}$, когда давления в зоне контакта превышают $2\sigma_m$ (σ_m – предел текучести), наблюдается множественный откол от соударяемой поверхности метаемой пластины. В результате этого происходит соударение и сварка отколовшихся частиц металла с поверхностью подложки, затем дополнительное зачеканивание отколовших частиц в поверхность ударом плакирующей пластины и отскок последней.

Соединение не происходит и в том случае, когда полученное соединение разрушается волнами разгрузки вследствие того, что в процессе деформации металла в зоне соединения большое количество энергии переходит в тепло, и наиболее деформированные поверхности участка расплавляются, а затем затвердевают при отводе тепла в окружающий слой металла. При движении точки контакта зона высоких давлений сменяется зоной растягивающих напряжений. Когда расплавленный участок металла не успевает затвердеть, происходит разрушение зоны соединения. Зона перемешивания расплавленных при соударении металлов остается на одной из поверхностей.

Стабильное получение покрытий толщиной 200÷300 мкм наиболее целесообразно осуществлять при $r < r_{\min}$ и активации фрикционного взаимодействия. Это достигается путем обеспечения скольжения плакирующего слоя по подложке. Для этого размещают заряд на торцевой поверхности плакирующей заготовки, либо плакирующую заготовку выполняют в виде клина.

Разработана установка для фрикционного нанесения покрытий с совмещением операций динамической закалки.

Технологический процесс включает подготовку поверхности и собственно фрикционное покрытие.

Удобно в технологическом отношении наносить покрытие, используя клеевые составы. На пластину-спутник наносится клей, например, силикатный или жидкое стекло. На клей наносится плакирующий слой порошка необходимого состава. При соударении с плакируемой поверхностью слой порошка переносится на последнюю. Затвердевший клей отлетает.

Ряд заготовок после взрывного нагружения подвергаются цементации. Глубина упрочненного слоя в обработанных взрывом деталях и заготовках за одинаковые интервалы времени увеличивается в 2 – 5 раз по сравнению с необработанными. Поэтому одним из направлений может быть изучение влияния предварительного импульсного нагружения на диффузионные процессы.

Так как диффузия совершается путем последовательного перемещения отдельных атомов, то для движения любого данного атома в твердом теле обязательно приобретение им определенной энергии активации. Установлено, что всякий фактор, способствующий увеличению исходной энергии атома, тем самым способствует уменьшению той дополнительной энергии, которая необходима для активации атома при диффузии. Наличие избыточной потенциальной энергии в кристалле с искаженной решеткой приводит к увеличению вероятности активации атомов, находящихся в областях с неправильной структурой, повышая тем самым скорость диффузии, которая обычно значительно быстрее протекает по искаженным областям границ зерен, имеющим энергию, выше, чем в объеме кристаллов, характеризующемся более совершенной структурой.

Основные параметры процесса диффузии связаны первым и вторым уравнениями Фика. Факторами ескорения диффузии могут быть градиент температуры, градиент напряжений, градиент электрического поля и т.д. Уравнение диффузии запишется в виде:

$$\frac{D\partial M}{\partial T} = -\frac{D_c\partial C}{\partial x} \pm \frac{D_m\partial T}{\partial x} \pm \frac{D_\sigma\partial\sigma}{\partial x} \pm \frac{D_E\partial E}{\partial x} \pm \dots, \quad (3)$$

где D_c , D_T , D_σ , D_E , D – коэффициенты диффузии, обусловленные соответственно градиентом концентрации, температуры, напряжения, электрического поля; m – масса диффундируемого вещества.

$\partial C, \partial T, \partial\sigma, \partial E$ – градиенты концентрации, температуры, напряжений и электрического поля;

$\frac{D\partial M}{\partial T}$ – скорость переноса массы диффундируемого вещества.

В нашем исследовании наибольший интерес представляет градиент напряжений $\frac{\partial \sigma}{\partial x}$ и температуры $\frac{\partial T}{\partial x}$. При прохождении ударных волн через металлы градиент напряжения составляет величину порядка сотен тысяч атмосфер на несколько микронов, и очевидно, что в этом случае роль D_σ значительно возрастает, прохождение ударной волны неизбежно связано с повышением температуры, изменением дефектности кристаллической структуры и т. п.

Существенное влияние на самодиффузии оказывает скорость деформации. Увеличение скорости деформации от 10^{-4} до $2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ при температуре 750°C приводит к увеличению коэффициента в 2500 раз. Полученные значения D для самодиффузии превосходят коэффициент диффузии железа в жидком состоянии. В диапазоне скоростей деформаций от 10^{-2} до 10^{-3} с^{-1} также отмечается увеличение коэффициента диффузии, связываемое с повышением средней концентрации вакансий, число которых оценивают с привлечением зависимости

$$N = \frac{kl_p}{2bd} \quad (4)$$

где $k=0,25$ – фактор, учитывающий долю образовавшихся порогов дислокаций, которые могут перемещаться конвективно;

l_p – расстояние, на которое перемещается каждая дислокация;

b – вектор Бюргерса;

d – расстояние между дислокационными диполями.

Следовательно, одной из областей применения взрывной обработки может стать модифицирующее воздействие ударных волн и скоростной деформации на материал, который в дальнейшем будет подвергнут химико-термической и др. видам обработки. После взрывного нагружения большинство металлов переходят в активированное состояние, и ряд процессов химико-термической обработки и нанесения защитных покрытий (цементация, борирование и др.) протекает значительно быстрее при тех же показателях качества.

Взаимодействие падающей и отраженной ударных волн в нагружаемом материале приводит к возникновению нарастающих растягивающих напряжений, которые могут привести к разрушению, называемому отколом. На это явление больше всего влияют форма волны напряжения и предельное значение разрушающего напряжения $\sigma_{\text{с}}$ нагружаемого материала. Положение трещины откола в сплошном материале или места расслоения в слоистом зависит от формы волны напряжений. При распространении волны в материале крутизна кривой $\sigma(t)$ за фронтом волны уменьшается с увеличением толщины нагружаемого поли- или мономатериала δ , что приводит к увеличению толщины откола Δ . При распространении волны напряжений большой интенсивности $\sigma > 2\sigma_{\text{с}}$ возникает множественный откол – несколько следующих один за другим параллельных отколов.

Обычно для предотвращения откола отражающую поверхность материала непосредственно опирают о другое тело, поглощающее энергию. Предотвращение откола производится и путем использования захватывающих плит и мастик. При этом откольные элементы, поглощающие значительное количество энергии, могут быть использованы для выполнения ряда вспомогательных операций. Например, в устройстве для штамповки взрывом поворотные грузы, прилегающие к стенкам бассейна, используются во вспомогательных операциях штамповки.

Полезное применение откола – это, прежде всего, разделение слоистых изделий для их утилизации после выполнения своего назначения, а также для расслоения готовых многослойных деталей.

Таким образом, эффект откола находит применение как функциональный и интенсифицирующий фактор и связан с обработкой и созданием слоистых изделий и использованием слоистости, как конструктивного, так и технологического приемов.

Поступила в редакцию 10.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Шаповал, Университет экономики, информационных и системных технологий, Кременчуг.

В.С. Кривцов, А.П. Брагин, А.П. Мельничук, С.А. Полтарушников

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Рассмотрен вопрос определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) произвольного элемента сферической оболочки. Для решения этой задачи использованы системы дифференциальных уравнений движения с учетом реализации больших пластических деформаций, с использованием гипотезы Кирхгофа-Ляве, с использованием физического закона, учитывающего упругую деформацию и линейное упрочнение в области пластических деформаций. Задача решена в предположении осесимметричности заготовки и детали, осесимметричности нагружения и однородности его в осевом направлении. Результаты численного решения задачи и сравнения их с результатами экспериментов подтверждают работоспособность выбранной модели.

осесимметричная сферическая оболочка, НДС произвольного элемента оболочки, гипотеза Кирхгофа-Лява, упругие, пластические деформации, расчетная модель, эксперимент, сравнение

В самолетостроении при монтаже отдельных участков трубопроводов широкое распространение получило соединение сфера-конус (рис. 1), обеспечивающее герметичность стыка участков трубопровода, компенсацию их угловых и линейных перемещений под воздействием переменных эксплуатационных нагрузок. К элементам соединения сфера-конус – сферическим и конусным наконечникам предъявляют жесткие требования соответствия критериям качества и технологичности.

Процесс оформления основного (генерального) контура детали характеризуется значительными величинами проштамповки, что при деформировании маложестких оболочек требует, чтобы нагружающее воздействие было как можно более плавным, приближающимся к статическому. Решение этой задачи возможно с использованием положений классических теорий тонких оболочек и пластического течения в динамической постановке [1 – 3].

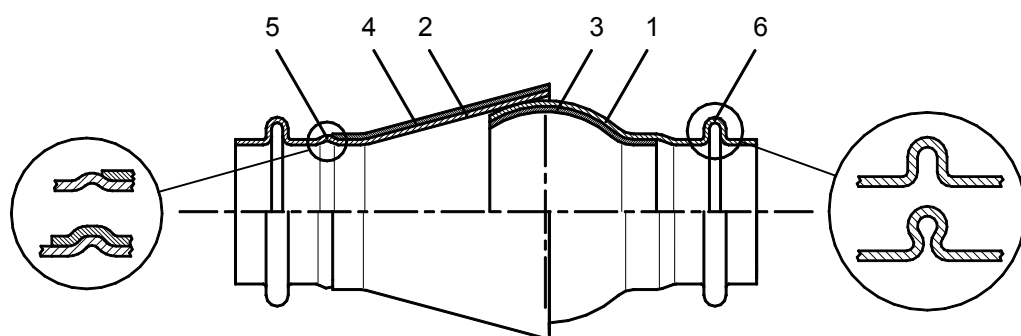


Рис. 1. Усиленное соединение сфера-конус трубопровода:

- 1, 2 – основные элементы сферического и конического наконечников;
 3, 4 – усиливающие элементы сферического и конического наконечников;
 5 – элементы фиксации (рифты), обеспечивающие взаимную фиксацию внешней и внутренней составляющих элементов;
 6 – компенсаторы, обеспечивающие компенсацию угловых и линейных перемещений элементов под воздействием эксплуатационных нагрузок

При решении задачи описания НДС таких элементов деталей, как рифты различного направления, пуклевки и компенсаторы следует учитывать, что для построения расчетной модели нельзя использовать гипотезу Кирхгофа-Лява, поскольку радиусы кривизны отдельных элементов оболочки соизмеримы с толщиной заготовки [1 – 3].

В процессе гидродинамической калибровки осесимметричных оболочек необходимо рассматривать две стадии их радиального деформирования: движение заготовки под действием импульсного давления; соударение заготовки и матрицы с последующим их пружинением [1 – 3].

Как показывают результаты экспериментальных исследований и опыт промышленного использования методов гидродинамической штамповки [4, 5] во всех случаях вид функции давления жидкости в гидравлической камере можно условно разделить на четыре варианта аппроксимации (рис. 2), три из которых допустимо использовать в форме $p = p(t)$. Это обусловлено тем, что фазовый сдвиг по времени на два порядка меньше продолжительности импульса, таким образом, справедливо допущение, что давление равномерно распределено по высоте камеры [9]:

$$p = p_{\max} \frac{t}{n t_{\max}}; \quad (1)$$

$$p = p_{\max} \cdot \sin \left(\frac{\pi t}{t_{\max}} \right); \quad (2)$$

$$p = p_{\max} \cdot \sin \left[\pi \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^m \right], \quad (3)$$

где $p_{\max}$ – максимальное давление; $t_{\max}$ – продолжительность импульса давления; p, t – текущие значения давления и времени импульса; m – коэффициент, определяющий угол наклона синусоиды.

Для оформления основного контура оболочки необходим “мягкий” нагружающий импульс давления, что соответствует зависимостям (1) и (2). Этого можно достичь увеличением массы снаряда и снижением его скорости, вследствие чего возрастает длительность нагружения и деформирования заготовки. Из двух вариантов, приемлемых для формообразования основного контура оболочки, наиболее рациональным следует считать распределение давления по синусоидальному закону, так как при этом минимальны потери энергии через зазоры [4, 5, 8].

При оформлении элементов взаимной фиксации компенсаторов, где толщина заготовки соизмерима с радиусом изгиба, требуется более энергоемкий и жесткий импульс, характеризующийся более резким нарастанием величины давления по времени, чем при штамповке маложестких оболочек. Продолжительность импульса давления ниже, чем в двух ранее рассмотренных случаях, влияние волновых процессов на деформирование заготовки, может быть существенным и при некоторых параметрах нагружения допущение, что $p = p(t)$ уже не может быть приемлемым. Соотношение (3) рационально использовать применительно к процессам формообразования компенсаторов [5, 8].

Для калибровки и формования элементов рельефа (рифтов и пуклевок), где перемещения оболочки ничтожно малы, необходим жесткий остродинамичный импульс, обеспечивающий калибровочное усилие, что достигается снижением массы снаряда и увеличением его скорости. В этом случае для уменьшения величины пружинения оболочка должна соударяться с поверхностью матрицы с предельной скоростью. В этом случае функцию изменения давления во времени можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью (рис. 3) и изменение давления

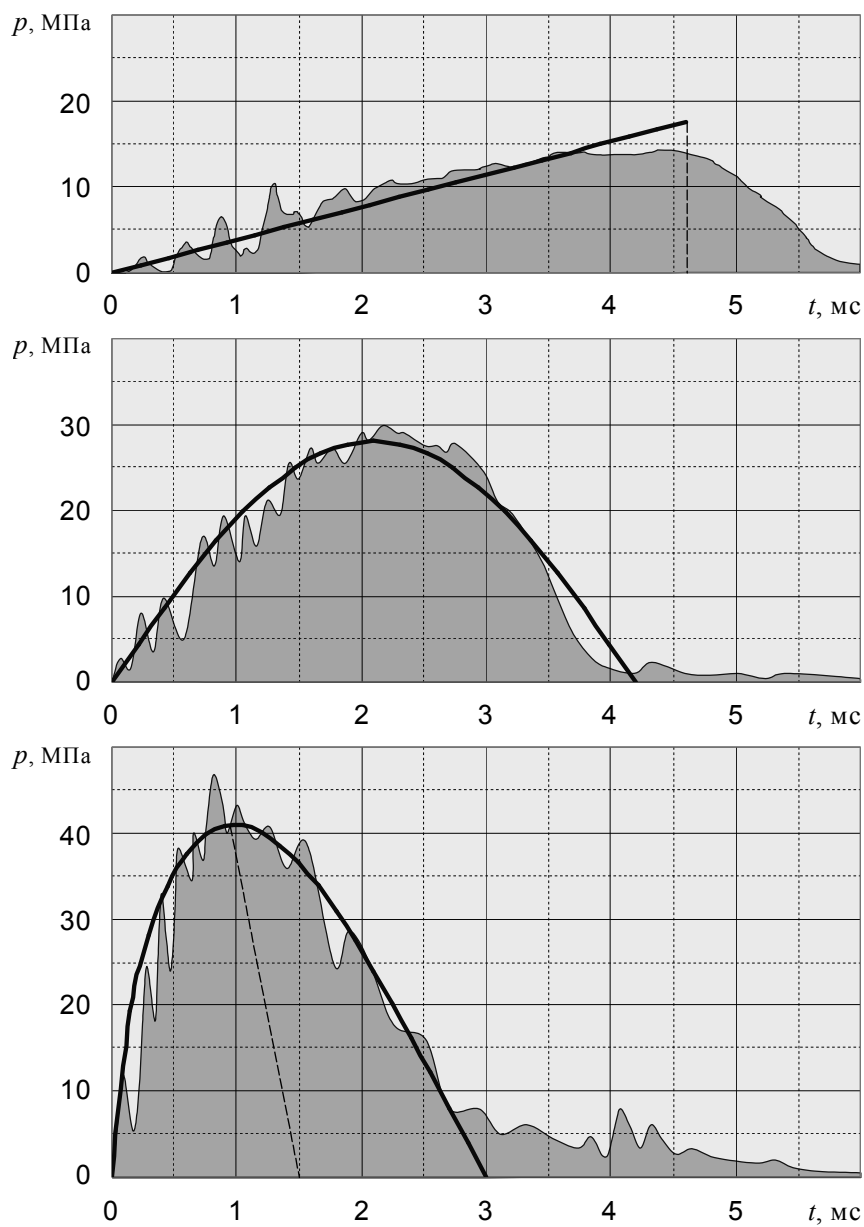


Рис. 2. Варианты аппроксимации функции $p = p(t)$ при ГДШ

по высоте камеры при этом весьма значительно [5, 8]. Поэтому функцию $p = p(z, t)$ следует определять с учетом взаимодействия снаряда с

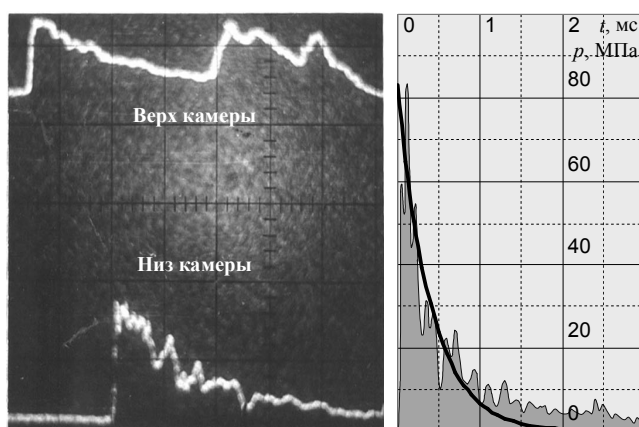


Рис. 3. Калибровочный импульс давления в камере

жидкостью. Решение этой задачи несколько упрощается с учетом относительной малости перемещений заготовки в процессе калибровки.

При оформлении гидродинамической камеры при этом весьма значительно [5, 8]. Поэтому функцию $p = p(z, t)$ следует определять с учетом взаимодействия снаряда с жидкостью. Решение этой задачи несколько упрощается с учетом относительной малости перемещений заготовки в процессе калибровки. штамповкой генерального контура сферической оболочки:

– функцию давления можно представить в форме соотношения (2) [9];

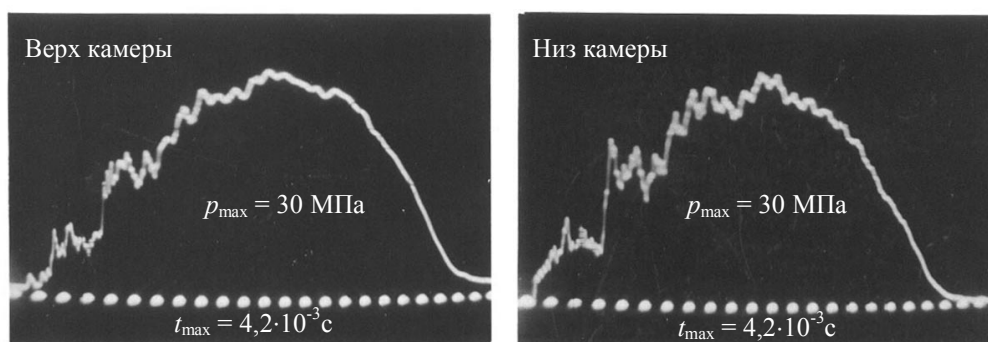


Рис. 4. Импульс давления в камере при оформлении основного контура

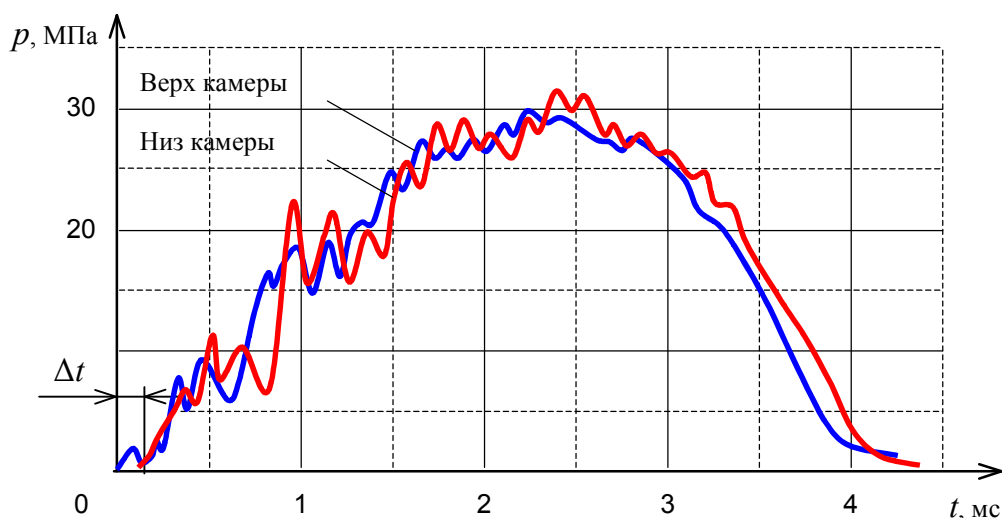


Рис. 5. Изменение импульса давления по высоте формирующей камеры при ГДШ тонкостенных оболочек

– в выражении (2) можно совершенно обоснованно не учитывать изменение давления по длине рабочей камеры (рис. 4, 5) о чем свидетельствует установленный экспериментально факт, что $\Delta t \ll t_{\max}$ [4].

Динамическое деформирование тонкостенных цилиндрических заготовок описывается геометрическими и физическими нелинейными уравнениями теории тонких оболочек с использованием теории пластического течения с учетом изотропного упрочнения и уравнения движения элемента оболочки имеют вид [1 – 3]:

$$r h \rho \frac{d^2 r}{dt^2} = p r \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial S} (N_s r \cos \alpha) - \frac{\partial}{\partial S} (Q r \sin \alpha) - N_\theta; \quad (4)$$

$$r h \rho \frac{d^2 z}{dt^2} = p r \cos \alpha - \frac{\partial}{\partial S} (N_s r \sin \alpha) - \frac{\partial}{\partial S} (Q r \cos \alpha); \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} (M_s r) - M_\theta \cos \alpha - Q r = 0, \quad (6)$$

Аналогичным образом строят теорию определения НДС многослойных оболочек:

$$r \left(\sum_{i=1}^n h_i \rho_i \right) \frac{d^2 r}{dt^2} = p r \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n N_{s_i} \right) r \cos \alpha \right) - \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) r \sin \alpha \right) - \sum_{i=1}^n N_{\theta_i};$$

$$r \left(\sum_{i=1}^n h_i \rho_i \right) \frac{d^2 z}{dt^2} = p r \cos \alpha - \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n N_{s_i} \right) r \sin \alpha \right) - \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) r \cos \alpha \right); \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} \left(\sum_{i=1}^n M_{s_i} \right) r - \left(\sum_{i=1}^n M_{\theta_i} \right) \cos \alpha - \left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) r = 0, \quad (9)$$

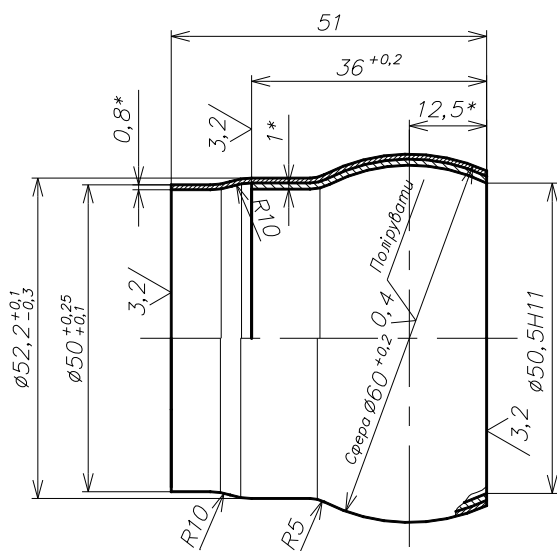


Рис. 6. Наконечник сферический

Выполнено моделирование и исследование процесса формообразования основного (генерального) контура элементов соединения сфера-конус на примере внешней оболочки сферического наконечника (рис. 6), выполненного из титанового сплава ПТ-7М [9]. Обоснование и построение математической модели ГДШ тонкостенных осесимметричных оболочек базируется на результатах экспериментальных исследований [6, 7].

Проведено численное исследование с использованием систем САЕ НДС сферического элемента при гидродинамической штамповке на этапе оформления основного контура, определено влияние параметров нагружающего воздействия на процесс формообразования (рис. 7). Установлена область рациональных параметров импульса давления, обозначенная на рис. 7 как область Г, которая характеризуется минимальными значениями промежуточных изгибных деформаций и минимальными энергозатратами на деформирование заготовки [9].

При сравнении численного решения задачи определения параметров НДС детали с результатами, полученными ранее экспериментально, использована интегральная оценка правильности решения. На рис. 8 показано сравнение компонентов деформированного состояния (рис. 8, а) и интенсивности деформаций (рис. 8, б), определенных теоретически (численно) и экспериментально.

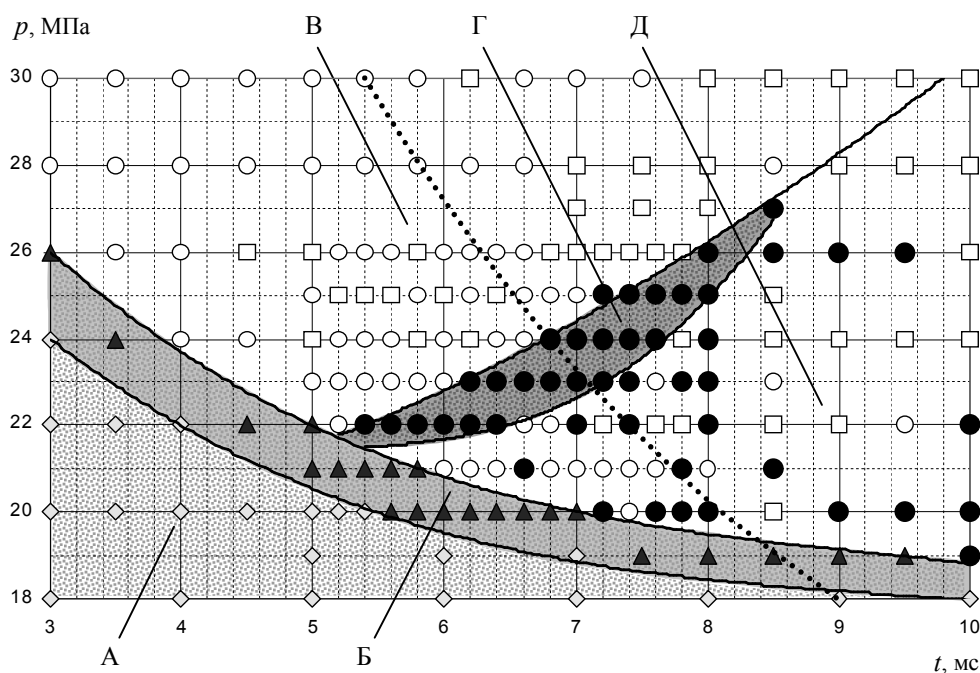


Рис. 7. Исследуемая область процесса гидродинамической штамповки при оформлении основного контура сферического наконечника:

- ◆ – нет контакта оболочки с поверхностью матрицы;
- ▲ – неполный контакт оболочки с поверхностью матрицы;
- – искажение формы оболочки от удара о поверхность матрицы;
- – удар оболочки, отскок с последующим наложением на матрицу; формообразование, сопровождающееся промежуточными изгибными деформациями;
- – качественная сферическая оболочка

Как видно, отклонение результатов численного решения от результатов эксперимента существенно только в зонах, близких к протяжному ребру матрицы, т.е. в зонах, где деформации имеют относительно малое значение [6, 7, 9].

На основе сопоставления результатов, полученных численно и экспериментально, можно утверждать, что предложенная математическая модель гидродинамической штамповки тонкостенных сферических оболочек при определении параметров напряженно-деформированного состояния детали на этапе оформления основного контура даст приемлемый результат [6, 7, 9].

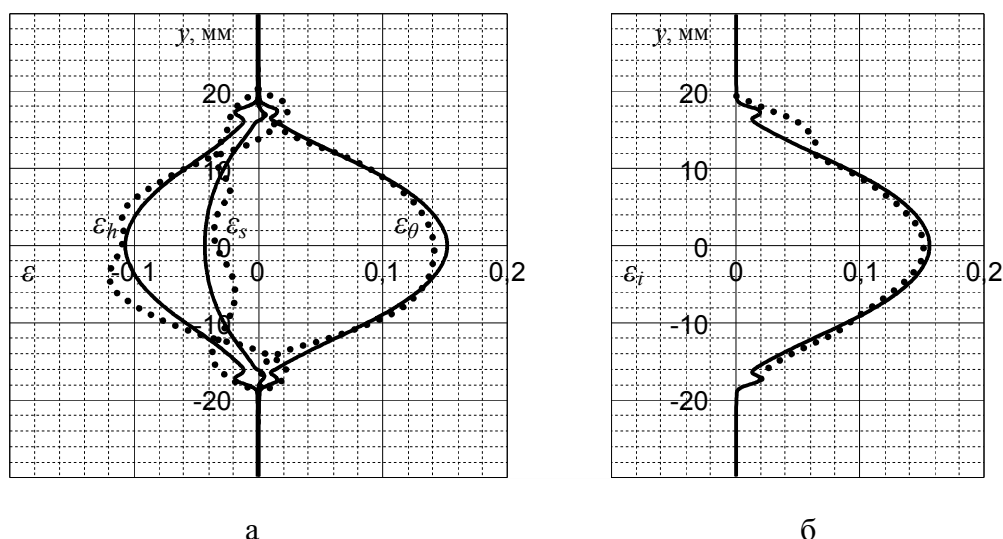


Рис. 8. Значения деформаций оболочки при моделировании и эксперименте:
 а – компоненты деформаций, б – интенсивность деформаций;
 — – моделирование; – эксперимент

Таким образом, можно рекомендовать для практического использования предложенные подход и методику определения рациональных параметров импульса нагружения, действующего на заготовку, и определения компонентов НДС тонкостенных сферических оболочек при реализации первого перехода – оформление методом гидродинамической штамповки (ГДШ) генерального контура оболочки.

Совершенно очевидна необходимость продолжения работы в этом направлении, т.е. необходимо провести:

- теоретическое и экспериментальное исследование процесса создания элементов рельефа оболочек, результаты которого соизмеримы с толщиной заготовки (рифты, пуклевки и т.п.);
- теоретическое и экспериментальное изучение процесса калибровки детали, т.е. необходимо рассмотреть совместную работу детали и матрицы.

Только после решения всех трех задач можно сформулировать полную методику теоретического определения энергосиловых параметров процессов ГДШ и компонентов НДС детали.

Литература

1. Тимошенко С. П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки – М.: Наука, 1963. – 635 с.
2. Большие динамические деформации балок, колец, пластин и оболочек / Уитмер, Балмер, Лич, Пиан // Ракетная техника и космонавтика. – 1963. – № 8. – С. 111-123.
3. Морино, Лич, Уитмер. Уточненный метод численного расчета нестационарных процессов в упругопластических тонких оболочках при больших деформациях // Прикладная механика, – 1971. – № 2. – С. 131-134.
4. Мацукин Ю.Г., Касьян В.Г., Лимберг Э.Р. Давление в ограниченном объеме жидкости при ее ударном нагружении // Импульсные методы обработки материалов: Сб. научн. тр. – М-ск: Наука и техника, 1977. – С. 106-110.
5. Родько С.Я., Муравьев С.Д., Брагин А.П. О влиянии геометрических параметров формирующих камер пресс-пушек на импульс давления в жидкости // Импульсная обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1984. – Вып. 12. – С. 111-115.
6. Полтарушников С.А., Брагин А.П., Мильченко Е.И. Деформированное состояние деталей типа сферических и конических законцовок трубопроводов // Импульсная обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1984. – Вып. 12. – С. 21-26.
7. Родько С.Я., Брагин А.П. Экспериментальное исследование процесса свободного деформирования тонкостенных труб при гидродинамической штамповке // Импульсная обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1987. – С. 52-57.
8. Кривцов В.С., Мельничук А.П. Особенности описания деформирования тонкостенных цилиндрических деталей при гидродинамической штамповке // Авиационно-космическая техника и технология: Труды Нац. аэрокосм. ун-та “ХАИ”. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2001. – Вып. 25. – С. 28-34.
9. Мельничук А.П. Моделирование технологических процессов гидродинамической штамповки законцовок трубопроводов воздушных систем летательных аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2006. – 207 с.

Поступила в редакцию 23.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Лобанов, завод им. Малышева, Харьков.

УДК 620. 1787

Л.Д. Добрушин¹, А.В. Колодяжный², С.Н. Солодянкин³, В.Г. Ярещенко²

¹*Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Украина*

²*Институт проблем машиностроения
им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина*

³*ЧПФ «ФЕЛИС», Украина*

СКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ЗАГОТОВОК И МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ВЗРЫВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Представлены математические модели процессов скоростного деформирования, которые характеризуют различные технологии взрывной обработки материалов давлением. Показано, что каждая технология характеризуется своим диапазоном скорости деформации. Приведены результаты расчета и эксперимента процессов взрывного формообразования, сварки, разделения взрывом.

скоростное деформирование, гидровзрывная штамповка, сварка взрывом, плакирование, управляемое разделение, совмещенные технологии

В технологиях взрывной обработки материалов давлением (ВОМД) – формообразование, сварка взрывом, динамическое деформационное упрочнение, управляемое разъединение – реализация техпроцессов происходит за счет скоростного деформирования конструкционного материала. Однако для каждого из перечисленных техпроцессов характерен свой диапазон интенсивности и локализации деформации и свои критерии реализации технологии.

Математическими моделями техпроцессов ВОМД являются краевые задачи для конструкционных элементов (балки, пластины, оболочки), поведение материала которых описывается фундаментальными зависимостями теории течения [1] и динамической деформационной теории пластичности [2]. В этой теории используется полилинейная функция для учета деформационного упрочнения при произвольных деформациях и кинематического упрочнения при скоростном деформировании материала элементов системы [3 – 6].

При осесимметричном приложении к оболочкам взрывных веществ (ВВ) физические уравнения можно представить в гуковской форме

$$\sigma_s = \frac{E^*}{1-\nu_*^2} (\varepsilon_s + \nu_* \varepsilon_\varphi); \quad \sigma_\varphi = \frac{E^*}{1-\nu_*^2} (\varepsilon_\varphi + \nu_* \varepsilon_s); \quad \tau_{s\varphi} = G^* \gamma_{s\varphi}, \quad (1)$$

$$\text{Здесь } E^* = \frac{\sigma_i / \varepsilon_i}{1 + m \sigma_i / \varepsilon_i}; \quad \nu_* = \frac{0,5 - m \sigma_i / \varepsilon_i}{1 + m \sigma_i / \varepsilon_i}; \quad G^* = \frac{1}{3} \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}; \quad m = \frac{1-2\nu}{3E},$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \left[\sigma_3^2 + \sigma_4^2 - \sigma_3 \sigma_4 + 3 \tau_{s\varphi}^2 \right]^{1/2}; \\ \varepsilon_i &= \left[(\varepsilon_s - \varepsilon_\varphi)^2 + (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_s)^2 + (\varepsilon_s - \varepsilon_\varphi)^2 - \frac{3}{2} \gamma_{s\varphi}^2 \right]^{1/2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{3}; \\ \sigma_0 &= \frac{\sigma_\varphi + \sigma_s}{3}; \quad \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_\varphi}{3}. \end{aligned}$$

При $\sigma_\varphi = 0$ поверхность свободна от нагружения получаем

$$\varepsilon_s = -\frac{\nu_*}{1-\nu_*} (\varepsilon_s + \varepsilon_\varphi).$$

Пластические деформации в материале наступают при выполнении динамического деформационного критерия Мизеса

$$\sigma_{i \geq} \sigma_T^{cm} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} \right], \quad (2)$$

где D , n – параметры сопротивления конструктивных материалов скоростному деформированию, константы.

Упрочнение в динамической деформационной теории пластичности будет

$$\sigma_i = 3G\varepsilon_i \{1 - \omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)\}, \quad (3)$$

где $\omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i)$ – функция упрочнения.

Для линейного упрочнения

$$\omega(\varepsilon_i, \dot{\varepsilon}_i) = \lambda \left\{ 1 - \varepsilon_T^{cm} \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{1/n} \right] \frac{1}{\varepsilon_i} \right\}. \quad (4)$$

В этом случае можно построить безитерационный вариант расчета параметров скоростного деформирования системы, который существенно сокращает машинное время. Но билинейный закон физической нелинейности справедлив лишь для малых деформаций.

Для анализа больших пластических деформаций применяется полилинейная функция упрочнения

$$\sigma_i = 3G \left(\varepsilon_i - \lambda_k \prod_{j=0}^{k-1} (1 - \lambda_j) \cdot (\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ik}) \left(1 + \left(\frac{\varepsilon}{D} \right)^{1/n} \right) \right), \quad (5)$$

где $\lambda_k = E_k / E_{k-1}$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_T$, $E_0 = E$, k – точки излома.

На рис. 1 приведены результаты расчета напряжений при скоростном деформировании взрывной нагрузкой балки-полосы по динамической деформированной теории пластичности с трехзвенным упрочнением. Кривые 1, 2 – без учета скорости с билинейным и трехзвенным деформационным упрочнением, 3, 4 – то же упрочнение с учетом скорости деформации.

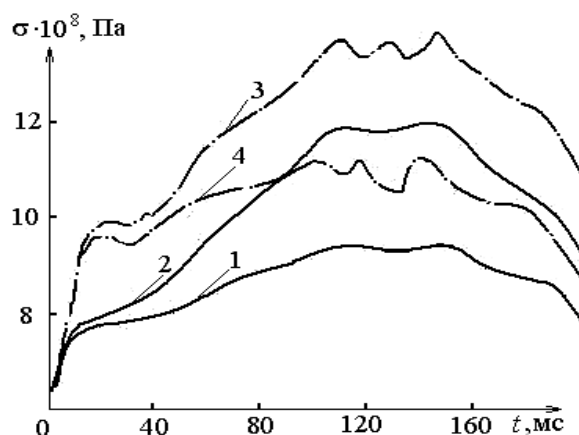


Рис. 1. Напряжения в балке-полосе при импульсном нагружении

Численные результаты скоростного деформирования объектов неоднократно проверялись экспериментом с применением метода широкополосного тензометрирования. Для этого имеется компьютеризированный многоканальный измерительно-вычислительный комплекс «Тензодин-12/1 (2)», малобазные тензорезисторы. Тензоусилитель на несущей частоте 1 МГц (2 МГц) имеет рабочую частоту в полосе от 60 Гц до 180 кГц (250 кГц) и приборную погрешность 3 % [4].

На рис. 2 приведены результаты расчета и эксперимента по удару в центре стальной балки длиной 80 см, сечением 4×4 см сферическим ударником $Q = 1,75$ кг с высоты $h_{\text{сб.}} = 10$ см (расхождение $\Delta_{\sigma} = 17\%$) и на расстоянии $l = 23$ см от центра (расхождение $\Delta_{\sigma} = 7\%$).

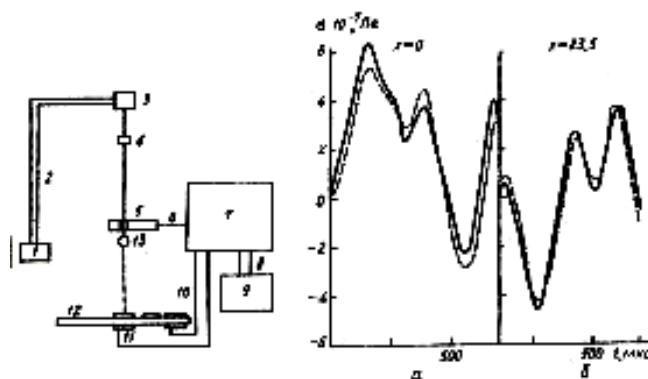


Рис. 2. Напряжения в шарнирно-опертой балке при ударе

Результаты применения метода широкополосного тензометрирования приводятся далее при рассмотрении соответствующих технологий ВОМД.

Технология гидровзрывной штамповки (ГВШ) разработана и развита, в основном, в трудах Р.В. Пихтовникова и его школы [7 – 9].

ГВШ состоит в приложении (через передающую среду) к заготовке такой нагрузки, которая придает ей форму матрицы при сохранении целостности и работоспособности будущей детали, т. е. нужно определить, какой брать заряд ВВ и сколько, как его разместить и оценить количество переходов. Матрица при этом должна оставаться упругой или получать допустимые остаточные деформации.

Расчет формообразования изделия производится в два этапа: для малых и умеренных деформаций на основе нелинейной волновой теории движения оболочки, для более развитых деформаций – переход к безмоментной теории оболочек [5].

На рис. 3 приведены результаты процесса поэтапного формообразования заполненной водой конической заготовки из стали ЭП 416 в соответствующую деталь под действием сферической волны давления. Сплошные линии соответствуют результатам расчета, штриховые – данным эксперимента.

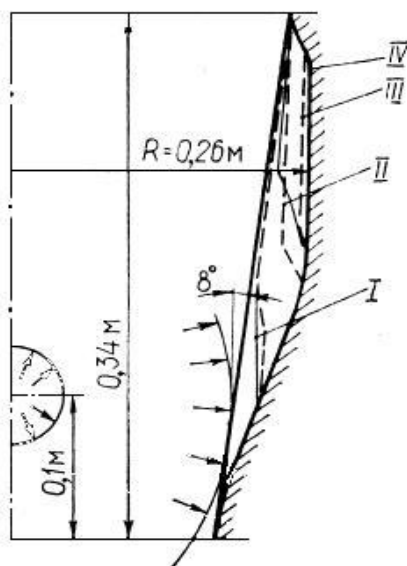


Рис. 3. Формообразование конической заготовки

Для экспоненциальной формы нагрузки

$$P(s, t) = P_m \exp[-t - t_0(s) / Q(s)] F(s, t),$$

(P_m, Q – постоянные интенсивности и скорости спада давления, $t_0(s)$ – время задержки действия давления, $F(s, t)$ – функция распределения давления вдоль меридиана оболочки) получаем профили I – IV – заготовки для каждого из четырех этапов формообразования:

$$P_m^{(1)} = 65 \text{ МПа}, \quad Q^{(1)} = 12,5 \text{ мкс}; \quad P_m^{(2)} = P_m^{(3)} = 70 \text{ МПа}, \\ Q_m^{(2)} = Q_m^{(3)} = 13 \text{ мкс}; \quad P_m^{(4)} = 75 \text{ МПа}, \quad Q^{(4)} = 13,5 \text{ мкс};$$

коэффициент трения $\mu = 0,04$.

Параметры взрывной нагрузки в ГВШ играют определяющую роль. В работе [10] изложена методика оптимизации взрывной нагрузки при реализации технологий ГВШ, упрощающая режим отработки процесса.

Техпроцесс сварки взрывом разработан в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого века почти одновременно в США и СССР.

Сварку взрывом по областям применения можно сгруппировать: в соединительные операции, прецизионную (с ограниченной зоной воздействия на изделия) и плакирование взрывом протяженных объектов (би- и триметалл – листы, трубы и т.п.).

В последующие десятилетия процесс сварки взрывом совершенствовался как в направлении математического моделирования [11 – 13], развитии и совершенствовании методов экспериментального исследования и реализации техпроцесса.

Можно считать, что в области сварки взрывом хорошо разработаны критерии реализации техпроцесса, установлены границы его осуществления. Так, установлен факт равномерного относительного проскальзывания материала в зоне контактной поверхности [11, 14], обусловленный наличием в нагрузке нормальной и тангенциальной составляющих, а также взаимодействия локальных элементов контактирующих поверхностей (шероховатостей). Это установлено для всех схем взрывной сварки – косое соударение [11, 12] эквипотенциальная схема с зазором, схема без зазора предложена В. Филиппчуком [11]. Как показано в работах [11, 12, 14] трение может быть источником разогрева узкой зоны контактного взаимодействия до фазового прихода (плавления). Существенным в этом случае является критерий превышения времени перехода в зону контакта волн растяжения σ_r над временем релаксации теплоты плавления в этой области. Этот критерий обеспечивает целостность зоны схватывания. Однако и в работе [11] и в настоящее время отмечается отсутствие решения динамической контактной задачи с учетом разрушения локальных неровностей контактной зоны, активацией молекулярно-атомного механизма схватывания.

Тем не менее, анализ высокоскоростного деформирования соударяющихся конструктивных элементов может сделать возможным более точно определять параметры, входящие в критерии реализации техпроцесса сцепления. Так, в работе [5] рассмотрено осесимметричное соударение эквивалентно расположенных цилиндрических слоев на базе деформационной теории пластичности. В результате установлено наличие и величины тангенциальной скорости смещения V_x , характер и уровень параметров напряженно-деформированного состояния в соударяющихся цилиндрах, время прихода волны растягивающих напряжений σ_r в зоне контакта со стороны свободной поверхности (рис. 4 – 6).

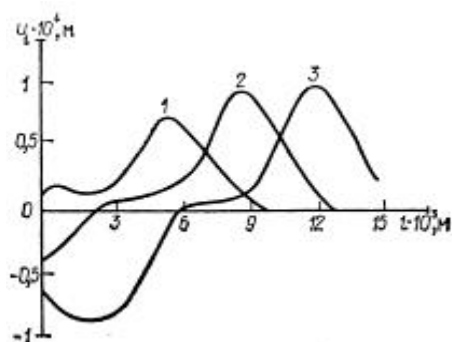


Рис. 4. Осевые смещения в зоне контакта:
 1 – $t_1 = 1,5 \cdot 10^{-6}$ с; 2 – $t_2 = 2,0 \cdot 10^{-6}$ с; 3 – $t_3 = 2,5 \cdot 10^{-6}$ с

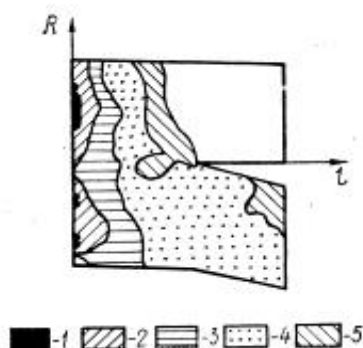


Рис. 5 – Интенсивность деформаций в соударяющихся слоях
 при $t = 2,08 \cdot 10^{-6}$ с в зонах:
 1 – $\varepsilon_i + 0,1$; 2 – $0,06 \leq \varepsilon_i \leq 0,1$; 3 – $0,04 \leq \varepsilon_i \leq 0,06$; 4 – $0,02 \leq \varepsilon_i \leq 0,04$

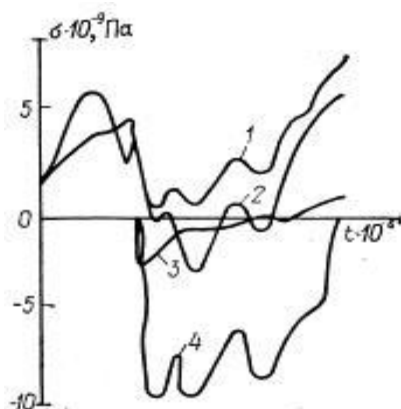


Рис. 6. Изменения окружных σ_ϕ , осевых σ_l , сдвиговых $\sigma_{r/l}$ и радиальных σ_r напряжений напряжений в зоне контакта

В технологии взрывного разделения элементов тонкостенных конструкций с использованием линейных концентраторов и зарядов ВВ применяются как конструктивные элементы (балки, пластины и оболочки), так и слои конечной толщины с привлечением для описания их скоростного деформирования теории течения [1] либо динамической деформационной теории пластичности [2, 5]. Сначала производится расчет параметров напряженно-деформированного состояния изделия с учетом локальной нагрузки, но без учета концентратора. В отчете о НИР [15] нами было показано, что при условии выполнения на линии разделения $F(x, y)$

$$\frac{R_{\min}(x, y)}{r_0} \gg 1$$

($R_{\min}(x, y)$ – минимальный радиус кривизны $F(x, y)$, r_0 – характерный размер поперечного сечения концентратора) в каждом нормальном сечений этой линии процесс деформирования представляет плоскую деформацию. Затем нагрузка доводится до значения интенсивности, при которой выполняется условие нормального отрыва [16]. Для примера рассматривается разделение слоя конечной толщины [4]. На слой, с одной стороны, нанесен концентратор, под концентратором с другой – локально распределенное давление от заряда ВВ (рис. 7). Применяя теорию течения, находим напряженно-деформированное состояние слоя в зоне нагрузки (рис. 8).

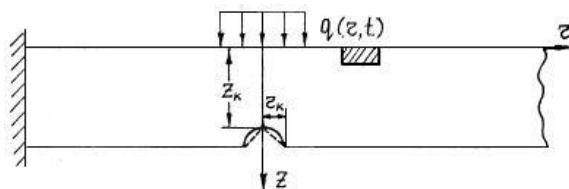


Рис. 7. Схема нагружения слоя с концентратором

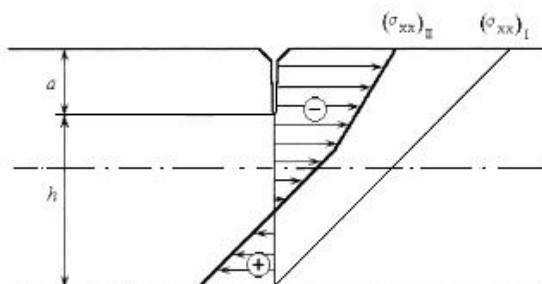


Рис. 8. Эпюры напряжений в слое при локальном нагружении

В работе [16] приведены данные о концентрации напряжений в зоне углового концентратора при изгибе и растяжении. Умножая расчетные напряжения σ_s на коэффициент концентрации K_1 , проверяем условие страгивания трещины

$$K_1 \sigma_s \geq I_1,$$

где I_1 – интенсивность напряжений при страгивании трещины.

Изменение I_1 для различных видов концентраторов приведены на рис. 9.

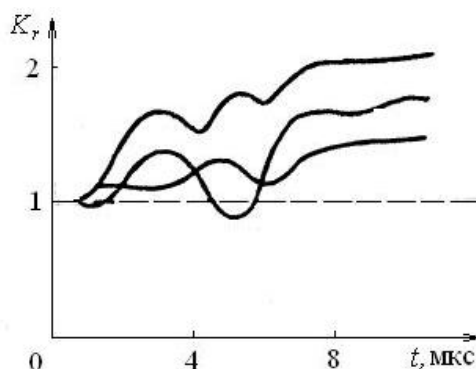


Рис. 9. Зависимость коэффициентов концентрации от времени

Таким образом, вероятность разделения слоя конечной толщины на ответственных объектах была доведена до $P = 0,999$, что проверено методом широкополосного тензометрирования. Детонационный характер нагружения слоя конечной толщины определяет диапазон скоростей деформаций в этом случае $\dot{\varepsilon} \approx 10^4 - 10^5 \text{ с}^{-1}$.

Выводы

При исследовании и реализации технологий взрывной обработки материалов давлением существенно используется математическое моделирование скоростного деформирования объектов для оценки напряженно-деформированного состояния и определения параметров техпроцессов. Поскольку взрывное вещество является альтернативным источником энергии, необходимо шире развивать применение технологий взрывной обработки материалов давлением в промышленности.

Литература

1. Качанов Л.Н. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 311 с.
2. Ильющин А.А. Пластичность. – М.; Л.: Гостехиздат, 1948. – 378 с.
3. Пежина П.П. Основы вязкопластичности. – М.: Мир, 1971. – 218 с.
4. Колодяжный А.В., Севрюков В.И. Ударное и импульсное воздействие на конструкции и материалы. – К.: Наук. думка, 1986. – 172 с.
5. Скоростное деформирование элементов конструкций и материалов / Ю.С. Воробьев, А.В. Колодяжный, В.И. Севрюков, Е.Г. Янютин. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
6. Волошенко-Климовицкий Ю.Я. Динамический предел текучести. – М.: Наука, 1965. – 179 с.
7. Пихтовников Р.В., Завьялова В.И. Штамповка листового металла взрывом. – М.: Машиностроение, 1965. – 175 с.
8. Пихтовников Р.В., Хохлов Б.А. Безбассейновая листовая штамповка взрывом. – Х.: Прапор, 1972. – 168 с.
9. Борисевич В.К. Обработка металлов давлением. Т. 2. Импульсная обработка. – Х.: ХАИ, 2006. – 372 с.
10. Борисевич В.К., Сабелькин В.П., Солодянкин С.Н. О численном моделировании взрывной штамповки на ЭВМ // Прикл. мат. и техн. физика. – 1979. – № 25. – С. 165-171.
11. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. – Н-ск: Наука, 1968. – 312 с.
12. Сварка взрывом / В.С. Седых, А.А. Дерибас, Е.И. Биченков, Ю.А. Тришин. – Н-ск: СО АН СССР, 1962. – Вып. 22. – С. 1-26.
13. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 289 с.
14. Колодяжный А.В. О роли трения при сварке взрывом / А.В. Колодяжный, М.В. Чернобровка // Проблемы машиностроения. – 2001. – Т. 4, № 3-4. – С. 127-130.
15. Оценка разделения панелей МК и НЧФ изделия 11Ф35 при срабатывании ЛУР СВ24: Отчет о НИР (заключительный) / ИПМаш АН УССР; Рук. А.В. Колодяжный; № ГР 0292005887. – Х., 1991. – 128 с.
16. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. – 304 с.

Поступила в редакцию 17.04.2007

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

УДК 621.7.044

**В.К. Борисевич, С.А. Бычков, А.П. Брагин, В.Е. Зайцев,
С.А. Полтарушников**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ГАЗОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ РАЗГОНА СНАРЯДА В УСТАНОВКАХ ДЛЯ ГДШ

В данной работе представлены три возможных варианта создания энергетического узла установок для реализации ГДШ. *Первый вариант* предполагает использование гидравлического удара для придания скорости снаряду, обеспечивающее потребный запас кинетической энергии. *Второй вариант* предполагает использование давления, создаваемого в одноктактном дизельном двигателе с последующим применением мультипликации давления и скорости, которая обеспечивает потребный запас кинетической энергии. *Третий вариант* предполагает прямое использование энергии горения топлива (дизельный или карбюраторный вариант) для разгона снаряда до заданной скорости, обеспечивающей потребный запас кинетической энергии.

энергетический узел для установок ГДШ, гидравлический удар, мультипликация давления и скорости, одноктактный двигатель внутреннего сгорания, давление, скорость, кинетическая энергия

Традиционно ранее основным энергоносителем в пресс-пушках был порох. Однако, в настоящее время использование пороха в производственных условиях не приемлемо.

Поэтому, в целях сохранения и дальнейшего развития уникальных технологий гидродинамической штамповки (ГДШ), подтвердивших свои преимущества и универсальность за 40 лет эксплуатации на ряде серийных и опытных предприятий, целесообразна разработка новых, альтернативных пороховым, конструктивно-технологических решений по обеспечению разгона снаряда (поршня), т.е. по сообщению снаряду заданной кинетической энергии.

В данной работе представлены 3 возможных и рекомендуемых для практического внедрения варианта создания систем разгона снаряда в установке для ГДШ.

I вариант

(использование гидравлического удара, рис. 1)

Используется давление, возникающее в жестких трубах, при реализации гидравлического удара, т.е. в «момент мгновенной остановки (торможения)» конструкции, в состав которой входят:

- масса подвижной части ствола (рис. 1, поз. 1);
- масса снаряда (рис. 1, поз. 5);
- масса столба жидкости (рис. 1, поз. 4), которой заполнена подвижная часть ствола.

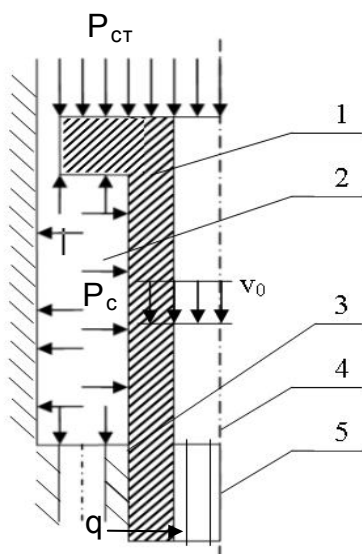


Рис. 1. Первый вариант: создание энергетического узла установок для реализации ГДШ

Позиции на рис. 1:

1 – подвижная часть ствола;
2 – суфлирующая полость, в которой может быть расположена жидкость, сжатый газ или механический регулятор сопротивления;

3 – поверхность неподвижной части ствола, с которой в момент удара контактирует нижняя часть фланца подвижной части ствола;

4 – столб жидкости, расположенный в подвижной части ствола;

5 – снаряд;

q – фиксатор снаряда.

Величина $P_{ст}$ задана и задает функцию $P_c = P_c(t)$, которая определяет V_0 .

Полезное действие гидравлического удара можно значительно усилить и, в определенном случае, сделать превалирующим в общем накопленном запасе энергии. Эта цель, согласно исследованиям Н.Е. Жуковского, достигается увеличением скорости, давления в столбе жидкости, воздействующим на задвижку (преграду, в нашем случае – снаряд), и длины канала.

Рассмотрим вопрос определения давления P_{Σ} , действующего на дно ци-

линдра (снаряда) вместе с массой воды, находящейся в цилиндре, под давлением P_{cm} , до скорости V_0 – скорости системы "подвижная часть ствола + снаряд + масса воды, находящаяся в подвижной части ствола" в момент удара всей системы об опору (рис. 1, поз. 3)

$$P_{\Sigma} = P_{cm} + P_z + P_k = P_{cm} + \rho_0 V_0 c_0 + \frac{\rho_0 V_0^2}{2}, \quad (1)$$

где P_z – давление на верхнем торце снаряда от действия гидроудара; P_{cm} – давление в полости обоймы над снарядом; P_k – кинематическая составляющая давления; V_0 – скорость системы «подвижная часть ствола + снаряд + масса жидкости в подвижной части ствола»; $m_{сн}$ – масса снаряда; ρ_0 – плотность воды; γ_0 – удельный вес воды, $\gamma_0 = 10000 \text{ Н/м}^3$; c_0 – скорость распространения звука в воде, $c_0 = 1425 \text{ м/с}$.

$$\rho_0 = \frac{\gamma_0}{g} = \frac{10^4 \text{ Н}}{9,81 \text{ м}^3} \cdot \frac{\text{с}^2}{\text{м}} = 1020 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = \left(\frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}} \right) \cdot \frac{1}{\text{м}^3} \right];$$

$$\rho_0 c_0 = 1020 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4} \cdot 1425 \frac{\text{м}}{\text{с}} = 1,4535 \cdot 10^6 \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^3} \right],$$

где $\rho_0 c_0$ – акустический импеданс.

Количественная оценка слагаемых (1):

А. Кинематическая составляющая давления

$$P_k = \frac{\rho_0 v_0^2}{2} = 510 \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4} \right] \cdot v_0^2 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right] = 510 \cdot v_0^2 \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right].$$

Б. Величина давления гидравлического удара.

P_{Γ} в (1) определена по формуле Н.Е. Жуковского [1], для идеальной жидкости (т.е. без учета вязкости) и без учета торможения за счет трения в стенках.

Экспериментальные исследования, проведенные в МГУ [2], показывают, что давление гидравлического удара, необходимо определять по соотношению

$$P_z = \sqrt{1 + \eta - \xi} \cdot \rho_0 v_0 c_0 = 1,155 \rho_0 v_0 c_0, \quad (2)$$

где $\xi = 0$, так как в расчетной схеме (рис. 1) жидкость перемещается вместе с цилиндром, относительное движение отсутствует, нет трения; $\eta = 0,333$, в расчетной схеме (рис. 1) движение жидкости можно считать

ламинарным.

Коэффициент η учитывает влияние вязкости жидкости на конечное значение P_c [2].

Таким образом,

$$P_c = \sqrt{1 + \frac{1}{3} \cdot \rho_0 v_0 c_0} = 1,678 \cdot v_0 \cdot 10^6 = 1,678 \cdot v_0 [\text{МПа}]. \quad (3)$$

В. Результаты сравнительного анализа.

При $v_0 \leq 100$ м/с погрешность менее 5%, если не учитывать P_c . Таким образом, допустимо использовать соотношение для определения P_Σ в форме

$$P_\Sigma = P_{cm} + 1,155 \rho_0 v_0 c_0. \quad (4)$$

Г. Определение скорости снаряда.

Соотношение (3) справедливо при реализации прямого гидравлического удара, т.е. при выполнении условия

$$0 \leq t \leq t_k = \frac{2L}{c_0}, \quad (5)$$

где t_k – время полупериода прямого гидроудара.

При этом в течение первого полупериода нагружения, т.е. при $0 \leq t \leq \frac{2L}{c_0}$ можно считать [2], что $P_\Sigma = \text{const}$.

В этом случае закон сохранения импульса принимает вид (рис. 2):

$$F_c \int_0^{t_k} P_\Sigma(t) dt = F_c P_\Sigma t_k = m_{ch} v_{ch}, \quad (6)$$

откуда

$$v_{ch} = \frac{F_c P_\Sigma t_k}{m_{ch}}. \quad (7)$$

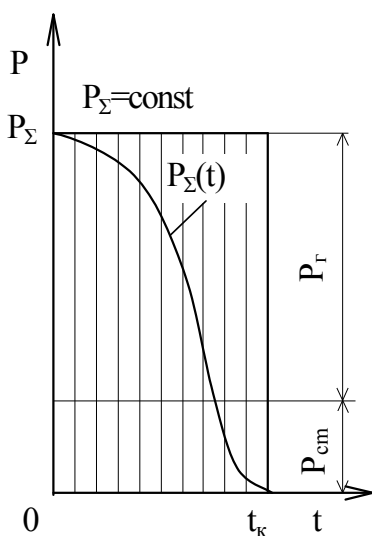


Рис. 2. Закон сохранения импульса

Графическое представление результатов расчета (рис. 3).

Соотношения (4) и (7) позволяют определить верхнюю границу доверительного интервала, если использовать вариант представления функции $P_{\Sigma} = f(t)$ в форме $P_{\Sigma} = \text{const}$ (рис.2).

Для более точного определения v_{CH} необходимо использовать результат теоретического и экспериментального определения (уточнения) вида

v_{CH} , м/с

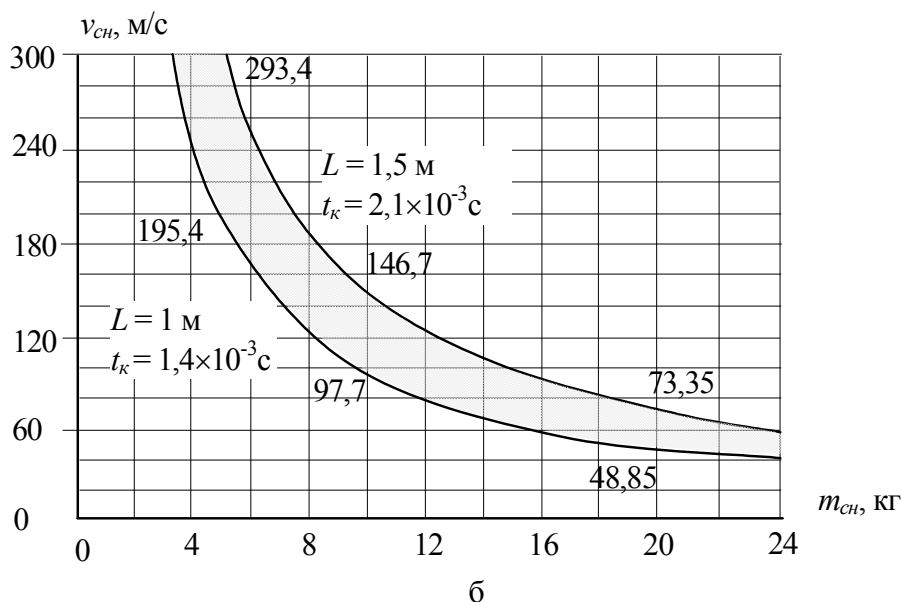
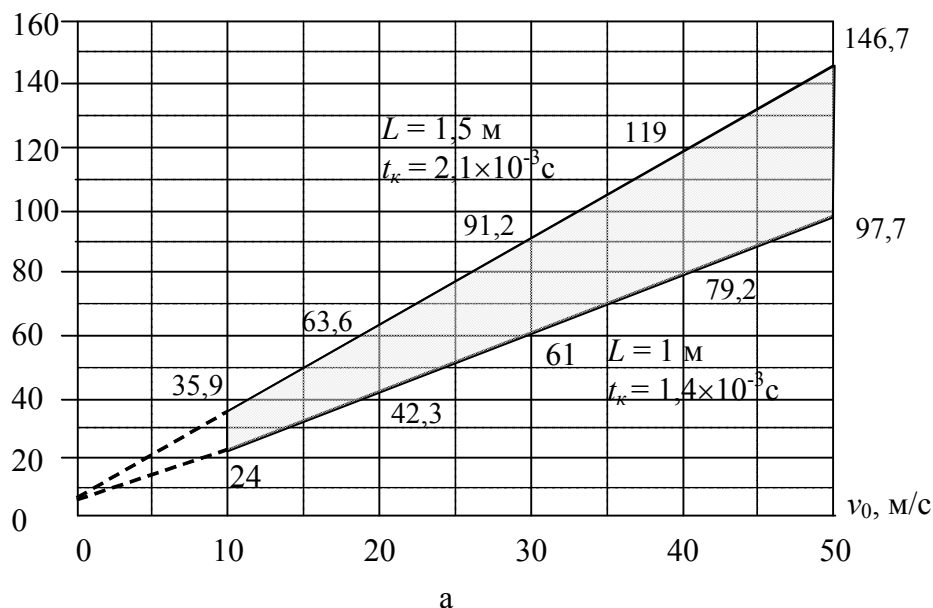


Рис. 3. Результаты расчета

функции $P_{\Sigma} = f(t)$ и последующего решения соотношения (6) для построения функции $v_{ch} = v_{ch}(t)$ и определения конечного значения v_{ch} в конце разгона снаряда, т.е. при $t = t_k$.

Замечание. С практической точки зрения исключительно важной является величина зазора, т.е. величина расстояния от верхнего среза рабочей камеры штампового блока до нижнего среза снаряда в момент его отрыва от ствола, т.е. в момент реализации гидравлического удара.

Оптимальным следует считать зазор, при котором "снаряд+столб жидкости в стволе" передает в рабочую камеру максимальное количество энергии.

II вариант (использование энергии горения топлива с применением в конструктивных решениях различных мультипликационных устройств)

В качестве разгонного устройства установок для гидродинамической штамповки может быть предложен аналог двигателя дизель-молота – широко применяемой машины для забивки свай или трамбовки грунтов. Такие двигатели называются *однотактными*, так как их рабочие циклы могут разделяться неограниченными временными промежутками [3].

Схема энергетической части разгонного блока для рассматриваемой нами системы приведена на рис. 4 в характерные функциональные моменты: а – исходное состояние; б – сжатие воздуха в камере сгорания; в – впрыск топлива, сгорание горючей смеси, в – перемещение рабочего органа.

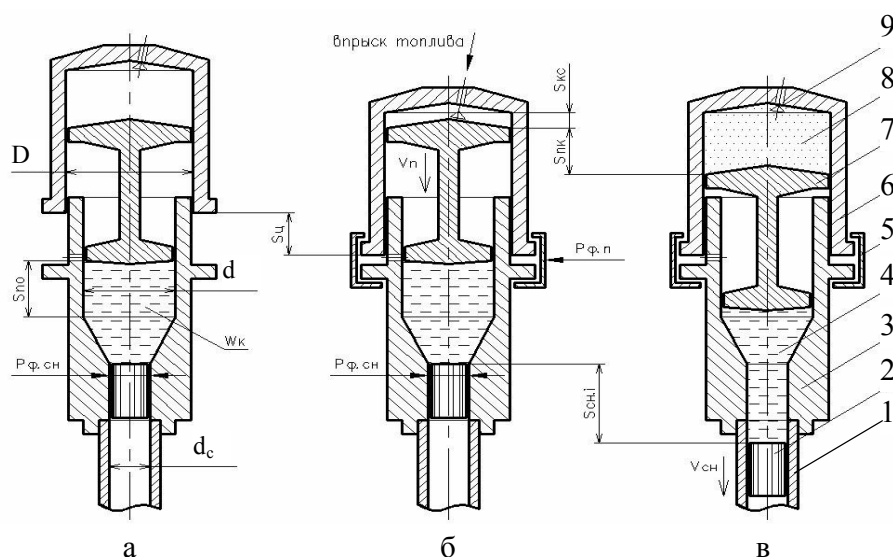


Рис. 4. Энергетическая часть разгонного блока

Позиции на рис. 4:

1 – ствол вместе с суфлирующим устройством, т.е. с устройством, которое обеспечивает совместное движение сжимаемой жидкости и нижнего среза снаряда;

2 – снаряд (поршень); 3 – переходник; 4 – жидкость;

5 – фиксирующее устройство; 6 – подвижная часть камеры сгорания;

7 – ступенчатый (дифференциальный) поршень;

8 – камера сгорания; 9 – подача топлива в камеру сгорания;

D – больший диаметр ступенчатого поршня;

d – меньший диаметр ступенчатого поршня;

d_c – диаметр ствола и снаряда;

$P_{ср.сн.}$ – усилие форсирования;

$P_{ср.кc}$ – усилие фиксации камеры сгорания.

Этот вариант разгонного блока в схематическом конструктивном представлении содержит в себе комбинацию, т.е. сочетание двух методов мультипликации.

Ступенчатый поршень (7) выполняет задачу увеличения давления, действующего на нижний срез ступенчатого поршня – жидкость, заполняющую коноидальный переходник и на верхний срез снаряда (2).

В предположении возможности использования квазистатического подхода, осредненное давление в коноидальной камере составит

$$P_d = P_D \cdot \frac{D^2}{d^2},$$

где P_D – давление на верхней поверхности ступенчатого поршня;

P_d – давление на нижней поверхности ступенчатого поршня.

Однако, гидродинамическая мультипликация давления при штамповке на пресс-пушках приводит к необходимости решения системы дифференциальных уравнений с выполнением и использованием индивидуальных граничных и начальных условий. Результаты численного решения задачи показывают пульсацию давления в рабочей камере.

И это подтверждено экспериментально и показывает, что функция давления $P = P(t)$ в рабочей камере существенно зависит от основных параметров разгонного блока, таких как исходное давление на верхней поверхности ступенчатого поршня и как объем жидкости в коноидальном

переходнике, как масса снаряда и поршня его фиксации и последующего суфлирования.

Изучение этого вопроса может и должно быть предметом самостоятельного исследования.

Второй метод мультипликации представляет собой гидродинамический вариант, который состоит в увеличении скорости потока жидкости при движении в сужающемся канале.

С учетом несжимаемости жидкости можно утверждать, что осредненная по сечению осевая компонента скорости потока жидкости постоянна, т.е.

$$v_{сн} \cdot \pi d_{сн}^2 = v_n \cdot \pi d^2 = \text{const} ,$$

откуда
$$v_{сн} = v_n \cdot \frac{d^2}{d_{сн}^2} ,$$

где $v_{сн}$ – скорость движения снаряда;

v_n – скорость движения ступенчатого поршня.

Предметом научного исследования должно быть изучение всех элементов системы, образующей данный вариант разгонного блока.

III вариант

(прямое использование энергии горения топлива, рис. 5)

Аналогичные методы разгона снаряда использованы при:

- прямом использовании энергии сгорания пороха;
- прямом использовании энергии сжатого воздуха [4];
- использовании энергии горения природного или сжиженного газового топлива [5] и т.д.
- использовании энергии горения топлива в однократном двигателе внутреннего сгорания [6].

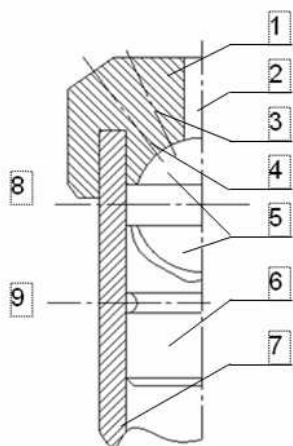


Рис. 5. Третий вариант

Позиции на рис. 5: 1 – фланец; 2 – отверстие для подачи в камеру сгорания сжатого воздуха; 3 – отверстие для подачи в камеру сгорания топлива; 4 –

устройство поджига смеси; 5 – камера сгорания; 6 – снаряд (поршень); 7 – ствол;

8 – подача форвакуума; 9 – фиксатор снаряда.

Прямое использование энергии горения топлива может быть реализовано как в случае применения карбюраторного однотактного двигателя, так и в случае использования дизельного однотактного двигателя внутреннего сгорания.

Форвакуум необходимо реализовать в подснарядной полости для продувки камеры сгорания и для возвращения снаряда в исходное положение, определяемое фиксатором.

Литература

1. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах // Бюллетень Политехнического общества. – 1899. – № 5.
2. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 269 с.
3. Волчек Л.Я. Исследование рабочего процесса свайного молота внутреннего сгорания // Труды ЦНИРИ. – М.: ЦНИИРИ, 1952. – Вып. 20. – С. 47-51.
4. Чачин В.Н., Колос В.К., Ботян В.В. Прессы для высокоскоростной ударной штамповки листовых материалов // КШП. – 1984. – № 2. – С.24- 25.
5. Кононенко В.Г., Кушнаренко С.Г., Коваленко Л.В., Стельмах В.А. Состояние и перспективы развития высокоскоростных машин для резки металла и брикетирования стружки с тепловым приводом на газовом топливе // Высокоскоростная штамповка: Сб. научн. тр. –Х.: ХАИ,1983. – С. 32-39.
6. Кононенко В.Г., Шошин Ю.С., Стельмах В.А. О возможности применения бензина в энергоузлах импульсных установок для технологических целей // Высокоскоростная обработка материалов давлением: Сб. научн. тр. –Х.: ХАИ, 1975. – Вып. 4. – С. 96-101.

Поступила в редакцию 1.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Елифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков.

В.И. Резниченко, С.Н. Пахомов, С.Е. Мостипан

*Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное»
им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС СВАРКИ ВЗРЫВОМ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ «КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ЮЖНОЕ» ИМ. М.К. ЯНГЕЛЯ»

Рассмотрены преимущества использования сварки взрывом при создании многослойных металлических материалов, изготовление которых другими методами невозможно. Показаны результаты использования многослойных композиционных металлических материалов, изготовленных сваркой взрывом в разработках ГП «КБ „Южное” им. М.К. Янгеля».

сварка взрывом, экспериментально – промышленная база сварки взрывом, биметаллические заготовки, подшипники скольжения, микролегирование

Государственное конструкторское бюро “Южное” имени М.К. Янгеля (Днепропетровск, Украина) на протяжении многих лет разрабатывает и осваивает ракетно-космические комплексы, в основе производства которых заложены передовые технологии. Значительные перспективы, как в ракетостроении, так и в других областях техники открывает использование принципиально новых композиционных материалов, обладающих целым рядом специальных или даже уникальных свойств [1, 2].

Одним из наиболее перспективных процессов соединения металлов в твердой фазе является сварка взрывом, позволяющая создавать композиционные металлические материалы. Разработанные технологии обеспечивают получение соединений любых разнородных металлов и сплавов, которые традиционными способами получить затруднительно или даже невозможно [2, 3].

При проектировании на предприятии нового ракетного комплекса были предложены технические решения, реализация которых стала возможной только при использовании многослойных композиционных материалов, полученных сваркой взрывом. Крупногабаритный биметаллический пере-

ходник сочетанием слоев 12X18H10T-АМг6 позволил значительно снизить вес конструкции при обеспечении герметичности и надежности соединения двигателя с топливным баком. Введение в конструкцию триметаллического магистрального трубопровода сочетанием слоев АМг6-АД1-АМг6 повысило надежность разделения окислителя и топлива, увеличило полезный объем топливного бака. Работоспособность деталей, полученных сваркой взрывом, подтверждена длительной эксплуатацией, а также успешными пусками ракетного комплекса “Днепр”.

Организация производства магистрального триметаллического трубопровода, а также крупногабаритного биметаллического переходника обусловили необходимость создания специализированного комплекса по сварке взрывом. Эти работы проводились конструкторским бюро “Южное” совместно с институтами АН Украины (Институт электросварки имени Е.О. Патона, Институт металлофизики и др.).

В настоящее время ГП «КБ “Южное” им. М.К. Янгеля» – один из ведущих на Украине изготовитель многослойных металлических композиций. Уникальный экспериментально-промышленный комплекс предприятия включает в себя корпус подготовки заготовок, корпус снаряжения для выполнения взрывоопасных операций, а также взрывные камеры (рис. 1), предназначенные для проведения в них непосредственно операций по обработке металлов энергией взрыва. Максимальный подрываемый вес заряда взрывчатого материала в камере 50 кг. Преимущества комплекса заключаются в том, что все технологические операции (от изготовления специальной взрывчатой смеси до контроля качества готовой продукции) объединены в едином технологическом цикле на одной автоматической и взрывных камерах. Гамма металлов, соединяемых энергией взрыва, достаточно велика и постоянно расширяется. Детали различного назначения плоской и цилиндрической формы – пластины, трубы, кольца (рис. 2, 3), получаемые из многослойных металлических композиций, допускают последующую механическую обработку, штамповку (рис. 4), пресование, и то, что позволяет получать изделия сложной геометрии [2, 4]. При этом толщина металла плакирующего слоя может изменяться от 1 до 50 мм, а основного – от 2 до 100 мм. Технология позволяет сваривать кольцевые детали диаметром от 20 до 1800 мм и трубные диаметром до 650 мм.



Рис. 1. Взрывные камеры экспериментально-промышленного комплекса сварки взрывом

Сваркой взрывом изготавливаются биметаллические и многослойные композиции следующих сочетаний: алюминий-сталь, алюминий-медь, титан-сталь, медь-сталь, латунь-сталь, ниобий-сталь, алюминий-алюминиевый сплав, алюминиевый сплав-алюминий-сталь, титановый сплав-медь-ниобиевый сплав и многое другое.

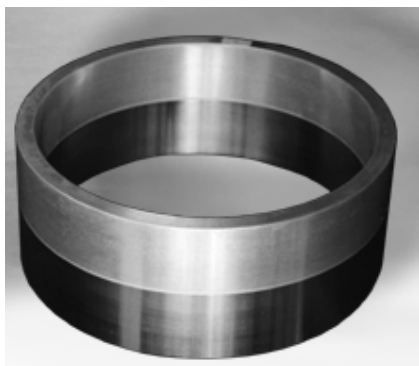


Рис. 2. Трубчатый переходник с сочетанием слоев сталь-алюминий

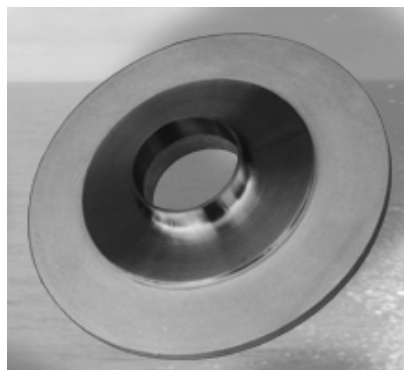


Рис. 3. Биметаллический (плоский) переходник с сочетанием слоев сталь-алюминий

Технические возможности и эффективность применения сварки взрывом реализуются на предприятии в новых разработках как изделий ракетно-космической техники, так и промышленной продукции общего назначения.

В ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля» освоено производство биметаллических заготовок для подшипников скольжения (рис. 4).



Рис. 4. Биметаллический подшипник скольжения

Подшипники скольжения используются в дизелях тепловозов для уменьшения трения системы вал-шатун. Применение биметаллических подшипников скольжения позволяет заменить традиционно используемые подшипники, получаемые литьем дорогостоящих баббит-бронзовых сплавов, а также обеспечивает увеличение гарантийного срока эксплуатации дизеля.

Технология заключается в сварке взрывом биметаллических коренных и шатунных вкладышей (б/м заготовок для подшипников скольжения) путем нанесения алюминиево-оловянного сплава на углеродистую сталь с последующей штамповкой и механической обработкой. При этом, прочность сцепления соединяемых слоев не менее 6 кгс/мм^2 .

Антифрикционный сплав А020 более дешевый, чем применяемые в настоящее время бронза и баббит.

Современный уровень развития энергоемких отраслей производства, таких как цветная, черная металлургии, энергетика и др. предъявляет повышенные требования к показателю затрачиваемой электроэнергии на выпуск единицы продукции. Одним из возможных путей снижения удельного расхода электроэнергии является уменьшение электрических потерь в токоведущих узлах силовых электротехнических устройств (электролизеров, сталеплавильных печей, коммутационных распределителей и др.).

Как правило, внутренние части и выводы электротехнических устройств изготавливаются из электротехнической меди, а силовые магистральные токоведущие элементы (кабели, шины, провода) выполняются алюминиевыми, что обусловлено хорошей электропроводностью, относительно невысокой стоимостью по сравнению с медью и малым удельным весом.

Для соединения разнородных участков силовых цепей широко применяются переходные элементы, изготовленные различными технологическими способами. Из всей гаммы известных способов сварка взрывом, благодаря быстротечности процесса ($t_{\text{св}} \sim 10^{-6}$ с), позволяет получать высококачественные медно-алюминиевые переходные элементы различных типоразмеров и конфигураций. Применение сваренных взрывом медно-алюминиевых композитов (рис. 5) в качестве контакт - элементов сильно-точного оборудования позволяет, во-первых, снизить потери электроэнергии при соединении разнородных участков токоподводящих узлов и, во-вторых, уменьшить материальные затраты за счет экономии дефицитных материалов при монтаже (замене) новой конструкции (узла, секции).

Повышение эксплуатационной стойкости деталей машин и механизмов, инструментов неразрывно связано с увели-

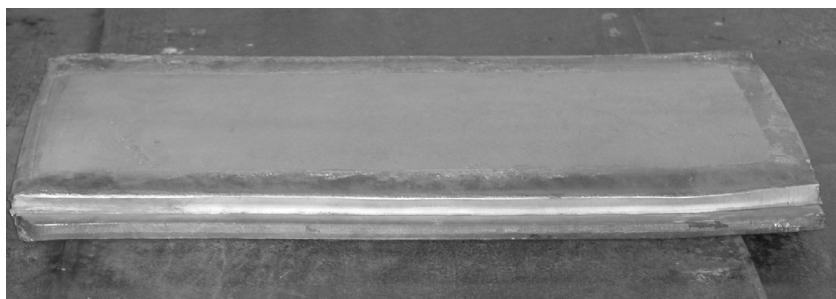


Рис. 5. Медно-алюминиевый композит

чением физико-механических характеристик металла (износостойкость, ударная вязкость, предел прочности при изгибе), так как многие детали работают в условиях абразивного износа, резких температурных перепадов и ударных нагрузок. Комплексное решение вопросов увеличения долговечности изделий является актуальной и важной проблемой для машиностроительной, горной и строительной отраслей народного хозяйства. Повышение износостойкости деталей рабочих органов и инструмента в основном достигается за счет нанесения износостойких защитных покрытий, а также при армировании высокотвердыми вставками.

Существенным недостатком традиционных методов упрочнения является то, что повышение износостойкости изделий, как правило, сопровождается снижением прочности при изгибе и ударной вязкости. Кроме того, при упрочнении используют дефицитные и дорогостоящие элементы (вольфрам, молибден, кобальт и др.).

В настоящее время повышенный интерес представляют нетрадиционные технологии упрочнения металла. Одним из перспективных способов является взрывное микролегирование заготовок инструмента потоком порошковых частиц. Процесс основан на явлении “сверхглубокого проникания”, заключающемся в том, что при определенных условиях соударения потока микрочастиц порошка с металлической заготовкой наблюдается проникание частиц на глубину 10-20 мм. При сочетании обработки потоком порошка и термообработки в структуре быстрорежущей стали, формируются карбидные волокна, направление которых совпадает с направлением введения частиц порошка. Такой материал, являющийся по своей сути композиционным, обладает повышенными механическими характеристиками и может быть использован для изготовления режущих вставок, предназначенных для армирования резцов горных машин (рис. 6).

Образцы композиционных металлических материалов, изготовленные



Рис. 6. Горнопроходческий комбайн; резец

методом сварки взрывом, неоднократно выставлялись на различных международных выставках.

Разработанные в ГП «КБ “Южное” им. М.К. Янгеля» и представленные на 51-й международной выставке изобретений, исследований и промышленных инноваций Eureka-2002, проходившей в Брюсселе, прогрессивные

технологии получения биметаллических и износостойких металлических композитов с использованием сварки энергией взрыва получили европейское признание и награждены “Золотой медалью с отличием”.

Заключение

Разработанный способ соединения разнородных металлов и сплавов сваркой взрывом позволяет решать технологические задачи с достижением значительного технико-экономического эффекта, и открывает новые области её промышленного применения. Сварка взрывом концентрирует в себе оптимальные возможности и значительные преимущества – соединяет разнородные металлы и сплавы, получение которых другими видами сварки затруднительно или даже невозможно, обеспечивает высокую прочность связи составляющих, требуемые механические характеристики и стабильное качество соединений, как при дальнейшем технологическом переделе, так и в условиях эксплуатации

Государственное КБ “Южное” имеет достаточный опыт, теоретические и практические знания в области исследований и разработки многослойных металлических композиций, чтобы предложить заинтересованной стороне услуги по созданию качественно новых материалов с требуемыми характеристиками, а также изготовление деталей из них.

Литература

1. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Изд.2. – Н-ск: Наука, 1980. – 221 с.
2. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. Сварка взрывом в металлургии. – М.: Металлургия, 1978. – 165 с.
3. Пихтовников Р.В., Завьялова В.И. Штамповка листового металла взрывом. – М.: Машиностроение, 1964. – 175 с.
4. Плакирование стали взрывом / Под ред. А.С.Гельмана. – М.: Машиностроение. 1978. – 190 с.

Поступила в редакцию 10.06.2007

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

УДК 621.7.044.7

Ю.В. Батыгин¹, А.Ю. Бондаренко¹, Е.А. Чаплыгин²¹ *Национальный технический университет**«Харьковский политехнический институт», Украина*² *Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина***ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ИНДУКТОРНОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК**

Проведен анализ электродинамических процессов в цилиндрической индукционной индукторной системе, по результатам которого построены графики изменения плотности индуцированного тока и распределенных сил притяжения, действующих на обрабатываемую заготовку и экран для различной геометрии индукторной системы.

магнитно-импульсное притяжение, электродинамические процессы, цилиндрическая индукционная индукторная система, плотность тока, экран, листовая заготовка, магнитно-импульсная установка

Впервые индукционные индукторные системы, работающие на притяжение заданных участков поверхности тонкостенных металлических объектов, были предложены для осуществления операций магнитно-импульсной рихтовки автомобильных кузовов [1, 2].

Конструктивно (рис. 1), такая система должна включать плоский одновитковый цилиндрический соленоид-индуктор – 1, дополнительный элемент, обеспечивающий возникновение сил притяжения, напри-

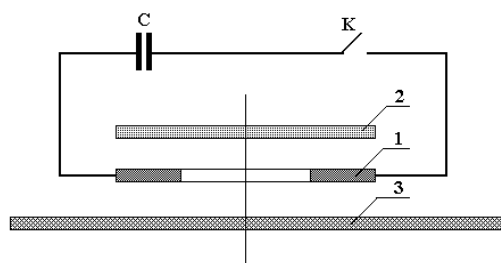


Рис. 1. Индукционная индукторная система

мер, экран – 2 и листовую заготовку – 3, определённый участок которой следует деформировать в направлении к поверхности индуктора. Все три составляющие укладываются параллельными слоями: экран – индуктор –

листовая заготовка. Последняя размещается так, чтобы участок, подлежащий деформированию, находился в рабочей зоне системы.

Протекание тока в витке индуктора возбуждает вихревые токи в экране и листовой заготовке. Направления этих токов одинаковы. В соответствии с законом Ампера, при фиксированном положении индуктора и экрана заготовка должна притягиваться в направлении к рабочей поверхности индуктора.

Если, например, требуется устранить вмятину в металлическом листе, её следует расположить в области под витком индуктора, которая в дальнейшем будет называться рабочей зоной системы. Тогда силовое взаимодействие индуцированных токов позволит притянуть соответствующий участок этого листа к плоскости жёсткой поверхности индуктора и устранить вмятину.

Как показали эксперименты, условием практической работоспособности индукционных индукторных систем является интенсивное проникновение поля индуктора сквозь экран и листовую заготовку.

Феноменологическое объяснение данного положения состоит, во-первых, в пространстве между экраном и заготовкой (вне областей непосредственно под витком индуктора) напряжённости полей, возбуждаемых одинаково направленными вихревыми токами, будут равны между собой, но направлены противоположно. Их суперпозиция обращает в нуль магнитный поток во внутренней полости системы. Электродинамические силы, вызывающие притяжение обрабатываемой заготовки к экрану, обусловлены электромагнитным полем, прошедшим во вне сквозь металл экрана и листовой заготовки. Они направлены извне и обуславливают притяжение листовой заготовки к экрану, т.е. возможность её деформирования в направлении к поверхности индуктора.

Во-вторых, в зоне под витком ток индуктора и индуцированные токи направлены противоположно.

Их взаимодействие приводит к известному эффекту отталкивания, что снижает действенность сил притяжения. Очевидно, что конечный результат, а именно, отталкивание или притяжение заготовки, подлежащей деформированию, будет определяться соотношением отмеченных определяющих факторов.

При решении поставленной задачи будем считать, что листовая заготовка тонкостенная [3], т.е.

$$\omega \cdot \tau \ll 1, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота действующего поля;

$\tau = \mu_0 \gamma d^2$ – характерное время диффузии в проводящий слой с удельной электропроводностью γ и толщиной d .

Для анализа протекающих электродинамических процессов воспользуемся методикой расчета, приведенной в работах [3 – 5].

Выражение для плотности вихревых токов, индуцированных в металле экрана и листовой заготовки при принятом предположении, что экран и обрабатываемая листовая заготовка абсолютно идентичны и расположены симметрично относительно индуктора на расстоянии h от него, имеет вид:

$$j_\varphi(t, \zeta, r) \Big|_{q(p, \lambda) \approx \lambda} \approx -\frac{\mu_0 \gamma}{2} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^\infty f(\lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot (h + \zeta)} J_1(\lambda r) \cdot d\lambda, \quad (2)$$

где $j(t)$ – плотность стороннего тока в индукторе; $f(\lambda)$ – Фурье-образ функции, поперечного распределения плотности тока в индукторе; $J_1(\lambda r)$ – функция Бесселя первого порядка; p – параметр преобразования Лапласа; $\zeta \in [0, d]$ – пространственная переменная, определяющая зависимость плотности вихревых токов по толщине листовой заготовки; $q(p, \lambda) = \sqrt{\lambda^2 + p\mu_0\gamma}$ – волновое число в металле заготовки.

Радиальное распределение индуцированных токов находится из формулы (2) интегрированием по толщине листа – $\zeta \in [0, d]$.

$$J_\varphi(t, r) = -\frac{\mu_0 \gamma}{2} \cdot \frac{dj(t)}{dt} \cdot \int_0^\infty f(\lambda) \cdot e^{-\lambda h} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda. \quad (3)$$

Нормальная составляющая распределённой силы (давление) притяжения проводников, с индуцированными токами, формула (3), размещённых на расстоянии $2h$ друг от друга, определяется с помощью закона Ампера.

После тождественных преобразований и введения обозначений, удобных для проведения численных оценок, получаем:

$$P_{attr}(t, r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{J_\phi^2(t, r) \cdot (2\pi \cdot r)}{(2h)} = \frac{\mu_0(\omega \cdot \tau)^2}{8h} \times$$

$$\times \left(\frac{dj(\phi)}{d\phi} \right)^2 \left(\int_0^\infty F(\lambda, R_{1,2}) \cdot e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda \right)^2 \times$$

$$\times r \cdot [\eta(r) - (\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2))], \quad (4)$$

где $F(\lambda, R_{1,2}) = \int_{(\lambda \cdot R_1)}^{(\lambda \cdot R_2)} f(x) \cdot x \cdot J_1(x) \cdot dx$; $\phi = \omega \cdot t$ фаза действующего поля;

$\eta(r)$ – ступенчатая функция Хевисайда; R_1 – радиус внутреннего отверстия витка индуктора; R_2 – внешний радиус витка индуктора.

Интеграл по площади круга с радиусом R_1 от выражения (4) даёт формулу для вычисления нормальной составляющей силы притяжения листовой заготовки к экрану в области внутреннего отверстия витка индуктора.

$$F_{attr}(t, r) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{2\pi \cdot \int_0^{R_1} J_\phi^2(t, r) \cdot (2\pi \cdot r) \cdot r dr}{(2h)} =$$

$$= \frac{\mu_0 \pi \cdot (\omega \cdot \tau)^2}{(4 \cdot h)} \left(\frac{dj(\phi)}{d\phi} \right)^2 \cdot \int_0^{R_1} \left(\int_0^\infty F(\lambda, R_{1,2}) \cdot e^{-\lambda h} \frac{(1 - e^{-\lambda d})}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda \right)^2 \cdot r^2 dr. \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) следует, что

- временная зависимость силы (давления) притяжения определяется квадратом производной тока индуктора;
- постоянство знака силы притяжения во времени означает постоянство её направленности по отношению к обрабатываемому объекту;
- вычисление импульса силы показывает, что

$$S_{attr} = \int_0^\infty P_{attr}(t, r) dt \sim \int_0^\infty \left(\frac{dj(t)}{dt} \right)^2 dt > 0,$$

что в свою очередь означает кумулятивный характер деформаций в период действия импульса;

- в рассмотренном низкочастотном режиме действующих полей ам-

плитуда силы притяжения прямо пропорциональна квадрату рабочей частоты и удельной электропроводности экрана и листовой заготовки;

– силы притяжения действуют вне области витка индуктора, где $r \in [0, R_1] \cup (R_2, \infty)$;

– в зоне витка, где $r \in [R_1, R_2]$, должны существовать только силы отталкивания, что объясняется взаимодействием тока, протекающего в индукторе, и индуцированных в заготовке токов противоположной направленности.

Далее, пространственно-временная зависимость для тангенциальной компоненты напряжённости магнитного поля записывается в виде:

$$H_r(r, \zeta, t) \approx \frac{j(t)}{2} \cdot \int_0^{\infty} f(\lambda) \cdot e^{-\lambda \cdot (h + \zeta)} \cdot \lambda \cdot J_1(\lambda \cdot r) d\lambda. \quad (6)$$

Нормальную компоненту магнитного давления на экран и листовую заготовку найдём как интеграл векторного произведения плотности тока (2) на радиальную составляющую напряжённости магнитного поля (6) по переменной $\zeta \in [0, d]$, умноженный на магнитную проницаемость вакуума.

С учётом знака, находим, что

$$P_{rep}(r, t) = \mu_0 \cdot \frac{(\omega \cdot \tau)}{(4 \cdot d^2)} \cdot j(\varphi) \cdot \frac{dj(\varphi)}{d\varphi} \cdot [\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)] \times \\ \times \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f(\lambda_1) \cdot f(\lambda_2) \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot h} \cdot \frac{1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot d}}{(\lambda_1 + \lambda_2)} \cdot \lambda_1 \cdot J_1(\lambda_1 r) \cdot J_1(\lambda_2 r) d\lambda_1 d\lambda_2. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что:

– в рассматриваемом низкочастотном режиме действующих полей временная зависимость силы магнитного давления определяется произведением временной функции тока индуктора и её первой производной,

– сила отталкивания есть осциллирующая функция времени, что означает переменную направленность этой силы в течение периода действия,

– импульс силы

$$S_{rep} = \int_0^{\infty} P_{rep}(t, r) dt \sim \int_0^{\infty} \left(j(t) \cdot \frac{dj(t)}{dt} \right) dt = \frac{j^2(t)}{2} \Big|_0^{\infty} = \frac{j(\infty) - j(0)}{2} = 0,$$

что в конечном итоге означает отсутствие отталкивания в зоне витка индуктора либо достаточно малую амплитуду действующих сил.

Численную иллюстрацию полученных результатов приведём на примерах выполнения технологической операции притяжения плоской листовой заготовки к индукционной индукторной системе при использовании оборудования, созданного в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт".

Источник мощности — магнитно-импульсная установка МИУ-15: рабочая частота $f = 2$ кГц, относительный декремент затухания $\delta_0 = 0,3$, рабочее напряжение $U = 5$ кВ. Амплитуда тока в индукторе при проведении экспериментов составляла $\sim 39,2$ кА, при запасаемой энергии ёмкостного накопителя $W = 12,5$ кДж.

Источники поля — плоские цилиндрические индукторы из латуни с различными размерами внутреннего окна и разной шириной витка. Экран и заготовка — плоские металлические листы толщиной $d = 0,001$ м из электро-технической стали с удельной электропроводностью $\gamma = 0,2 \cdot 10^7$ (Ом·м) $^{-1}$.

На рис. 2 ÷ 5 приведены наиболее значимые результаты вычислений, выполненные по формулам (4) и (5). Металлические листы расположены симметрично относительно плоскости витка индуктора на расстоянии $h = 0,002$ м друг от друга. Изменение радиального распределения плотности вихревых токов в экране и листовой заготовке проиллюстрировано на рис. 5.

Основные результаты проведенных вычислений сводятся к следующим положениям:

- наибольшая концентрация распределённых сил (давления) притяжения имеет место в области краёв витка индуктора (рис. 2);
- в рассмотренной индукторной системе возможно получение достаточно высоких амплитуд сил притяжения, так распределённые силы могут достигать величин 70 ÷ 80 Атм. (рис. 2, г), а интегральные на площади круга $12,5\pi$ см ^{2} соответственно 400 кГ (рис. 3);
- амплитуды сил притяжения существенно зависят от размера внутреннего окна индуктора, ширины витка и расстояния между экраном и заготовкой.

1. При изменении радиуса в диапазоне $R_1 \in [0,015 \text{ м}, 0,035 \text{ м}]$ распределённые силы притяжения возрастают более чем в 1,5 раза, интегральные

– более чем в 20 раз, что физически можно объяснить увеличением площадей взаимодействия индуцированных токов (рис. 2, 3).

2. Уменьшение ширины витка индуктора от 0,2 до 0,1 его внешнего размера (т.е. R_2) приводит к росту сил притяжения в 2÷3 раза (рис. 3). Физически, это можно объяснить увеличением напряжённости возбуждаемого магнитного поля за счёт его концентрации при меньшей ширине витка, а также увеличением площадей взаимодействия между индуцированными токами. Данное объяснение иллюстрируется графическими зависимостями на рис. 5.

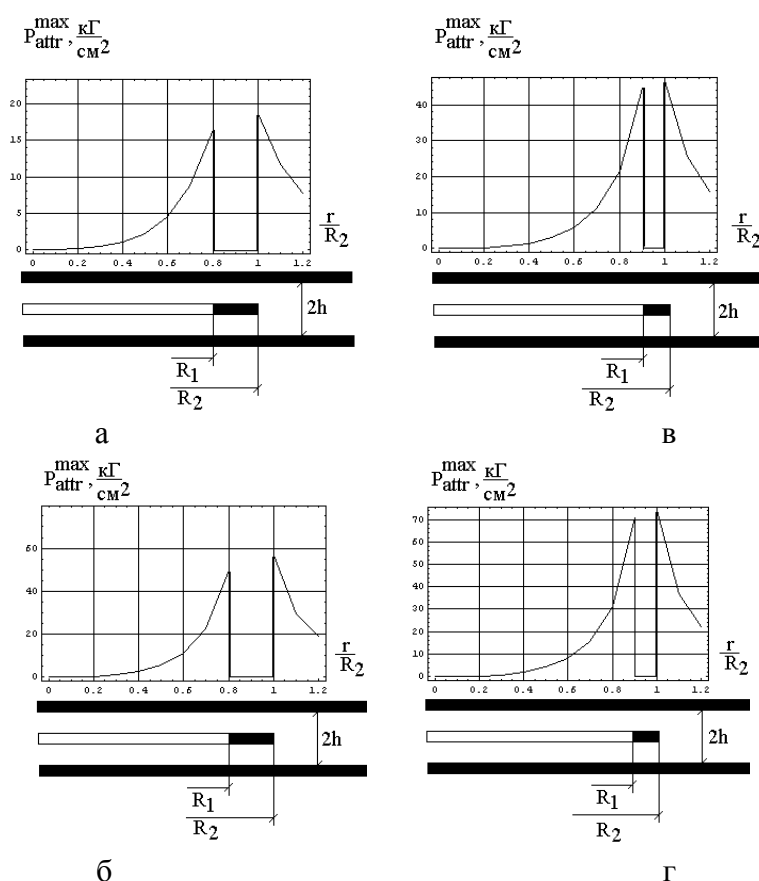


Рис. 2. Радиальное распределение сил притяжения (давления) в симметричной индукционной индукторной системе при вариации её геометрических параметров:

- а – $R_1 = 0,015$ м, $R_2 = 0,8^{-1} \cdot R_1$; б – $R_1 = 0,015$ м, $R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$;
 в – $R_1 = 0,035$ м, $R_2 = 0,8^{-1} \cdot R_1$; г – $R_1 = 0,035$ м, $R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$

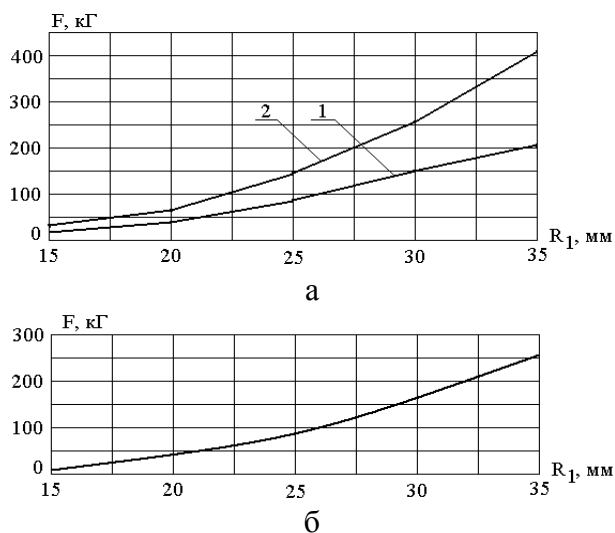


Рис. 3. Зависимость интегральной силы притяжения в симметричной индукционной индукторной системе от размера внутреннего отверстия витка индуктора:

а — $2h = 0,002$ м, 1 — $R_2 = 0,8^{-1} \cdot R_1$; 2 — $R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$;

б — $2h = 0,003$ м, $R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$

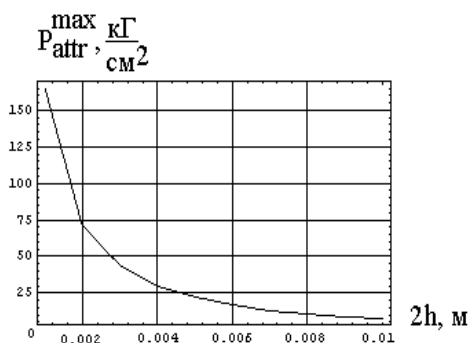


Рис. 4. Зависимость максимума распределённой силы (давления) притяжения от величины зазора между экраном и листовой заготовкой:

$R_1 = 0,035$ м;

$R_2 = 0,9^{-1} \cdot R_1$

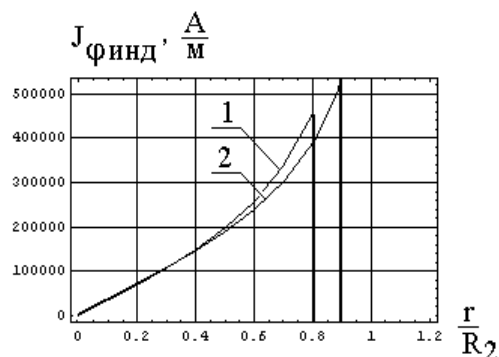


Рис. 5. Радиальные зависимости индуцированных токов в пространстве внутреннего окна индуктора ($r \leq R_1 = 0,025$ м, $2h = 0,002$ м):

1 (2) — $R_1 = 0,8 \cdot R_2$ ($R_1 = 0,9 \cdot R_2$),

интегральная величина индуцированного тока составляет 3066 (3896) А

3. При увеличении зазора между экраном и листовой заготовкой резко падают как распределённые (рис. 4), так и интегральные (рис. 3) силы притяжения.

4. Особенно резко снижаются распределённые силы притяжения при относительно малых величинах зазора, так в интервале $2h \in [0,001 \text{ м}; 0,002 \text{ м}]$ амплитуда усилий падает более чем в два раза, от 165 до 75 атм (рис. 4).

Изменение сил притяжения при вариации радиальных размеров витка индуктора или его ширины объясняется увеличением или уменьшением области, занимаемой индуцированными токами, а вариация величины зазора между экраном и листовой заготовкой означает изменение уровня электромагнитной связи между этими элементами, что, как известно, ведёт к росту или падению сил электродинамического взаимодействия.

Литература

1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хищенко Л.Т. Физические основы возможных направлений развития магнитно-импульсной обработки тонкостенных металлов // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2004. – № 2. – С. 80-84.

2. Батигін Ю.В., Лавінський В.І., Хавін В.Л. Спосіб магнітно-імпульсної обробки тонкостінних металевих заготовок. – Патент України № 74909. 15.02.2006. – Бюл. №2.

3. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И. Магнитно-импульсная обработка тонкостенных металлов. – Х.: МОСТ-Торнадо, 2002. – 288 с.

4. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Чаплыгин Е.А. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2005. – № 3. – С. 69-73.

5. Чаплыгин Е.А. Магнитное поле в тонкостенной листовой заготовке при низких значениях рабочих частот // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2006. – № 6. – С. 71-74.

Поступила в редакцию 12.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Ф. Болюх, Национальный политехнический университет «ХПИ», Харьков.

В.К. Борисевич, В.П. Павиченко, В.В. Третьяк, Н.Ф. Савченко

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УНИВЕРСАЛЬНОГО ФРИКЦИОННОГО БАНДАЖА ДЛЯ ЗАМЫКАНИЯ ФОРМУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ МАТРИЦ ПРИ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКЕ

Представлены материалы по исследованию несущей способности универсального фрикционного бандажа для замыкания формующих элементов матриц при взрывной штамповке обечаек. Даны практические рекомендации по усовершенствованию конструкции узлов оснастки и улучшению качества штампуемых деталей.

взрывная штамповка, оснастка, составная матрица, фрикционный бандаж, формующие элементы, замыкание

В последние годы все более широкое распространение в мире получают прогрессивные процессы металлообработки с использованием импульсных нагрузок. Среди них значительное место занимает штамповка взрывом крупногабаритных листовых деталей типа обечаек из высокопрочных труднодеформируемых сплавов, применяемых в самолетостроении и двигателестроении, а также в химической и пищевой промышленности.

Оснастка для взрывной штамповки обечаек методом раздачи может содержать один из четырех типов матриц: неразъемные матрицы с одним цельным формующим элементом, составные с горизонтальной плоскостью разъема, составные с вертикальной плоскостью разъема и силовым бандажом, а также составные с вертикальной плоскостью разъема и силовым корпусом (рис. 1).

Цельные неразъемные матрицы применяют для ограниченного класса деталей, как правило, небольших габаритов.

Формующие элементы составных матриц при взрыве удерживаются в рабочем положении силовыми замыкающими элементами в виде бандажей, корпусов и т.д. При этом, в технологическом процессе штамповки

взрывом наиболее трудоемкими и длительными по времени являются операции сборки-разборки и транспортировки силовых замыкающих и формирующих элементов оснастки.

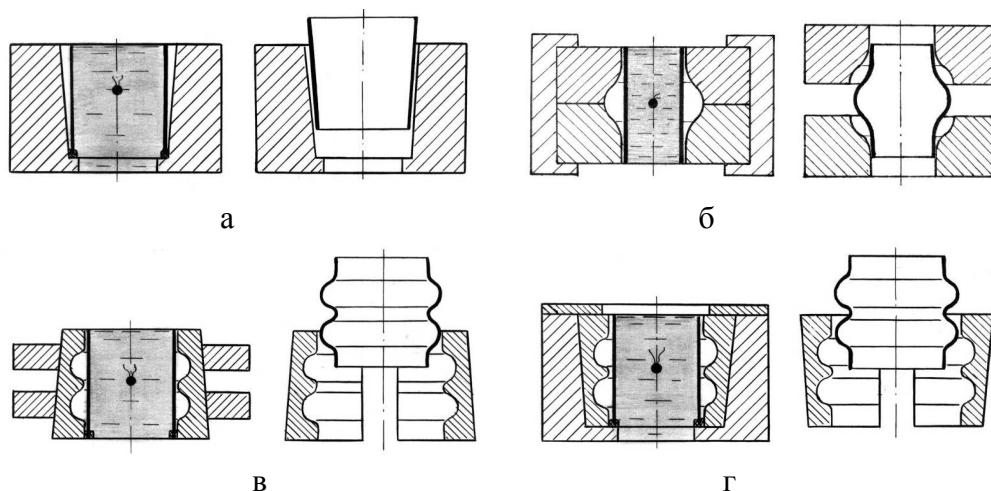


Рис. 1. Схемы оснастки с различными типами матриц для взрывной штамповки обечаек в положении сборки и разборки:

а – неразъемные матрицы; б – составные матрицы с горизонтальным разъемом; в – составные матрицы с вертикальным разъемом и силовым бандажом; г – составные матрицы с вертикальным разъемом и силовым корпусом

Из анализа существующих схем матриц, а также из опыта практического применения штамповки взрывом на предприятиях следует, что при штамповке деталей методом раздачи цилиндрических заготовок диаметром до 500 мм можно применять матрицы любого из выше упомянутых типов. В этом случае трудоемкость операций сборки-разборки матриц в зависимости от их типа существенно не отличаются.

При росте габаритов деталей до 1000 мм и более, масса матриц возрастает на столько, что начинает существенно расти трудоемкость операций сборки-разборки матриц и время их транспортировки с места обслуживания к месту подрыва заряда ВВ и обратно. В связи с этим для штамповки деталей габаритами 1000 мм и более целесообразно иметь универсальную, технологичную в изготовлении конструкцию оснастки, позволяющую быстро производить сборку-разборку и надежное силовое замыкание-размыкание формирующих элементов непосредственно в зоне штамповки.

Впервые в мировой практике предложено силовое замыкание составных, сменных формующих элементов матриц при взрывной штамповке крупногабаритных обечаек производить с помощью одного универсального, фрикционного бандажа (рис. 2).

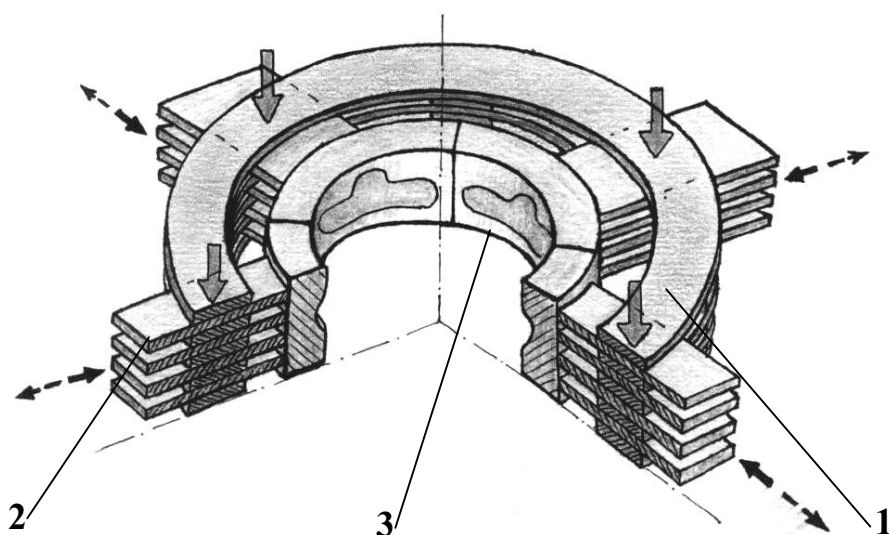


Рис. 2. Схема оснастки для взрывной штамповки обечаек методом раздачи с фрикционным силовым замыканием сменных формующих элементов матриц: 1 – пакет кольцевых пластин; 2 – радиальные пакеты прямоугольных пластин; 3 – сменные формующие элементы матриц

Оснастка содержит один универсальный, фрикционный бандаж, состоящий из пакета кольцевых пластин 1, набранных по вертикали с зазором, в которых из прямоугольных пластин собраны радиальные (не менее двух) пакеты 2. Во внутренние торцы радиальных пакетов упираются наружные поверхности съемных формующих элементов составных матриц 3. Схема оснастки в положениях сборки - замыкание и размыкание - разборка приведена на рис. 3.

На рис. 2 и 3 условно не показаны приводы горизонтального перемещения радиальных пакетов для сборки-разборки формующих элементов съемных матриц (силы P – горизонтальные стрелки), а также приводы вертикального сжатия зон контакта кольцевого пакета с радиальными па-

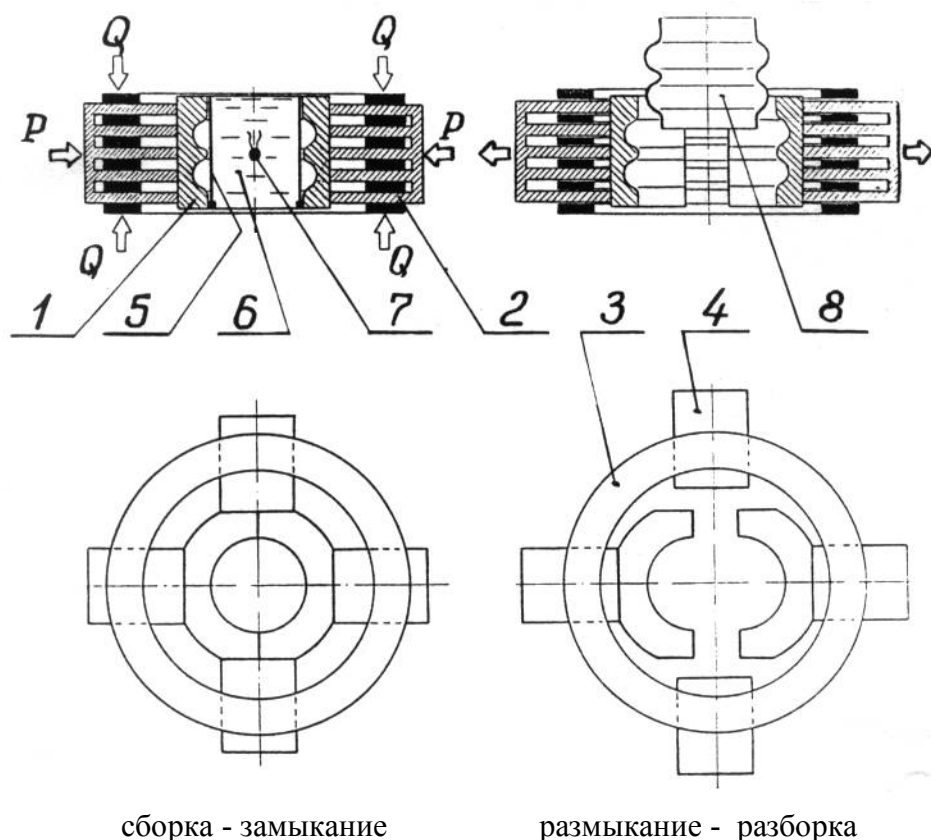


Рис. 3. Схема оснастки в положении сборки и разборки:
 1 – формующие элементы матрицы; 2 – фрикционный бандаж;
 3 – пакет кольцевых пластин; 4 – радиальные пакеты
 прямоугольных пластин; 5 – заготовка; 6 – передающая среда;
 7 – заряд ВВ; 8 – готовая деталь

кетами (силы Q – вертикальные стрелки) для замыкания-размыкания формующих элементов составных матриц.

Формующие элементы матрицы 1, предназначенные для штамповки конкретной детали, устанавливаются в бандаж 2, состоящий из кольцевого 3 и радиальных пакетов 4. С помощью приводов горизонтального перемещения радиальные пакеты пластин 4 силой P смещаются к заготовке, где происходит сборка формующих элементов с образованием цельной штампующей поверхности матрицы. В центр ее устанавливается заготовка 5, подается передающая среда 6 и заряд ВВ 7. Затем с помощью привода

вертикального сжатия силой Q происходит сжатие всех радиальных пакетов 4 и кольцевого пакета 3 в зонах их контакта. Благодаря возникновению сил трения между кольцевым и радиальными пакетами пластин происходит силовое фрикционное замыкание формующих элементов 1 матрицы и передача усилий при взрывной штамповке от детали к кольцевому пакету. После взрыва в обратной последовательности производится замыкание-разборка матрицы и съем готовой детали 8.

Сила трения F_{mp} , возникающая в каждом из радиальных пакетов пропорциональна числу пар трения, равное удвоенному количеству радиальных пластин N в пакете, силе сжатия Q и коэффициенту трения скольжения k :

$$F_{mp} = 2 \cdot k \cdot Q \cdot N.$$

При соответствующем подборе этих составляющих, силы трения, возникающие в зоне между радиальными и кольцевым пакетами достигают таких значений, при которых обеспечивается надежное силовое замыкание формующих элементов матрицы в собранном положении в процессе взрывной штамповки.

Для проверки несущей способности оснастки с фрикционным силовым замыканием формующих элементов при взрывной штамповке листовых обечаек была разработана конструкция и изготовлена в металле модель такой оснастки, показанная в разомкнутом положении на рис. 4. Модель оснастки содержит разрезную матрицу, состоящую из четырех формующих элементов.

Показателем хорошей несущей способности оснастки с фрикционным силовым замыканием является возможность получения взрывной штамповкой качественных деталей. Поэтому конечным результатом исследований была деталь, полученная на модели взрывной оснастки с фрикционным замыканием формующих элементов.

На рис. 5 показана составная матрица с готовой деталью.

Анализ качества готовой детали позволяет сделать вывод о полной надежности исследуемой схемы оснастки с фрикционным силовым замыканием и хорошей ее несущей способности.

Для устранения хлопунгов необходима герметизация и вакуумирование полости между заготовкой и поверхностью матрицы. При герметизации

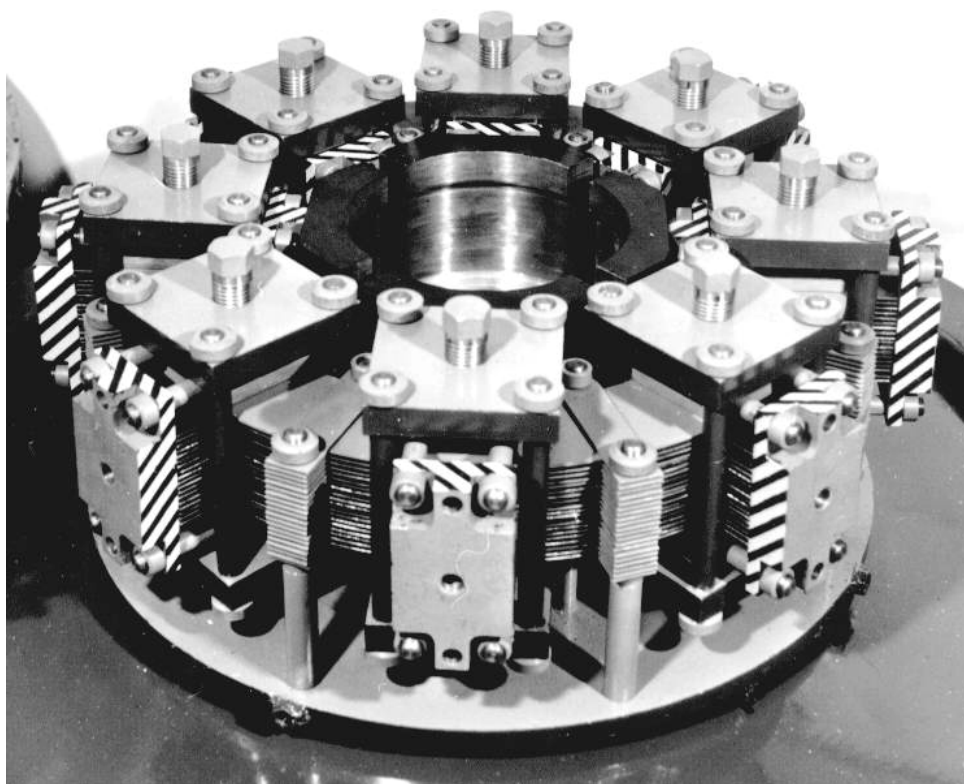


Рис. 4. Модель оснастки с фрикционным силовым замыканием формующих элементов матрицы при взрывной штамповке обечаек

натурной заготовки необходимо применить резиновый уплотнитель. Четкая фиксация составных формующих элементов матрицы друг относительно друга достигается их штифтованием. Для устранения отскока при взрыве верхнего торца заготовки от матрицы необходимо в конструкцию заложить прижимной элемент в виде кольца с внутренним отражающим фланцем.

Опыт работы на модели показал, что большую часть трудоемкости при подготовке оснастки к штамповке, занимают такие операции, как перемещение и стыковка восьми радиальных пакетов совместно с формующими элементами (сборка – разборка), установка и герметизация заготовки на рабочем столе, а также вертикальное замыкание – размыкание силовыми

винтами восьми узлов зажима. Поэтому все перемещения на натурной установке, аналогичные ручным механическим перемещениям на модели, необходимо перевести на гидравлику.



Рис. 5. Готовая деталь в разрезной матрице, состоящей из четырех формующих элементов

Выводы

Проведено исследование несущей способности универсального фрикционного бандажа для замыкания формующих элементов матриц при взрывной штамповке обечаек, получена деталь на изготовленной в металле модели, даны практические рекомендации по усовершенствованию конструкции узлов оснастки и улучшению качества штампуемых деталей.

Поступила в редакцию 25.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского “ХАИ”, Харьков.

А.Г. Нарыжный

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ФАКТОРЫ И ЭТАПЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТОЧНОСТЬ ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Статья посвящена анализу процесса формообразования тонкостенной замкнутой осесимметричной детали с помощью импульсной ударной штамповки. Основные результаты получены с помощью численного компьютерного моделирования по методу Уилкинса процесса совместного деформирования толстостенной стальной матрицы и оболочки вращения с использованием ограниченной версии пакета LS-DYNA. Адекватность компьютерной модели и точность решения задач изучены ранее. Описаны три основных этапа формообразования и соответствующие факторы, определяющие точность детали. Важной особенностью процесса является наличие подвижного локального очага пластического деформирования, обусловленного ударом заготовки о жесткую матрицу. Материал в пластическом очаге чувствителен к воздействиям, что можно использовать для управления процессом формообразования детали. Отмечается неизбежность неточности изготовления детали.

импульсная штамповка, точность детали, моделирование, удар, остаточные деформации

С начала внедрения в середине прошлого века методов импульсной штамповки в промышленное производство точность деталей, изготавливаемых этими методами, остается проблемным вопросом. Остаются неразвитыми теоретические представления о формообразовании деталей, в особенности, в результате удара заготовки по матрице. Существующие представления имеют, в основном, эмпирический ограниченный характер. Обеспечение точности детали достигается, по преимуществу, с помощью технологических экспериментов на этапе отладки техпроцесса.

Формообразование при импульсной штамповке отличается быстротекущий характер, высокая интенсивность, а также взаимосвязанность процессов деформирования и ударного взаимодействия элементов технологической системы. Окончательная форма, размеры и, следовательно, точность детали устанавливается путем поэтапного накопления остаточных дефор-

маций, вызванных разнообразными факторами, сменяющимися и обуславливающими друг друга в динамических процессах.

Статья посвящена анализу процесса формообразования детали при импульсной ударной штамповке, выделению основных этапов, их закономерной последовательности, а также внешних и внутренних факторов, придающих специфическую окраску этим этапам, и определяющим в конце концов окончательную форму и точность детали. Под точностью понимается степень соответствия размеров детали размерам штамповой поверхности матрицы.

Основные результаты получены с помощью численного компьютерного моделирования по методу Уилкинса процесса совместного деформирования толстостенной стальной матрицы и тонкостенной трубчатой заготовки с использованием ограниченной версии пакета LS DYNA [1].

Рассмотрена модель технологической системы импульсной гидродинамической штамповки замкнутых осесимметричных деталей (рис.1). Радиус контактной поверхности R_2 и высота заготовки H равны 70 и 80 мм, соответственно. Толщина оболочки δ и величина технологического зазора Δ равны 1 мм. Заготовка изготовлена из алюминиевого штампуемого сплава типа АМГ с плотностью $\rho=2700 \text{ кг/м}^3$, модулем упругости $E=7 \times 10^{10} \text{ Па}$, коэффициентом Пуассона $\nu=0,33$ и предельной кривой вида

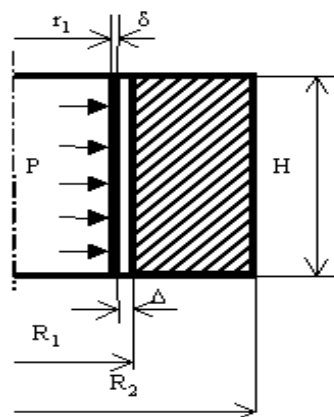


Рис. 1. Схема модели

$$\sigma_i = \begin{cases} E \times \varepsilon, & \sigma_i < \sigma_T; \\ 3 \times 10^8 \times \varepsilon^{0,145}, & \sigma_i \geq \sigma_T, \end{cases} \quad (1)$$

где σ_i – интенсивность напряжений, $\sigma_T = 1,19 \times 10^8 \text{ Па}$ – предел текучести, ε – интенсивность деформаций.

Матрица изготовлена из стали типа 40Х, обладающей следующими характеристиками: $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; $E = 1,962 \times 10^{11} \text{ Па}$; $\nu = 0,27$; $\sigma_T = 8,0 \times 10^8 \text{ Па}$. Предельная кривая имеет вид

$$\sigma_i = \begin{cases} E \times \varepsilon, & \sigma_i < \sigma_T; \\ 1,175 \times 10^9 \times \varepsilon^{0,0702}, & \sigma_i \geq \sigma_T. \end{cases} \quad (2)$$

На внутренней поверхности заготовки действует импульсное давление вида

$$p(t) = \begin{cases} p_0 \times \sin \lambda t, & 0 \leq t \leq \pi/\lambda; \\ 0, & t > \pi/\lambda, \end{cases} \quad (3)$$

где $p_0 = 1,492 \times 10^8$ Па – расчетная амплитуда давления на внутренней по-

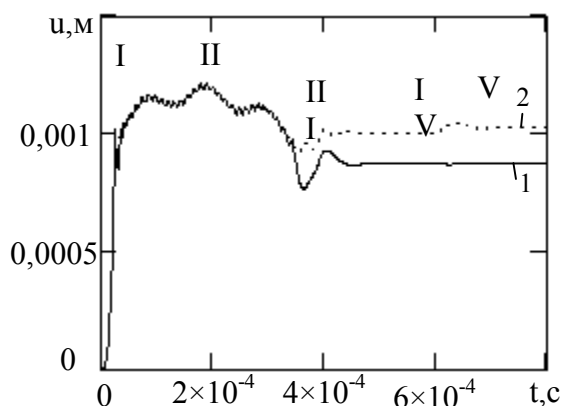


Рис. 2. Перемещения точек заготовки в зависимости от времени

верхности заготовки;

$\lambda = 9,28 \times 10^3$ 1/с – постоянная времени.

Адекватность компьютерной модели и точность численных решений изучены ранее [2].

На рис. 2 показана зависимость радиальных перемещений двух точек заготовки от времени. На графике можно выделить пять характерных этапов развития остаточных

перемещений.

I. Свободная раздача в зазоре

Свободная деформирование происходит под действием внешнего да-

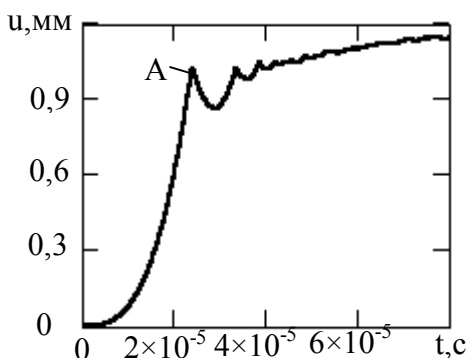


Рис. 3. Начальные перемещения

ления, этап оканчивается первым ударом заготовки по матрице (точка А, рис. 3).

Деформирование заготовки происходит по упруго-пластическому типу из начального естественного состояния.

Особенностью этапа является неоднородность радиальных перемещений и скоростей по длине

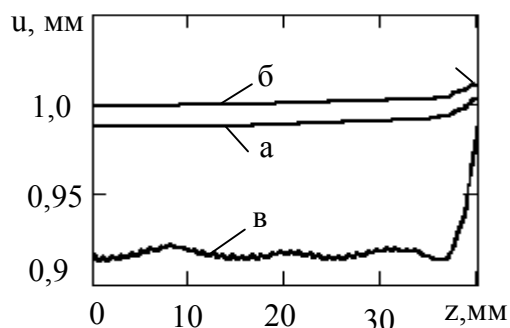


Рис. 4. Распределение перемещений по длине заготовки

(линии а, б рис. 4; показана симметричная половина графика), в результате чего первый удар заготовки по поверхности матрицы является неодновременным и неоднородным, поскольку контактные напряжения зависят от скорости. Удар и соответствующие контактные напряжения наблюдаются на фоне предварительных неоднородных напряжений заготовки

в конце первого этапа.

II. Ударные упруго пластические колебания

На этом этапе происходит формирование размеров детали, следовательно, неточностей и несовершенств формы и размеров.

После первого удара движение заготовки обусловлено действием давления, собственных внутренних сил и реакции матрицы. Заготовка вовлекает в движение матрицу, как видно на рис. 2. Перераспределение энергии является важным фактором снижения амплитуды колебаний на этом этапе. Движение заготовки имеет характер совместных ударных колебаний с матрицей, причем колебания матрицы как более жесткого тела модулируют колебания заготовки.

При ударах возникают поля пластических напряжений и соответствующих деформаций, имеющие волновой характер. Особенность удара как причины пластичности в его кратковременности и малой мощности, в результате чего волны пластических напряжений быстро затухают на протяжении 0,2 мм и дальше распространяются как упругие. Как видно из рис. 5, амплитуда, следовательно, скорость удара, а также контактные ударные напряжения быстро уменьшаются.

Ввиду неодновременности удара из зоны начала соударения распространяются волны продольного изгиба заготовки как показано на рис. 4,

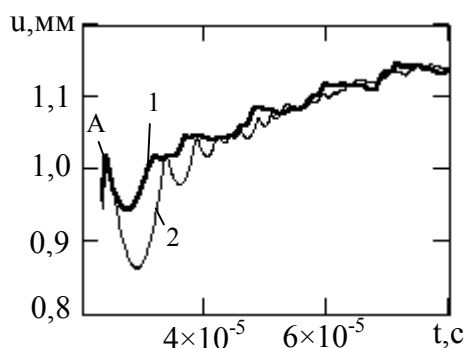


Рис. 5. Перемещение точек матрицы 1 и заготовки 2 после первого удара

встречу друг другу, интерферируют с образованием дефекта в виде корсета в центральном сечении детали.

Множественность соударений, неоднородность и неодновременность соударений заготовки и матрицы приводят к своеобразному хаосу осциллограмм деформаций при экспериментальном исследовании НДС матриц с использованием электротензометрических датчиков. Датчики воспринимают и суммируют волновые деформации, источники которых, удары заготовки по формирующей поверхности матрицы, на втором этапе быстро меняют свое положение и интенсивность.

Неоднородность ударов и интерференция волн различной природы порождает локальные подвижные очаги пластичности. Материал в очаге чувствителен к внешним воздействиям, что дает возможность управления формообразованием детали.

При неоднородных и неодновременных ударах происходит искривление прямых нормалей, что нарушает основную гипотезу теории оболочек.

III. Затухающие ударные упругие колебания

На этом этапе не происходит изменения остаточных перемещений и напряжений в заготовке.

С уменьшением амплитуды ударных колебаний заготовки контактные напряжения и в целом напряжения снижаются и движения заготовки при-

кривая в. Волны продольного изгиба захватывают всю длину заготовки. В результате пластической диссипации волны изгиба «замерзают», формируя рельеф поверхности, что следует рассматривать как родовой дефект метода.

Волны напряжений интерферируют, усиливая эффект неоднородности остаточных напряжений и деформаций. Волны изгиба, распространяясь с двух концов на-

обретают упругий характер. При этом происходит рассеяние энергии колебаний за счет различных факторов: вязкое рассеяние в материале заготовки и матрицы, трение заготовки и матрицы, акустическое излучение в окружающую среду. Этап заканчивается установлением стационарного состояния системы. Возможны два варианта состояния – с натягом и без натяга. В последнем случае в конце данного этапа деталь принимает окончательную форму.

IV. Стационарное состояние детали в матрице

Этот этап соответствует технологической паузе, в течение которой деталь не меняет своего состояния.

V. Освобождение детали, образование вторичных деформаций

В случае образования в конце III этапа натяга при освобождении детали из матрицы происходит разгрузка напряжений натяга и деталь изменяет свои размеры и форму за счет вторичных остаточных деформаций, как показано на рис. 6. Кривая 1 соответствует положению детали в матрице, кривая 2 – после освобождения из матрицы.

На рис. 7 показано приращение остаточных деформаций (вторичных пластических деформаций) как функция толщины детали. Наибольшие изменения остаточных деформаций наблюдаются поверхностях детали

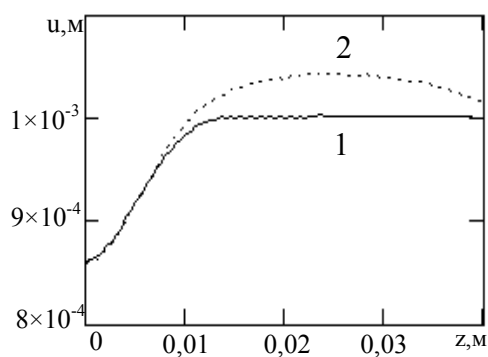


Рис. 6. Вторичные перемещения детали

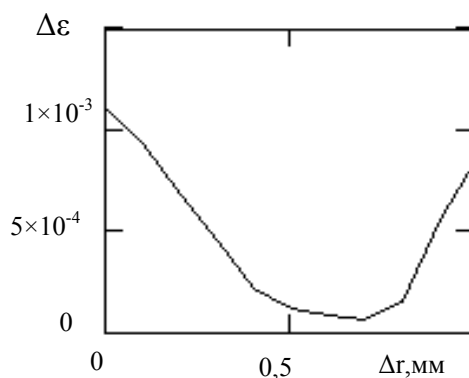


Рис. 7. Приращение остаточных деформаций при освобождении детали

Выводы

1. Образование формы и размеров (в том числе – неточности изготовления) детали протекает и накапливается на трех этапах за счет внешнего давления, ударного взаимодействия с матрицей и разгрузки напряжений натяга (если таковой существует)

2. Удар, как кратковременный и конечной мощности источник, порождает специфические волны напряжений, которые без поддержки источника и в силу пластической диссипации энергии быстро затухают, откладывая остаточные деформации по преимуществу вблизи поверхности удара.

3. В общем случае деталь не копирует в точности форму поверхности матрицы, дефекты формы неизбежны, речь может идти о минимизации величины дефектов.

4. Нарушение гипотезы о прямых нормалях ограничивает применение моделей оболочек для теоретического исследования задач ударного формообразования.

Литература

1. LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971. – Livermore Software Technology Corporation, 2006. – 2130 p.

2. Нарыжный А.Г. Накопленное окончательное напряженно-деформированное состояние взаимодействующих с ударом тел вращения. Дис...канд. техн. наук: 01.02.04. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 157 с.

Поступила в редакцию 10.04.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП “Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, Харьков.

А.И. Долматов, Н.Ю. Калиниченко, С.Е. Маркович

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ПРОБЛЕМЫ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ СПЛАВОВ И ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ, НАНЕСЕННЫМИ ГАЗОДЕТОНАЦИОННЫМ СПОСОБОМ

Описана проблематика обработки шлифованием деталей из специальных сплавов и термическими газо-детонационными покрытиями. Рассмотрены проблемы внедрения в производство глубинного планетарно-сопряженного шлифования. Представлены практические рекомендации, связанные с выбором режимов обработки, режущего инструмента и применяемому оборудованию.

глубинное планетарно-сопряжённое шлифование, газо-детонационное покрытие, периферийное планетарное шлифование, планетарная головка, износостойкие покрытия, плотность тепловых потоков

Введение

Высокие требования, предъявляемые к авиационным двигателям, обуславливают широкое внедрение труднообрабатываемых материалов из специальных сплавов на титановой основе, жаропрочных сплавов, а также деталей с защитными газо-детонационными покрытиями. Шлифование является универсальным методом обработки композиционных материалов, легированных сталей, труднообрабатываемых сплавов на титановой основе и деталей с износостойкими газо-термическими покрытиями, что обусловило его широкое применение в производстве. Одним из наиболее перспективных является метод глубинного планетарно-сопряжённого шлифования, который интенсифицирует процесс снятия материала и позволяет: вести обработку на скоростях 100...180 м/с, достичь скорости съёма материала 10...20 мм³/мм·с, получать чистоту обработанной поверхности Ra=0,8...1,25 мкм, обрабатывать детали с твердостью от 200...220 HB до 62... 64 HRC₉.

1. Проблемы внедрения абразивной обработки специальных сплавов

Сложность проведения финишной обработки шлифованием деталей из титановых и жаропрочных сплавов связано с опасностью образования поверхностных дефектов: шлифовочных прижогов, трещин и т.д. Высокая термодинамическая напряжённость процесса шлифования становится причиной ухудшения условий обработки деталей с газо-детонационными покрытиями, с учётом специфических особенностей покрытий: структурная неоднородность, наличие развитой пористости и границы раздела “покрытие-подложка” [1]. Влияние всех этих факторов, может привести к отслоению покрытия, разупрочнению поверхностного слоя, интенсификации фазово–структурных превращений и образованию остаточных растягивающих напряжений.

Вопросы повышения качества и производительности обработки деталей из специальных сплавов и деталей с термическими покрытиями требуют решения целого комплекса задач: выбор способа и метода шлифования; подбор необходимого режущего инструмента (РИ) и оборудования, на котором возможно реализовать процесс обработки; выбор оптимальных режимов обработки. Одним из перспективных методов обработки является планетарно – сопряженное шлифование. К недостаткам данного способа обработки можно отнести следующее [2]: низкое значение коэффициента использования резерва режущих зёрен во времени приводит к низкой эффективности съёма материала. За время паузы в зоне обработки накапливается несошлифованный припуск. Разница в нагружении зёрен приводит к их интенсивному износу, либо к неэффективному использованию режущих. Третья негативная особенность заключается в том, что протяженность дуги мгновенного контакта, являющаяся зоной генерирования тепла, в планетарном и моноосевом способах обработки примерно одинакова, т.е. здесь так же нет рассредоточения тепловой энергии по поверхности детали. Отсутствие единой методики, позволяющей производить априорное прогнозирование физико-механические характеристики поверхностных слоёв после абразивной обработки, что так же не позволяет осуществлять корректирование режимов при активном контроле параметров процесса целью получения заданного комплекса свойств.

2. Постановка задачи и цель исследования

Целью исследований является разработка основных положений единой методики проектирования технологических процессов высокопроизводительной абразивной обработкой специальных сплавов и деталей с защитными газо-термическими покрытиями. Указанная проблематика требует решения следующих задач:

- анализ проблем связанных с распределением поверхностной плотности тепловых потоков по поверхности заготовки;
- определение составляющих силы резания и давления при обработки защитных газо-термических покрытий.

В связи с увеличением теплонапряженности процесса остро стоит проблема получения данных о распределении тепловых потоков по шлифуемой поверхности заготовки в режиме реального времени.

Особое внимание следует уделить проблеме финишной обработки газо-детонационных покрытий. Шлифование таких покрытий характеризуется напряженным состоянием напылённой поверхности. Это обусловлено опасностью отслоения покрытия, которая возникает в процессе шлифования. Важной особенностью механической обработки наплавленных покрытий является то, что обрабатываемая поверхность состоит из отдельных выступов и впадин глубиной 2...3 мм. В начальный момент обработки имеет место небольшая фактическая площадь контакта РИ с обрабатываемым материалом. Это ведёт к повышенному износу алмазного круга и удорожания процесса шлифования.

3. Методики определения физико-механических характеристик поверхностных слоёв детали после абразивной обработки

В работе Хусаинова А.Ш. [3] предложены новые методы получения информации о распределении поверхностной плотности тепловых потоков по шлифуемой поверхности заготовки. Для определения поверхностной плотности теплового потока в работе [3] применялись методы: сравнения температур, интегральный и последовательный, использующие ЭДС одной термодпары, заложенной в глубине заготовки. Метод сравнения условно устойчив и требует знания распределения температур. Для этого метода термодатчик был заложен на глубину 0,1 мм с частотой опроса датчика 2500 Гц. Для интегрального метода замеры производились на разных глубинах при 20 последовательных проходах, при этом погрешность по-

считанного теплового потока составляла 25...50%. Последовательный метод самый неточный и его погрешность достигала 50%. Для эксперимента применялись одноразовые заготовки. В результате проведенных экспериментов и на основании расчётов была получена зависимость, (рис. 1) [3]: для круга 1 – $225 \times 40 \times 76$ 24A40ПСМ17К5; материала заготовки – сталь ХВГ, твёрдостью 55...59 HRC₉; $V_K = (28...35)$ м/с, $V_3 = 10$ м/мин, $S_t = 0,02$ мм/дв. ход; подача поливом 0,5%-го содового раствора с расходом 10 дм³/мин.

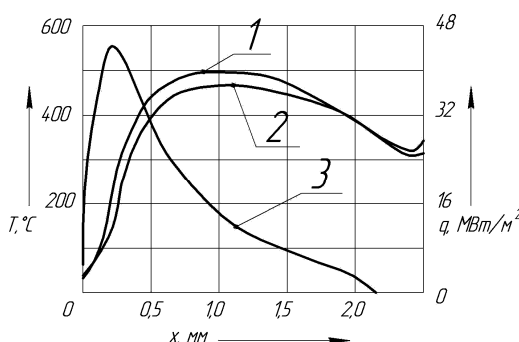


Рис. 1. Температура в поверхностном слое заготовки и поверхностная плотность теплового потока в зоне плоского встречного шлифования [3]:
1, 2 – температура на глубине 15 и 65 мкм соответственно;
3 – поверхностная плотность потока

Таким образом, интегрально – аппроксимационный метод позволяет вычислить поверхностную плотность теплового потока по температурным откликам одной полуискусственной термопары при заданном законе изменения поверхностной плотности. Погрешность расчёта на большей части ширины теплового источника в среднем не превышала 5%. Данная методика определения величины и характера распределения поверхностных тепловых потоков может быть применена к абразивной обработке шлифованием инструментальных высоколегированных сталей и труднообрабатываемых специальных сплавов. Погрешность, имеющая место в расчёте температур при абразивной обработке шлифованием, вследствие неточного учёта теплофизических свойств, форм и перемещений объектов, участвующих в процессе резания, приводила к увеличению локальных температур в зоне резания. Это становилось причиной: интенсивного налипания частиц материала заготовки к абразивным зёрнам, повышению

вероятности образования дефектов в поверхностном слое заготовки и снижению стойкости абразивного инструмента.

В работе [4] автором разработаны физические и математические модели для расчета температур при шлифовании, позволяющие в комплексе учесть форму контактирующих объектов: абразивного зерна, заготовки, РИ и стружки, относительное перемещение этих объектов, расположение отдельных источников тепловыделения, наложение тепловых импульсов от отдельных зёрен; зависимость теплофизических свойств объектов и механических характеристик материала заготовки от температуры. Исследования выполнялись для схемы плоского многопроходного шлифования периферией круга, с учётом реальной формы контактирующих объектов: абразивного зерна (АЗ), круга и стружки.

В качестве АЗ предлагается усечённая пирамида с углом при вершине 2γ площадкой затупления l_2 ; форма заготовки в виде прямоугольного параллелепипеда; форма стружки – совокупность прямоугольных параллелепипедов различной толщины. Авторами принималась двумерная постановка задачи теплового взаимодействия, поскольку изменение температур в направлении оси вращения шлифовального круга незначительно и им можно пренебречь. Пограничный слой между АЗ, стружкой и заготовкой и его термическое сопротивление можно не учитывать, так как контакт между этими телами в условиях пластической деформации приближается к идеальному. Поэтому считаем, что температура в любой точке на поверхности соприкосновения контактирующих тел одна и та же. Теплообмен считается нестационарным, поскольку АЗ вступают в контакт с заготовкой периодически. Для повышения достоверности результатов, автор учёл зависимость сопротивления материала заготовки пластическому деформированию и зависимость теплофизических свойств всех взаимодействующих объектов от температуры. Предполагается, что заготовка 1 неподвижна, а режущее АЗ 2, шлифовальный круг 4, стружка 3 и плоскость сдвига DE перемещаются относительно заготовки, со скоростью $V_{кр}$ и скоростью подачи V_S (рис. 2) [4]. Система координат XOY связана с зерном и перемещается относительно заготовки в направлении оси OX со скоростью $V_{кр}$. Автор работы [4] представил уравнения теплопроводности для заготовки 1, АЗ 2, стружки 3 и шлифовального круга 4.

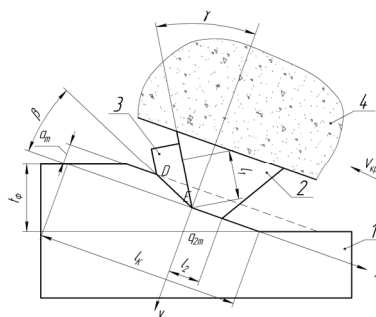


Рис. 2. Схема контакта режущего АЗ с заготовкой:

1 – заготовка; 2 – АЗ; 3 – стружка; 4 – круг; l_k – длина дуги контакта круга с заготовкой; l_1 – длина контакта стружки с поверхностью АЗ; l_2 – размер площадки затупления АЗ; t_ϕ – глубина шлифования; β – угол сдвига; γ – угол при вершине зерна [4]

В результате проделанных расчётов автором [4] было определено, что на каждый элементарный участок заготовки от момента входа его в зону действия тепловых импульсов, являющихся результатом диспергирования материала заготовки отдельными АЗ. Для расчёта количества тепловых импульсов, воздействующих на каждый элементарный участок, получена зависимость, учитывающая: длину дуги контакта круга с заготовкой l_k ; скорость круга $V_{кр}$; скорость продольной подачи V_{Snn} и среднее расстояние между диспергирующими зёрнами t_ϕ . Адекватность математических моделей реальным условиям проверялась авторами путём сравнения средней температуры в зоне контакта, полученную расчётным путём, с температурой, измеренной методом полуискусственной термопары. Расхождения между расчётными и экспериментальными данными не превышали 15%. Моделирование теплового состояния системы производилось при следующих исходных данных: материал заготовки – сталь 30Х; материал АЗ– электрокорунд белый; $V_{кр} = 35$ м/с; $V_{Snn} = 10$ м/мин; глубина шлифования $t_\phi = 0,01$ мм; СОЖ– эмульсия Укринол-1 (3%). В результате проведённых экспериментов авторами было установлено, что вблизи от вершины АЗ на площадке его контакта с заготовкой локальные температуры достигают температуры плавления материала зерна. Результаты численного моделирования позволяют разработать рекомендации по снижению

локальных температур и интенсивности адгезионного взаимодействия абразивных зёрен с заготовкой в режиме глубинного планетарно – сопряженного шлифования.

Авторами работы [5] исследован процесс шлифования деталей с композиционным TiC-NiC-CU – покрытием. Разработана математическая модель, позволяющая определить при шлифовании тангенциальную силу резания, температуру на обработанной поверхности и остаточные напряжения покрытия любого химического состава. Авторами получены оптимальные режимы шлифования деталей с композиционным TiC-NiC-CU покрытием при шлифовании: кругами из карбида кремния зелёного, электрокорунда белого и алмазного круга, обеспечивающие наибольшую работоспособность термического газо-детонационного покрытия. В статье [5] разработана математическая модель, учитывающая физику процесса шлифования, с последующим проведением вычислительного эксперимента. Температура шлифования $T_2(y, \tau)$, приведенная к обработанной поверхности, учитывающая, что мощность теплового источника неравномерно распределена по пятну контакта шлифовального круга с деталью и тепловая мощность в данной точке пятна контакта зависит от конкретной координаты x ; геометрии пятна контакта a, b ; скорости перемещения детали относительно теплового источника V_0 ; радиуса закругления зерна r ; коэффициента температуропроводности обработанной поверхности α_2 [5]. Как свидетельствуют результаты исследований зависимости режимов обработки и зернистости шлифовального круга [5], при возрастании глубины резания, единичные силы резания снижаются, так как происходит уменьшение сечения стружки, снимаемой режущим зерном, а увеличение глубины увеличивает дугу контакта круга с деталью и, следовательно, увеличивается число работающих зёрен. Увеличение поперечной подачи практически не влияет на единичные силы резания.

Разработанная математическая модель, позволяющая определить при шлифовании тангенциальную силу резания, температуру на обрабатываемой поверхности заготовки и остаточные напряжения покрытий любого химического состава, применима для перспективного метода глубинного планетарно – сопряженного шлифования. Авторы работы получили оптимальные режимы обработки деталей с композиционным покрытием TiC-

NiC-CU шлифованием на неавтоматизированном производстве кругами [5]:

карбида кремния зелёного: $t = 0,005, 0,01$ мм; $s = 0,5, 1, 2$ мм/дв.ход;
 $V_{кр} = 25, 35$ м/с; $V_{\partial} = 5, 15, 25$ м/мин; $N_z = 16, 25$ мкм; ТК = МЗ, СМ1;

электрокорунда белого: $t = 0,005, 0,01$ мм; $s = 0,5, 1, 2$ мм/дв.ход;
 $V_{кр} = 25, 35$ м/с; $V_{\partial} = 5, 15, 25$ м/мин; $N_z = 16, 25$ мкм; ТК = МЗ, СМ1, С1;

алмазными кругами: $t = 0,005, 0,01, 0,03$ мм; $s = 0,5, 1, 2$ мм/дв.ход;
 $V_{кр} = 25, 35$ м/с; $V_{\partial} = 5, 15, 25$ м/мин; $N_z = 12, 16, 25$ мкм; ТК = МЗ, СМ1.

В качестве перспективного метода обработки рекомендуется использование интегральной технологии абразивной обработки на основе глубинного шлифования. Центральной идеей интегральной технологии является соединение в едином процессе этапа формообразования сложнопрофильных поверхностей с этапом формирования высококачественного слоя детали. К преимуществам данного метода следует отнести: увеличение производительности обработки более чем в 10 раз; по скорости съёма металла он в несколько раз превосходит методы лезвийной обработки материалов; исключить технологическую наследственность, свойственную многооперационным технологиям обработки; сократить трудоёмкость обработки деталей. К недостаткам этого метода можно отнести: применение специальных станков для глубинного шлифования, обладающих большей жёсткостью; использование инструмента с высокими физико-механическими и теплофизическими свойствами.

В работе [6] Гуцаленко Ю.Г. предлагает уменьшить удельный расход алмаза за счёт увеличения глубины резания вплоть до величины снимаемого припуска, то есть, применив глубинное шлифование. В начальный момент обработки в связи со шлифованием отдельных выступов покрытия фактическая производительность значительно меньше номинальной, заданное значение силы можно обеспечить при увеличенном значении номинальной производительности обработки. Это предполагает применение многопроходного шлифования с глубиной шлифования существенно ниже максимальной высоты неровностей покрытия и увеличенными значениями продольной подачи или скорости детали. По мере съёма припуска номинальная производительность обработки должна уменьшаться, а фактическая производительность – оставаться неизменной. Это достигает-

ся уменьшением во времени глубины шлифования или продольной подачи, которые определяют производительность обработки.

Как свидетельствуют экспериментальные исследования [6] на универсальном круглошлифовальном станке 3Б12, с увеличением напряжения источника технологического тока (ИТТ-35) при круглом наружном алмазно-искровом шлифовании кругами 1А1 производительность обработки покрытия (3Х2В8) непрерывно увеличивается [6]. Проведя серию экспериментов при шлифовании с переменной подачей, автор работы установил, что с уменьшением поперечной подачи S_n по мере съёма припуска удельный расход алмаза q_v уменьшается. В условиях шлифования с переменной во времени поперечной подачей S_n удельный расход алмаза q_v в начальный период обработки неровностей наплавки удаётся снизить на 30%, сократив средний расход алмаза на шлифование неравномерного припуска не менее, чем на 8 мг/см^3 .

Шлифование, с изменяющейся номинальной производительностью обработки Q , позволяет практически исключить повышенный удельный расход алмаза в начальный момент обработки при контакте вершин неровностей поверхности покрытия с алмазным кругом.

Заключение

Как показал анализ рассмотренных работ, метод глубинного планетарно-сопряжённого шлифования является одним из наиболее перспективных, высокоэффективных и экономически целесообразных методов при обработке деталей из жаропрочных и специальных сплавов: ЖС6К, ЖС6У-ВИ; а также с защитными газо-детонационными покрытиями: TiC-NiC-CU и на основе Al_2O_3 . Широкое внедрение данного метода в производство требует решения ряда проблем: распределения поверхностной плотности тепловых потоков по поверхности заготовки [3], определение величины и вида остаточных напряжений [5]. В настоящее время разработаны и рекомендованы к внедрению отдельные математические модели процессов, позволяющие рассчитать: температуру в зоне резания, характер распределения поверхностной плотности тепловых потоков [3, 4], тангенциальную силу резания и остаточные напряжения покрытия любого химического состава [5, 6]. Данные модели могут быть использованы в

качестве модулей для универсальной математической модели, позволяющие производить априорное прогнозирование физико-механических характеристик поверхностных слоёв материала после абразивной обработки.

На основании проведенного анализа прикладных работ можно выделить следующие рекомендации: при обработке деталей с покрытием на основе сормаита и электрокорунда с микротвёрдостью покрытия $HV_{100} > 4,5$ ГПа экономически выгодно применять круги на связке М2-01, на следующих режимах: $t = 0,02$ мм; $S_{non} = 1,8$ мм/ход; $V_d = 13,87, 15$ м/мин, если $Q = 0,85 \dots 0,90$ см³/мин [1].

Литература

1. Пилипенко А.М. Повышение эффективности шлифования деталей с износостойкими плазменными и детонационными покрытиями: Автореферат дис. ... канд. техн. наук / АН УССР, Ин-т сверхтвёрдых материалов. – К., 1987. – 16 с.
2. Буюкли И.М. Повышение эффективности периферийного планетарного шлифования деталей из конструкционных материалов: Автореферат дис. ... канд. техн. наук / Одес. политехн. ин-т. – Одесса., 1990. – 16 с.
3. Хусаинов А.Ш. Новые методы определения поверхностной плотности тепловых потоков при шлифовании // Обработка материалов резанием. – 2006. – № 4 (34). – С. 45-51.
4. Унянин А.Н. Аналитические исследования локальных температур при шлифовании // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 4-9.
5. Клименко Н.Н., Лебедев В.Г. Исследование процесса шлифования деталей с композиционным TiC-NiC-CU – покрытием // Проблемы техники. – 2003. – № 2. – С. 76-80.
6. Гуцаленко Ю.Г. Физические особенности шлифования износостойких наплавленных покрытий // Високі технології в машинобудуванні. – 1999. – С. 21-27.

Поступила в редакцию: 15.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП “Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, Харьков.

В.Е. Зайцев, А.М. Андриенко, В.П. Сабелькин, С.Г. Домбровская

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ОТРАБОТКА ОПЫТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ОБОЛОЧЕК ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ

На основании проведенного анализа существующих методов производства высокоточных оболочек деталей предложен двухпереходный метод их изготовления – взрывная штамповка с предварительной вытяжкой. Этот метод позволяет на стадии разработки технологического процесса отказаться от корректировки оснастки и увеличить точность детали.

технология производства летательных аппаратов, штамповка деталей взрывом

Вступление

Приёмо-передающие устройства, особенно устанавливаемые на летательных аппаратах, должны обладать высокими характеристиками при минимальных размерах и массе. Этого можно добиться только повышением точности изготавливаемых зеркал антенн.

Анализ деталей, применяемых при изготовлении вышеуказанной продукции, показал, что большой объём занимают осесимметричные оболочки двойной кривизны с периферийным рифтом различных радиусов кривизны с габаритными размерами от 1,2 до 2,5 метра, относительной глубиной до 17 %, относительной толщиной 0,0012...0,0009.

В качестве типового представителя деталей рассматриваемого класса рассмотрим рефлектор антенны спутниковой системы, форма которого – параболоид вращения. Рефлекторы антенн спутниковой связи и телевидения, как правило, характеризуются большими габаритами и требуют высокой точности изготовления (отклонение от теоретического контура сечения $\pm 0,5...1$ мм). Традиционными методами изготовления это обеспечить трудно.

Основная задача данной работы – исследование выбранной схемы формообразования деталей, динамического поведения листовой заготовки

и экспериментальное определение её напряжённо-деформированного состояния, определение оптимальных параметров технологических процессов и отработка типовых технологических процессов в лабораторных условиях в целях выработки рекомендаций для практического внедрения в производство.

1. Комбинированный метод изготовления высокоточных оболочечных деталей

Существуют (и применяются сегодня на производстве) следующие способы изготовления зеркал антенн спутникового телевидения:

- вытяжка с прижимом фланца заготовки,
- штамповка на прессах эластичными средами,
- обтяжка на обтяжном пуансоне,
- обкатка,
- изготовление сегментов зеркала антенны с последующей сборкой в стапеле с помощью разъемных (болтовые) или неразъемных (клепка, сварка и т.п.) соединений,
- электрогидравлическая штамповка,
- гидровзрывная штамповка.

На основании проведенного анализа существующих методов изготовления указанных выше деталей предложен комбинированный метод формообразования оболочек двойной кривизны высокой точности.

Деталь изготавливается за два этапа.

На первом этапе с помощью традиционного способа вытяжки изготавливается полуфабрикат заданной глубины.

На втором этапе из полуфабриката формовкой по пуансону (матрице) изготавливается окончательная деталь.

Сочетание традиционной и импульсной технологий позволило создать оптимальную схему формообразования крупногабаритных высокоточных антенных конструкций спутниковых систем, учитывающую возможность изготовления различных видов зеркальных антенн: длиннофокусных, среднефокусных, короткофокусных, офсетных.

2. Определение параметров внешней нагрузки

Основным технологическим параметром при вытяжке полуфабриката из листовой заготовки является величина давления среды. Для определения величины давления была использована безмоментная теория расчёта тонкостенных оболочек, а также уравнение Лапласа. Как показали эксперименты, разница между расчетной величиной давления и величиной давления, определенной экспериментально, составила не более 5 %.

Одними из основных технологических параметров процесса импульсного формообразования являются величины заряда взрывчатого вещества и дистанция от заряда до заготовки. На этапе формовки следует обеспечить максимальное прилегание всех точек полуфабриката к поверхности матрицы, соблюдая жёсткие требования к точности геометрических размеров оболочек двойной кривизны. При этом скорости, с которыми точки заготовки должны подходить к поверхности пуансона, должны быть минимально возможными, что необходимо для увеличения срока службы дорогостоящей штамповочной оснастки.

На основе метода деформируемого многогранника [1] проведен расчет оптимальных величин энергетических и геометрических параметров импульсной штамповки оболочек двойной кривизны.

Целью работы являлось нахождение оптимальных величин энергетических и геометрических параметров системы «заряд – заготовка», таких, как масса заряда и дистанция от заряда до заготовки, которые обеспечат заданный характер деформирования заготовки и соответствие окончательных геометрических форм детали требуемым по техническим условиям, т.е. совпадение с заданной точностью потребных и расчетных прогибов заготовки. В общую блок-схему расчёта включена процедура численного расчёта напряжённо-деформированного состояния заготовки, введены ограничения на дистанцию заряда взрывчатого вещества до заготовки и на величину массы заряда. Результаты расчетов оптимальных геометрических и энергетических параметров импульсной штамповки детали типа зеркала антенны с учетом начальных и граничных условий показали отличие расчётных значений технологических параметров от экспериментальных в интервале 15...20 %, что объясняется принятыми допущениями, которые были положены в основу методик расчёта [2].

Комбинированный метод формообразования для рассматриваемого класса деталей позволяет отказаться при отработке технологии от корректирования профиля матрицы и увеличить точность за счёт:

- бегущей волны от импульсного нагружения;
- схемы формообразования;
- отсутствия зависимости от поставляемого проката;
- отсутствия зависимости от утонения заготовки.

Технология изготовления отрабатывалась на деталях из алюминиевых сплавов АМцМ и АМг6М толщиной 1,5...2,5 мм, стального листа 08кп толщиной 1,0 мм. Габариты деталей – 1,2, 1,5, 1,8 и 2,5 метра (рис. 1).



Рис. 1. Изготовленные антенны диаметром 2,5, 1,8, 1,5 и 1,2 метра

Детали, отштампованные по предложенному технологическому процессу, изображены на рис. 2.

В условиях отсутствия в Украине производства листового алюминия актуальным является вопрос замены материала для изготовления зеркал параболических антенн приемопередающих систем. В этой связи были проведены эксперименты



Рис. 2. Изготовленные параболические антенны диаметром 2,5 метра

по гидровзрывной штамповке зеркал антенн из черного металла, в частно-

сти, из стального листа. Из-за трудности с наличием проката листа требуемой ширины, особенно для деталей больших габаритов отработана технология изготовления деталей из сварной листовой заготовки – лист сварен встык и внахлест (рис. 3).

Как показала отработка технологии изготовления и проведенная штам-



Рис. 3. Деталь, отштампованная из сварной заготовки, сталь 08кп

повка деталей из стального листа [3], отличие технологических процессов изготовления деталей из алюминиевого и стального листов состоит в следующем:

– перед операцией вытяжки лист из материала сталь 08кп

необходимо подвергнуть отжигу;

– после предварительной вытяжки полученный полуфабрикат также необходимо отжечь.

Величина потребных зарядов взрывчатого вещества при штамповке зеркала антенны из стального листа выше на 25...30 %, чем при штамповке из листа АМцМ.

При штамповке детали из предварительно сваренного листа установлено, что сварной шов не накладывает каких-либо ограничений на процесс изготовления детали. При этом на рабочей поверхности зеркала антенны не остаётся каких бы то ни было утяжек материала или отклонений от теоретического профиля поверхности, которые бы в дальнейшем влияли на работу приёмо-передающих комплексов.

Для контроля геометрических параметров изготовленных деталей предложен оптический метод. При этом дешёвый и простой в применении способ обладает высокой точностью получаемых результатов. Профиль оболочки измеряется с помощью точного угломерного прибора, который устанавливается на некотором расстоянии от детали и на возвышении, с которого обеспечивается оптическая видимость поверх-

ности детали в требуемом сечении. Измеряются углы между струной, натянутой в плоскости, пересечение которой с контролируемым профилем определяет контролируемую кривую, и проекцией этой струны на поверхность детали.

Методика обработки результатов контроля позволяет перевести результаты угловых измерений в линейные величины при контроле профиля. Точность измерений составляет $\pm 0,01$ мм.

Кроме того, указанный метод измерения позволяет контролировать качество и точность геометрии гидровзрывной штамповочной оснастки непосредственно по изготовленным на этой оснастке деталям.

Результаты обмера зеркал параболических антенн больших габаритов (диаметром 1,8 и 2,5 метра) показали:

- высокую точность геометрии профиля (отклонение от теоретического не более $\pm 0,5$ мм в центральной части рефлектора и не более $\pm 1,0$ мм по краю), что соответствует заданным условиям;
- высокое качество внутренней поверхности.

С изготовленной партией антенн разных диаметров проведены испытания приёмных комплексов на спутниковых системах в различных широтных и климатических регионах и при различных условиях эксплуатации.

Антенны, изготовленные комбинированным способом, показали более высокое качество в сравнении с изделиями, изготовленными традиционными способами.

3. Рекомендации для осуществления натурного технологического процесса

Проведенные серии экспериментов позволили выработать ряд рекомендаций, существенно влияющих на ход технологического процесса изготовления крупногабаритных высокоточных оболочек двойной кривизны. Все рекомендации были условно разбиты на ряд крупных подгрупп:

1. Выбор геометрии оболочки двойной кривизны.

В эту подгруппу объединены геометрические параметры, влияющие на ход технологического процесса:

- диаметр листовой заготовки;
- высота вытяжки полуфабриката на первом технологическом пере-

ходе;

- геометрия борта готового изделия (высота борта и радиусы закругления, угол борта).

2. Выбор геометрии оснастки первого технологического перехода.

В эту подгруппу объединены геометрические параметры оснастки первого перехода, влияющие на ход технологического процесса вытяжки полуфабриката [4]:

- толщина плиты основания и прижимного кольца оснастки первого технологического перехода;
- геометрия прижимного кольца.

3. Выбор геометрии оснастки для гидровзрывной штамповки.

В эту подгруппу объединены геометрические параметры оснастки второго перехода, влияющие на ход технологического процесса калибровки:

- толщина плиты основания и прижимного кольца оснастки второго технологического перехода;
- количество колонок для прижима клиновыми зажимами.

Заключение

1. Разработана новая технология, которая позволяет получать высокоточные детали двойной кривизны больших габаритов. Исследована возможность изготовления оболочек двойной кривизны из сварной листовой заготовки.

2. Предложены методики расчёта оптимальных параметров технологического процесса формообразования оболочек двойной кривизны больших габаритов высокой точности и основных элементов технологической оснастки. Благодаря этому удалось снизить себестоимость изделий на 15...25 %.

3. Экспериментальные исследования энергетических и геометрических параметров разработанного технологического процесса позволили установить, что разница между данными, полученными расчётом, и экспериментальными данными составляет до 5 % для первого технологического перехода и до 20 % для перехода гидровзрывной формовки.

4. Приведенные рекомендации по выбору геометрии оболочек двойной кривизны, пневмостамповочной оснастки и оснастки для гидро-взрывной штамповки дают возможность наиболее правильно спроектировать технологический процесс изготовления высокоточных крупногабаритных оболочек двойной кривизны.

5. Показана возможность изготовления зеркал параболических антенн из более прочных материалов, в частности, из материала сталь 08кп.

6. Разработан типовой технологический процесс гидровзрывной формовки оболочек с предварительной вытяжкой полуфабриката, который, по сравнению с традиционными технологиями формообразования, позволил:

- снизить массу детали и повысить ее точность на 0,2...0,3 мм,
- сократить сроки подготовки производства в 1,5...2 раза,
- снизить себестоимость детали в целом в 1,4...1,6 раза.

Литература

1. Борисевич В.К., Сабелькин В.П., Солодянкин С.Н. Расчет оптимальной нагрузки при штамповке взрывом деталей сложной конфигурации // Импульсная обработка металлов давлением. – Х., 1979. – Вып. 8. – С. 60-64.

2. Сабелькин В.П., Зайцев В.Е. Технология изготовления гидровзрывной штамповкой крупногабаритных листовых деталей двойной кривизны // Кузнечно-штамповочное производство. – 1994. – № 9. – С. 15-16.

3. Сабелькин В.П., Кривцов В.С., Зайцев В.Е. и др. Проведение научно-исследовательских работ по разработке технологии изготовления оболочек двойной кривизны // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ, 1997. – С. 68-72.

4. Сабелькин В.П., Кривцов В.С., Зайцев В.Е., Беланов А.В. Методика расчета оснастки для штамповки деталей двойной кривизны // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ, 1995. – С. 150-155.

Поступила в редакцию 1.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

Ю.А. Невешкин

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ПРОЦЕСС ВЗРЫВНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ

Сделан обзор результатов исследований связанных с использованием энергии взрыва бризантных взрывчатых веществ в стационарном бассейне для объемной штамповки, проводимых в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" ("МИНТ ХАИ"). Предложена модифицированная экспериментальная установка для последующих испытаний.

бассейн, объемная штамповка, взрыв, ударная волна, гидросток, газовый пузырь, отражение, схлопывание, кавитация

В работе [1] для определения величины и характера результирующих сил, действующих на дно бассейна, периода пульсации газового пузыря, а также амплитуды и частоты колебаний фундамента использовалась экспериментальная установка (рис. 1).

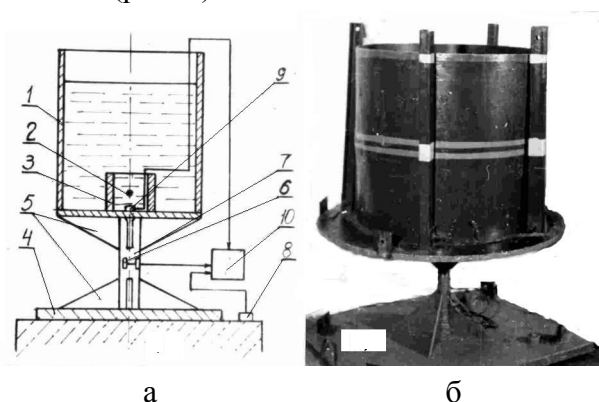


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид установки (б)

Установка представляла собой цилиндрический бассейн радиусом 0,35 м и высотой 0,7 м с передающей средой, зарядом 2 и оснасткой 3. Между днищем бассейна и опорной фундаментной плитой 4 размещалась силоизмерительная вставка 7, оснащенная датчиками 6. К силоизмерительной вставке приварены косынки 5, усиливающие днище и соединяющие ее с

опорной плитой, которая в свою очередь, крепилась к фундаментному блоку. Фундаментный блок выполнен из железобетона в виде куба с размерами $1 \times 1 \times 1$ м.

При исследовании характера и величины результирующих сил, действующих на дно бассейна, установлено, что основной вклад в величину результирующей силы от действия ударной волны вносят отраженные волны от боковых стенок. Величина результирующей силы гидротока от газового пузыря соизмерима с нагрузкой от ударной волны и зависит от столба жидкости над зарядом. При наличии пульсации газового пузыря результирующая сила от его схлопывания может быть больше чем от действия ударной волны и гидротока [1].

На рис. 2 приведена осциллограмма зависимости деформации от времени, записанная при помощи датчика 6.

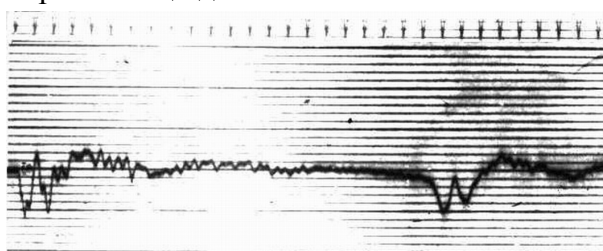


Рис. 2. Осциллограмма зависимости деформации от времени

Дальнейшие теоретические исследования показали, что стационарный бассейн, наполненный передающей средой (водой) можно применять для объемной штамповки (в том числе прессования, выдавливания и т.д.) [2]. В экспериментах использовалась схема непосредственного воздействия днища бассейна на образец через пуансон, т.е. контактного силового воздействия на объект нагружения без разгона бассейна (рис. 3).

Размеры бассейна аналогичны представленному на рис. 1. Емкость имеет возможность перемещаться в вертикальном направлении (вдоль оси бассейна) по направляющим. Между днищем бассейна и фундаментом располагался технологический узел, обеспечивающий действие нагрузки по оси образца и реализующий сложную схему напряженно-деформированного состояния, в которой растекание металла в направлении от центра ограничено боковыми поверхностями закрытого штампа. В

этом случае в заготовке возникают значительные радиальные удельные давления и металл вынужден перемещаться в осевом направлении. Такая схема требует особенно больших удельных давлений деформирования.

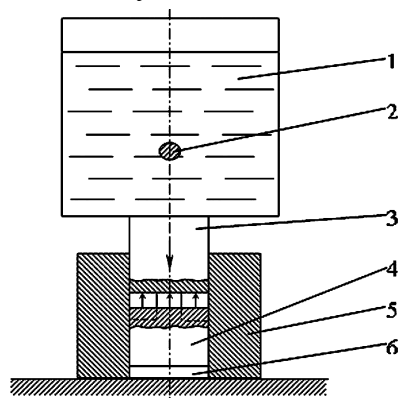


Рис. 3. Экспериментальная установка:
1 – бассейн; 2 – заряд; 3 – пуансон; 4 – образец;
5 – обойма; 6 – вкладыш

Образец 4 помещался внутри металлической обоймы 5, препятствующей его деформации в радиальном направлении. Под образцом установлен вкладыш 6, который не позволяет металлу образца выдавливаться в щели между обоймой и основанием. В экспериментах моделировалась панель с фасонными ребрами - выступами. При взрыве заряда массой 2 г на поверхности образца образовывались ребра высотой 7,2 мм. Равномерность деформации, качество поверхности и разностенность ребер удовлетворительны (рис. 4, а).

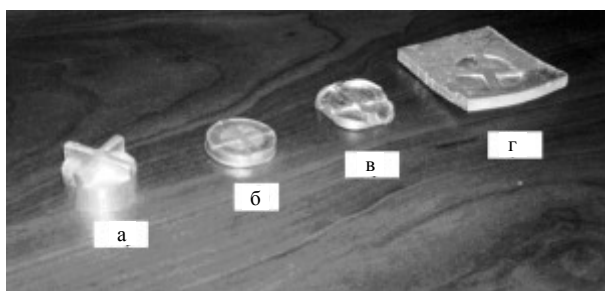


Рис. 4. Образцы после деформирования

При использовании материала АМц, имеющего более высокие прочностные характеристики, ребра получались качественные, но значительно

меньшей высоты (рис. 4, б) при том же заряде. Изменение напряженно-деформированного состояния за счет разрешения радиального движения металла изменяло механизм образования ребер. Выдавливание практически отсутствовало, а формирование ребер происходило только за счет осадки материала, что приводило к неравномерной деформации и даже к разрушению образца (рис. 4, в), а также к короблению листа (рис. 4, г).

Также авторами [2] был оценен коэффициент полезного действия подобных установок, оценочное значение КПД имело величину 18,6%.

Дальнейшие исследования показали, что КПД установки зависит от условий взрывания. Так, при изменении расстояния заряда от дна от 200 мм до 100 мм КПД уменьшается до 14,2%, что говорит о необходимости оптимизации параметров при разработке технологических процессов.

Проверка предложенного упрощенного расчета общего КПД установки, изготовленной по схеме (рис. 5) осуществлялась и при простой осадке образцов [3].

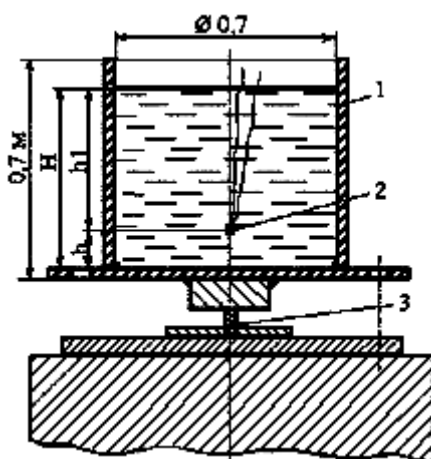


Рис. 5. Установка для осадки и деформирования модельных образцов:

1 – бассейн; 2 – заряд БВВ; 3 – деформируемый образец

В бассейн (размеры бассейна аналогичны представленному на рис. 1) заливали различное количество воды, уровень которой составлял $h + h_1$. Заряд БВВ 2 в виде электродетонатора ЭД8 размещали на различных расстояниях h от дна бассейна. Деформируемый образец 3 диаметром $d_0 = 20$ мм и отношением $\frac{l_0}{d_0} = 1,4$ (l_0 – высота образца) из алюминиевого

сплава Д1 ($\sigma_{\text{в}} = 325$ МПа) размещен под выступом центральной части бассейна. Максимальная высота столба жидкости в емкости не превышала 0,6 м. На рис. 6 представлены образцы, осажденные при различных значениях h и h_1 .

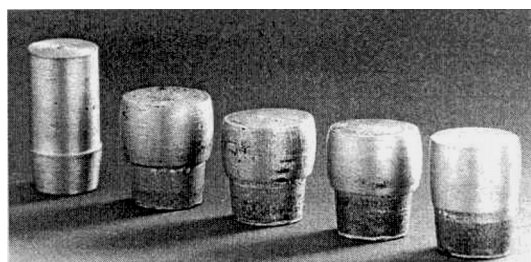


Рис. 6. Образцы из алюминиевого сплава Д1, осажденные на установке по схеме, представленной на рис. 5

В работе [4] приведен метод оценки силовых характеристик технологических установок для объемной штамповки на базе взрывного бассейна. Оценка выполнена с использованием приближенной модели распространения ударной волны в установке, что позволяет оценить только основные закономерности нагружения в процессе штамповки.

Для более тщательного анализа технологического процесса штамповки возникла необходимость в более точных моделях, максимально учитывающих особенности физических процессов, происходящих во взрывных бассейнах. Дальнейшие исследования велись по направлению определения результирующих сил от ударных волн, действующих на дно бассейна, используемого для объемной штамповки [5]. Предложенная методика расчета уже может учитывать особенности физических процессов, происходящих при взрыве зарядов в установках ограниченных объемов. Полученные теоретические зависимости позволяют рассчитать силу, действующую на дно бассейна, для всей положительной фазы давления в ударной волне с учетом основных особенностей распространения волны в цилиндрической емкости в условиях развития взрывных процессов. Расчетные графики силы позволяют производить их аппроксимацию с целью использования при расчете процессов обработки материалов. Универсальность полученных формул позволяет вести оптимизацию силовых характеристик и параметров технологических установок.

При взрыве в ограниченном пространстве, на преграду (например, на донную часть емкости) воздействуют отраженные от стенок и свободной поверхности ударные волны, а также такие явления, которые несут в себе силовое воздействие, как схлопывание газового пузыря и его пульсация, кавитация, возникающая у свободной поверхности и у дна емкости, волны разгрузки, зависящие от формы емкости и ее величины, интерференция и др. факторы [6].

В работе [7] рассмотрена расчетная модель движения гидровзрывной емкости при взрыве в ней БВВ с учетом взаимодействия установки с деформируемой заготовкой. Исследованы характер и величины результирующих сил, действующих на упругую заготовку. Показано, что объект нагружения и установка представляют собой единую колебательную систему, а характер нагружения объекта зависит от ее частотных характеристик. Получено приемлемое соответствие теоретических и экспериментальных данных. Исследования проводились на установке представленной ранее на рис. 1.

Проделанный обзор показывает, что еще многие вопросы взрывного нагружения объемных деталей рассмотрены с большим количеством допущений и упрощений из-за малой изученности. Некоторые вопросы не отражены в существующей литературе.

С целью дальнейшего исследования взрывной объемной штамповки с использованием энергии взрыва БВВ в стационарном бассейне была создана экспериментальная модельная установка. За основу был взят бассейн, используемый в рассмотренных выше установках (рис. 1, 3, 5).

Модельная экспериментальная установка (рис. 7) представляет собой бассейн 1 в виде цилиндра диаметром и высотой по 0,7 м, заполненный передающей средой (вода), в которой помещен заряд бризантного взрывчатого вещества (БВВ) 2. Бассейн может перемещаться в вертикальном направлении под действием возникающих от взрыва БВВ нагрузок или собственного веса по колоннам 3 через втулки 4. Днище бассейна усилено стальным цилиндром 5 диаметром 0,14 м и высотой 0,035 м, а также восьмью, равномерно расположенными по окружности и расходящимися в радиальном направлении от этого цилиндра, элементами из проката квадратного сечения 6. Три колонны расположены равномерно по окружности

и крепятся на столе 7. Между столом и опорной фундаментной плитой 8 размещена силоизмерительная вставка 9, оснащенная датчиками 10. К силоизмерительной вставке приварены косынки 11, усиливающие стол и соединяющие его с опорной плитой, которая, в свою очередь, крепится к фундаментному блоку 12. Блок выполнен из железобетона в виде куба с размерами 1х1х1 м.

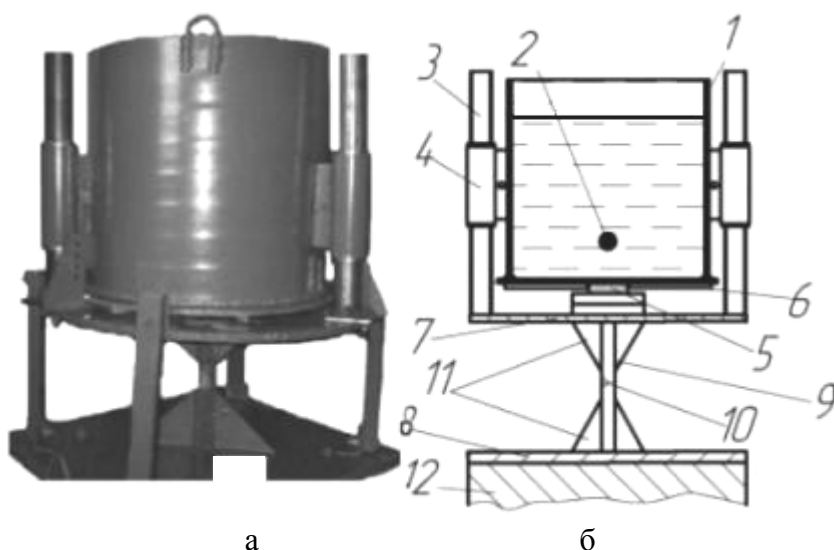


Рис. 7. Модифицированная экспериментальная установка:
а – внешний вид; б – схема

Такая установка характеризуется лучшей центрируемостью бассейна, относительно стола, возможностью последующей доработки, фиксации бочки на нужной высоте и т.д.

Первоначально планируется установить зависимость КПД процесса от высоты подъема бочки (зависимость первоначального расстояния между пуансоном и деталью), определить оптимальные параметры технологического процесса получения отдельных объемных заготовок (значения веса заряда и высоты его расположения в бочке).

Литература

1. Соломяный А.У., Панченко В.Е., Московец В.И. Экспериментальное определение внешней нагрузки гидровзрыва на элементы оборудования //

Импульсная обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. – Х.: ХАИ, 1986. – Вып. 14. – С. 104-109.

2. Шкалова А.В., Борисевич В.К., Коваленко П.И., Соломяный А.У. Применение гидровзрывного оборудования для объемной штамповки // Технологические системы. – К.: НИАТ, 2001. – № 5 (11). – С. 68-70.

3. Шкалова А.В. Определение КПД и других параметров штамповки взрывом по новой схеме нагружения // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением (Москва). – 1999. – № 11. – С. 23-24.

4. Борисевич В.К., Коваленко П.И., Соломяный А.У., Шкалова А.В. Оценка силового воздействия ударной волны на дно гидробассейна в технологических установках для объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением (Москва). – 2002. – № 11. – С. 3-7.

5. Борисевич В.К., Коваленко П.И., Шкалова А.В., Нечипоренко А.В. Расчет осевой нагрузки от ударной волны в гидровзрывной камере установки для объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением (Москва). – 2004. – № 9. – С. 3-5.

6. Борисевич В.К., Коваленко П.И., Шкалова А.В. Оценка влияния свободной поверхности на параметры нагружения дна в гидровзрывных установках // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 7 (23). – С. 171-181.

7. Борисевич В.К., Коваленко П.И., Шкалова А.В., Невешкин Ю.А. Модель движения гидровзрывной емкости при взрыве бризантного взрывчатого вещества // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением (Москва). – 2006. – № 12. – С. 28-32.

Поступила в редакцию 12.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП “Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, Харьков.

С.К. Асланов, А.И. Стручаев

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Украина

КИНЕТИКА ВТОРИЧНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ В ГАЗО-КАПЕЛЬНЫХ СМЕСЯХ И ТЕОРИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ

Выполнено замкнутое теоретическое построение для стационарного распространения детонационного процесса в аэровзвеси жидкого горючего. Произведен теоретический анализ механизма диспергирования поверхности капли под действием аэродинамических факторов, возникающих при ее обтекании потоком газа. Построено уравнение кинетики разрушения капли и дана аналитическая оценка преобладающего диапазона средних размеров капель образующейся вторичной дисперсии.

гетерогенная детонация, вторичное диспергирование, вязкая гидродинамическая неустойчивость

В работе в отличие от предыдущих исследований по идеальной неустойчивости [1, 2], рассмотрена задача вязкой неустойчивости дробления капель в потоке [3, 4].

При прохождении ударной волны по аэровзвеси каплей горючего каждая взвешенная капля будет увлекаться спутным течением газа под действием возникающей аэродинамической силы, которая сообщит ей ускорение W_0 . Обладая инерционностью, капля попадает в условия обтекания газовым потоком, набегаящим на нее со скоростью V_0 (рис. 1).

Пока величина V_0 сохраняет сверхзвуковое значение, перед каплей присутствует соответствующая ударная волна. Малая объемная доля ($\leq 0,1\%$) взвеси горючей жидкости при детонации аэрозоля позволяет отвлечься от рассмотрения взаимодействия соседних частиц и сосредоточить внимание на взаимодействии индивидуализированной капли с окружающим газом.

В таком случае можно пользоваться упрощенной локальной схемой плоского тангенциального течения (рис. 2).

Связывая систему отсчета с движущейся каплей, направим ее оси (x, y) по касательной и нормали к невозмущенной поверхности раздела сред $y = 0$. Местное действие инерционных сил будет обусловлено нормальной составляющей вектора ускорения

$$W = W_0 \cos \phi, \quad 0 \leq \phi < \pi/2.$$

Потоки жидкости ($y < 0$) и газа ($y > 0$) сопрягаются законом совпадения вязкого касательного напряжения на их границе, так, что изображенный на рис. 2 локальный профиль распределения скоростей основного течения характеризуется относительно малым градиентом в жидкости за счет малой вязкости газа.

Проведем анализ предельных случаев, изображенных на рис. 2 пунктирами *a* и *б*.

Первый из них – модель постоянного градиента (ПГ-модель) дает асимптотическое представление истинного профиля вблизи жидкой поверхности и описывает явление масштаба меньше толщины δ пограничного слоя в обтекающем газе ($\lambda/\delta < 1$), где λ – масштаб периодического волнообразования. Для описания масштабов явлений, соизмеримых с δ ($\lambda/\delta \sim 1$), служит вторая асимптотика – модель тангенциального разрыва (ТР-модель), когда локальная скорость газового потока V сохраняет постоянное значение непосредственно до поверхности жидкости. Тем самым величина $V = V(\phi)$ приобретает смысл распределения скорости вдоль поверхности капли при ее обтекании потоком идеального газа. При описании явлений, соизмеримых с δ , необходимо использовать истинный ха-

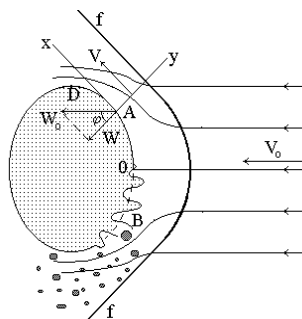


Рис. 1. Картина обтекания крупной капли исходной аэрозвеси (ff – ударная волна)

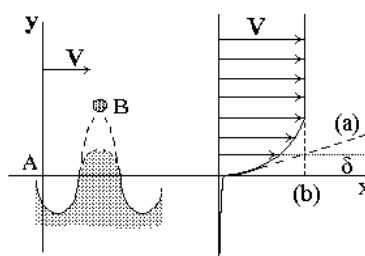


Рис. 2. Локальная схема волнообразования и диаграмма скоростей основного течения

рактен вязкого течения, который включает в себя уменьшение градиента скорости газа до его исчезновения с удалением от капли и поэтому занимает промежуточное положение (сплошная кривая) между двумя предельными моделями. Каждая из них включает область $y < 0$ первоначально неподвижной жидкости с плотностью ρ , вязкостью μ и поверхностным натяжением σ . В случае ПГ-модели к ней примыкает стационарный поток ($y > 0$) идеального газа плотности ρ_g с линейным профилем скорости (yV/δ), а в случае ТР-модели она сопрягается с однородным потоком скорости V . Естественно, что оценку влияния сжимаемости газа имеет смысл сделать лишь во втором случае.

Возмущенные состояния (вязкая жидкость и идеальный газ) складываются из возмущений давления-скорости ($f = 1$) и диффузии вихря ($f = \sqrt{1 - i\omega/k^2\nu}$), где $\nu = \mu/\rho$, а во втором ($y > 0$) – присутствует только возмущение давления-скорости в форме $f = -1$. Сопряжение состояний на границе раздела $y = 0$ осуществляется кинематическими условиями совпадения нормальных составляющих скоростей сред и самой границы

$$V'_{1y} - jV \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = V'_y = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (1)$$

и динамическими законами непрерывности нормального и касательного напряжений

$$\begin{cases} p'_1 - \rho_g W \varepsilon = p' - \rho W \varepsilon + 2\mu \frac{\partial V'_y}{\partial y} - \sigma \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(V'_y - \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) + \frac{\partial V'_x}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $j = 0$ и $j = 1$ соответствует ПГ- и ТР-моделям, V_x, V_y - компоненты скорости, нижний индекс «1» отвечает области газового течения, штрихом обозначены возмущения.

Подстановка решений для возмущений в (1), (2) дает уравнение для определения собственных значений ω рассматриваемой задачи:

$$\begin{aligned}
& (\gamma+1)u^2 + (3\beta + i\gamma q_j V_s)u + 2\beta^2(1 - \sqrt{1+u/\beta}) = \alpha_j; \\
& q_j = 2j + (1-j)/\delta_k; \quad \alpha_j = \alpha + j\gamma V_s^2; \quad \alpha = 1 - \gamma - \sigma k^2/\rho W; \\
& u = -i\omega/\sqrt{kW}; \quad \beta = vk^{3/2}/\sqrt{W}; \quad V_s = V\sqrt{k/W}; \quad \delta_k = k\delta; \quad \gamma = \rho_g/\rho.
\end{aligned} \tag{3}$$

Вблизи экватора капли Д ($\phi \sim \pi/2$) ускорение $W = W_0 \cos(\phi)$ значительно уменьшается, и главная роль принадлежит скорости обтекания V , что требует пересчета безразмерных величин:

$$u_{eq} = -i\omega/kV; \quad \beta_{eq} = kv/V; \quad \alpha_{jeq} = (1-\gamma)W/kV^2 - \sigma k/\rho V^2 + j\gamma, \tag{4}$$

уравнение (3) сохраняет свой вид, если положить $V_s = 1$. Решение уравнения (3) для обеих предельных моделей ($j = 0; 1$) может быть получено асимптотически при $\beta \ll 1$ и $\beta \gg 1$ в степенном виде:

$$u_{j0} = \sqrt{\alpha_j} - \frac{3}{2}\beta - \frac{1}{2}i\gamma q_j V_s \left(1 - \frac{3}{2}\frac{\beta}{\sqrt{\alpha_j}}\right) + O\left(\beta^{3/2}\right); \tag{5}$$

$$u_{j\infty} = \frac{\alpha_j}{2\beta} \left(1 - \frac{5}{16}\frac{\alpha_j}{\beta^2}\right) - \frac{1}{4\beta^2}i\gamma q_j V_s \alpha_j \left(1 - \frac{15}{16}\frac{\alpha_j}{\beta^2}\right) + O\left(\frac{1}{\beta^5}\right), \tag{6}$$

где можно отбросить величину $\gamma \sim 10^{-3}$ и члены $O(\gamma^2)$. При $V_s = 1$ (5) и (6) описывают решения в экваториальной области параметров (4). Из положительности вещественной части ($-i\omega$), т.е. $\alpha_j > 0$ вытекают неравенства:

$$k < k_j; \quad k_j = j\rho\gamma V^2/2\sigma + \sqrt{(j\rho\gamma V^2/2\sigma)^2 + \rho W/\sigma}, \tag{7}$$

поскольку $k > 0$ ($k_0 < k_1$). Его величину, соответствующую асимптотическому пределу $\beta = 1$, обозначим

$$k_* = (W/v^2)^{1/3}; \quad \beta(k_*) = 1. \tag{8}$$

При распространении детонации в топливном аэрозоле слабовязких жидкостей капли горючего приобретают за лидирующим фронтом ускорения $W_0 \sim 10^6 \div 10^7 \text{ м/с}^2$ и скорости обтекания $V > 10^3 \text{ м/с}$ и, согласно (7) и (8), реализуется случай $k_0 < k_* < k_1$. Тогда из характера поведения асимптотик (5) и (6) неустойчивость ПГ-модели ($j = 0$) может иметь место только в случае $\beta \ll 1$, а для ТР-модели ($j = 1$) при обеих асимптоти-

ках. Однако вторая асимптотика $k \gg k_*$ для ТР-модели содержит в себе неустойчивость, которая связана с характерным размером $\lambda \sim 1/k \ll 1/k_* \approx 10^{-6}$ м. Этот размер оказывается меньше толщины пограничного слоя δ в обтекающем каплю газе и оценивается с учетом сферичности капли как:

$$\delta \cong 2,5\sqrt{v_1 d_0 / V_0}, \quad v_1 = \mu_g / \rho_g, \quad V \approx 3/2 \cdot V_0 \sin(\phi), \quad (9)$$

Для реальных значений $v_1 \approx 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ и $d_0 \sim 1 \text{ мм}$ выражение (9) дает $\delta \sim 9 \cdot 10^{-6}$ м, что намного превосходит $1/k_*$ и характерный размер λ , и свидетельствует о непригодности асимптотического подхода $\beta \gg 1$ при анализе неустойчивости ТР-модели. Приемлемой остается асимптотика $\beta \ll 1$ ($k \ll k_*$) в обеих моделях ($j = 0; 1$), могущих претендовать лишь в качестве предельных оценок с двух сторон, поскольку масштаб $1/k_0$ соизмерим с величиной δ . Вблизи экватора капли $\phi \sim \pi/2$. и реализуется случай $k < k_{*eq} = V/v$. когда возможна неустойчивость лишь асимптотики $\beta_{eq} \ll 1$. Для вязких жидкостей неустойчивости обеих моделей и асимптотик становится возможной для случая $k_* < k_0$.

При дозвуковых значениях местной скорости обтекания капли V давление в потоке газа над выпуклостями волнообразования **В** будет убывать, а над впадинами **А** – нарастать за счет соответствующего ускорения и замедления газового потока. Это приведет к дальнейшему вытягиванию всплесков жидкости и углублению впадин. В сверхзвуковой зоне, возможной вблизи экватора капли **Д** (рис. 1), вследствие торможения потока на выпуклостях возникнут нестационарные тройные ударно-волновые конфигурации, которые будут дробить поверхностный слой жидкости.

Сформулированные требования максимума дают следующие три условия ($l = 0; 1; 2$) для определения диапазона наиболее вероятных чисел k :

$$dF_l^j / dk = 0; \quad d^2 F_l^j / dk^2 < 0, \quad (10)$$

где $F_0^j = \text{Re}(-i\omega)$; $F_1^j = k \exp(F_0^j \tau_{jm})$; $F_2^j = \text{Re}(\omega)$ соответственно для инкремента нарастания амплитуды возмущений, крутизны профиля волнообразования и частоты колебаний.

Действительно, внутри области значений k между максимумами $k = k_{ml}^j$ уменьшение одной из величин $F_l^j(k)$ компенсируется увеличением другой, сохраняя тем самым относительно благоприятные условия для отрыва вторичных капелек, а вне этих интервалов тенденция к уменьшению является общей для F_l^j .

Рассмотрим случай детонации взрывозвеси горючего слабовязкой жидкости (5). Из нее вытекает, что главный член частоты $F_2^j(k)$ не зависит от k для ПГ-модели и является линейно возрастающей функцией для ТР-модели, искать решение k_{ml}^j уравнения (10) для максимума функций $F_l^j (l=0;1)$ из представления (5) асимптотически по степеням параметра $b = \sqrt{\rho k_{m*}^j / \sigma}$, где

$$k_{m*}^j = j \gamma \rho V^2 / 3\sigma + \sqrt{(j \gamma \rho V^2 / 3\sigma)^2 + \rho W / 3\sigma} < k_j \quad (11)$$

точка максимума F_0^j при $b=0$ ($v=0$). В результате можно найти:

$$k_{ml}^j = k_{m*}^j \left[1 + l A_0^j - \left(3\sqrt{2-B^j} / (3-B^j) - l A_1^j \right) b + \dots \right]; \quad B^j = j \rho \gamma V^2 / \sigma k_{m*}^j, \quad (12)$$

где $A_0^0 \approx 0,36$; $A_1^0 \approx 1,25$; $A_0^1 \approx 0,21$; $A_1^1 \approx 0,75$. Величина A_1^0 выражается через A_0^0 , которая является корнем некоторого иррационального уравнения. Аналогично находят A_0^1, A_1^1 , причем, $2-B^j \sim \alpha_j(k_{m*}^j) > 0$, поскольку выражение (11) всегда удовлетворяет условию неустойчивости (7). Таким образом, В случае ПГ-модели обтекания ($j=0$) наиболее вероятна локальная реализация промежутка неустойчивых волновых чисел

$$k_{m0}^0 < k < k_{m1}^0, \quad (13)$$

удовлетворяющего требованию асимптотики $k \ll k_*$ для практических параметров.

В случае ТР-модели ($j=1$) обе максимальные точки $k_{ml}^1 \gg k_*$ располагаются за пределами асимптотической области, так что внутри нее обе функции $F_l^1(k)$ ($l=0;1$) будут возрастающими. Для отрыва вторичных

капель с поверхности исходной благоприятна правая зона интервала, допустимого асимптотикой $k \ll k_*$. Увеличение интенсивности сил инерции в виде возрастающей функции частоты $F_2^1(k)$ колебательной неустойчивости позволяет ослабить последнее неравенство и совместно с (13) принять в качестве двусторонней оценки для доминантного диапазона локальных (по ϕ) параметров разрушения капли

$$k_{m0}^0 < k < k_* . \quad (14)$$

Несмотря на преимущество левой части этой области в силу асимптотики $k \ll k_*$, удаление от границы k_{m0}^0 усиливает физическую адекватность ПГ-модели. Вблизи экватора капли, где приемлема асимптотика $\beta_{eq} \ll 1$, ПГ-модель непригодна для объяснения дробления, обеспечивая только неустойчивость слишком длинноволновых возмущений. Для ТР-модели имеется промежуток между максимумами F_0^1 и F_1^1 , однако главный член левой границы $k_{m*}^{leq} \approx 1,5\gamma\rho V_0^2/\sigma \approx 5 \cdot 10^7$ 1/м отвечает масштабу $\lambda \sim 1/k \approx 2 \cdot 10^{-8}$ м $\ll \delta$. Следовательно, адекватность модели, если и возможна, то лишь начиная с $\lambda \sim \delta$, не добавляя ничего нового к найденному диапазону (14). Осреднение интервала (13), как это сделано в [5], дает для границ неравенства $\lambda_{m0}^0 < \lambda < \lambda_*$, диапазон среднего значения доминантной волны, позволяющего оценить среднеобъемный размер вторичной дисперсии

$$6\left(\frac{v^2}{W_0}\right)^{1/3} < \{\langle \lambda \rangle\} < 8\sqrt{3}\left(\frac{\sigma}{\rho W_0}\right)^{1/2} \left[1 + \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt[4]{3}} \left(\frac{\rho W_0}{\sigma^3}\right)^{1/4} v \right]. \quad (15)$$

Величина скорости убыли массы отдельной исходной капли аэрозоля $m(t)$ оценивается средним значением за промежуток времени Δt

$$dm/dt = -A(t)(\Delta m/\Delta t), \quad (16)$$

где $A(t)$ – некоторая корректирующая функция.

Предполагая отрыв капелек с поверхности послойным, в качестве Δt естественно использовать время срыва слоя массой $\Delta m \approx 2\pi R^2 \rho d_l$. Тогда масштаб промежутка Δt можно оценить характерным временем развития

неустойчивости поверхностного волнообразования $t_u = 1/F_0^j(k)$ для доминантного диапазона (15):

$$\langle t_u^0 \rangle = \frac{1}{2\pi k} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt[4]{2}} \frac{\Gamma^2(1/8)}{\Gamma(1/4)} \left(\frac{\rho}{3\sigma W_0} \right)^{1/4}, \quad (17)$$

где $\Gamma(\xi)$ – гамма-функция.

Во введенной расчетной схеме можно применить закон Срезневского для линейного изменения площади поверхности S испаряющейся капли [6], понимая под S площадь диспергируемой передней стороны поверхности капли при средней по времени диспергирования скорости убывания ее площади a_S и времени полного разрушения капли t_b ($R_0 = R(0)$, $R(t_b) = 0$):

$$dS/dt = -a_S = \text{const} \quad \text{или} \quad R^2/R_0^2 = 1 - \tau, \quad \tau = t/t_b. \quad (18)$$

Подставляя последнее в (16), получим следующее уравнение:

$$dm/dt = -Bm_0\tau(1 - \tau); \quad B = 3A_1(d_l/d_0)(t_b/\langle t_u \rangle), \quad m_0 = \pi d_0^3 \rho / 6$$

После интегрирования и удовлетворения условий $m(0) = m_0$ и $m(t_b) = 0$ находим, что $B = 6$, и окончательно выражаем закон диспергирования капли в скоростном потоке газа

$$m/m_0 = 1 - \tau^2(3 - 2\tau); \quad t_b/\langle t_u \rangle = 2d_0/(A_2\langle \lambda \rangle), \quad A_2 = (A_1/n)(d_l/d_\lambda). \quad (19)$$

Таким образом, полученная теоретическая закономерность (19) хорошо совпадает с известной эмпирической зависимостью [7]:

$$m = 0,5m_0(1 + \cos(\pi\tau)).$$

Для оценки величины коэффициента A_2 можно воспользоваться данными измерений времени t_b . Увеличение вязкости жидкости должно приводить к снижению скорости диспергирования капли (16), т.е. к уменьшению значения множителя A_1 . Увеличение же при этом размера $d_l \sim d_\lambda \approx (\langle \lambda \rangle / n)$ согласно (15) будет компенсировать изменение A_1 , так что произведение $A_1 d_l = A_2 \langle \lambda \rangle$, а значит, отношение $t_b/\langle t_u \rangle$ можно считать практически не зависящим от вязкости. Промежуток индукции начала разрушения капли пропорционален характерному времени нарастания амплитуды неустойчивого волнообразования $\langle t_u \rangle$. Нетрудно убедиться,

что оба конца доминантного интервала волновых чисел (14) т.е. обе модели $j = 0; 1$ обеспечивают возрастание масштабом вязкости. Тем самым предложенный позволяет теоретически объяснить соответствующую зависимость промежутка индукции и время, как известная модель срыва пограничного приводит к обратной зависимости этих величин.

Применим одномерную расчетную схему для химических процессов и термо-газодинамической детонационной зоны протяженностью L , стационарно распространяющейся по взрывчатке со скоростью D . Кинетика задавалась в виде задержки воспламенения по закону Аррениуса $\tau_{ch} = B_{ch} \exp(E/R \cdot T_1)$, где E – энергия активации, T_1 – среднеобъемное значение температуры.

С учетом сделанных упрощений в релаксационной зоне будем иметь течение двухфазной, пятикомпонентной двухскоростной и двухтемпературной реагирующей среды. Система уравнений для расчета структуры этого течения в координатах x , отсчитываемых относительно фронта детонации, аналогична приведенной в [7]. Задача о стационарном распространении детонации математически замыкается обязательным требованием, чтобы поток газовой фазы имел возможность достигнуть звуковой скорости ($M = 1$) с дальнейшим переходом в сверхзвуковую область. Собственные значения задачи будут служить в качестве искомых величин скорости D самоподдерживающихся режимов детонации.

Выполненный расчет течения в детонационной зоне не учитывал затраты энергии на работу отрыва вторичных капелек и их разгон до скорости газа и перемешивания с окислителем, потери на стенках трубы. В результате этого из всех возможных самоподдерживающихся режимов в переходной области следует ожидать реализации прежде всего режимов с наименьшей скоростью распространения D . Теплоотвод же в стенки трубы будет наиболее низким при минимальной протяженности $L_{\min}$ детонационной зоны. Противоборство этих тенденций окончательно выделит весьма узкий диапазон оптимального стационарного режима для каждого

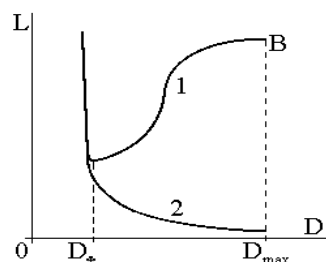


Рис. 3. Вид зависимостей: $1 - L(D)$, $2 - x_m(D)$ для $A_1 = \text{const}$

фиксированного значения параметра A_2 . В силу чрезвычайно резкого подъема кинетической ветви кривых $L(D)$, т.е. слева от точек $L_{\min}$ (рис. 3), указанный диапазон скоростей детонации будет сосредоточен в малой окрестности значения $D_* = D(L_{\min})$. Численный подбор неопределенного параметра A_2 (в пределах (1 ... 3)) позволяет обеспечить попадание теоретически найденного диапазона величин скорости детонации взрыва горючего на соответствующие экспериментальные значения [7] во всех трех рассмотренных случаях самоподдерживающегося режима распространения.

Литература

1. Taylor G.G. Generation of ripples by wind blowing over a viscous fluid // Scientific Papers of G.G.Taylor. – Cambridge University Press. – 1963. – P. 244-254.
2. Асланов С.К., Гирин А.Г. К построению теории детонации аэрозолей // Физика горения и взрыва. – 1988. – № 4. – С. 101-109.
3. Aslanov S.K. Construction of the explosion waves theory for combustible aerosols // J. Aerosol Sci. – 1994. – № 25 (Supp 1.1). – S. 44-45.
4. Гельфанд Б.Е. Современное состояние и задачи исследования детонации в системе капли жидкости-газ // Детонация: Мат. IV Всес. симпозиума по горению и взрыву – М.: Наука, 1977. – С. 28-39.
5. Асланов С.К. Гидродинамическая неустойчивость и математическое моделирование процесса механического разрушения // Вісник ОДУ. – 2000. – Т. 5, вип. 3 (фіз.-мат. науки). – С. 94-102.
6. Sreznevsky B.I. // Journal of Russia Phys.-Chemical Society. – 1882. – № 14. – P. 420-483.
7. Aslanov S.K., Girin A.G. Modelling of spray detonation combustion processes // Archivum Combustionis. – 1991. – Vol. 11, № 3-4. – P. 205-217.

Поступила в редакцию 17.04.2007

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. С.Д. Каим, Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса.

А.Ю. Комаров, В.В. Третьяк, В.Я. Зорик, И.В. Клыгина

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ ПРИЕМОВ

Рассмотрена проблема удара заготовки по матрице в пятне контакта. Обосновано применение специальных приемов при импульсной штамповке. Предложены основные схемы этих приемов. Даны рекомендации по применению специальных приемов при штамповке взрывом.

импульсная штамповка взрывом, этапы деформирования, пятно контакта, специальные приемы

В настоящее время импульсные технологии получили широкое распространение в машиностроении и авиационной промышленности. Существуют отдельные технологические рекомендации для определенных схем штамповки, сборки, сварки и т.д. Однако эти сведения носят отрывочный характер и не охватывают полностью все возможности применения импульсных источников энергии [1,2].

В частности, остается практически не изученным вопрос использования и моделирования процесса на ранней стадии проектирования технологического процесса импульсной технологии с использованием специальных приемов. Отсутствуют практические рекомендации использования специальных приемов в конкретных ситуациях для высокоэнергетических методов штамповки, хотя именно их использование приводит к расширению технологических возможностей методов, уменьшению энергозатрат, увеличению срока службы оснастки, дает возможность получения изделий с заданным распределением утонений и остаточных напряжений по поверхностному слою и сечению детали.

Рационально весь процесс деформирования разделить на 3 этапа (рис. 1) и рассматривать их изолированно, не учитывая влияния предыстории деформирования. Максимальную деформацию можно определить интегрально, как результат наложения деформаций па трех этапах деформирования.

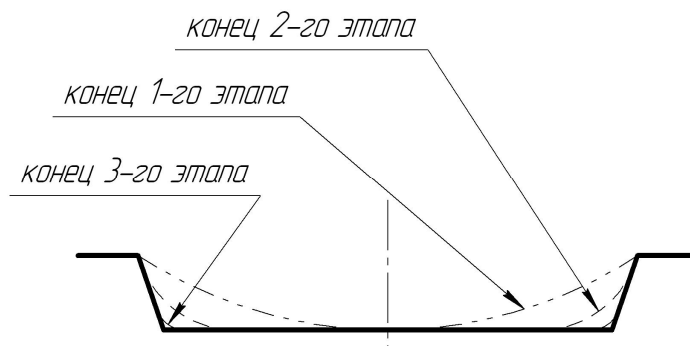


Рис. 1. Этапы деформирования заготовки при импульсной штамповке

1 этап. Деформирование свободно провисающего участка материала до касания куполом дна матрицы.

2 этап. Растекание купола по дну матрицы. Этот этап заканчивается в момент образования пространственного равностороннего угла.

3 этап. Вытяжка и калибровка угловой зоны.

Исходя из геометрического анализа элементов панели, можно отметить, что практически для всех элементов можно выделить наличие хотя бы одного из трех этапов деформирования.

При наличии второго или третьего этапов после касания поверхности матрицы и заготовки происходит выключение пятна контакта из процесса деформирования вследствие действия больших сил трения. Это создает трудности в случае необходимости получения равного распределения утонений и остаточных напряжений в детали. После выключения части заготовки из процесса действие энергии формообразования целиком переносится на свободно провисающие участки заготовки (в данном случае угловая зона), вследствие чего они получают максимальную деформацию и минимальную толщину стенки. При неблагоприятных обстоятельствах (малая пластичность материала, сложный рельеф, большая глубина вытяжки) возможен брак из-за разрыва материала.

Такой процесс деформирования накладывает серьезные ограничения на размеры штампуемых деталей: относительную высоту, угол наклона стенки, относительный радиус сопряжения дна со стенкой.

Специальные приемы позволяют полностью снять или существенно снизить эти ограничения.

На рис. 2 изображены основные схемы применения специальных приемов при высокоэнергетической штамповке.

Применение в качестве специального приема набора материала (рис. 2, д) позволяет предварительно вытянуть листовую заготовку до получения необходимой площади с равномерным распределением утонений, а на втором переходе получить заданную конфигурацию детали путем растекания этой поверхности по матрице.

Использование присоединенной массы (рис. 2, е) позволяет перераспределить скорости движения отдельных участков заготовки при импульсной штамповке. Преобразующие экраны (рис. 2, з) решают ту же задачу, но путем торможения определенных участков, а не разгона, как в предыдущем случае.

Разделение одного заряда на несколько менее мощных (рис. 2, а) приводит к более эффективному использованию высвобождаемой при взрыве энергии, а значит, способствует энергосбережению и не приводит к чрезмерному росту остаточных напряжений в зоне расположения заряда.

Использование при штамповке взрывом отражателей (рис. 2, г) позволяет манипулировать объемом и формой взрывной камеры. Этот специальный прием дает возможность управления направлением энергии взрыва и, как следствие, управление деформированием заготовки. Кроме того, это приводит к уменьшению заряда за счет эффективного использования вторичных (отраженных) ударных волн.

Использование подкладок в качестве спецприема (рис. 2, ж) дает возможность получать различные формы деталей с использованием одной матрицы, что приводит к значительному удешевлению оснастки.

Получение детали со сложным рельефом иногда целесообразно проводить в несколько этапов (рис. 2, и): формировать генеральную простую форму с помощью не импульсного деформирования металлов, а местный рельеф (рифты, пуклевки и т.д.) получать импульсной штамповкой.

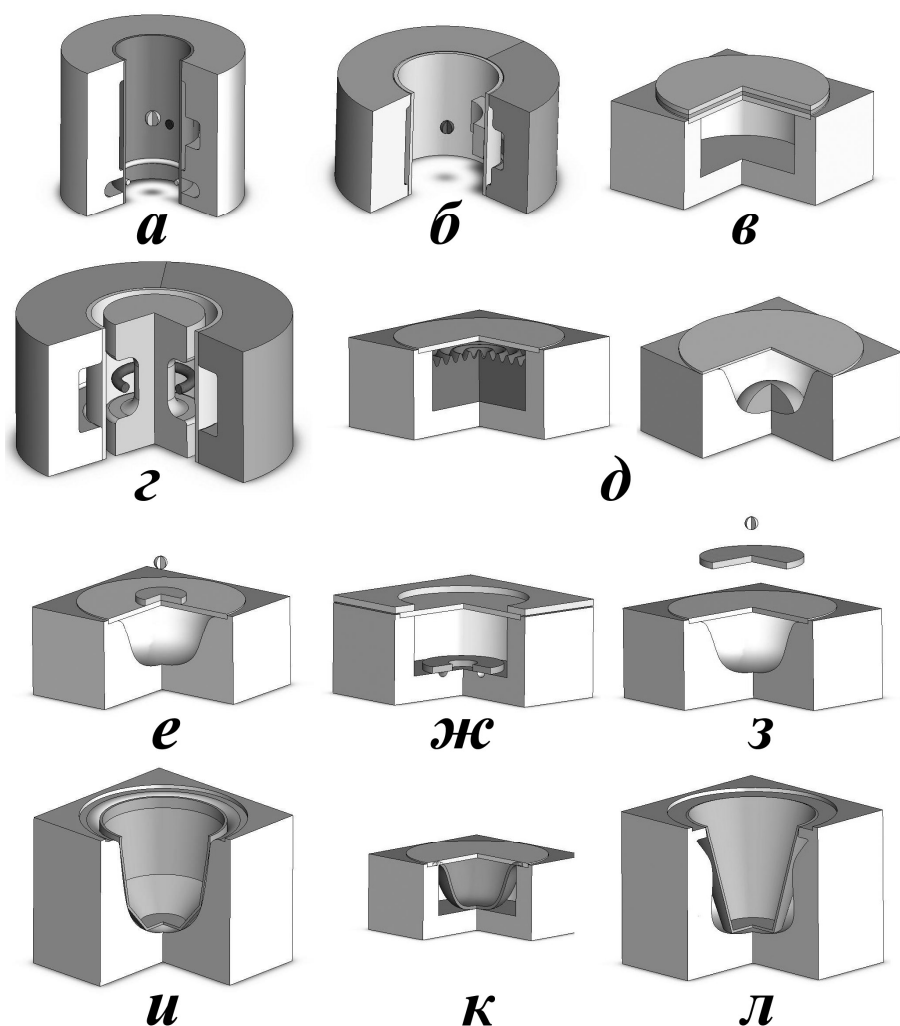


Рис. 2. Основные схемы специальных приемов:

- а – комбинированный заряд;
- б – кумулятивная выемка;
- в – обкладки;
- г – отражатель;
- д – набор материала;
- е – присоединенная масса;
- ж – подкладки;
- з – преобразующий экран;
- и – пространственная заготовка;
- к – технологические окна;
- л – скользящий торец

Штамповка со скользящим торцом (рис. 2, л) позволяет избежать опасных утонений в зоне крепления заготовки, кроме того, в процессе деформирования в таком случае участвует весь материал. За счет правильно подобранной заготовки и отсутствия жесткого защемления можно добиться заданного распределения напряженно-деформированного состояния в детали.

Использование обкладок (рис. 2, в) позволяет варьировать деформирование заготовки за счет изменения пластичности обкладок, их материала и толщины. Так, при необходимости штамповать очень пластичный материал можно достичь необходимых утонений и глубины вытяжки обкладками из менее пластичного материала. Следует заметить, что деформации обкладок и заготовки различаются.

Специальные приемы позволяют значительно снизить максимальные деформации, что существенно при выполнении технических требований, предъявляемых к детали.

Литература

1. Борисевич В.К. Тенденции и проблемы развития импульсных технологий // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і літакобудуванні: Тематичний збірник наукових праць. – Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія, 2002. – С. 16-20.
2. Борисевич В.К., Зорик В.Я. Совмещение методов импульсной обработки при закреплении труб в трубных досках // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сборник научных трудов. – Х.: Госуд. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2000. – Вып. 22 (5) – С. 94-102.

Поступила в редакцию 10.03.2007

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

В.К. Борисевич, А.Г. Нарыжный, С.И. Молодых

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«ХАИ», Украина*

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕДАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ И ТОЧНОСТЬ ДЕТАЛИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ШТАМПОВКЕ

Статья посвящена анализу влияния передающей среды на процесс деформирования и образования окончательных размеров, а также на качество и образование дефектов тонкостенной детали при импульсной ударной штамповке. Слой передающей среды моделируется как распределенная присоединенная к деформирующейся заготовке масса, в которой отсутствует собственное НДС. Результаты получены с помощью численного компьютерного моделирования по методу Уилкинса процесса деформирования осесимметричной упругопластической пластины с присоединенными массами при ударе о жесткую матрицу. Для моделирования использована ограниченная версия пакета LS-DYNA. Варьируется величина давления на заготовку и толщина слоя передающей среды. Раскрыт механизм, основные этапы и факторы деформирования заготовки и образования детали, в том числе дефектов типа недоштамповки и пучности.

импульсная штамповка, точность детали, моделирование, удар, остаточные деформации

Выбор и обоснование оптимальных технологических параметров, обеспечивающих качество и точность детали – нерешенная до конца задача проектирования техпроцессов импульсной штамповки. Системной основой разработки рекомендаций по проектированию техпроцессов штамповки является исследование закономерностей и особенностей деформирования заготовки в специфических условиях при действии различных факторов [1, 2]. При традиционной штамповке деформирование заготовки определяется двусторонним ограничивающим действием жесткой штамповой оснастки, что делает исследование кинетики образования детали почти чисто геометрической задачей. При импульсной штамповке заготовка испытывает со стороны оснастки лишь одностороннее действие, что оставляет свободу ее деформирования в сторону от оснастки. При таком спосо-

бе управления деформированием большее значение имеют учет свойств материала заготовки и законы деформирования [3]. Очевидно, возможны два рода дефектов формы детали:

1) непроштамповка, когда заготовка не входит в контакт с формующей поверхностью оснастки;

2) значительный рефлекс, когда заготовка в результате удара по формующей поверхности матрицы получает значительный импульс и отделяется от нее после удара (рис. 1).

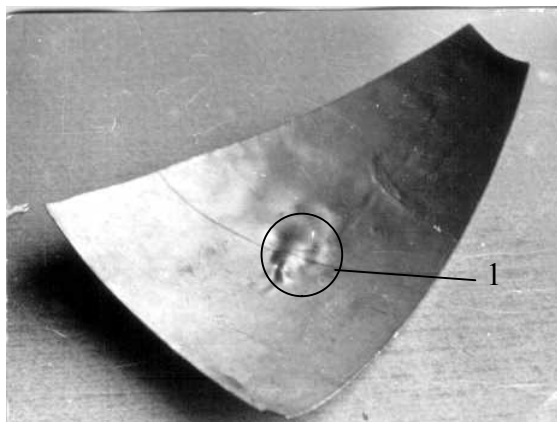


Рис. 1. Сегмент сферического днища с дефектом в виде пучности (1)

С практической точки зрения необходим поиск факторов и параметров, препятствующих дефекту второго рода. При использовании жидкой или эластичной передающей среды, очевидно, при обращении движения заготовки вследствие удара, среда будет оказывать инерционное сопротивление такому движению. Целесообразно изучить

влияние передающей среды на деформирование, окончательную форму и точность детали.

При исследовании кинетики образования детали оказывается, что внешние факторы, параметры и условия часто вызывают деформации не непосредственно и тотчас, а в превращенном и опосредованном динамическими процессами виде. Окончательные размеры и форма детали есть накопленный результат остаточных деформаций заготовки, образующихся на разных этапах, чередующихся друг с другом, под действием различных внутренних факторов. Процесс формирования окончательных размеров детали качественно и пространственно неоднороден и протекает во времени с различной интенсивностью [3]. Поэтому важно проводить исследование процесса деформирования заготовки в его реальной сложной пространственно-временной структуре, с учетом смены характерных этапов и

факторов, механизмов образования деформаций, различной интенсивности и их взаимной обусловленности.

Статья посвящена теоретическому анализу процесса ударного деформирования заготовки с учетом влияния передающей среды. Предполагается, что собственным напряженно-деформированным состоянием (НДС) передающей среды можно пренебречь, ее влияние на НДС заготовки сказывается во время ускоренного обратного движения заготовки в результате удара о матрицу, то есть основное значение играет свойство инерции некоторого слоя среды. В связи с этим среда рассматривается как распределенная присоединенная масса, величина которой определяется толщиной слоя.

1. Объект и метод исследования

Рассмотрена осесимметричная технологическая система гидродинамической штамповки метанием в матрицу (позиция 3, рис. 2) заготовки в виде круглой пластины (позиция 2). Заготовка выполнена из алюминиевого сплава типа АМГ с характеристиками: модуль упругости второго рода $G = 2,6 \times 10^{10}$ Па, модуль объемного сжатия $M = 6,9 \times 10^{10}$ Па, предел текучести $\sigma_T = 1,6 \times 10^8$ Па, модуль линейного деформационного упрочнения $\eta = 2,4 \times 10^7$ Па, плотность $\gamma = 2700$ кг/м³. Размеры заготовки: начальный радиус $R = 136$ мм, толщина $\Delta = 4$ мм. Матрица считается недеформируемой, ее глубина $H = 45$ мм. Присоединенные массы соответствуют цилиндрическому слою (позиция 1), для определенности, воды толщиной

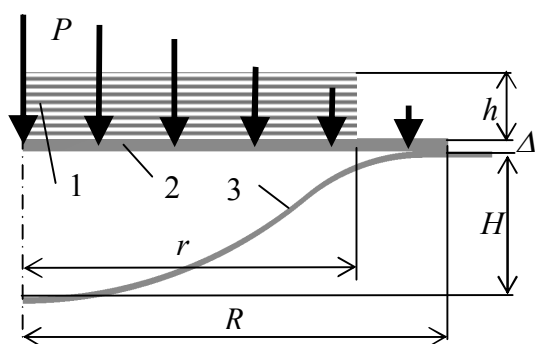


Рис. 2. Технологическая система

толщиной h и радиальным размером $r = 101,5$ мм. Давление на поверхность заготовки определяется в предположении взрыва точечного заряда по формуле

$$P = K p_0 \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \cos\left(\frac{\pi \rho}{R}\right), \quad (1)$$

где K – варьируемый множитель; $p_0 = 1,123 \times 10^9$ Па – расчетная ам-

плитуда давления; t – время; θ – характеристическое время; ρ – радиальная координата точки приложения давления ($0 \leq \rho \leq R$).

Соответствующая нелинейная осесимметричная нестационарная ударно-контактная задача упруго-пластичности с большими перемещениями решается с помощью ограниченного пакета LS-DYNA версия 971 [4] явным конечно-разностным методом Уилкинса. Рассмотрены 3 варианта технологических систем с различными толщинами слоя передающей среды (0, 10 мм и 100 мм, соответственно, варианты 1, 2 и 3). Для каждого варианта варьируется амплитуда давления с целью поиска сочетания параметров модели, минимизирующих величину отклонения размеров детали от размеров штамповой поверхности матрицы.

Для дискретизации заготовки использовано 1900 четырехугольных ячеек и 2101 узел, в 132 из них заданы присоединенные массы. При дискретизации не использовалось предположение о прямых нормалях, которое неприменимо при анализе ударных процессов пластического деформирования [3].

Для решения использован компьютер с процессором Athlon 64 3000+ с частотой 1,8 ГГц. Потребный объем оперативной памяти 287770 Б, шаг дискретизации по времени из соображений устойчивости процесса решения равен $5,14 \times 10^{-8}$ с. Длительность процесса 0,001 с, длительность решения задачи на компьютере 29 с.

2. Результаты и обсуждение

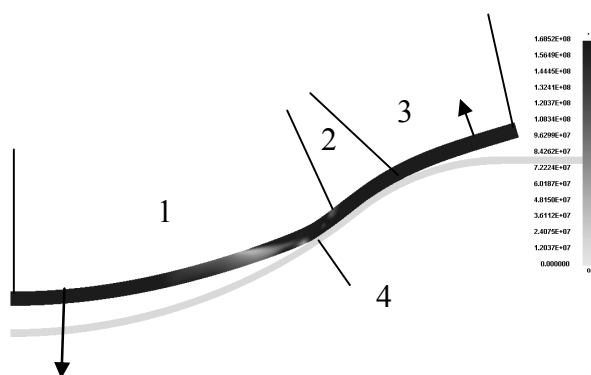


Рис. 3 Характерные зоны деформируемой заготовки

На рис. 3 показана картина распределения интенсивности напряжений в заготовке, штампуемой без участия передающей среды, в момент времени 0,00027 с. Плотность тона соответствует величине интенсивности

напряжений, максимальное значение которой равно $1,617 \times 10^8$ Па. Стрелками показано преимущественное направление движения точек заготовки. Зона 1 соответствует свободному безударному деформированию заготовки под действием давления. Зона 2 соответствует прилеганию заготовки к поверхности матрицы. На границе зон 1 и 2 наблюдается локальный очаг пластичности 4, движущийся справа налево и сверху вниз. Зона 3 соответствует отрыву заготовки от поверхности матрицы. Очаг пластичности, представляющий собой концентрическую тороидальную зону, соответствует волне изгиба, возникающей при ударе заготовки по матрице. Перемещаясь от периферии пластины к центру, очаг пластичности принимает в момент удара центральной части форму сплошной области с повышенным значением интенсивности напряжений, равным $1,634 \times 10^8$ Па. При ударе о матрицу материал в очаге пластичности получает импульс и начинает обратное движение. В силу конечности (по энергии и времени действия) удара как источника пластичности в результате пластической диссипации энергии происходит скорый переход к упругому характеру движения заготовки и завершается накопление остаточных деформаций. После рассеяния энергии упругих движений заготовка замирает, принимая окончательную форму и размеры детали.

На рис. 4 и 5 показана система в конце процесса моделирования, когда деталь приобретает окончательную форму. Плотность серого тона пропорциональна величине накопленных остаточных пластических деформаций (см. шкалу справа от рисунка), максимальные значения которых наблюдаются на оси симметрии и указаны ниже для вариантов.

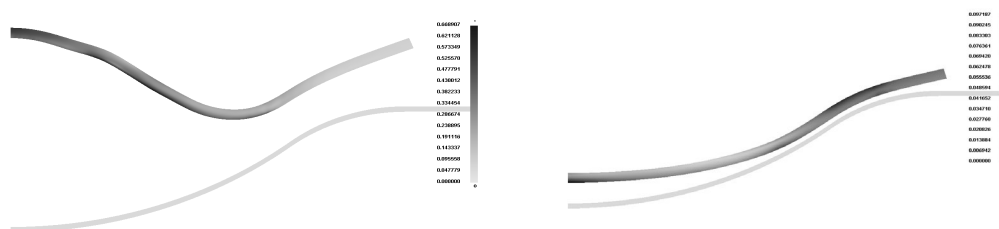


Рис. 4. Вид детали с дефектом в виде пучности (слева) и недоштамповки (справа)

На рис. 4 слева показана форма детали, полученная без учета передающей среды ($K = 0,2$; максимальная накопленная пластическая деформация $\varepsilon_{eff}^p = 66,8\%$). В результате значительного рефлекса в центре образовался дефект в виде пучности. На этом же рисунке справа показана деталь,

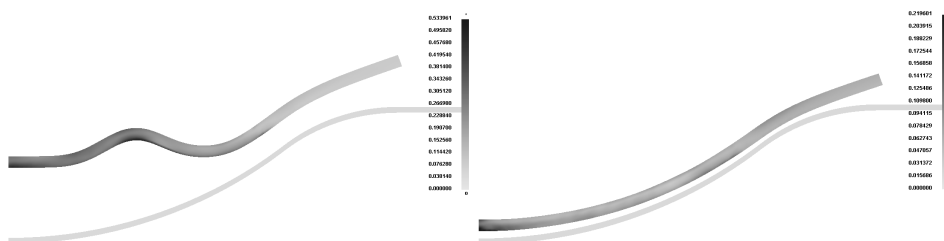


Рис. 5. Окончательная форма и распределение остаточных деформаций при неблагоприятном (слева) и оптимальном (справа) сочетании давления и толщины слоя среды (вариант 3)

полученная с учетом слоя передающей среды толщиной 100 мм при недостаточной величине импульса давления ($K = 0,09$; $\varepsilon_{eff}^p = 9,7\%$). В результате средняя часть заготовки непроштампована.

На рис. 5 слева показана форма детали, полученной с учетом слоя среды толщиной 100 мм. Дефект пучности под действием передающей среды принимает более сложную волнообразную форму ($K = 0,2$; $\varepsilon_{eff}^p = 53,4\%$). На том же рисунке справа показана деталь, полученная с учетом оптимальной величины импульса в процессе обратного движения ($K = 0,1$; $\varepsilon_{eff}^p = 22,0\%$). Видно, что деталь расположена эквидистантно поверхности матрицы, дефекты пучности или непроштамповки отсутствуют. В варианте отсутствия передающей среды удовлетворительная форма детали наблюдается при значении параметра давления $K = 0,087$, малый слой (10 мм) требует оптимального значения $K = 0,088$, а большой слой (100 мм) требует наибольшего же значения параметра $K = 0,1$. При меньших, чем оптимальное значение параметра K , во всех вариантах наблюдается дефект типа непроштамповки. При бóльших, чем оптимальное значение K , наблюдается дефект типа пучности. Подчеркнем, что одни и те же параметры давления в одном варианте являются оптимальными, в другом – избыточными, в третьем – недостаточными.

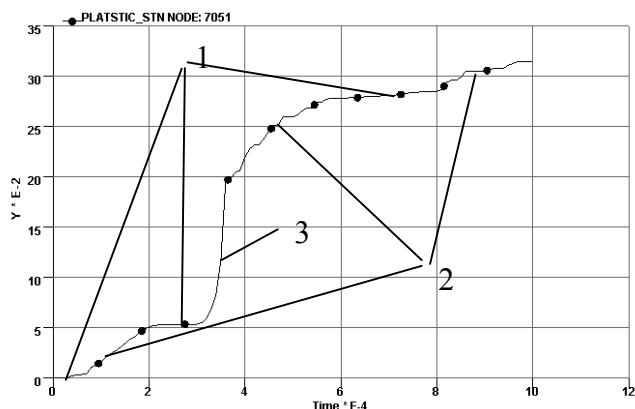


Рис. 6. Накопление остаточных деформаций в куполе детали

формаций показан на рис. 6 для варианта 1 с оптимальным нагружением. Помечены характерные этапы изменения деформаций- паузы, соответствующие упругому деформированию материала (1), плавное увеличение, вызванное пластическим изгибом (2), скачок, вызванный ударом (3). Наблюдается три этапа деформации, вызванной изгибом, и единственный этап деформации, вызванной ударом. Полное изменение в равной степени обусловлено изгибом и ударом. Удару предшествовало упругое деформирование материала в куполе детали, вообще говоря, этапы пластического деформирования перемежаются с этапами упругого деформирования. Пластический изгиб и паузы, по-видимому, обусловлены изгибными колебаниями оболочки.

На рис. 7 показана зависимость скорости центральной точки заготовки

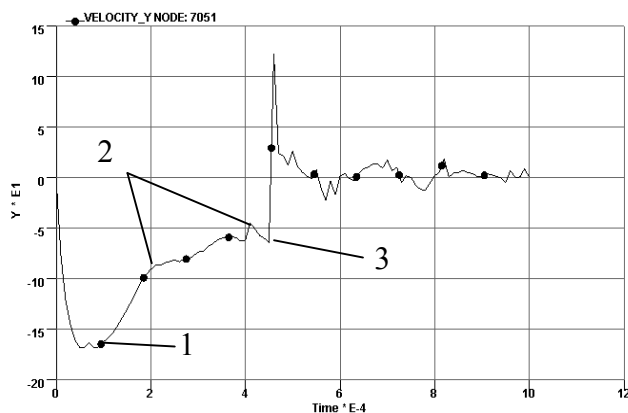


Рис. 7. Зависимость скорости движения заготовки

Максимальные накопленные остаточные деформации наблюдаются в куполе детали со стороны матрицы; их величины падают с ростом толщины слоя передающей среды – 31%, 25,8% и 22% для вариантов 1,2 и 3, соответственно. Характер накопления остаточных де-

формаций от времени при толщине слоя 100 мм и оптимальном сочетании параметров (обозначены: 1 – максимальная скорость, 2 – зона медленного роста скорости, 3 – момент удара о матрицу). Удовлетворительная форма детали не зависит от толщины слоя

среды и достигается при замедлении скорости по достижении ею значения 70-80 м/с, более высокие скорости удара вызывают значительный рефлекс материала заготовки, находящегося в очаге пластичности, и дефект пучности. Уменьшение слоя передающей среды изменяет характер зависимости скорости перед ударом: наблюдается сокращение зоны 2, что, по-видимому, связано с колебаниями оболочки.

К моменту удара заготовки по матрице давление падает до нуля, поэтому оно не оказывает препятствия выпучиванию детали.

Выводы

Использование передающей среды не позволяет в общем случае избежать дефекты типа пучности или непроштамповки, однако существует возможность оптимального выбора эффективной толщины слоя среды при заданной функции давления, которая обеспечивает минимизацию дефектов, позволяет повысить точность и качество детали. Целесообразно исследовать влияние иных, чем инерционное демпфирование, видов действия на заготовку со стороны передающей среды, например, вязкое сопротивление и действие конвективного массопотока.

Значение параметров (амплитуда давления и толщина слоя), гарантирующие удовлетворительную форму детали, лежат между значениями этих параметров, обуславливающих дефекты первого и второго рода.

Механизм деформирования заготовки и образования дефектов детали основан на сочетании динамического изгиба и удара по поверхности матрицы. Образующиеся в условиях неоднородного и неодновременного удара волны упруго-пластического изгиба интерферируют с образованием очага пластичности и одновременным рефлексом от удара о матрицу. Материал в очаге пластичности находится в состоянии, близком к всестороннему сжатию, и при этом весьма чувствителен к внешним воздействиям, поэтому рефлекс может приводить к большим перемещениям материала заготовки, которые из-за пластической диссипации «замерзают», искажая проектную форму детали. В рассмотренном в статье случае образующаяся единственная сходящаяся к оси волна интерферирует сама с собой. При штамповке осесимметричных замкнутых обечаек образуются и интерфе-

рируют две волны, сходящиеся к плоскости симметрии системы [3]. В случае, показанном на рис. 1, интерферируют три волны изгиба: две волны, распространяющиеся поперек длинных ребер и третья волна от ближнего ребра заготовки.

Образование окончательной формы детали происходит в форме накопления остаточных деформаций в несколько этапов. На одних этапах преобладает фактор динамического изгиба, на других – влияние удара. Этапы, на которых происходит приращение остаточных деформаций перемежаются этапами упругого деформирования заготовки. В целом поле деформаций сильно неоднородно.

Удовлетворительная форма детали связана с особым характером изменения скорости движения – снижением ее величины до 70-80 м/с после достижения максимальной величины 170-200 м/с.

Литература

1. Борисевич В.К. Разработка научных основ оптимального проектирования технологических процессов листовой штамповки взрывом летательных аппаратов и двигателей. – Дис... докт. техн. наук. – Х., 1979. – 409 с.
2. Научные основы математического моделирования и экспериментальных исследований для новых импульсных технологий создания аэрокосмических изделий: Отчет о НИР / Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского (ХАИ). – №ГР0103U004037. – Х., 2005.
3. Нарыжный А.Г. Накопленное окончательное напряженно-деформированное состояние взаимодействующих с ударом тел вращения. – Дис... канд. техн. наук: 01.02.04. – Х., 2006. – 157 с.
4. LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 971. – Livermore Software Technology Corporation, 2006. – 2130 p.

Поступила в редакцию 12.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

В.В. Сухов

Институт специальных систем и технологий ИМиС, Украина

ОПЫТ СОЗДАНИЯ ГАЗОВЗРЫВНЫХ СИСТЕМ С МНОГОТОЧЕЧНЫМ ИНИЦИИРОВАНИЕМ ДЕТОНАЦИИ МЕТАНО-КИСЛОРОДНОЙ СМЕСИ

Освещен опыт создания газозрывных процессов с многоточечным способом инициирования детонации метано-кислородной смеси в объеме камеры взрыва. Приведены геометрические параметры основных конструктивных элементов камеры взрыва, обеспечивающие устойчивое образование детонации и ее переход в рабочий объем камеры взрыва. Результаты исследований были реализованы в конструкциях двух газозрывных прессов ДГП-400 и ДГП-1200М.

детонация, камера взрыва, формообразование, пресс, газовая смесь

Интенсивное развитие импульсных методов формообразование в свое время было определено повышением требований к качеству и точности изготовления деталей, относительно быстрой их сменяемостью, а также отсутствием необходимого прессового оборудования.

Полученные в этот период научные и практические результаты существенно расширили область знаний в области импульсных источников энергии.

Впервые в отечественной и зарубежной практике использовать энергию взрыва горючих газовых смесей для формообразования деталей предложено в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е.Жуковского «Харьковский авиационный институт» Р.В. Пихтовниковым [1].

Дальнейшие разработки в этом направлении были продолжены Б.А.Черепенниковым [2].

По результатам исследований Б.А.Черепенникова на ГП «Киевский авиационный завод «АВИАНТ» были разработаны и внедрены механизированные детонационные – газовые пресса ДГП-100, ДГП-400, ДГП-600, ДГП-1200 для штамповки деталей из заготовок толщиной от 1,0 до 5 мм и габаритом до 1,4 мм [3].

Из условия непрерывного распространения детонационной волны, как правило, камера взрыва выполняется конической с углом конуса в пределах $30 \div 45^\circ$.

В этом случае габариты взрывных определяются размерами штампуемой детали, а не необходимой работой деформирования. Поэтому в существующих камерах взрыва коэффициент использования энергии составляет не более $1,0 \div 2,0 \%$ [4].

Одним из путей повышения эффективности преобразования энергии рабочего тела в полезную работу в газовзрывных прессах является инициирование детонационного режима горения газовой смеси в отдельной объеме с последующим многоточечным инициированием данного режима горения газовой смеси в рабочем объеме камеры взрыва.

Конструктивно газовзрывной пресс с многоточечным инициированием детонации состоит из трубы детонации, распределительных трубок, переходных конусов и рабочего объема камеры взрыва [5, 6].

Геометрические параметры трубы детонации выбираются из условий, обеспечивающих стабильное образование режима детонации.

Для метано-кислородной смеси, на основании опыта эксплуатации серийных прессов, диаметр и длину трубы детонации рекомендуется брать равными соответственно $32 \div 35$ мм и $0,7 \div 0,8$ м. Внутренний диаметр распределительных трубок должен быть выбран в пределах $10 \div 15$ мм. При распространении детонационной волны по трубкам такого диаметра энергетические потери волны практически отсутствуют. Угол конуса и выходной диаметр переходного конуса необходимо брать равными соответственно $18 \div 20^\circ$ и $32 \div 35$ мм.

Количество переходных конусов и передающих детонацию каналов зависит от расположения конусов по плоскости камеры взрыва (по углам треугольника, квадрата и т.д.) и расстояния между ними. При расположении конусов по углам квадрата рекомендуется длину стороны квадрата брать равной $100 \div 150$ мм. Расстояние от крайних конусов до боковой стенки камеры взрыва необходимо выбирать соответственно $50 \div 75$ мм.

При большом количестве распределительных трубок ухудшается условие монтажа установки и ее эксплуатации, снижается безопасность работы. Для устранения указанных недостатков разработан плоский распреде-

литель [7], в теле которого выфрезеровываются распределительные и промежуточные каналы. Такого типа конструкции распределителя реализована в камере взрыва, изображенной на рис.1.

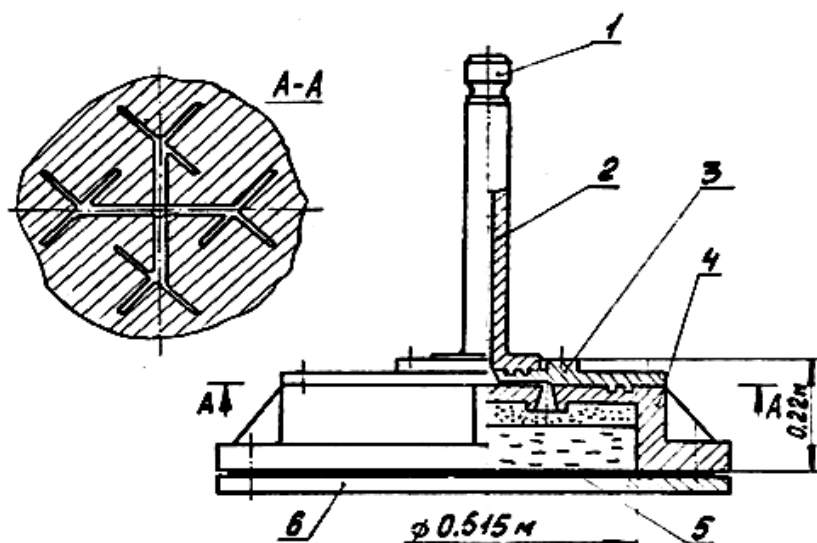


Рис. 1. Камера взрыва нового типа:

- 1 – форкамера; 2 – труба детонации; 3 – распределитель;
4 – корпус; 5 – резиновая диафрагма; 6 – прижим

Для сравнения на рис. 2 изображены коническая камера взрыва и камера нового типа.

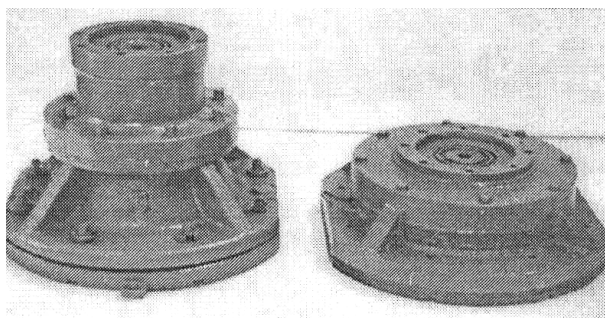


Рис. 2. Коническая камера взрыва и камера нового типа

При одинаковом диаметре выходного очка камеры 0,515 м высота новой камеры в 2 раза меньше конической. Кроме того, путем перекрытия

распространения детонационной волны по отдельным или группе переходных конусов можно изменять по форме величину силового воздействия по плоскости заготовки в пределах $20 \div 30$ % от максимальной нагрузки.

Результаты исследований были реализованы в конструкциях газозрывных прессов ДГП-400 и ДГП-1200 М.

Литература

1. Пихтовников Р.В. Способ штамповки деталей. – Авт. свид. № 157957.
2. Черепенников Б.А. Исследование процесса листовой штамповки энергией детонационного взрыва газовой смеси. – Дис...канд. техн. наук: – Х.: ХПИ, 1962. – 254 с.
3. Трахтенберг Ю.Б., Климентьев В.И., Голованов В.Н. Импульсная штамповка деталей // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 1. – С. 4-6.
4. Каримов Э.Х. Исследование газоимпульсного процесса при горении метано-кислородной смеси. . – Дис...канд. техн. наук. – Саратов: СПИ, 1973. – 180 с.
5. Черепенников Б.А., Сухов В.В. Устройство для штамповки. – Авт. свидетельство № 400144.
6. Степанченко В.А., Трахтенберг Ю.В, Сухов В.В. и др. Многокамерное устройство для газозрывной штамповки. – Авт. свид. № 403245.
7. Сухов В.В., Титов В.А., Трахтенберг Ю.Б. Устройство для газозрывной штамповки. – Авт. свид. № 510895 от 1 июля 1974 г.

Поступила в редакцию 10.06.2007

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

В.Я.Самойлов, В.В.Борисевич, В.В.Хоменко

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
"Харьковский авиационный институт", Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ СХОДЯЩИМИСЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ ВЗРЫВА

Рассмотрены вопросы теоретического и экспериментального исследования упрочнения металлов сходящимися ударными волнами взрыва. Приведены параметры на границе раздела «ВВ – среда», характеристики сходящихся ударных волн, дан анализ напряженно-деформированного состояния цилиндрического образца. Рассмотрена картина образования, перемещения и отражения сходящихся волн.

образец, взрывчатое вещество, сходящаяся ударная волна, упрочнение, граница раздела.

Одним из направлений производства высокопрочных металлов и сплавов является упрочнение готовых деталей различными термическими, механическими и термомеханическими методами. Наряду с этими способами используется метод упрочнения металлов взрывом.

Существует несколько схем упрочнения взрывом. По способу создания ударных волн схемы упрочнения можно разделить на схемы упрочнения накладными зарядами и на схемы упрочнения метанием пластины.

При упрочнении метанием упрочняемый образец устанавливается на массивное основание, на определенном расстоянии от образца располагается метаемая пластина под некоторым начальным углом. Сверху пластины помещается плоский заряд взрывчатого вещества после инициирования которого пластина приобретает скорость, направленную к образцу. Угол соударения пластины и образца больше начального угла установки пластины и область соударения передвигается вдоль поверхности образца с конечной скоростью. Схемы упрочнения накладными зарядами распространены более шире, чем схемы упрочнения метанием [1]. Они основаны на непосредственном установлении заряда взрывчатого вещества на уп-

рочняемой поверхности образца. В зависимости от конфигурации заряда и места его инициирования генерируется «косая» (бегущая) детонационная волна, распространяющаяся по длине образца или «плоская», воздействующая одновременно на значительную поверхность образца.

При «косой» ударной волне пик давления имеет величину в $1,5 \div 2$ раза меньшую, чем в случае плоской ударной волны, но глубина распространения упрочнения «косой» ударной волной в 2 – 3 раза больше.

Недостатком схем упрочнения плоскими ударными волнами является высокая вероятность разрушения обрабатываемого изделия.

Основным недостатком существующих схем упрочнения является то, что они пригодны для упрочнения только плоских образцов, в то время как основная масса деталей современного машиностроения это детали типа тел вращения, детали с криволинейной поверхностью.

Предлагаемый нами способ упрочнения металлов сходящимися ударными волнами пригоден для упрочнения образцов и деталей практически любой конфигурации и заключается в применении полого заряда, форма которого соответствует форме упрочняемого изделия. При инициировании заряда образуется сходящийся фронт ударной волны, перемещающийся по передающей среде к образцу, установленному в фокусе схождения.

Максимальный эффект упрочнения наблюдается при симметричном нагружении сходящейся ударной волной упрочняемого образца. Это имеет место только тогда, когда профили заряда, сходящегося фронта и образца строго идентичны. Симметричность и точное подобие сходящегося фронта упрочняемой поверхности возможны при обеспечении одновременного инициирования взрывчатого вещества по всей поверхности заряда. Выполнение этого требования для полого заряда сложной формы представляет значительные трудности. Поэтому нами использовалась схема инициирования заряда «бегущей» детонационной волной, которая перемещаясь вдоль заряда, обеспечивает постепенное симметричное нагружение поверхности образца.

Все вопросы, связанные с исследованием нового способа упрочнения взрывом, можно разделить на две группы: вопросы касающиеся определения параметров взрыва, механизма передачи энергии взрывчатого веществ-

ва сходящейся ударной волной упрочняемому образцу, реакции образца на приложенную нагрузку и вопросы, связанные с применением нового способа упрочнения в конкретных технологических процессах, включая внедрения их в производство.

Поэтому, были поставлены следующие задачи исследования:

1. Разработать основы технологии упрочнения металлов сходящимися ударными волнами взрыва.
2. Провести необходимые экспериментальные исследования по сравнительному анализу разработанных схем упрочнения.
3. Теоретически проанализировать параметры сходящихся ударных волн для выяснения физики внешней нагрузки.
4. Провести теоретический анализ напряженно-деформируемого состояния упрочняемого образца.
5. Обосновать область применения нового способа упрочнения и разработать рекомендации по внедрению процесса в производство.

Упрочнение металлов сходящимися ударными волнами исследовалась на образцах, изготовленных из стали Ст3, меди М1, алюминиевых сплавов Д16Т, АК6, АК8, АД1, латуни ЛС59-1 и находящихся в состоянии поставки.

В экспериментах применялись цилиндрические образцы, изготовленные из пруткового проката различного диаметра. В качестве взрывчатого вещества использовались насыпные заряды тэна и аммонита 6ЖВ, детонирующий шнур на основе тэна. Насыпные ВВ помещались в бумажные оболочки различной формы, которая соответствовала форме заряда.

Упрочняемый образец устанавливался на песчаную подушку, назначения которой – уменьшение влияния на образец отраженной от дна камеры ударной волны. Концентрично с образцом устанавливался заряд определенной формы. Полые цилиндрические заряды оканчиваются обычно конусом, предназначенным для создания в цилиндре плоского детонационного фронта сходящейся ударной волны. Конус имел угол, равный 120° и изготавливался из двух ВВ: в середине – аммонит 6ЖВ, а по боковой поверхности – тонкий слой тэна.

Для уменьшения влияния на распределение твердости волн разгрузки по верхнему торцу образца устанавливалась «инертная» прокладка из пе-

нопласта.

Сравнение различных схем нагружения и определение влияния параметров заряда проводилась контролем упрочнения, который осуществлялся измерением твердости методом Роквелла.

Для упрочнения металлов данным методом могут применяться плоские, конические, цилиндрические и сферические сходящиеся ударные волны. Передающая среда – воздушная или водяная.

Было установлено, что при нагружении цилиндрической сходящейся волной (заряд без генератора плоская волна) характер изменения твердости зависит от материала образца. У стальных образцов максимальное упрочнение наблюдается со стороны инициирования. Кривая изменения твердости дуралевых образцов выпуклая – твердость на краях меньше, чем в центре. Латунные образцы упрочняются по боковой поверхности, а в центре – разупрочняются.

При упрочнении конической УВ в водяной передающей среде было получено увеличение поверхностной твердости стального образца в 1,44, медного в 1,41 и образца из Д16Т в 1,27 раза. При использовании воздушной передающей среды это увеличение составило соответственно 1,3; 1,29 и 1,25 раза. Кроме того было установлено, что для каждого материала имеется свой «критический» угол конуса, при котором наблюдается максимальное упрочнение.

Кривая распределения твердости по диаметру образца, упрочненного цилиндрической сходящейся ударной волной (заряд с генератором плоской ударной волны) является вогнутой – твердость в центре меньше, чем на краях, что объясняется влиянием температуры на фронте сходящейся ударной волны.

Для изучения картины образования, перемещения и отражения сходящихся волн использовался комплекс аппаратуры, состоящий из теневого прибора ИАБ–451 и скоростной фоторегистрирующей установки СФР–2М. Сходящийся ударный фронт создавался взрывом высокоомной проволоочки (никелин, $d = 0,01$ мм). Исследовали взрыв проволоочек различных конфигураций, расположенных по контуру отверстий, выполненных в гетинаксовых пластинах.

Взрыв проволоочки осуществлялся пропусканием через нее высоко-

вольтного импульса тока. Временное расстояние между кадрами кинограммы зависило от скорости вращения зеркала фоторегистратора и равнялось 8 и 6 микросекунд. Расшифровка кинограмм производилась с помощью инструментального микроскопа ТИ.

В ходе экспериментов было установлено, что имеет место удовлетворительная симметричность схождения фронта.

После окончания фазы схождения образуется расходящийся фронт, который распространяется вдоль линии фокуса или образца в виде «песта». Установлено, что скорость перемещения фронта волны вдоль поверхности образца зависит от диаметра и качества поверхности образца. С уменьшением диаметра и повышением качества поверхности образца скорость увеличивается.

Было также установлено, что нарушение симметрии движения незначительное – в основном волны круговые, довольно симметричные.

Для выяснения возможности применения способа для упрочнения готовых деталей был проведен анализ согласно методике, изложенной в работе [2]. Анализ проводился для цилиндрического образца, на боковую поверхность которого действует осесимметричная нагрузка $P(t)$.

Использовались основные уравнения механики сплошных сред. Из решения уравнений движения при учете особенностей динамического нагружения было получено выражение, позволяющее определить закон изменения радиуса и скорости его изменения.

Было определено давление на границе раздела, скорость движения границы раздела и скорость ударной волны при взрыве аммонита 6ЖВ в воздухе, в воде и на поверхности ряда металлов (сталь, медь, дуралюмин).

Было установлено, что с увеличением радиуса и высоты цилиндрического образца степень пластической деформации уменьшается, а с ростом длительности импульса нагрузки увеличивается.

Выводы

1. Разработан и исследован новый способ упрочнения металлов сходящимися ударными волнами взрыва, основными преимуществами которого являются:

-
- а) возможность упрочнения деталей с криволинейной поверхностью;
 - б) существование на фронте сходящейся ударной волны значительных давлений, что позволяет производить упрочнение деталей изготовленных из высокопрочных металлов и сплавов;
 - в) малая вероятность разрушения упрочняемого объекта благодаря использованию неконтактного заряда ВВ и уменьшению процесса интерференции волн сжатия и разгрузки.
2. Установлено, что наибольшее распространение получать плоские сходящиеся волны для упрочнения плоских образцов, цилиндрические и конические волны для упрочнения объектов цилиндрической формы.
3. Наиболее рациональной схемой упрочнения деталей значительной длины является схема упрочнения по поясам, реализуемая с применением заряда в форме логарифмической спирали, в фокусе которой устанавливается образец.
4. Проверено влияние основных технологических параметров образца (материала, диаметра, высоты, исходной твердости, качества поверхности) и заряда (вида ВВ, толщины, передающей среды) на степень упрочнения.

Литература

1. Атрощенко Е.С., Пашков П.О., Рядинская И.М. Упрочнение металлов при взрывном нагружении // Физика металлов и материаловедения. . – 1965. – Т. 19, № 4. – С. 59-67.
2. Алексеев Ю.Н. Вопросы пластического течения металлов. – Х.: ХГУ, 1958. – 234 с.

Поступило в редакцию 1.02.2007

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

В.А. Богуслаев, О.И. Гавриш, С.А. Стадник

ОАО «Мотор-Сич», г. Запорожье

ШТАМПОВКА ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ВЗРЫВОМ НА ОАО «МОТОР-СИЧ»

Описание в общем виде состояния работ по штамповке взрывом на предприятии "Мотор-Сич", г. Запорожье

импульсная штамповка, листовые детали, бассейн

Бурное развитие авиационной промышленности в середине XX-го века потребовало резкого увеличения объема листоштамповочных работ, в особенности для производства крупногабаритных деталей, деталей имеющих сложную геометрическую форму и изготавливаемых из титановых и высокопрочных сплавов. Важное значение при производстве авиационных двигателей имеют также процессы по снижению материалоемкости выпускаемой продукции, экономному расходованию сырья, энергии, металла, применению прогрессивных малоотходных и безотходных технологий. Одним из основных направлений реализации поставленных задач является освоение прогрессивных технологических процессов формообразования, обеспечивающих сокращение объема механической обработки и уменьшения количества металла, превращаемого в стружку. Это достигается максимальным приближением заготовки к форме и размерам окончательной детали.

Одними из прогрессивных методов, позволяющими решить данные задачи, являются методы импульсной листовой штамповки. Наиболее широкое применение в производственной практике благодаря высокому качеству и точности изготавливаемых деталей, малым срокам подготовки и запуска производства, минимальным капитальным затратам, а так же возможностью получать детали сложной геометрической формы из труднодеформируемых сплавов получила импульсная штамповка взрывом. Это обеспечивает штамповке взрывом приоритет перед другими методами,

такими как выкатка на оправке с нагревом, изготовление элементов расчленённой детали на прессах с последующей сваркой, механической обработкой.

Значительный вклад в развитие теории и технологий применения импульсных методов обработки металлов внесли такие наши учёные как: Пихтовников Р.В., Борисевич В.К., Губский А.А., Завьялова В.И., Дерибас А.А. Огромный практический вклад по освоению и внедрению штамповки взрывом в промышленности принадлежит таким инженерам и руководителям ОАО «Мотор Сич» как: Мартынов Е.Н., Исаев А.В., Колодезный А.Т., Ахметшин А.З., Шаботенко А.Г., Мокрый В.Я.

Для повышения производительности труда и качества выпускаемых авиационных двигателей на ОАО «Мотор Сич» в 1964 г. был создан опытно-промышленный участок по штамповке деталей энергией взрыва бризантными взрывчатыми веществами. За время работы данного участка (до января 1980 г.) на нём была освоена и отработана технология листовой штамповки более 30-ти наименований деталей для серийного производства.



Рис.1. Корпус импульсной штамповки

С января 1980 г. вступил в строй новый корпус импульсной штамповки производственной площадью свыше 1400 м² и повышенной мощностью импульсных установок, что в несколько раз позволило увеличить количество и габариты штампуемых деталей. Данный корпус входит в состав опытно – экспериментального цеха №20 КТУ (конструкторско-

технологического управления) ОАО «Мотор-Сич». Строительство корпуса произведено согласно расчётам, разработанным проблемной лабораторией Харьковского национального аэрокосмического университета им. Н.Е.Жуковского «ХАИ».

Технологический процесс штамповки (калибровки) выполняется по принципу «раздача» деталей сложной конфигурации из жаропрочных, титановых и алюминиевых сплавов. В качестве энергоносителя использу-

ются такие взрывчатые материалы, как порошкообразный аммонит № 6ЖВ, детонирующий шнур ДШ – А и высоковольтный электродетонатор ЭДВ – М. Штамповка взрывом производится, как правило, за несколько операций с промежуточным отжигом. В зависимости от конфигурации детали заготовки используются конические или цилиндрические, сваренные автоматической сваркой.

На участке освоена штамповка листовых деталей диаметром от 80 до 1400 мм, толщиной листа от 0,6 до 3,0 мм, высотой от 80 до 580 мм.

Внедрение метода штамповки взрывом позволяет за счёт сокращения количества сварных швов и высокого качества поверхности, повысить прочность деталей и увеличить ресурс и надёжность изделий.

Штамповка производится в цилиндрических бассейнах (рис. 2), установленных во взрывных камерах.

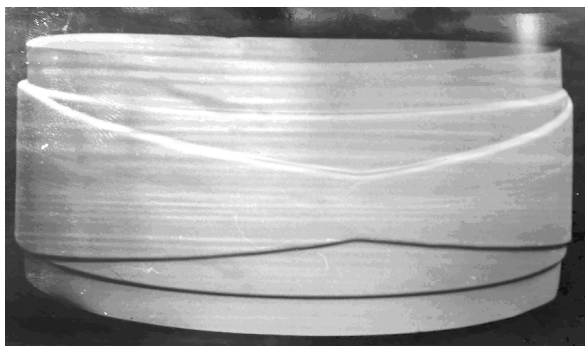


Рис. 2. Цилиндрический бассейн для штамповки

На участке расположены бассейны:

Ø 4,48 м, Ø 2 м, Ø 1,3 м.

Применение штамповки взрывом на ОАО «Мотор Сич» позволило аннулировать трудоёмкий процесс выкатки деталей с нагревом, получить стабильные размеры деталей при высо-

ком качестве поверхности, увеличить ресурс работы узлов основных изделий, в отдельных случаях это единственный способ получения деталей.

За время своего существования на участке освоено производство около двухсот наименований деталей (рис. 3) типа патрубков, кожух, обечайка, улитка, кок, из материалов ОТ4-1, ОТ4-0, ЭП 410, ЭП718-ИД, ЭИ-878, ЭИ-703, ВЖ-102, АМГ-6М, АМГ-3М. Участок изготавливает листовые детали для всех типов и модификаций авиационных двигателей, а также наземных газотурбинных электростанций производства ОАО «Мотор Сич», таких как Д-18, Д-36, Д-136, Д-336, Д-436, АИ-20, АИ-24, АИ-25, ВК-1500, ВК-2500, ТВ3-117, электростанция газотурбинная «Мотор Сич» ЭГ 1000Т-Т», газотурбинный привод ГТЭ-8/МС. Было изготовлено более 300 000 листовых деталей имеющих различную геометрическую формы, и

материал. Инженерно-технический персонал участка импульсной штамповки неоднократно был участником научно-технических конференций и выставок, за достижения в области штамповки взрывом удостоен дипломов и наград. Также инженерно-технический состав и рабочие активно вносят рационализаторские предложения для наиболее эффективной реализации производственного процесса.

В настоящее время на участке импульсной штамповки цеха №20 ОАО «Мотор Сич» ведётся работа по совершенствованию имеющихся и разработке новых технологий производст-

ва листовых деталей авиационных двигателей импульсными источниками энергии используя последние достижения в области штамповки взрывом. Разрабатываются методики моделирования процесса штамповки взрывом для деталей имеющих различную геометрическую форму и габаритные размеры, материал, толщину листа. Данные методики позволят моделировать процессы штамповки листовой детали для перспективных авиационных двигателей разработки ОАО «Мотор-Сич» с существенным сокращением как материальных так и затрат времени для проектирования и отработки технологического процесса.



Рис. 3. Производимые детали

Поступила в редакцию 17.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Лобанов, з-д им. Малышева, Харьков.

А.И. Сабакарь

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛ-ФУНКЦИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ СТАТИЧЕСКИМ И/ЛИ ДИНАМИЧЕСКИМ НАГРУЖЕНИЯМИ

Теория R-функций позволяет находить решения краевых задач о формоизменении металлов при статической и/или динамической нагрузками с границами любой геометрии, кроме границ с «особыми» точками. Использование ГЛ-функций обеспечивает получение структур решений их без указанной проблемы.

функция, структура решений, технологический процесс, обработка давлением, область, граница, конъюнкция, дизъюнкция, отрицание

Обработка металлов давлением является основой современного заготовительно-штамповочного производства любого крупного машиностроительного предприятия. Вопросы экономии черных, цветных металлов, легированных и жаропрочных сталей и сплавов решаются, прежде всего, в кузнечно-штамповочных цехах заводов. Службы главного металлурга и технолога призваны обеспечить получение заготовок деталей машин с максимальным коэффициентом использования материалов, минимальными трудовыми и энергетическими затратами при использовании совершенных инструментов и кузнечно-штамповочных машин. Все это требует поиска новых технологических решений, всестороннего анализа и выбора оптимальных режимов обработки заготовок.

Однако в сфере теоретического анализа технологических процессов заготовительно-штамповочного производства и отыскания оптимальных режимов их осуществления, за редким исключением, работы практически отсутствуют.

Несмотря на это, используя труды ученых в области теории пластичности и обработки металлов давлением таких, как А.А. Ильюшина, Л.М. Качанова, В.П. Колмогорова, Г.Я. Гунна, Ю.Н. Алексеева и др., а также в области прикладной математики в части создания R-функций В.Л. Рвачева,

В.С. Проценко, В.Л. Курпа, Н.С. Синеккопа и др., появляется возможность разрешить все указанные проблемы.

Использование теории R-функций предполагает получение полной информации о решении краевой задачи с организации его поиска [1]. Это, например, может быть поиск о симметрии решения, если постановка задачи инвариантна относительно некоторых типов преобразований симметрии, о законах малых градиентов и значений кривизны, о характере решения в окрестности угловых и других «особых» точек и т.д.

Метод R-функций, являясь аналитическим, содержит в себе конструктивные возможности для того, чтобы уже на уровне структурных формул полнее учесть информацию об искомом решении. В точках, которые являются для границы $\partial\Omega$ рассматриваемой области Ω особыми (угловые точки, ребра, точки стыка граничных условий), необходимо специально выбирать функцию $\omega(x)$, где $\omega(x) = 0$ – уравнение границы $\partial\Omega$, а также и уравнения $\omega_i(x) = 0$ для границ $\partial\Omega_i \subset \partial\Omega$. В действительности этот вопрос более сложен и необходимо учитывать поведение в окрестностях «особых» точек не только функций ω и ω_i , но и характер структурных зависимостей, в которые эти функции входят.

Следовательно, построенные структуры решений могут оказаться мало пригодными для краевых задач с «особыми» точками. Возможны случаи, когда структурные формулы теряют свойство полноты и приводят к большим погрешностям в случае, когда граница области имеет узкие врезы, щели и т.п.

Иногда особый характер поведения решения в угловых точках границы можно устранить в результате такого видоизменения краевой задачи, которое не искажало бы основных физических соотношений, было простым с математической точки зрения [2].

Однако искусственное изменение границы краевой задачи для некоторых технологических процессов, а именно, вырубки-пробивки, просечки и др. приводит, в конце концов, к снижению коэффициента использования материалов.

Поэтому предлагаем решать краевые задачи для этих случаев с помощью ГЛ-функций [3], свободных от изменения структуры решений в «особых» точках.

Далее, напомним определение ГЛ-функций. Пусть в пространстве R^n заданы функции $f_1 = f_1(x)$, $f_2 = f_2(x)$, при $x = (x_1, \dots, x_n)$. Эти функции, определенные всюду в пространстве R^n и на множествах $\bar{\Omega}_1$ и $\bar{\Omega}_2$ таковы, что:

$$\begin{aligned} f_1 > 0 \text{ на } \Omega_1, \quad f_1|_{\partial\Omega_1} = 0, \quad f_1 < 0 \text{ на } R^n \setminus \bar{\Omega}_1; \\ f_2 > 0 \text{ на } \Omega_2, \quad f_2|_{\partial\Omega_2} = 0, \quad f_2 < 0 \text{ на } R^n \setminus \bar{\Omega}_2. \end{aligned} \quad (1)$$

По определению систему множеств

$\Omega_1, \Omega_2, \Omega_1 \cup \Omega_2, \Omega_1 \cap \Omega_2, \Omega_1 \setminus \Omega_2, \Omega_2 \setminus \Omega_1, R^n \setminus \Omega_1 \cup \Omega_2, R^n \setminus \Omega_1 \cap \Omega_2,$ (2)
а также подмножеств Ω^1 и Ω^{11} этих множеств, на которых $|f_1| \leq |f_2|$, $|f_2| \leq |f_1|$, соответственно, называем основной системой множеств для функций f_1 и f_2 и обозначаем $M = \{ \Omega: f_1, f_2 \}$.

А также по определению множества

$$\partial\Omega_1, \partial\Omega_2, \partial\Omega_1^1, \partial\Omega_1^{11}, \partial\Omega_2^1, \partial\Omega_2^{11} \quad (3)$$

называем ядрами функций f_1 и f_2 и систему этих множеств обозначают $K_{er}(f_1, f_2)$.

Тогда функция

$$F(x) = \Phi[f_1(x), f_2(x)], \quad x \in R^n \quad (4)$$

называется ГЛ-функцией, когда она

а) определена и неотрицательна хотя бы на одном из множеств системы $M = \{ \Omega: f_1, f_2 \}$;

б) имеет непустое ядро и обращается в нуль только на одном из множеств системы $K_{er}(f_1, f_2)$ или на одном из множеств Ω^1 и Ω^{11} .

Здесь системы множества по дизъюнкции $\Omega_1 \cup \Omega_2$ (рис. 1) записываются как

$$\partial\Omega_1^1 \cup \partial\Omega_1^{11} = \partial\Omega_1; \quad \partial\Omega_2^1 \cup \partial\Omega_2^{11} = \partial\Omega_2, \quad (5)$$

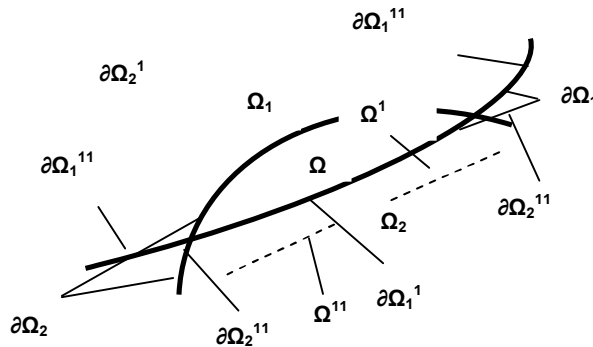


Рис. 1. Системы множеств и подмножеств

До настоящего времени рассмотрено семь ГЛ- систем.

Наибольший интерес представляют системы $\Gamma_0 L_0$ - и $\Gamma_e L_e$ -функций:

$$\begin{aligned} \text{а)} \quad & f_1 \Gamma_0 f_2 = ((f_1^2 + f_2^2)^{1/2} - f_2) / 2; \\ & f_2 \Gamma_0 f_1 = ((f_1^2 + f_2^2)^{1/2} - f_1) / 2; \\ & f_1 L_0 f_2 = ((f_1^2 + f_2^2)^{1/2} + f_2) / 2; \\ & f_2 L_0 f_1 = ((f_1^2 + f_2^2)^{1/2} + f_1) / 2; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{б)} \quad & f_1 \Gamma_e f_2 = (((e^{f_1} f_2)^2 + f_1^2)^{1/2} - f_2) / 2; \\ & f_2 \Gamma_e f_1 = (((e^{f_2} f_1)^2 + f_2^2)^{1/2} - f_1) / 2; \\ & f_1 L_e f_2 = (((e^{f_1} f_2)^2 + f_1^2)^{1/2} + f_2) / 2; \\ & f_2 L_e f_1 = (((e^{f_2} f_1)^2 + f_2^2)^{1/2} + f_1) / 2. \end{aligned} \quad (7)$$

Из определения ГЛ-функций следует, что их свойства существенно образом связаны со свойствами функций f_1 и f_2 , входящих в систему множеств, а также с теми множествами, на которых они рассматриваются.

Системы ГЛ-функций определены, суммируемы, сохраняют знак и обращаются в нуль.

Представим некоторые свойства $\Gamma_0 L_0$ - и $\Gamma_e L_e$ -функций, сведенных в табл. 1 – 4.

Таблица 1

	$f_1 \Gamma_0 f_2$	$f_2 \Gamma_0 f_1$	$f_1 L_0 f_2$	$f_2 L_0 f_1$
$\partial \Omega_1^I$	0	$f_2 / 2$	f_2	$f_2 / 2$
$\partial \Omega_1^{II}$	$- f_2$	$- f_2 / 2$	0	$- f_2 / 2$
$\partial \Omega_2^I$	$f_1 / 2$	0	$f_1 / 2$	f_1
$\partial \Omega_2^{II}$	$- f_1 / 2$	$- f_1$	$- f_1 / 2$	0

Таблица 2

	$\partial(f_1 \Gamma_0 f_2) / \partial l$	$\partial(f_2 \Gamma_0 f_1) / \partial l$	$\partial(f_1 L_0 f_2) / \partial l$	$\partial(f_2 L_0 f_1) / \partial l$
$\partial \Omega_1^I$	0	$\partial(f_1 + f_2) / 2 \partial l$	$\partial f_2 / \partial l$	$\partial(f_2 + f_1) / 2 \partial l$
$\partial \Omega_1^{II}$	$- \partial f_2 / \partial l$	$- \partial(f_1 + f_2) / 2 \partial l$	0	$\partial(f_2 + f_1) / 2 \partial l$
$\partial \Omega_2^I$	$\partial(f_1 - f_2) / 2 \partial l$	0	$\partial(f_1 + f_2) / 2 \partial l$	$\partial f_1 / \partial l$
$\partial \Omega_2^{II}$	$- \partial(f_1 + f_2) / 2 \partial l$	$- \partial f_1 / \partial l$	$\partial(f_2 - f_1) / 2 \partial l$	0

Таблица 3

	$f_1 \Gamma_e f_2$	$f_2 \Gamma_e f_1$	$f_1 L_e f_2$	$f_2 L_e f_1$
$\partial\Omega_1^I$	0	f_2	$2 f_2$	f_2
$\partial\Omega_1^{II}$	$- 2 f_2$	$- f_2$	f_2	$- f_2$
$\partial\Omega_2^I$	f_1	$- f_1$	f_1	f_1
$\partial\Omega_2^{II}$	$- f_1$	$- f_1$	$- f_1$	f_1

Таблица 4

	$\partial(f_1 \Gamma_e f_2)/\partial l$	$\partial(f_2 \Gamma_e f_1)/\partial l$	$\partial(f_1 L_e f_2)/\partial l$	$\partial(f_2 L_e f_1)/\partial l$
$\partial\Omega_1^I$	0	$\partial(f_2 - f_1)/\partial l$	$2 \partial f_2 / \partial l$	$\partial(f_1 + f_2)/\partial l$
$\partial\Omega_1^{II}$	$- 2 \partial f_2 / \partial l$	$- \partial(f_1 + f_2)/\partial l$	0	$\partial(f_1 - f_2)/\partial l$
$\partial\Omega_2^I$	$\partial(f_1 - f_2)/\partial l$	0	$\partial(f_1 + f_2)/\partial l$	$2 \partial f_1 / \partial l$
$\partial\Omega_2^{II}$	$- \partial(f_1 + f_2)/\partial l$	$- 2 \partial f_1 / \partial l$	$\partial(f_2 - f_1)/\partial l$	0

Далее, отметим существенную связь между $\Gamma_0 L_0$ -функциями и R-функциями, выражающуюся в наличии равенства между ними:

$$\begin{aligned}
 f_1 - f_1 \cap_0 f_2 &= 2 (f_1 \Gamma_0 f_2); \\
 f_2 - f_1 \cap_0 f_2 &= 2 (f_2 \Gamma_0 f_1); \\
 f_1 \cup_0 f_2 - f_1 &= 2 (f_1 L_0 f_2); \\
 f_1 \cup_0 f_2 - f_2 &= 2 (f_2 L_0 f_1).
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

При решении краевых задач возникает необходимость, как и при использовании R-функций, продолжить действие оператора дифференцирования с тех множеств, на которых он задан, на более широкое множество с непрерывностью на нем, что и отражено в труде [3].

Системы ГЛ-функций и операции с ними вводятся в структурные формулы для каждой краевой задачи. В эти структурные формулы также включены все основные характеристики по определению напряженно-деформированного состояния материала заготовок. При этом используется функция μ , обеспечивающая использование для анализа процессов обработки металлов давлением общих закономерностей механики сплошных сред, то есть уравнений равновесия, непрерывности и теплообмена. Из них получается равенство направляющего тензора напряжений и направляющего тензора деформаций

$$\overline{D}_\sigma = \overline{D}_\epsilon. \quad (9)$$

Как показано в работе [4], исходя из принципа инвариантности внутренних сил в теле, находящемся под воздействием сил, основным физическим законом в области больших пластических деформаций является условие совпадения направляющего тензора напряжений и направляющего тензора скоростей деформаций

$$\overline{D}_\sigma = \overline{D}_\epsilon \quad (10)$$

При этом вводится специфическая характеристика, названная коэффициентом жесткости

$$\xi_i = \sigma_i / 3 \epsilon_i = \sigma_s \delta / 3 v_0, \quad (11)$$

где σ_s – предел текучести материала заготовки; v_0 и δ – скорость и характерный размер заготовки.

Таким образом, при решении краевых задач с учетом динамического нагружения в структурные формулы вводятся различные коэффициенты жесткости.

Литература

1. Рвачев В.Л., Рвачев В.А. Неклассические методы теории приближений в краевых задачах. – К.: Наук. думка, 1979. – 196 с.
2. Рвачев В.Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. К.: Наук. думка, 1982. – 552 с.
3. Гончарюк И.В. Конструктивные и вычислительные методы математики, механики и кибернетики. Т. 1. Непрерывные функции с логическими и наследственными свойствами и некоторые их применения. – Х.: ХГУ, 1984. – 244 с.
4. Алексеев Ю.Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием. – Х.: ХГУ, 1969. – 108 с.

Поступила в редакцию 1.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

М.М. Буденный

*ГП «Харьковский научно-производственный центр
стандартизации, гидрологии и сертификации»*

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ УСКОРЕННОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Кратко описаны прогрессивные виды станочной оснастки: наладочные, сборные, унифицированные приспособления, а также автоматизированные приспособления с ЧПУ.

технологическая оснастка, наладочные приспособления, сборные приспособления, унифицированные приспособления, приспособления с ЧПУ

Современный период развития промышленности характеризующийся переходом к рыночным методам хозяйствования, повышением спроса на конкурентоспособную, ликвидную продукцию, быстрым обновлением ее ассортимента и повышением качества при одновременном сокращении материальных и трудовых затрат, требует быстрого и полного удовлетворения потребности производства в технологической оснастке (ТО). Являясь самой распространенной разновидностью орудий производства, ТО существенно влияет на сроки освоения новой техники, загрузки оборудования и производительность труда, качество и себестоимость выпускаемой продукции, определяет требования к квалификации рабочих основного производства.

При сжатых сроках освоения новых изделий и переходе на интенсивные формы работы, когда весь прирост объемов выпускаемой продукции обуславливается ростом производительности труда, наибольший положительный эффект достигается путем комплексного внедрения прогрессивных видов универсально-сборной и переналаживаемой технологической оснастки, обеспечивающих значительное сокращение затрат на производство средств технологического оснащения быструю их переналадку при смене объектов производства.

Однако, в настоящее время инструментальное производство предприятий машиностроительной отрасли еще не стало мощной и мобильной базой, обеспечивающей потребность в инструментальной продукции, особенно в штампах, прессформах, станочных и сборочных приспособлениях, специальном и вспомогательном инструменте.

По технологической оснащенности рабочего места в металлообработке отрасль уступает. Например, США в 4 раза, причем это отставание углубляется. Например, в США обеспечивается опережающее развитие инструментального производства (в пропорции 3,9 : 1 к основному), а у нас оно развивается медленнее основного (в пропорции 0,85 : 1). Это происходит, несмотря на огромные затраты на ТО, которые достигли 8-15% себестоимости валовой продукции отраслевого машиностроения, а в абсолютных показателях-13млн. нормо-часов, более 45тыс.т. качественное стали. В условиях мобильной системы технологической подготовки производства крайне важным является максимальная загрузка имеющегося технологического оборудования, возможности его быстрой переналадки на изготовление новых деталей, а это невозможно без современной переналаживаемой технологической оснастки не уступающей по технико- экономическим характеристикам специальным приспособлениям.

Современному уровню и тенденциям развития ТО присущи следующие общие черты:

- высокая гибкость и универсальность, обеспечивающие возможность базирования и закрепления всей номенклатуры деталей, которые планируются к изготовлению, с использованием ограниченного количества элементов, входящих в систему ТО;
- обеспечение полного базирования заготовок, т. е. их ориентации относительно системы координат станка;
- конструкция приспособления должна обеспечивать плотное прилегание заготовок к базовым поверхностям, предотвращать их смещение и вибрацию при различных видах обработки;
- высокая степень надежности;
- максимально возможная простота конструкции и минимальная стоимость приспособлений;

- инструментальная доступность, позволяющая обрабатывать максимальное количество сторон за одну установку заготовки;
- обеспечение требуемой точности обработки;
- быстроедействие;
- удобство установки и снятия обрабатываемых деталей;
- возможность хорошего отвода стружки.

Перечисленным требованиям в наибольшей степени отвечают агрегированные модульные быстропереналаживаемые приспособления, komponуемые из унифицированных базовых, опорных, зажимных, установочных и других устройств.

Такие компоновки приспособлений обеспечивают возможность базирования и закрепления заготовок различной формы и размеров, а также быструю переналадку производства при смене выпускаемых изделий.

Обратимые приспособления подразделяются на два класса: со спутниковой и беспутниковой системами оснащения. В спутниковую систему оснащения входят наладочные (НП), сборные (СП) и унифицированные приспособления (УП), в беспутниковую- автоматически переналаживаемые приспособления с ЧПУ.

Выбор обратимых приспособлений и эффективность их применения зависят от различных факторов, основными из которых являются:

- принцип построения и уровень осуществления переналаживаемой системы (ПС): гибкая производственная ячейка, переналаживаемая автоматическая линия, механообрабатывающий автоматизированный комплекс и др.;
- система оснащения ПС: спутниковая или беспутниковая;
- номенклатура деталей, планируемых для обработки;
- партионность обрабатываемых деталей;
- способ транспортирования и установки деталей на оборудование.

Наладочные приспособления. В систему входят универсальные и специализированные наладочные приспособления (УНП и СНП).

Первые получили наибольшее применение в условиях мелко- и средне-серийного производства. Они представляют собой разборные станочные приспособления многократного применения и предназначены для обработки не только однотипных или близких по формам деталей, но и дета-

лей, входящих в разные классы. Компоновка УНП состоит из базовой части, универсальной по схемам базирования и конструктивным формам устанавливаемых заготовок, и специальной сменной наладки.

Специализированные наладочные приспособления наиболее эффективны в условиях средне- и крупносерийного производства. Они представляют собой разборные станочные приспособления многократного применения для закрепления заготовок, близких по конструктивно-технологическим признакам и объединенных общностью базовых поверхностей и способом обработки.

Компоновка СНП состоит из базовой части, специализированной по схемам базирования типовых групп обрабатываемых заготовок, и сменной наладки.

Кроме того, СНП могут иметь регулировочные элементы, т.е. быть комбинированными. От УНП они отличаются более высокой степенью механизации. При групповом методе обработки СНП широко используются при оснащении ПС.

Техническая характеристика основных серий ЦНП и СНП приведены в табл. 1.

Основные достоинства УНП и СНП:

- приближение по точности, габаритным размерам, массе и удобству в работе к необратимой специальной оснастке, что обеспечивает их конкурентоспособность;
- жесткость конструкций, создаваемых из неразборных узлов и минимального количества элементов;
- применение методов фиксации деталей и сборочных единиц посредством отверстий и пальцев, что гарантирует стабильность получения размеров при обработке крупных партий деталей;
- возможность широкой механизации приспособлений за счет применения быстродействующих съемных зажимных устройств, устанавливаемых на базисную часть приспособления методом агрегатирования.

Область применения НП охватывает все типы производства. По состоянию готовности к использованию они близки к лучшим образцам станочной неразборной оснастки.

Техническая характеристика основных серий ЦНП и СНП

Се- рия	Режим рабо- ты	Ширина рабочей поверх- ности, мм	Диа- метр устано- вочного отвер- стия, мм	Диаметр крепеж- ных от- верстий, мм	Шаг между отвер- стиями, мм	Рекомен- дуемое усилие закрепле- ния обра- батываемой де- тали, Н
10	Лег- кий	125 - 160	8	M12	40	2450- 9800
14	Сред- ний	160- 320	12	M16	60	3675- 14700
18	Тяже- лый	280- 560	16	M20	80	6125 - 24500
22	Особо тяже- лый	500- 800	20	M24	100	9065- 36260

Сборные приспособления. В систему входят универсально-сборные и сборно-разборные приспособления (УСП и СРП).

Первые применяются в основном в единичном и мелкосерийном производстве, представляют собой разборные станочные приспособления многократного применения.

Компоновка УСП собирается из заранее изготовленных стандартных деталей и сборочных единиц высокой точности и прочности для выполнения одной (нескольких) деталиеоперации и не требует дополнительной механической обработки.

После выполнения операции приспособление возвращается на участок сборки УСП, где разбирается; элементы УСП могут многократно применяться для сборки других приспособлений. Базирование деталей и сбо-

рочных единиц УСП при компоновке приспособлений осуществляется посредством шпонок, устанавливаемых в Т-образных и П-образных пазах.

С целью расширения области применения и повышения эффективности использования комплекты УСП снабжены универсальными средствами механизации. В ряде случаев они довольно успешно применяются для оснащения ПС.

Сборно-разборные приспособления являются разновидностью оснастки многократного применения, предназначенной для крупносерийного и массового производства. Они представляют собой станочные приспособления, собираемые для выполнения одной (нескольких) детали операции из заранее изготовленных стандартных деталей и сборочных единиц нормальной точности и прочности. При необходимости получения на обрабатываемых деталях размеров повышенной точности производится доработка поверхностей СРП, контактирующих с обрабатываемой деталью (опорных поверхностей специальных сменных наладок).

Компоновки СРП могут применяться для технологического оснащения ПС.

Унифицированные приспособления. Анализ функционирующих в настоящее время ПС показывает, что для их оснащения широко используются системы УП, которым присущи характерные особенности как наладочных, так и сборных приспособлений. Как и наладочные приспособления, каждая такая система включает базовые конструкции, устанавливаемые на сменных палетах станка, и наладки, монтируемые на базовых конструкциях. Однако в отличие от НП, сменные наладки которых соответствуют особенностям формы каждой заготовки, наладки такой системы выполняются универсальными: либо с сетками высокоточных установочных и крепежных отверстий, либо с сеткой Т-образных установочных и крепежных пазов. Благодаря универсальности наладок возможно их повторное применение для установки других заготовок, что является характерным для СП. Как и СП, системы УП включают в себя универсальные позиционирующие и зажимные элементы.

В зависимости от степени гибкости автоматизации, способа транспортирования и установки на станках обрабатываемых деталей, ПС могут оснащаться унифицированными приспособлениями по двум направлениям.

В случае реализации первого направления оснащение ПС осуществляется следующим образом. Базовые приспособления с постоянно закрепленными универсальными наладками, образуя приспособление-спутник, устанавливаются и жестко закрепляются на сменных палетах станка. Необходимое количество палет и приспособлений-спутников для работы одного станка в автоматизированном режиме в зависимости от времени обработки составляет от 4 до 12 шт. Обрабатываемые детали на станции загрузки устанавливаются на приспособления-спутники и транспортируются к станкам, встроенным в ПС.

Переналаживаемые системы, построенные по такому принципу оснащения, получили наибольшее распространение, так как позволяют обрабатывать детали различных конфигураций и размеров. Существенным недостатком их является то, что при оснащении УП такого типа требуется большое количество трудоемких в изготовлении и материалоемких сменных палет и приспособлений-спутников. В результате существенно увеличиваются сроки и стоимость оснащения, требуются большие площади для складов-накопителей и большая грузоподъемность транспортных средств.

При реализации второго направления развития УП для ПС указанный недостаток устраняется, так как базовые приспособления устанавливаются и постоянно закрепляются всего на двух сменных палетах станка. Однако в отличие от базовых приспособлений первого направления, конструкция приспособлений в данном случае позволяет автоматически базировать и закреплять универсальные сменные наладки (плиты-спутники) с обрабатываемыми деталями. Эти детали на станции загрузки устанавливаются на универсальные сменные наладки, которые транспортируются к станку промышленным роботом или другим транспортным средством и устанавливаются на базовом приспособлении в позиции загрузки станка. В этом случае возможна обработка деталей, различных по конфигурации и размерам. Данный вари-

ант оснащения позволяет уменьшить количество сменных палет и базовых приспособлений до 2 шт. на один станок, за счет чего сокращаются сроки и стоимость оснащения, площади складов-накопителей и необходимая грузоподъемность транспортных средств.

Автоматически переналаживаемые приспособления с ЧПУ. Значительные капитальные и текущие затраты при применении приспособлений-спутников вызвали необходимость создания таких транспортных систем, в которых заготовки транспортируются и устанавливаются без спутников. В системе автоматически переналаживаемых приспособлений с ЧПУ переналадка установочных и зажимных элементов (регулирование их положения по трем осям координат при смене объекта обработки) осуществляется без участия человека в любой последовательности по заданной программе с помощью ЭВМ, в которую вводят данные о типе и необходимом положении заготовки.

Автоматические переналаживаемые приспособления являются широкоуниверсальными и обеспечивают высокую гибкость производства. По мнению некоторых специалистов, данные приспособления по мере своего развития могут вытеснить приспособления-спутники. В результате их внедрения будут созданы новые гибкие автоматизированные технологические системы с высокой степенью загрузки, использующие интенсивные режимы резания.

Станочная оснастка с унифицированными координатно фиксирующими элементами предназначения для базирования и закрепления широкой номенклатуры деталей различных как по конфигурации, так и размерам заготовок. Элементы оснастки могут эффективно использоваться как в составе комплекта, так и отдельно друг от друга.

По функциональному назначению и конструктивному использованию элементы оснастки можно условно разделить на три группы, состав которых приведен в табл. 2.

С целью снижения затрат на механизацию и автоматизацию переналаживаемой технологической оснастки, обеспечения большей простоты конструкций и ее надежности в работе просматривается тенденция создания ТО по групповому принципу с учетом обеспечения максимальной загруженности.

Состав и функциональное назначение элементов
разработанной системы

Наименование группы	Состав группы	Функциональное назначение
Базовые элементы	Кубы; одно- и двухсторонние угольники; подставки	Ориентация при установке; базирование и закрепление сменных элементов (плит)
Сменные элементы	Плиты нескольких типов-размеров	Компоновка переналаживаемых приспособлений на базе плит с применением деталей группы "установочно-зажимные элементы" или специальных наладок
Установочно-зажимные элементы (УЗЭ)	Опоры, прокладки, сегменты, упоры, призмы, пальцы, шпонки, планки, прижимы, прихваты, болты, гайки, винты, шайбы, шпильки	Компоновка переналаживаемых приспособлений на базе сменных элементов под конкретные обрабатываемые детали

В настоящее время разработано и широко применяется пять комплектов агрегатных средств механизации (АСМ) отличающихся условиями закрепления обрабатываемых заготовок.

В состав комплектов входят гидравлические цилиндры двухстороннего действия, устанавливаемые на плитах переналаживаемых приспособлений всех типов, рукава высокого давления, быстроразъемные муфты, соединительная и крепежная арматура. Источник давления представляет собой двухступенчатый пневмогидрообразователь последовательного действия с электропневматическим управлением, который действует от пневматической системы цеха, преобразующий низкое давление воздуха сети (4 – 6 атм) в высокое давление рабочей жидкости (100 – 200 атм).

Для механизации приспособлений, устанавливаемых на вращающихся и перемещающихся станках токарного и многопозиционного оборудования применяется быстроразъемные «бесшланговые» зажимы, которые не требуют постоянного присоединения к источнику давления.

Последнее время, в связи с созданием постоянных магнитов большой мощности (усилия), все большее распространение получает переналаживаемая магнитная оснастка, которая позволяет вести не только шлифовку, но и фрезеровку на максимальных режимах. Она более гибкая и удобная в эксплуатации и постепенно начинает вытеснять гидравлическую.

Применение предлагаемой станочной оснастки способствует уменьшению потребности в материальных и трудовых затратах на технологическую подготовку производства, повышает его мобильность и расширяет возможности оборудования.

Литература

1. Обратная технологическая оснастка для ГПС / А.Я. Мовшивоч, А.С. Кобзев, В.П. Горбулин и др. – К.: Техника, 1992. – 216 с.
2. Станочные приспособления: Справочник. Т. 2. / Под ред. Б.Н. Вордашкина, В.В. Данилевского. – М.: Машиностроение, 1984. – 468 с.
3. Глущенко В.И., Ряховский А.В. Рациональный выбор технологической оснастки для многокоординатного оборудования и ГПС. – М.: Оборонная техника, 1994. – 280 с.

Поступила в редакцию 15.06.2007

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

В.Н. Павленко, С.А. Полтарушников, В.Н. Сапрыкин

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УЗЛА ПРЕСС-ПУШКИ ДЛЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ

Расчет на прочность ствола в установке для реализации ГДШ. Источником движения снаряда является энергия газа в заснарядном объеме, которая может быть подведена путем сгорания пороха. При этом параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) ствола определены как с учетом давления газов в заснарядной полости, так и с учетом изменения температуры ствола в результате его нагрева, т.е. рассмотрена термодинамическая модель. Показано, что расчет на прочность в опасных точках ствола можно проводить в первом приближении в квазистатической постановке с использованием энергетической теории прочности.

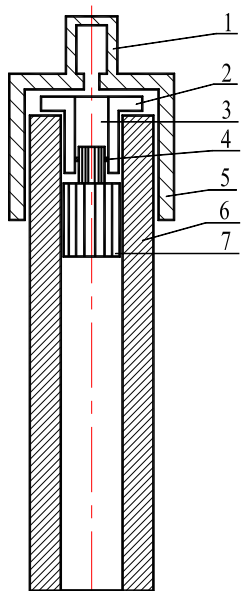
ствол в установках ГДШ, параметры НДС элементов ствола, термодинамическая модель, энергетическая характеристика пресс-пушки, энергетическая теория прочности

Применение в производстве авиационной техники высокопрочных материалов с улучшенными и специальными характеристиками, повышенные требования к качеству, точности и надежности изделий, частое обновление и совершенствование конструкций изделий и как следствие – мелкосерийный характер производства предопределили использование оборудования для импульсной безотходной обработки металлических заготовок, в частности пресс-пушек (ПП) для гидродинамической штамповки (ГДШ) [1, 2]. Вопросам проектирования и создания этого оборудования посвящены работы школ Р.В. Пихтовникова, Ю.Н. Алексева, В.К. Борисевича, А.И. Зимина и др. [3]. Однако дальнейшая эксплуатация этого оборудования и разработка новых технологических процессов, реализуемых на нем, невозможна без совершенствования методик расчета, повышения степени компьютеризации проектно-технологических работ, а также перехода от натурального эксперимента к математическому моделированию.

Наиболее нагруженным элементом пресс-пушек для ГДШ, который оп-

ределяет многие параметры технологического процесса, является энергетический узел, чаще всего ствольного типа.

Энергетический узел (ствол) ПП представляет собой толстостенный цилиндр, заглушенный днищем и предусматривающий движение массивного снаряда в сторону свободного торца под действием давления газа с переменными во времени термодинамическими параметрами (рис. 1). Основные



параметры этого процесса давление газа и тепловое воздействие продуктов сгорания того или иного химического заряда по внутренней поверхности энергоузла, скорость, запасенная снарядом кинетическая энергия, КПД связаны с массой заряда, массой снаряда, диаметром ствола и ограничены прочностью материала ствола.

Сгорая, пороховой или иной заряд, выделяет разогретые до 2000-3000 К газообразные продукты, которые расширяясь за счет запаса внутренней энергии, выталкивают снаряд. Продукты сгорания отдают часть своей энергии посредством теплообмена материалу ствола и снаряда, нагревая их. При теплообмене газа и стенок ствола в массивных частях энергоузла возникают нестационарные, неоднородные поля температур.

Рис. 1. Энергетический узел:
1 – механизм воспламенения;
2 – заряд энергоносителя;
3 – затвор; 4 – связь снаряда
с взрывной камерой; 5 – затвор;
6 – ствол; 7 – снаряд

Вследствие неравномерного разогрева стенок возникают температурные напряжения, которые необходимо учитывать при проектировании стволов и оценивать их влияние на общее напряженное состояние разогретого ствола при выстреле. Давление газов в заснарядной камере не превышает 500 МПа. Действие давления газов на стенки ствола, как и поля температур в стволе являются факторами, обуславливающими напряженно-деформированное состояние в стволе.

Кратковременность протекающих процессов и высокая интенсивность рабочих нагрузок, сложность и разнообразие конструктивных решений

определяют суть проблемы обеспечения прочности и долговечности энергетических узлов оборудования импульсного формообразования деталей.

В публикациях не рассматривается комплексная задача, в которой рассматривается взаимодействие деформируемого твердого тела (ствола) с параметрами газа, того или иного химического заряда, характерными для процесс выстрела в стволе ПП, не рассмотрены.

В связи с этим целью данной работы является оценка динамического поведения ствола ПП для ГДШ с учетом комплекса процессов, протекающих в энергетическом узле, а именно исследование НДС и прочности стволов, на основе данных о совместном действии одновременно изменяющихся давлений и поля температур.

Типовая схема такого устройства, достаточная для исследования, представлена на рис. 2.

Исходными данными для проведения прочностного расчета, являются ре-

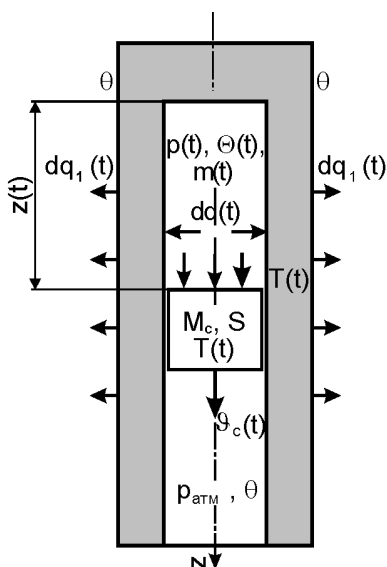


Рис. 2. Типовая расчетная схема энергетического узла:

M_c – масса снаряда; m_c – масса порохового заряда, v_c – скорость снаряда, S – площадь поперечного сечения снаряда

зультаты совместного решения комплексной многопараметрической газодинамической интегро-дифференциальной модели, которая полностью описывает термодинамические процессы и НДС ствола при выстреле с учетом тепловых потерь [1]. Основными из них являются: геометрические параметры канала ствола, диаметр – d и длина ствола – L , величина заснарядного объема – V_0 , а также закон распределения давления – $p(t)$ и температур внутри канала ствола – $\Theta(t)$, как в пространства, так и во времени.

Характерные закономерности изменения основных термодинамических параметров процесса разгона снаряда (давление и температура пороховых газов в заснарядной камере ствола), а также закон движения снаряда приве-

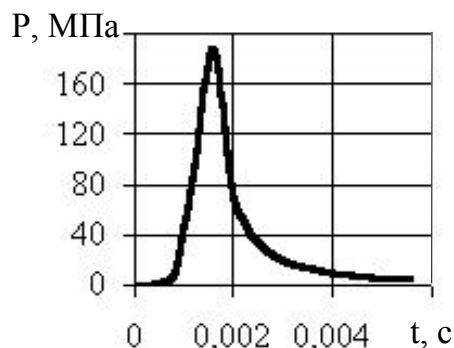


Рис. 3. Изменение давления пороховых газов

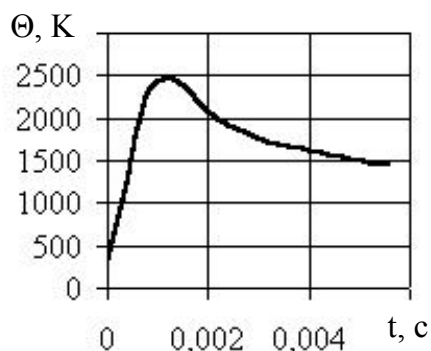


Рис. 4. Изменение температуры пороховых газов

дены на рис. 3 – 5.

Перед проведением поверочного расчета на прочность ствола, выполним исследования разогрева ствола, как за время одного, так и при серии выстрелов. При этом высокая температура пороховых газов влечет за собой возникновение высокоградиентного поля температур в стволе, что может при определенных условиях вызвать значительные температурные напряжения в стволе. В связи с этим необходимо при проектировании

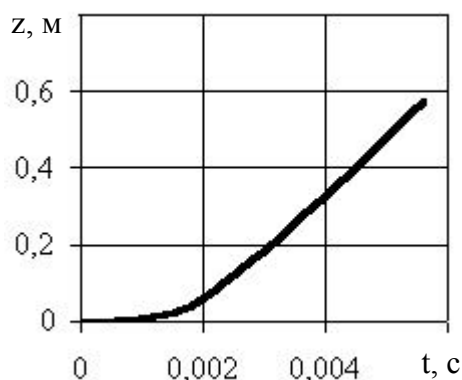


Рис. 5. Закон движения снаряда

ствола оценить их влияние на общее напряженно-деформированное состояние ствола. Кроме этого необходимо оценить влияния разогрева ствола на механические характеристики материала ствола.

На основании разработанной расчетной модели, приведенной в [1], установлен закон изменения температурного поля по толщине ствола в зависимости от количества выстрелов (1 – одного выстрела; 2 – 10 выстрелов;

3 – 20 выстрелов), если продолжительность одного технологического цик-

ла составляет 120 с представлено на рис. 6.

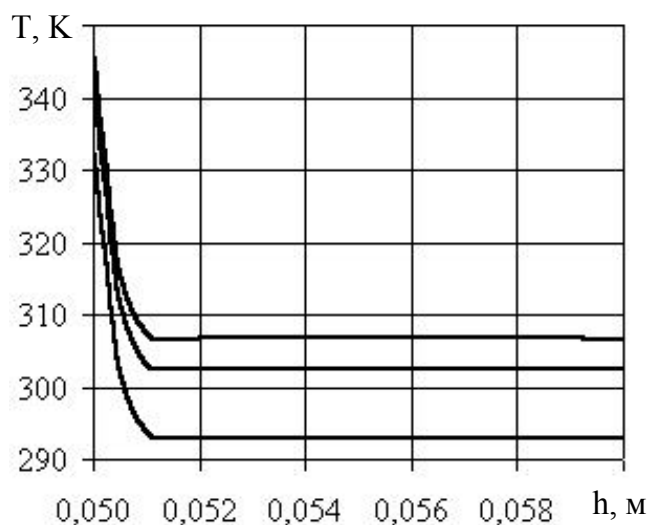


Рис. 6. Распределение температурного поля по толщине ствола

Кратковременность действия температурной нагрузки и существенное время остывания приводят к тому, что ствол к началу следующего выстрела почти полностью остывает, в результате чего каждый последующий выстрел приводит к увеличению температуры внутренней и наружной поверхности ствола на 3÷5% если сравнивать с полем температур после первого выстрела.

При единичном выстреле наблюдается низкий уровень температур в стволе, в результате чего нет необходимости учитывать изменение механических характеристик.

После изучения процесса разогрева ствола переходим к определению эквивалентных напряжений возникающих в стволе энергетического узла ПП.

Исходными данными для определения эквивалентных напряжений по одной из теорий прочности являются: закон изменения давления пороховых газов, во времени (рис. 3); закон движения снаряда (рис. 5); температура ствола (рис. 6).

Зная нагрузки, действующие на стенки ствола можно определить НДС ствола и провести проверочный расчет на прочность. В последнее время

при расчете прочности артиллерийских стволов [4], частным случаем которых являются гладкие стволы ПП, наметилась тенденция перехода от теории наибольших линейных деформаций (вторая теория прочности), к теории удельной потенциальной энергии формоизменения (четвертая теория прочности Мизеса-Хилла), которая и будет использована в дальнейшем анализе.

Эквивалентное (расчетное) напряжение определяется формулой

$$\sigma_{\text{экв}}^{IV} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{экв}}^{IV}$ – эквивалентные напряжения; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Условие прочности в нашем случае принимает следующий вид

$$\sigma_{\text{экв}}^{IV} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение, определяемое по следующей формуле:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T}, \quad (3)$$

где σ_T – предел текучести материала ствола; n_T – коэффициенты запаса прочности: $n_T = 1,4 - 1,6$ [6].

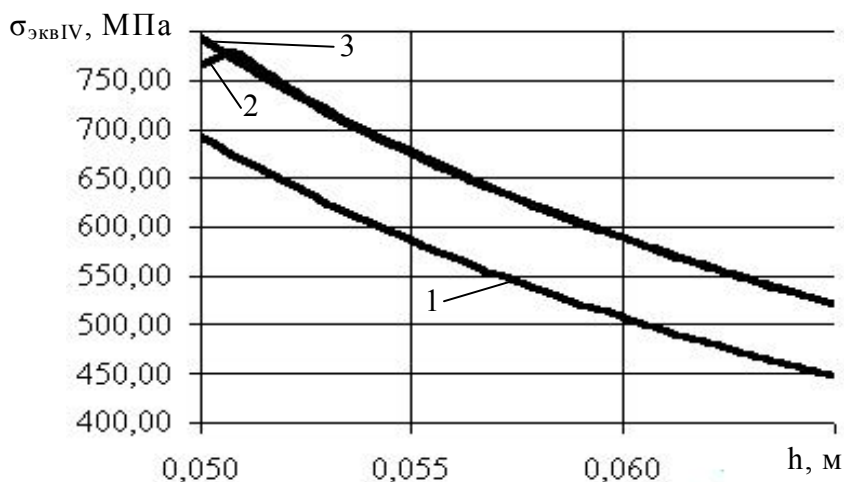


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений по толщине ствола

С целью выявления вклада каждого из факторов (давления, температу-

ры) в напряженное состояние ствола выполнен соответствующий анализ. Одновременно с этим проведено сравнение результатов по напряженному состоянию, возникающему за счет давления рассчитанному по динамической модели, т.е. с учетом нестационарности, и в предположении действия статического давления, равного пиковому [6].

С учетом принятых допущений, геометрических размеров и материала ствола типичное распределение эквивалентных напряжений, как от поля давления, так и от совместного действия поля температур и давления пороховых газов в опасном сечении в зависимости от толщины стенки ствола при статическом и динамическом расчете приведено на рис. 7.

На рис. 7 кривая 1 показывает эквивалентные напряжения полученные

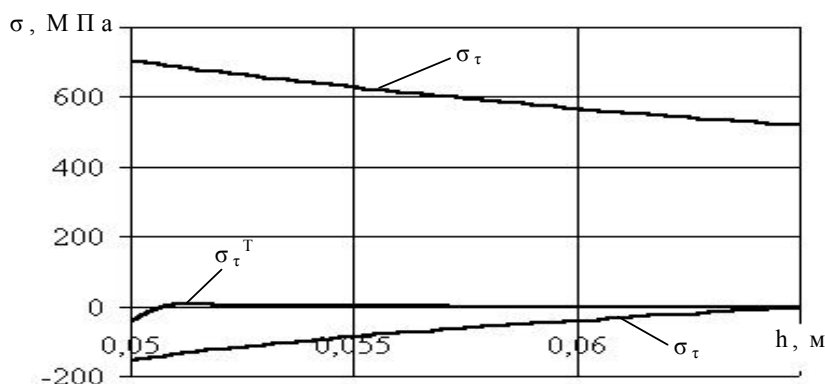


Рис. 8. Распределение окружных и радиальных напряжений по толщине ствола:

σ_{τ}^T — окружное напряжение от поля температур в стволе

при статическом расчете без учета температурных напряжений; 2 — динамический расчет с учетом температурных напряжений; 3 — динамический расчет без учета температурных напряжений).

Проведенный расчет, позволил установить закон распределение окружных напряжений от поля температур в стволе и давления пороховых газов, а также радиальных напряжений от давления пороховых газов (рис. 8).

Совместный анализ рис. 7 и 8 показывает, что сжимающие температурные напряжения возникают в пограничном слое (рис. 8), учет которых приводит к тому, что уровень эквивалентных напряжений на внутренней

поверхности ствола ниже, чем при расчете эквивалентных напряжений без учета температурных напряжений (рис. 7).

Эквивалентные напряжения в стволе установки работающей со временем цикла меньше 120 с уменьшаются от выстрела к выстрелу в связи с ростом температуры внутренних слоев ствола и вследствие этого с ростом отрицательных температурных напряжений. Поэтому в режиме циклической работы наиболее опасным в смысле прочности будет первый выстрел, и нет необходимости в исследовании напряженно-деформированного состояния энергетических узлов в режиме циклической работы.

В результате деформирования ствола происходит изменение зазора между стенками ствола, величину которого необходимо знать, чтобы правильно оценить тепловые потери, связанные с истечением газа через зазор.

Изменение радиального перемещения стенки ствола толщиной 0,015 м, в момент возникновения максимальных напряжений в стволе, приведено на рис. 9. Как видно радиальное перемещение внутренней поверхности ствола составляет порядка 0,13 мм, что с учетом принятого зазора при расчете не превышает ограничения на величину зазора, в зависимости от диаметра ствола, которая составляет от $0,25 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ м.

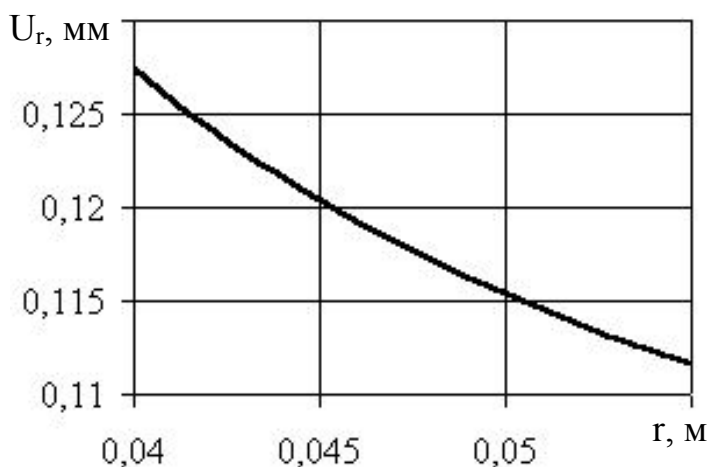


Рис. 9. Изменение радиального перемещения в стенке ствола

Анализ показал, что не происходит заметного уменьшения КПД энергетического узла.

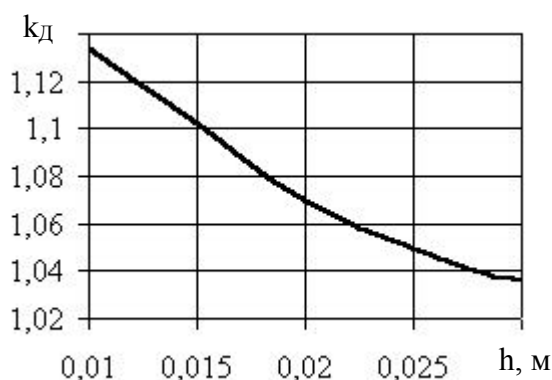
Далее, пользоваться статическим подходом можно только при ориентировочном расчете прочности ствола с учетом коэффициента динамичности.

Коэффициент динамичности введем следующим образом:

$$k_D = \frac{\sigma_{D_{\text{экв}} \max}^{IV}}{\sigma_{\text{СТ}_{\text{экв}} \max}^{IV}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{D_{\text{экв}} \max}^{IV}$ – максимальные эквивалентные динамические напряжения в стенке ствола, посчитанные с учетом действия поля давлений и поля температур; $\sigma_{\text{СТ}_{\text{экв}} \max}^{IV}$ – максимальные эквивалентные статические напряжения в стенке ствола, посчитанные от действия только поля давлений пороховых газов.

Численная зависимость коэффициента динамичности от толщины стенки ствола, полученная на основании проведенных теоретических исследований представлена на рис. 10. Результаты исследований показали, что



коэффициент динамичности слабо зависит от массы заряда и массы снаряда, т.е. он может быть определен для общего случая в зависимости от толщины стенки ствола.

Рис. 10. Зависимость коэффициента динамичности от толщины стенки ствола

Выполненный прочностной расчет показал:

- из-за кратковременности действия выстрела температура пороховых газов воспринимается лишь тонкими слоями металла, прилегающими к поверхности канала ствола;

- температурные напряжения распространяются в пределах пограничного слоя, не оказывая существенного влияния на общее напряженное состояние ствола. Однако проведение динамического расчета без учета на-

пряжений от поля температур при одном выстреле приводит к увеличению запаса прочности ствола в 1,03...1,14 раза;

– радиальные перемещения внутренней поверхности ствола не превышают предельных значений, в результате чего не происходит заметного уменьшения коэффициента полезного действия энергетического узла;

– в случае учета динамического поведения конструкции под действием приложенных нагрузок при помощи коэффициента динамичности, при расчете на прочность стволов при одном выстреле можно перейти от динамического подхода определения напряжений к статическому подходу (задача Лямэ).

Литература

1. Брагин А.П., Мацукин Ю.Г. Пресс-пушки как машинное оборудование для гидродинамической штамповки // Импульсная обработка металлов давлением. – Х., 1981. – Вып. 9. – С. 18-22.

2. Кривцов В.С., Нарыжный А.Г., Павленко В.Н. Математическая модель напряженно-деформированного состояния и термодинамических процессов ствола технологической пресс-пушки // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосмич. ун-т. «ХАИ», 1998. – Вып. 6. – С. 104-108.

3. Пихтовников Р.В., Завьялов В.И. Штамповка листового металла взрывом. – М.: Машиностроение, 1964. – 175 с.

4. Орлов Б.В., Ларман Э.К., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. – М.: Машиностроение, 1976. – 432 с.

5. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наук. думка, 1988. – 737 с.

6. Павленко В.Н. Совершенствование конструктивных параметров и технических характеристик энергетических узлов пресс-пушек для гидродинамической штамповки: Дис.... канд. техн. наук. – Х., 2002. – 152 с.

Поступила в редакцию 13.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП “Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, Харьков.

С.А. Бычков, В.К. Борисевич, В.С. Кривцов, А.П. Брагин

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
"Харьковский авиационный институт", Украина*

О КОНЦЕПЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ДЛЯ ВЫБОРА ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Рассматриваются реализованные процессы высокоэнергетических импульсных процессов листовой штамповки и предлагается алгоритм выбора конкретной технологии для конкретного производства.

высокоэнергетический импульсный процесс, металлообработка, взрывчатые вещества, рациональное применение, алгоритм выбора

В 50-х годах прошлого столетия началось промышленное использование высокоэнергетических импульсных технологических процессов обработки материалов давлением. Машиностроение обратило на них внимание вследствие возникшего дефицита в высокоэффективных технологиях металлообработки новых конструкционных материалов – высокопрочных и труднодеформируемых. Востребованность производства привела к появлению новейших методов взрывной штамповки бризантными взрывчатыми веществами (ВШ), электрогидравлической (ЭГШ), детонационно-газовой (ДГШ), гидродинамической (ГДШ), магнитоимпульсной (МИОМ).

Краткая обобщенная техническая информация (на основе отечественных и зарубежных источников) импульсных способов листовой штамповки представлена в табл. 1. В ней показаны технологические возможности методов импульсной обработки материалов для листовой штамповки.

К началу 70-х в мировой практике сложились основные направления и определились способы импульсной обработки материалов и их характерные параметры. На некоторых предприятиях отрасли при участии НИАТа, НИИТМа, ХАИ, МАТИ, МВТУ им. Баумана, СО АН СССР создавались участки взрывной штамповки (Казанский авиационный завод

Таблица 1

Краткая обобщенная техническая информация импульсных способов листовой штамповки

Наименование		Штамповка взрывом	Штамповка порохом	Детонационно-газовая штамповка	Штамповка испарением сжиженного газа	Штамповка электрическим разрядом		МИУ	Гидродинамическая штамповка				
	Источник энергии	Бризантные ВВ	Металлические ВВ	Смесь газов	Жидкий азот	Взрыв проволоки	Электро-разряд в жидкости	Магнитное поле	Порох	Газ высокого давления	Смесь горючих газов	Вакуум	Перегретый пар
Характеристики источника энергии	Способ высвобождения энергии	Детонация	Горение	Горение, детонационное горение	Испарение и расширение газа	Испарение проволоки	Ионизация среды	Изменение магнитного поля	Горение	Расширение	Горение	Перемещение бойка атмосф. давл.	Расширение
	Длительность импульса, с	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-3} \quad 10^{-6}$	$\sim 10^{-1} \quad 10^{-2}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-3}$
	Скорость волны давления или инструмента	1200... 750	300... 2500	300... 2500		6000	6000	3000... 6000	50... 250	15... 50	50... 100	15... 30	20... 50
	Передающая среда	вода, воздух, песок	воздух, вода	газ, эластичные мембраны	испарившийся газ, вода	вода	вода	воздух, магн. поле	разделительный поршень + жидкость, гель, эластомер				

Продолжение таблицы 1

Наименование		Штамповка взрывом	Штамповка порохом	Детонационно-газовая штамповка	Штамповка испарением сжиженного газа	Штамповка электрическим разрядом		МИУ	Гидродинамическая штамповка				
	Источник энергии	Бризантные ВВ	Металельные ВВ	Смесь газов	Жидкий азот	Взрыв проводки	Электроразряд в жидкости	Магнитное поле	Порох	Газ высокого давления	Смесь горючих газов	Вакуум	Перегретый пар
Технологические характеристики	Тип оборудования	Бассейн, броня, броникамера, взрывные прессы	Броникамера, взрывные прессы	Прессы закрытой схемы, прессы открытого типа	Специальные установки	Специальные установки	Прессы электрогидравлические	Магнитно-импульсные установки	Пресспушки	Прессы гидроударного действия	Прессы гидроударного действия	Вакуумные установки	Модернизированные пресспушки
	Расположение оборудования	На удалении от производственных помещений	Отдаленное	Отдаленное	Без особых требований	Отдаленное	Отдаленное	Отдаленное	Изолированное от механического производства	Без особых требований	Отдаленное	Без особых требований	Без особых требований
	Мах габарит штампуемой детали, м	5 м более	1,5	1,5	0,6	достигн. 1,5 перспект. 3,0	достигн. 0,9 перспект. 1,5	достигн. 0,3 перспект. 1,2	достигн. 0,45 перспект. 0,8	0,35	0,45	0,3	0,3

Наименование		Штамповка взрывом	Штамповка порохов	Детонационно-газовая штамповка	Штамповка испарением сжиженного газа	Штамповка электрическим разрядом		МИУ	Гидродинамическая штамповка				
	Источник энергии	Бризантные ВВ	Металлические ВВ	Смесь газов	Жидкий азот	Взрыв проволоки	Электро-разряд в жидкости	Магнитное поле	Порох	Газ высокого давления	Смесь горючих газов	Вакуум	Перегретый пар
Технологические характеристики	Располагаемая работа, кДж	не ограничена	до				до 500	до 120	реализов. 150 пер-спект. 250	до 50	до 50	до 10	до 10
	Источник энергии	Бризантные ВВ	Металлические ВВ	Смесь газов	Жидкий азот	Взрыв проволоки	Электро-разряд в жидкости	Магнитное поле	Порох	Газ высокого давления	Смесь горючих газов	Вакуум	Перегретый пар
	Максимальное давление на неподвижной преграде, МПа	$\geq 10^4$	$5 \cdot 10^2$		5...10		$2 \cdot 10^2$	–	$2 \dots 3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^2$	10^2	10	10^2
	Универсальность	хорошая	хорошая	удовл.	удовл.	удовл.	хорошая	удовл.	отл.	хорошая	хорошая	удовл.	хорошая

Окончание таблицы 1

Наименование		Штамповка взрывом	Штамповка порохом	Детонационно-газовая штамповка	Штамповка испарением сжиженного газа	Штамповка электрическим разрядом		МИУ	Гидродинамическая штамповка				
	Источник энергии	Бризантные ВВ	Металлельные ВВ	Смесь газов	Жидкий азот	Взрыв проволоки	Электроразряд в жидкости	Магнитное поле	Порох	Газ высокого давления	Смесь горючих газов	Вакуум	Перегретый пар
Технологические характеристики	Основные выполняемые операции	вытяжка, раздача, формовка, калибровка, отбортовка, упорочнение, сборка	вытяжка, формовка, раздача, калибровка	вытяжка, формовка, калибровка, сборка	вытяжка, раздача, формовка	калибровка, формовка, сборка	вытяжка, формовка, калибровка, раздача	раздача, калибровка, сборка	вытяжка, раздача, формовка, калибровка, сборка, шт-ка крутоизог. пат-ов, пробивка	вытяжка, раздача, формовка, пробивка тонколистовых заготовок	вытяжка, раздача, формовка	вытяжка, формовка, раздача	вытяжка, формовка, раздача
	Возможности автоматизации	удовл.	удовл.	хорошая	хорошая	удовл.	отл.	хорошая	хорошая	отл.	отл.	хорошая	хорошая

им. Горбунова, Куйбышевский авиационный завод, Новосибирский авиационный завод им. Чкалова, моторостроительные заводы в Запорожье, Николаеве, Перми, Рыбинске), где были представлены и участки электрогидравлической, магнитно-импульсной, детонационно-газовой и гидродинамической штамповки.

Однако, вместе с зарождением и многочисленными попытками внедрения новых технологических методов в действующие производства, возникла и проблема определения их рациональной области применения, своей технологической ниши и соответствующих критериев.

Однако эти критерии позволяют учитывать лишь возможные варианты технологии.

При выборе же оптимального варианта следует разработать концепции и критерии, позволяющие объективно и всесторонне грамотно определять оптимальную технологию и оборудование для каждого конкретного случая.

При этом перед руководителями производства возникают сложные, в большинстве своем противоречащие друг другу проблемы. Они являются продуктом общественного научно-технического и социального развития, современного состояния ресурсной базы.

К этим проблемам относятся:

- технологическая, определяемая наличием или возможностью обеспечения производства необходимыми техническими средствами (производственными мощностями, специальным и универсальным оборудованием, энергией, инструментом, оснащением и т.д.), научно-технической базой (программами и методиками проектирования технологических процессов, производственными инструкциями, руководящими техническими материалами), специалистами соответствующего уровня;

- организационная, требующая разработки, согласования и утверждения в инстанциях документации, регламентирующей функционирование вновь организуемых производственных участков и оборудования;

- экономическая, связанная с растущим дефицитом основных конструктивных материалов, оборудования и энергетических поступлений;

- социальная, возникшая в связи с изменением ориентации профессиональных приоритетов, возросшими требованиями к условиям труда

и культуре производства, включая медицинские и эргономические аргументы;

- экологическая, определяемая современными требованиями защиты и сохранения окружающей среды;

- демографическая, вызванная изменением пропорций возрастных и социальных формаций в обществе;

- психологическая, определяющая особенность отношения и поведения людей в условиях работы с взрывчатыми веществами, источниками мощных электромагнитных и СВЧ-излучений и сильных импульсных шумов;

- территориальная, определяющая принципиальную возможность размещения технологического комплекса.

Машиностроение, испытывая острый дефицит в новых высокоэффективных технологиях металлообработки, успешно предпринимало многократные попытки освоения импульсных технологических процессов.

Обоснование выбора и последующей реализации того или иного способа штамповки стало уже весьма затруднительным без систематизированной концептуальной ориентации.

С этой целью был разработан алгоритм выбора технологии для возможного внедрения по соотношению между физическими параметрами заготовки и детали с одной стороны и энергосиловыми возможностями конкретного метода импульсной обработки материалов с другой стороны.

Потребные параметры – параметры заготовки и детали:

- габариты детали и заготовки;
- абсолютная и относительная толщина заготовки;
- объем проштамповки;
- минимальный относительный радиусгиба детали;
- механические характеристики материала заготовки;
- энергия пластической деформации;
- максимальное потребное давление.

Энергия пластической деформации как параметр, определяющий на этапе выбора источника импульсной энергии, используется при следующих условиях:

а) объем проштамповки достаточно велик, т.е. перемещения отдельных точек заготовки соразмерны с ее абсолютными размерами;

б) импульс нагружения характеризуется высокой скоростью нарастания давления и кратковременностью его действия. Если расположить реализованные импульсные технологии в ряд по этому признаку (табл. 1), то наиболее кратковременные импульсы создаются при взрыве БВВ, при электроразряде в жидкости, при создании импульсного магнитного поля; промежуточное положение занимают процессы гидродинамической и детонационно-газовой штамповки; наконец, процесс штамповки испарением сжиженных газов можно считать квазистатическим. Предельной (теоретически) следует считать ситуацию, при которой давление в импульсе бесконечно велико, а время его действия бесконечно мало. В этом случае разгон заготовки до скоростей, определяемых законом сохранения импульса (количества движения), происходит на бесконечно малых перемещениях, что позволяет для определения НДС заготовки решать уравнение движения без правой части, но совместно с начальными кинематическими условиями;

в) имеются статистические данные по величине коэффициента полезного действия аналогичных реализованных технологических процессов;

Максимальное потребное давление используется как определяющий параметр на этапе выбора источника импульсивной энергии при следующих условиях:

а) если технологический процесс характеризуется малыми (соизмеримыми с толщиной заготовки) перемещениями точек заготовки (калибровка, чеканка, пробивка отверстий, обжим и т.д.);

б) если импульс нагружения является достаточно длительным (квазистатическим). В этом случае имеется возможность пренебречь в уравнении движения инерционными членами и, решая получившееся уравнение статического равновесия, определить потребное давление.

Располагаемые параметры.

К числу этих данных относятся:

- располагаемая или запасаемая энергия;
- коэффициент полезного действия;
- геометрические и физические параметры объектов импульсной обра-

ботки материалов;

– параметры импульса нагружения:

- а) время нарастания и время действия давления;
- б) максимальное давление импульса нагружения;
- в) величина импульса.

На рис. 1 представлен алгоритм выбора источника импульсной энергии по фактическим параметрам, т.е. алгоритм определения *возможности*

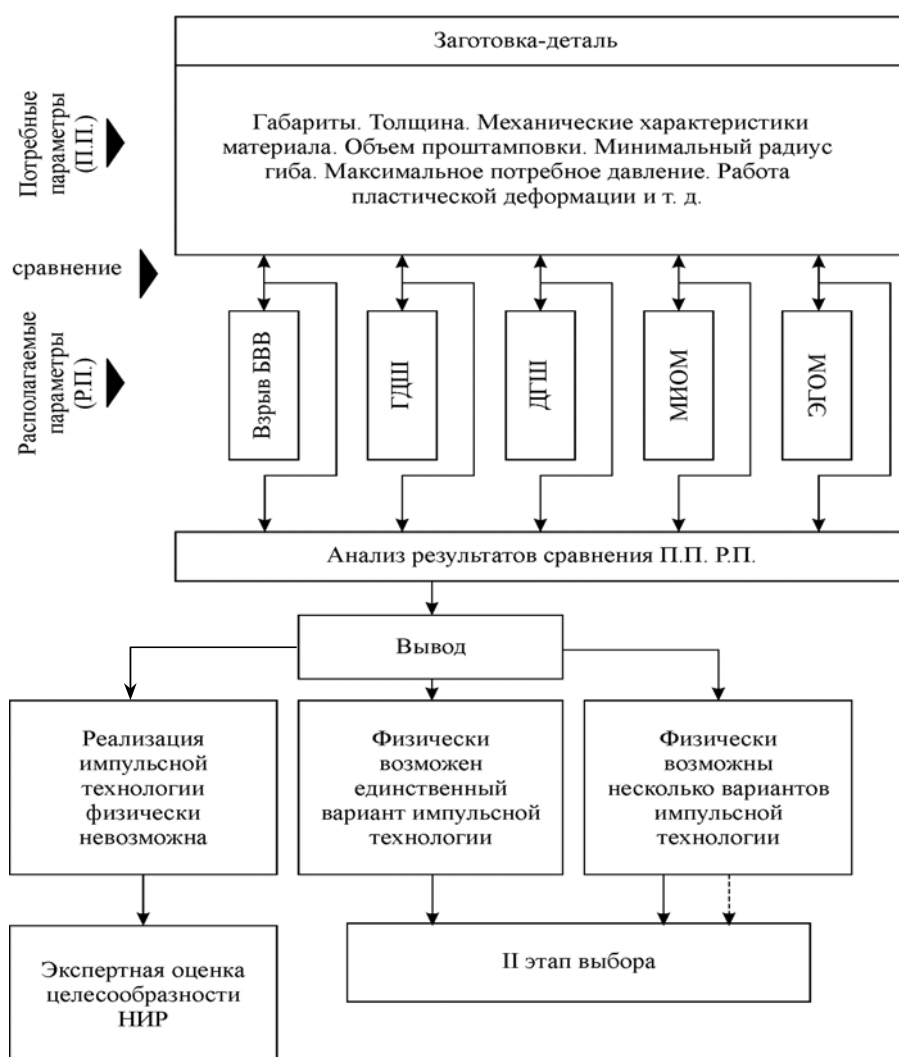


Рис. 1. Блок-схема алгоритма выбора источника импульсной энергии по фактическим параметрам (1 этап – выбор по физическим параметрам)

реализации конкретного технологического процесса с использованием конкретного источника импульсной энергии, который был теоретически и экспериментально исследован и разработан для внедрения в промышленность импульсных технологий в основном учеными Проблемной лаборатории ХАИ, руководителем которой до 1972 года был профессор, д.т.н. Р.В. Пихтовников, а в последующее время – его ученики.

Если приведенный в соответствии с этим алгоритмом анализ приводит к выводу, что реализация импульсной технологии физически невозможна, то должна быть проведена экспертная оценка целесообразности проведения НИР, так как располагаемые параметры представляют собой статистические данные по параметрам реализованных процессов и слово «невозможна» в этом случае означает «нереализована».

Если физически возможны один или несколько вариантов импульсной технологии, то необходимо перейти ко второму этапу выбора, т.е. к выбору по сравнению технико-экономических показателей.

Целесообразность внедрения определяется в результате сравнения технико-экономических показателей.

В настоящее время проводится работа по формированию информационного блока данных по перечисленным выше критериям.

В АНТК им. О.К. Антонова совместно со специалистами ХАИ планируется проведение работ по классификационной обработке статистических данных новыми математическими методами и адаптации данной концепции в современных САПР системах.

Поступила в редакцию 15.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Гребенников, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

M.A. Golovanova¹, B. Gonzalez², M.K. Knyazyev¹

¹ *Zhukovsky National Aerospace University
"Kharkiv Aviation Institute", Ukraine*

² *LABEIN Technological Research Center, Spain*

EFFICIENCY IMPROVEMENTS OF BATCH PRODUCTION OF SHEET PARTS WITH METHOD OF ELECTROHYDROIMPULSE FORMING

Analysis of influences of main factors that determine efficiency of sheet-forming production: manufacturing, organizational, designing factors, is performed. Analysis of constituents of piece and piece-calculation times for conditions of batch production allowed to reveal the most "time-consumptive" factors that influence on performance of separate elements of a manufacturing process and propose engineering solutions for improvements of equipment and organization of electrohydroimpulse forming process.

sheet-forming production, production volume, economic efficiency, operation time, discharge chamber, repairability

Under conditions of transforming economics the tasks of organization of rapid manufacture of sheet-formed products and submitting them at the markets frequently appear. Such products could be separate articles (for example, things of kitchen utensils) or be components of more complicated and expensive machines and instruments (sheet parts of aircraft engines, car body components, lighting fixture, etc.). Manufacture and selling of relatively small batch of sheet articles could show the need of large-scale or mass production. Rapid output of high-quality products at low prices would allow to manufacturing company to conquer a market.

Impulse sheet-forming methods are most suitable for conditions of small-batch production and shortest pre-production periods for manufacturing of sheet-formed items. One of impulse methods is electrohydroimpulse forming (EHF) that proved its high efficiency under market conditions of economy development and limitations applied to the use of explosives in industry connected with their storage, transportation and utilization. EHF is based on the use

of “safety” type of energy – electric energy and allows significantly reduce application of manual labour in manufacture of complicated sheet parts with providing the specified accuracy at the expense of one hard shape-determining surface (die or punch) and positive effects of metal deformation under the impulse loading.

Now EHF manufacturing processes find the increasing application in various branches of industry for production of components from sheet blanks, especially taking into account rise of volume of small-batch production of sheet parts that, in its turn, determines increased interest of specialists to seeking new ways and the most economical means for manufacture of parts with methods of sheet-metal stamping.

Efficiency increase of sheet-stamping production, including EHF method, is mainly determined by rational utilization of various kinds of resources (material, energy, labour, financial) and requires complex approach to consideration and use of these or those technologies for manufacture of articles. Increase of EHF efficiency is stipulated by, on the one hand, the influence of two groups of factors that are connected with reduction of value of capital investments to metalworking equipment, tooling, and current costs (manufacturing cost of sheet-formed parts). On the other hand, these factors could be divided into design-manufacturing and organizational ones. Interconnection between these groups of factors is shown in Fig. 1. Let us consider in more detail influence of separate factors on efficiency of sheet-stamping production.

Main factor of efficiency rise of sheet-stamping production is reduction of manufacturing cost that is determined by a number of indexes, among which reduction of labor expenditures for articles’ processing, reduction of materials consumption per a piece, reduction of capital expenditures for purchased equipment, and application of cheaper tooling, that permit to reduce capital allowances for compensation of wear of equipment being in operation (depreciation charges) and decrease costs for manufacturing re-equipment. In its turn, reduction of materials consumption depends on configuration and sizes of a part, material, from which it is made, which, in their turn, influence variant of laying-out of sheet, band or strip that being reflected in the coefficient of material utilization.

Important factor of efficiency rise of sheet-stamping production is an annual program of manufacture and volumes of batches. It is known that depend on

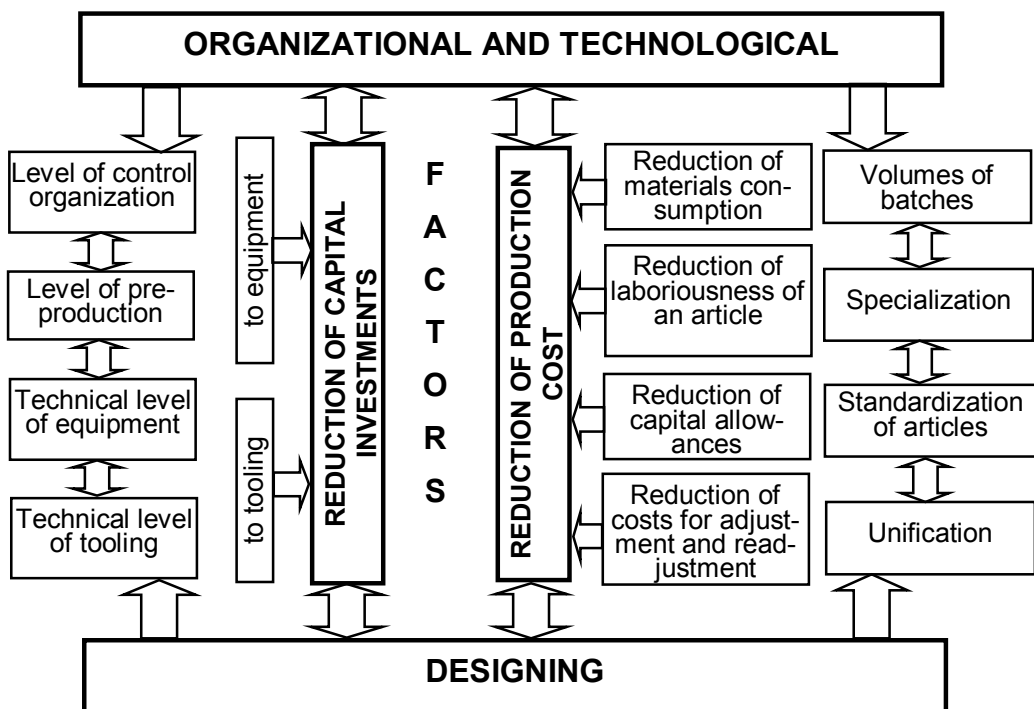


Fig. 1. Factors of efficiency increase of sheet-stamping production

sizes of parts the value of annual output program could change in 5...250 times.

Increase of production volumes of parts of the same name allows to reduce conditional-permanent segment of manufacturing cost of output products connected with amortization of special metalworking equipment, discarding the tooling, with adjustment and tuning of presses, etc.

Depend on production conditions each press could be engaged for manufacturing from several tens at conditions of batch or small-batch production to one-two item name at conditions of mass production. When batch volume increases, this feature allows significantly raising productivity of metalworking equipment and reducing labouriousness of works.

Previous investigations [1, 2] showed high technical and economical effectiveness of the EHF method under conditions of individual and small-batch production. But EHF equipment is characterized by lower productivity as compared with traditional metalworking equipment for sheet forming that practically exclude its application for middle-batch and large-batch production. This is connected, first of all, with peculiarities of organization of EHF process, which

includes large number of auxiliary functions that are to be provided and performed by EHF equipment before the beginning of impulse forming of a part and after its completing.

Change of productivity of metalworking equipment at various production volumes (volumes of batches) significantly influences the time of auxiliary motions that occupies the largest specific weight in the time per piece. Thus, analysis of structure of time allowance per piece for sheet-stamping works shows that auxiliary time occupies 50-60 % and more of total time allowance. Preparation-completing time substantially changes at various volumes of batches. At conditions of batch production the preparation-completing time reaches 30 % of actual time fund in press shops, while at mass and large-scale production it does not exceed 5-12 % [3]. Rise of specific weight of preparation-completing time at small-batch production in comparison with large-scale and mass production occurs at the expense of increase of quantity of batches putting into production and, hence, quantity of readjustments of equipment.

Thus, with rise of batches volumes the specific weights of preparation-completing and auxiliary times reduce, and, hence, hour and annual productivities increase.

Analysis of constituents of piece and piece-calculation times for production of one article allows to reveal the most "time-consumptive" links, to reveal those factors that influence on performance of separate elements of a manufacturing process and propose engineering solutions for improvements of equipment and organization of a forming process.

Modern condition of sheet-stamping production for specific types of nomenclature of sheet-formed parts is characterized by large volume of hand works. This could be explained by that at conditions of mechanized small-batch and batch production the complicated and expensive tooling could be economically not sound, therefore the simplified manufacturing processes, which apply simple tooling and hand labour for finishing works, are used. On the other hand, finishing works for formed parts occupy substantial specific weight in total labouriousness of works. Finishing works are consequence of low pressures generated at forming in certain types of equipment. The most of press equipment do not allow to obtain parts from hardly-deformed metals and alloys that causes necessity of production of part's segments with sequent welding and straighten-



Fig. 2. Conical discharge chamber and tooling placed in technological unit of the installation UEHSh-2

num alloys AD1M and 1080 in experimental installation UEHSh-2 (Fig. 2) two approaches to planning of forming process were tested. When using “classic” (traditional) approach the discharges of lower voltage of 13 kV were applied at the stage of forming of general shape, at the stage of forming of local elements – 14-15 kV, at the stage of calibration – 16 kV with capacitance of 50 microfarad. Total number of discharges was 8, total energy consumption – 42.2 kJ and main forming time – 74 s (8 charge-discharge cycles). When using nontraditional approach with higher voltage of 20-30 kV and less capacitance of 33.2 microfarad the required number of discharges reduced to two. At that total energy consumption was 21.5 kJ, and forming time decreased to 16 s that is comparative with parameters of traditional forming in the die-and-punch tooling on hydraulic presses.

Further reduction of main forming time is possible with increase of power of supply source of charge circuit.

In respect of reduction of forming time for middle- and large-size parts it could be very useful application of multi-electrode discharge blocks of directed

ing that still more increases labouriousness of hand works.

Main forming time, as a constituent of total machine and operation times, at EHF is connected with performance of specified quantity of cycles of charge-discharge of capacitors’ bank. Here the reduction of charge time is reached at the expense of mightier source of direct current.

Another reserve for reduction of main time is such an organization of forming process that provides decrease of discharges’ quantity and, respectively, consumptions of time and energy.

Thus, during adjustment of forming process for the part “model lamp reflector for exterior lighting” from alumi-



Fig. 3. General view of die and article “fairing” of 488 mm outside diameter from steel St3kp of 1,5 mm thickness

action (MDB) that allow to generate the optimized loading fields, which correspond to geometric parameters of a part. For example, during forming the part “fairing” (Fig. 3) that represents a half-torus, the load was applied only to the weighed-down segment of blank by connecting of corresponding electrodes of the installation UEHSh-2, excluding central zone where blank has round hole according to the part’s shape [4].

Use of dome-shaped discharge chamber with single electrode pair in this case would require much more quantity of mighty discharges to create specified pressure at the periphery of the chamber where torus profile is to be formed. At that the highest intensity of loading would be created in the central zone of die and the most of energy would be utilized extremely unproductive.

In order to provide high productivity it is necessary that each MDB electrode pair have its “own” discharge circuit. Though MDB is quite operable with less quantity of discharge circuits and even with one circuit. In the described case (ref. Fig. 3) forming of fairing was performed with six discharge circuits, though it is necessary to connect 12 electrode pairs for loading along all weighed-down segment of blank. Forming time with 6 electrode pairs (with use of 6 discharge circuits) was 14.5 min. taking into account rotation of the part in the die in 30° after the first pass. According to our estimation it would be necessary only 2.5-3 min., if forming would be realized with 12 electrode pairs at present power of charging source.

Next group of technical means provides shortening of auxiliary time. Significant feature of EHF equipment is large number of auxiliary motions necessary for providing the main function – impulse loading of blank. These auxiliary passes could be combined in time and, thereby, to reduce total machine time (table).

As one can see from the cyclogram the combinations of such motions as vacuuming switching-on, filling a discharged chamber with water and charge of capacitor’s bank at incomplete pouring water out discharged chamber (combi-

nation during the time τ_5); pouring out water and unclamping of tooling (τ_7); travel of table to auxiliary position, supply of compressed air into die and removal of formed part (τ_8) significantly reduce the total cycle time.

Table

Modified operation cyclogram of electrohydraulic press

No.	Name of motion	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	τ_8
1.	Cleaning and oiling of die	■							
2.	Blank mounting		■						
3.	Travel of table to working zone			■					
4.	Clamping of tooling				■				
5.	Vacuuming of die cavity					■	■		
6.	Filling disch. chamber with water					■			
7.	Charge-discharge cycles					■	■		
8.	Pouring water out disch. chamber							■	
9.	Unclamping of tooling							■	
10.	Travel of table to auxiliary position								■
11.	Supply of compressed air into die								■
12.	Removal of formed part								■

Further shortening of operation time the authors see in application of higher sources of hydraulic energy or hydraulic accumulators for accelerated motions of table and clamping-unclamping of tooling, increase of open flow areas of pipes for reduction of time for filling-pouring-out water, use of mode of incomplete pouring water out discharge chamber, increase of capacity of vacuum pump and/or application of vacuum receiver. As a special mean, robots-manipulators could serve for mounting and removal of blank, cleaning and oiling of die, and excluding the table's travels, as well as for transfer of formed article to the next press for sequent processing.

The very important characteristic of EHF equipment is its suitability for repair and maintenance. It is known that "weak" link of discharge units is high-voltage insulator of electrodes that operates under heavy conditions of impulse loading (tens thousands bars) and high electric field strength, which determine its short service life. Unfortunately, today there are no materials able to withstand such loads for a long time (comparative with service life of metallic components of a discharge chamber). Therefore design of discharge chamber should provide fast replacement of worn electrode or work part of insulator. This cha-

racteristic acquires especial value for multi-electrode discharge blocks under conditions of batch production.

Scientific workers of the KhAI EHF laboratory developed multi-electrode discharge block that provides fast replacement of caps of electrode insulators with use of quick-changeable units for clamping of discharge plate and hold-down plate with rubber diaphragm. Besides that the fast replacement of discharge units in technological block aiming to shortening of repair time with sequent replacement of electrodes or their caps on the auxiliary position of EHF production area is provided.

Application of coaxial discharge surfaces with fixed spark gaps in the MDB design excludes the adjustment time (reduces preparation-completing time) spent for tuning of optimal spark gap value.

Conclusions

Performed technical and economic analysis allowed to reveal process parameters limiting the reduction of processing cycle of EHF method under conditions of batch production.

Investigations results were used to develop technical and organizational means for providing batch production of sheet-formed articles, directions for further investigations were determined.

References

1. Chachin V.N. Electrohydraulic processing of engineering materials // Minsk: Science and engineering. – 1978. – 184 p. (in Russian).
2. Knyazyev M.K. Economical technology for production of small batches of sheet parts // Business-most, 2004, No. 4(23). – P. 17-19 (in Russian).
3. Byalkovskaya V.S. Estimation of economic efficiency of new equipment in press-forging production. Moscow: Mechanical engineering, 1972. – 111 p. (in Russian).
4. Knyazyev M.K., Chebanov Yu.I. Multi-Electrode Discharge Blocks for Electrohydraulic Forming and their Capabilities // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2004. – No. 3 (9). – P. 13-20 (in English).

Поступила в редакцию 7.04.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.С. Воробьев, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков.

Л.Р. Кириченко

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
"Харьковский авиационный институт", Украина*

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Вариантом создания достаточной конкурентоспособности для взрывных технологий обработки материалов давлением является создание гибких безмашинных производственных систем.

взрыв, конкурентоспособность, системы, безмашинная обработка материалов, технология.

Обычно взрыв воспринимается как разрушительная сила. Но можно заставить взрыв служить источником энергии для созидательной работы.

Применение энергии взрыва в качестве источника высокого давления открыло принципиально новые возможности для воздействия на вещества и материалы давлениями, значительно превышающими те, которые достигаются на прессах. Это научно-технологическое направление основано на скачкообразном превращении кинетической энергии движения массы вещества в энергию его сжатия, например, при ударе движущегося с большой скоростью предмета о твердую преграду. Скорость распространения ударной волны и давления в ней могут быть сколь угодно большими.

Это свойство эффективно использовал ученый ХАИ Р.В. Пихтовников, с 1946 г. применяя энергию взрыва для листовой штамповки с целью исследования высокоскоростного деформирования металлов (в 40-х годах такая возможность ставилась под сомнение) и создания научно-технического направления импульсной обработки материалов давлением.

Р.В. Пихтовников со своей научной школой исследовал высокоскоростное формообразование применяя различные источники импульсной энергии: бризантные взрывчатые вещества (БВВ), пороховые ВВ, газовые смеси; энергию разряда конденсаторов (электрогидравлический, магнитодинамический эффекты); расширение сжиженных газов и т.д.

Перечисленные методы отражены в содержательной части юбилейного буклета к столетию проф. Р.В. Пихтовникова, составленной на высоком уровне мастерства авторами, за плечами которых десятилетия креативной деятельности в этом направлении.

Способы различаются по энергетическим, технологическим и эксплуатационным характеристикам.

Создание новейшей аэрокосмической техники в 60-х годах и нужды промышленного производства поставили отрасли, связанные с формообразованием листовых деталей, перед необходимостью получения протяженных и сложных с минимальным количеством сварных швов деталей из высокопрочных материалов. Эти факты в 60-70-х годах XX столетия стали решающими в выборе направления дальнейших исследований.

Были достигнуты впечатляющие результаты в области обработки взрывным давлением листовых металлов. Наряду с совершенствованием технологий происходили эволюционные изменения в области технологического оснащения взрывных установок, закрытых помещений под цеха и участки взрывной штамповки.

С момента возникновения в мировой практике обработки металлов взрывом определились два направления. Первое – безмашинная штамповка с применением химической энергии БВВ, второе – машинная штамповка с использованием энергии БВВ, порохов, взрывчатых газовых смесей.

В настоящее время главным препятствием процесса внедрения взрывной обработки металлов является низкая степень автоматизации, наличие большой доли ручного труда, из-за чего исключалась возможность использования техпроцессов для крупносерийных и массовых производств.

Анализ раскрывает причины задержки в области внедрения. При достаточно совершенных и востребованных промышленностью технологиях наблюдается в значительной мере неадекватность природе источника энергии – БВВ оборудования, защитных установок и сопровождающей инфраструктуры. Этим обстоятельством частично объясняется падение в мире интереса к листоштамповочным технологиям с применением высокоэнергетических веществ и материалов.

Основная проблема защитного оборудования заключается в наличии статической металлической конструкции. Известно, что любые смены в

истории нагружения металлических конструкций ведут к смене кинетики накопления повреждений в материале конструкций. Прямое воздействие взрыва на металл защитных статических установок (взрывные прессы, вакуум-камеры и т.д.) сопровождается внезапной сменой режима нагружения, что сказывается на снижении сопротивления материала конструкции и снижает уровень допустимых повреждений в их материале. По результатам исследований [1] сопротивление материала деформированию в упругой области при внезапной смене режима нагружения может временно уменьшиться в сотни раз. Чтобы не допустить этого, между статической защитной конструкцией и источником импульсного нагружения необходима энергопоглощающая защитная среда адекватная природе данного источника – БВВ.

В последних изыскательных работах и в последней книге Р.В. Пихтовникова «Безбассейновая листовая штамповка взрывом» находим стремление профессора привести установки и оборудование в соответствие с природой источника энергии. В книге взят курс на гибкую безмашинную производственную систему (ГБПС).

Все виды опасностей, формируемых в процессе трудовой деятельности, регламентированы ГОСТами. Обычно графически они представляются как

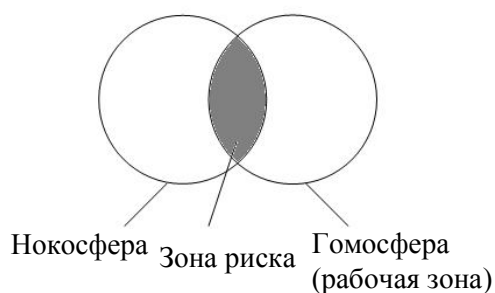


Рис. 1. Формирование области действия опасности на человека в производственных условиях

соотношения возможной опасности с местонахождением человека (рис. 1).

Путем применения энергопоглощающих материалов и сред, внесения коренных изменений в защитное оборудование ГБПС максимально умень-

шена нокосфера и область наложения нокосферы на гомосферу. В целом зона опасности защищена тремя уровнями защиты от воздействия ударной волны, сопутствующего разлета продуктов детонации; предусматривается надежная защита от почти невероятного случая разлета осколков. Уровни

защиты практически дублируют друг друга, вместе создавая надежную гарантию безопасности даже для человека, находящегося в непосредственной близости от ноксосферы.

Организация участка штамповки взрывом, снабженного гибкой безмашинной производственной системой представлена в [2].

Не задаваясь целью оптимизации экономического эффекта именно безмашинного направления обработки материалов взрывом, рассмотрим это направление с точки зрения конкурентоспособности в переходное время, переживаемое сейчас нами. Представим проблемы обеспечения дееспособности этого вида обработки материалов в условиях рынка.

Управление какими конкурентоспособными преимуществами в безмашинной взрывной обработке материалов давлением необходимо осуществлять в первую очередь?

О преимуществах штамповки взрывом написано много. Среди них следует выделить как наиболее важные с точки зрения конкурентоспособности в данный конкретный отрезок времени:

- широкие возможности создавать внешнюю нагрузку различной потребной конфигурации;
- гибкость при переходе от одной продукции к другой;
- чрезвычайно высокий уровень мобильности.

На эти благодатные технологическо-эксплуатационные возможности необходимо опираться в поисках своей ниши на рынке сбыта.

Одновременно стремиться к созданию ГБПС многопозиционной штамповки, включающей операции вытяжки, формовки, пробивки и др.

Следует обратить внимание на обстоятельство, способствующее повышению конкурентоспособности взрывных технологий. Существенно снизился барьер для входа новых технологий на рынок листоштамповочного производства по сравнению с имевшемся барьером в бывшем СССР. Тогда была хорошо (кроме последних десяти лет) отлажена плановая работа по обновлению кузнечно-штамповочного оборудования, и потребность во взрывных технологиях сводилась к уникальной области, где применение прессов было невозможно технологически или ощутимо не выгодно. Востребованность технологий ограничивалась низкой способностью их в те времена участвовать в серийном производстве. Сейчас кузнечно-штампо-

вочное оборудование сильно устарело. Из отчета «Госкомстат СССР, 1987 г.»: имелось только 50% кузнечно-прессовых машин десятилетнего возраста, 30% – до 20-ти лет и 20% – старше двадцати лет. Прибавим к этому возрасту прошедшие 20 лет, в течении которых оборудование не обновлялось, – получим нынешний возраст оборудования. Это обстоятельство заставляет искать альтернативные варианты обновлению дорогостоящего кузнечно-прессового парка.

Стоит использовать благоприятный момент новизны наших технологий: если в устоявшихся технике и технологиях в настоящее время приходится переходить на новые европейские стандарты, то для импульсных технологий и оборудования таких стандартов еще практически не существует. Необходимо спешить стать законодателями в этом направлении, чтобы в европейские стандарты заложить украинский интерес.

Выводы

В современных условиях весь потенциал созданных школой Р.В.Пихтовникова технологий взрывной обработки материалов может быть скоро востребован. Для его эффективной реализации необходимо сосредоточить усилия на обеспечении эксплуатационных, организационных, управленческих аспектов. Своевременно подготовленная производственная система поможет успешно интегрировать технологии в самые разнообразные области производственной деятельности человека.

Литература

1. Прочность материалов и конструкций / Отв. ред. В.Т. Трощенко. – К.: Академперіодика, 2005.
2. Пихтовников Р.В., Хохлов Б.А. Безбассейновая листовая штамповка взрывом. – Х.: Прапор, 1972.

Поступила в редакцию 11.05.2007

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

А.И. Долматов, В.В. Третьяк, В.Ю. Гранин, Л.А. Филипковская

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
"Харьковский авиационный институт", Украина*

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЪЕКТНОГО ПОДХОДА В РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕМ ЗАГОТОВИТЕЛЬНО- ШТАМПОВОЧНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Процесс проектирования импульсных технологий рассматривается в объектном представлении. Предложена концепция проектирования импульсных процессов в объектном представлении для реализации в современных САПР системах. Рассмотрена структура информационной базы в объектном представлении.

**заготовительно-штамповочное производство, импульсная нагрузка,
штамповка взрывом, листовая деталь, объектный подход**

В настоящее время одним из важнейших условий изготовления высококачественных изделий является проблема ресурсосбережения и технологической гибкости производства. Этим требованиям при определенных условиях применения отвечают импульсные технологии.

Детали, изготовленные импульсными методами с помощью простого оборудования и оснастки (рис. 1) обладают высокой прочностью, жесткостью и хорошими технологическими показателями.

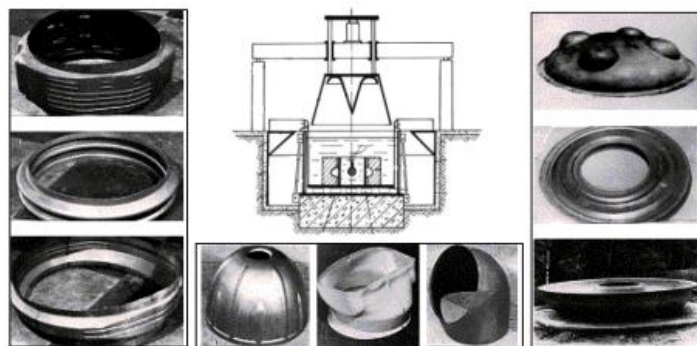


Рис. 1. Оборудование и оснастка для штамповки взрывом

Изготовление листовых деталей имеет минимальную металлоемкость и стоимость, особенно при малых сериях выпуска.

Благодаря данным свойствам импульсные методы нашли и продолжают находить свою достойную нишу при изготовлении номенклатуры деталей авиационной и космической отраслей. Так, для современного авиационного двигателя можно найти ряд листовых деталей, в которых импульсная технология будет являться конкурентоспособной в отношении ресурсосбережения и качества (рис. 2.).

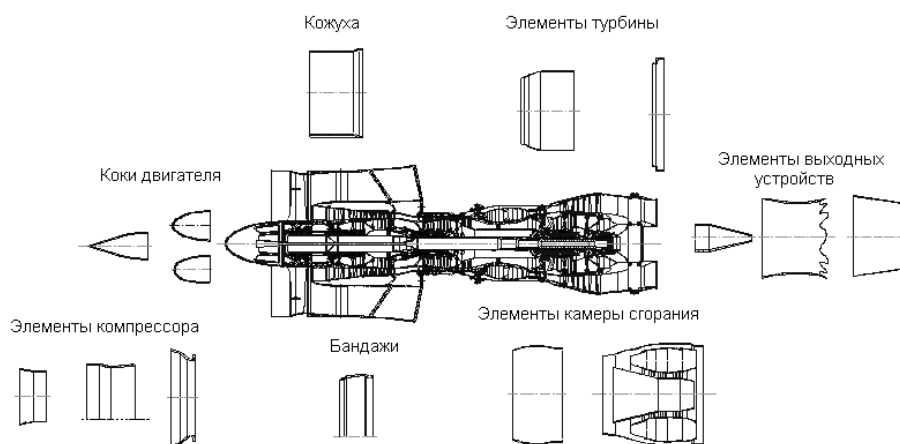


Рис. 2. Возможная номенклатура деталей авиационного двигателя для изготовления импульсными источниками энергии

Однако, сложность физики процесса и неапробированность процессов для сложных деталей требуют отработки таких процессов сначала в НИИ, а затем в производстве.

Для эффективного использования этих процессов в производстве процесс проектирования необходимо производить с использованием опыта проектирования технологических процессов на производстве и имеющейся научной базой.

Проектирование импульсных технологических процессов с использованием максимальных возможностей данных методов и их оптимизация связана с анализом и синтезом многофакторной информации, которая должна быть систематизирована и обработана соответствующим математическим аппаратом, освоенным современной наукой и удобным для производства.

Как правило, для работы с такого рода данными имеется уже отработанная информационная база для освоенных и внедренных процессов.

Наличие такой базы при соответствующей систематизации информации позволяет предприятию сохранять и приумножать свой технологический опыт, делая его доступным для новых поколений технологов. Современные системы автоматизированного проектирования позволяют легко осуществлять такую работу лишь для хорошо формализованной и полностью разработанной математической модели детали и технологического процесса.

Только в этом случае удастся для уникальных деталей вести обработку информации технологами-экспертами с минимально возможными трудозатратами без привлечения посторонних расчетчиков, в том числе высокопрофессиональных программистов.

В современных системах автоматизированного проектирования для описания технологических знаний используются принципы объектного представления знаний, в которых использованы принципы, известные и использованные в методах современного программирования (полиморфизм, наследование и инкапсуляция).

При описании детали и технологического процесса используются различные виды математических моделей, обработка которых требует использования соответствующего математического аппарата.

Математическая модель детали описывается в понятиях конструкторско-технологических элементов, которые обладают иерархической структурой, состоящей из нескольких уровней элементов. Каждый элемент, также как и деталь представляют собой объект со своим набором свойств. Используются возможности наследования свойств от старшего объекта к младшему. В САПР системах достаточно хорошо описаны принципы описания детали и технологического процесса для методов механообработки[1]. При описании объемной детали используются достаточно простые инженерные термины и их значения, что делает процесс легким и доступным для технологов в виде конструкторско-технологических элементов. Данная концепция очень удачно реализована в интеллектуальной среде СПРУТ – ТП.

Анализ номенклатуры листовых деталей сложной конфигурации пока-

зал, что одним из наиболее эффективных методов их изготовления является деформирование заготовок нагружением их через подвижные передающие среды (ППС): жидкость, газ, эластичные материалы (резина, полиуретан). Нагружение материала заготовки осуществляется как при низких скоростях, так и при высоких с использованием импульсных методов.

Процесс формообразования поверхностей деталей при таких видах штамповки идентичен. В нем выделяются три основных этапа деформирования: получение генеральной формы детали, формообразование элементов рельефа и отдельных фрагментов, обеспечение параметров точности.

Для реализации этих методов достаточно легко используют одноинструментальную схему штамповки (в основном по жесткой матрице: роль универсального пуансона выполняет ППС). Благодаря простоте технологического оснащения (оборудования и штампа) методы широко используются при изготовлении деталей в производстве с частой сменой объекта и небольших величинах партий деталей.

При этом следует заметить, что для новых эффективных методов штамповки не проведена формализация знаний с позиций системного подхода, пригодного для использования в современных системах автоматизированного проектирования, где использовано объектное представление как детали, так технологического процесса и оснастки. Это связано со сложностью и недостаточным исследованием физики импульсных процессов, отсутствием нормативно-справочных данных и т.д.

Разработана математическая модель [2], позволяющая формировать новые технологические процессы, с использованием формализованных знаний экспертов-технологов накопленных наукой и производством, которая может быть легко реализована современными системами автоматизированного проектирования (САПР, САПР ТП и др.).

Математическая модель детали и технологии (рис.3), описывается как объект, состоящий из конструкторско-технологических элементов. Объект характеризуется именем и идентификатором и в свою очередь состоит из объектов более низкого уровня, которые связаны между собой соотношением род-вид (например, представление детали по отношению симметрии) и целое-часть (составные части детали на различных уровнях декомпозиции описания).

Математическая модель проектирования импульсных технологических процессов описывается в виде иерархической классификации: метод обработки, этап обработки, операция, переход. Метод обработки складывается из этапов, этапы – из операций, операции – из переходов.

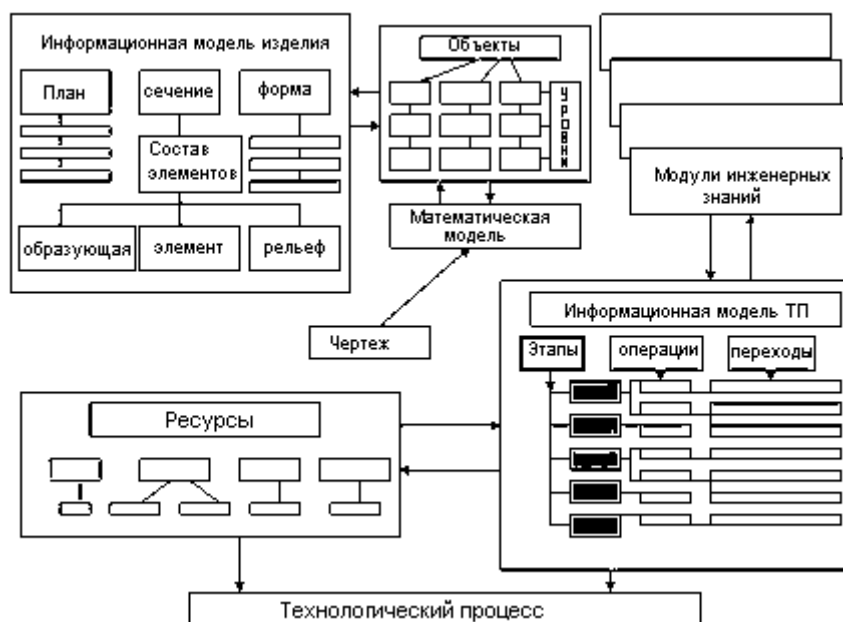


Рис. 3. Объектное представление импульсных процессов

Проектирование ТП на уровнях формирования последовательности этапов, операций и переходов складывается из двух фаз: структурного и параметрического синтеза. Структурный синтез устанавливает последовательность элементов на соответствующем уровне. При параметрическом синтезе формируются свойства элементов, уже включенные в технологический процесс.

При разработке технологического процесса на уровне структурного синтеза используются методы распознавания образов.

Традиционно этапы проектирования технологических процессов включают лишь методы инструментальной обработки. Такой подход позволяет использовать конкретное графическое представления технологии лишь для узкой номенклатуры деталей, что приводит к усложнению процесса проектирования.

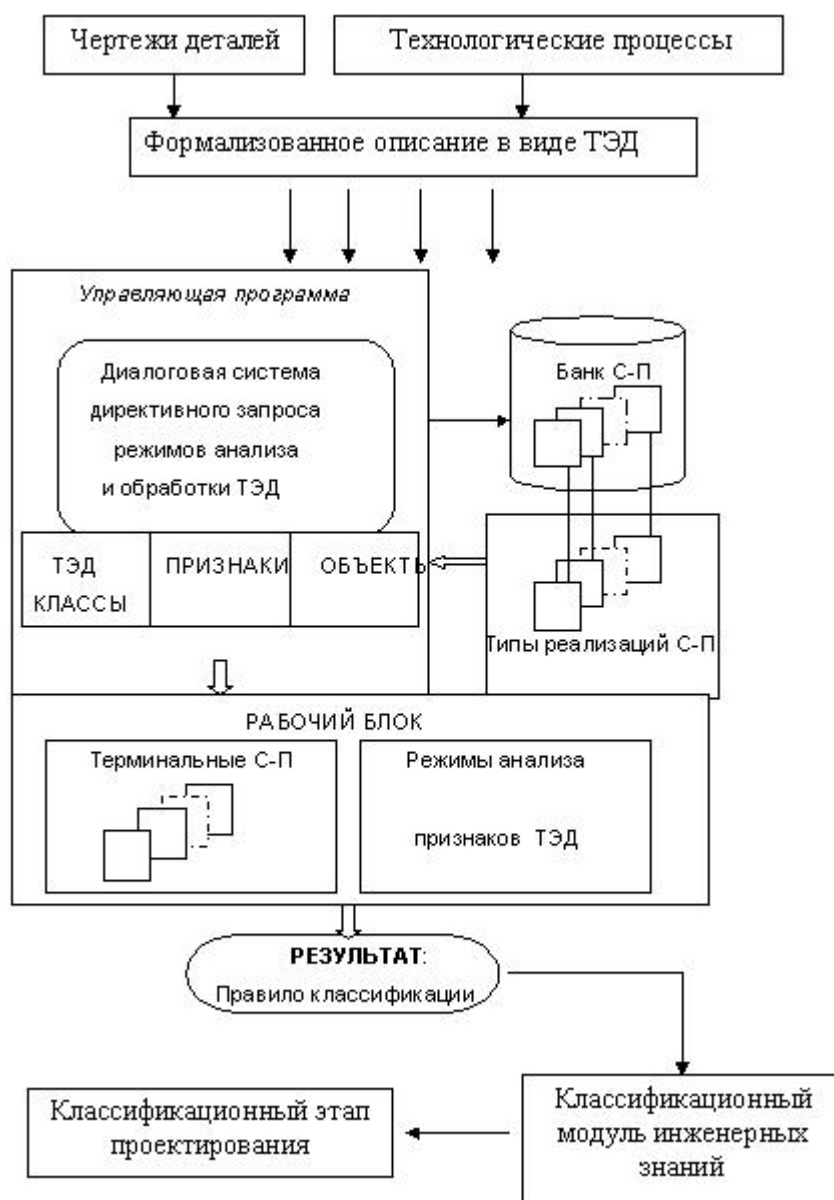


Рис. 4. Блок-схема взаимодействия модулей ИПК КОД-Т при использовании алгоритмов распознавания образов

Использование для импульсных процессов этапа классификации вначале проектирования технологического процесса (рис. 4), позволяет значительно упростить последующие графы, исключить проблематичные ветви и условия, и в конечном итоге за счет распознающего блока исключить

ошибочность проектирования.

Задача разработки инструментального средства автоматизации формирования оптимальных графов маршрутной технологии решена в виде подпрограммы в среде баз знаний. При этом использованы алгоритмы структурно-аналитических (С-А) моделей распознавания образов.

Повышение эффективности проектирования обеспечивается за счет использования оптимальных С-А моделей анализа и распознавания производственных ситуаций, получения надежных правил их классификации и сокращения затрат на подготовку производства [3].

Для этой цели адаптирован программный комплекс, включающий автоматизированный анализ разнотипных данных и построения С-А правил классификации производственных ситуаций.

Для решения поставленной задачи использован интерактивный программный комплекс (ИПК) КОД-Т (рис. 4) разработанный в ХАИ, предназначенный для автоматизированного анализа данных, измеренных в разнотипных шкалах, и классификации производственных ситуаций с целью управления производственными ситуациями при разработке технологических процессов, техническом и медицинском диагностировании [4].

Исходной информацией ИПК КОД-Т является таблица имперических данных (ТЭД) в форме матрицы «объекты – признаки», которые составляют реализации с наименованиями классов.

Выходную информацию ИПК КОД-Т составляют сведения о структурной полноте признаков ТЭД, их разделяющей способности и информативности, о возможности безошибочной классификации до построения грамматического ПК, а также само С-А правило классификации в виде самоанализирующей древовидной решающей структуры. Внутренние вершины решающего дерева отвечают терминальным бинарным (свойством-предикатом) С-П, описывающим локальные закономерности структурного образа в исследуемой предметной области, а внешние вершины (листья) соответствуют заданным категориям (классам) принимаемых решений.

На рис.5 представлена схема реализации алгоритмов проектирования в базах знаний проектирующей системы.

Элементом знаний в системе является модуль инженерных знаний, представляющий собой продукционное правило. Модули характеризуются

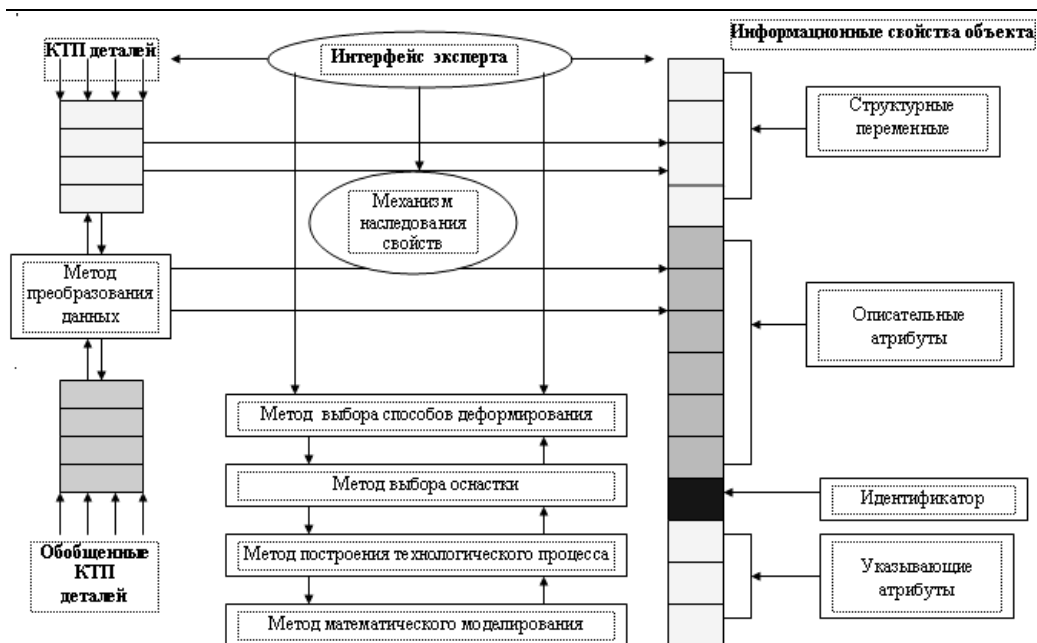


Рис. 5. Структура базы знаний проектирующей системы.

на каждом этапе проектирования своими входными и выходными свойствами, ограничениями на значения входных свойств и механизмами преобразования входных свойств в выходные. Использование базы знаний позволяет технологу без специальной подготовки производить следующие действия: присваивать значения выходным свойствам, определять значения по таблицам, определять значения выбором из базы данных, вычислять значения по формулам, вычислять значения с помощью программных модулей, осуществлять построение геометрических образов.

Модули инженерных знаний объединяются в функциональную библиотеку – базу знаний. База знаний имеет общий словарь (список свойств), из которого выбираются входные и выходные свойства.

Связанные между собой по входу и выходу модули инженерных знаний образуют методы (рис. 6). В методе, представленном схемой на рис. 6 производится расчет припусков на обработку объемной детали. Для выбора элементов маршрутной технологии структурная модель процесса представляется в виде блоков ориентированных графов, представляющих собой последовательность технологических операций, рассчитанных с помощью алгоритмов распознавания образов (рис. 7).

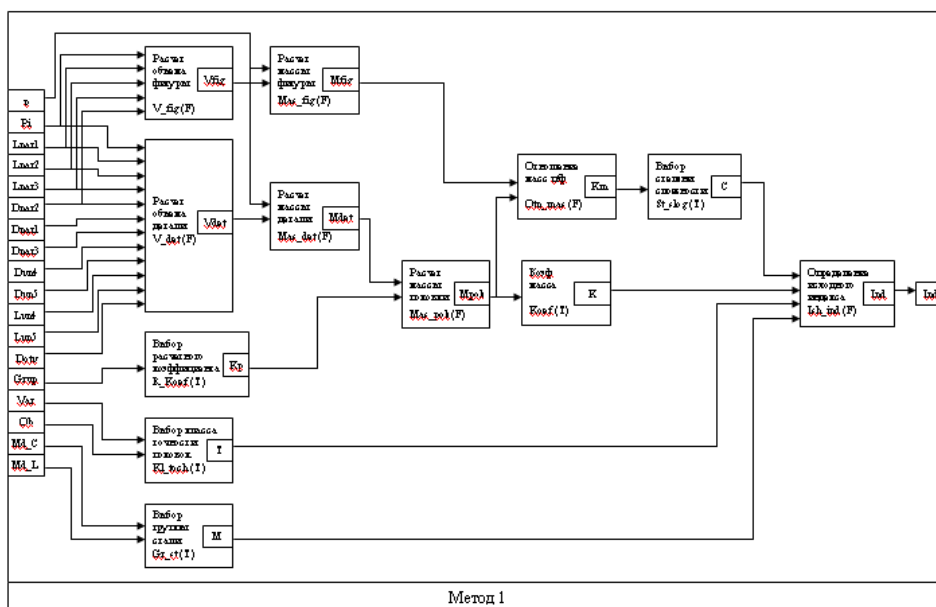


Рис. 6. Модули инженерных знаний, объединенные в метод назначения припусков на обработку объемной детали

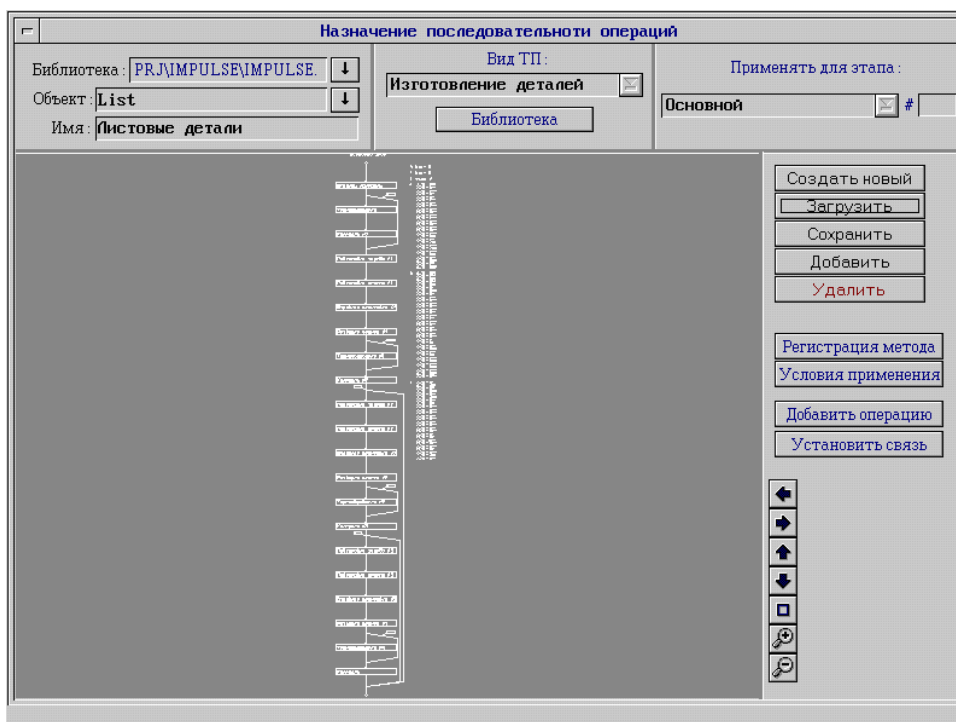


Рис. 7. Реализация построения плана технологического процесса в учебной версии СПРУТ – ТП

Данная концепция проектирования импульсных процессов позволяет легко преобразовывать сложные математические модели (словестные, аналитические и графические) в форму, удобную для обработки профессиональными технологами для разработки новых технологических процессов в оболочках современных САПР систем.

Данные алгоритмы внедрены и используются в учебном процессе в качестве обучающих программ.

Литература

1. Евгеньев Г.Б. Систематология инженерных знаний: Учебн. пособие для вузов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 346 с. (Сер. Информатика в техническом университете).
2. Борисевич В.К., Третьяк В.В., Клыгина И.В.. Математическое моделирование ресурсосберегающих технологий // Науково-методична конференція «Впровадження нових інформаційних технологій навчання». – Х.: "ХАИ", 2004. – С. 227-232.
3. Сироджа И.Б. Структурно-аналитический метод распознавания образов с разнотипными признаками. // Математические методы анализа динамических систем. – Х., 1981. – Вып. 5. – С. 91-107.
4. Зорик В.Я., Филипповская 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. – Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія, 2001. – С. 286-289.

Поступила в редакцию 10.06.2007

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

В.Я. Зорик, В.В. Третьяк, В.П. Павиченко, И.В. Скорченко

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Рассмотрены алгоритмы и методика проектирования технологии взрывной штамповки для получения листовых деталей методами адресации и синтеза. Представлена математическая модель листовых деталей и технологического процесса. Представлен граф для выбора схемы штамповки методом синтеза с использованием методов распознавания образов.

технология взрывной штамповки, методы адресации и синтеза, листовые детали, групповой технологический процесс

Технологические процессы листовой штамповки взрывом можно проектировать различными методами (рис. 1).

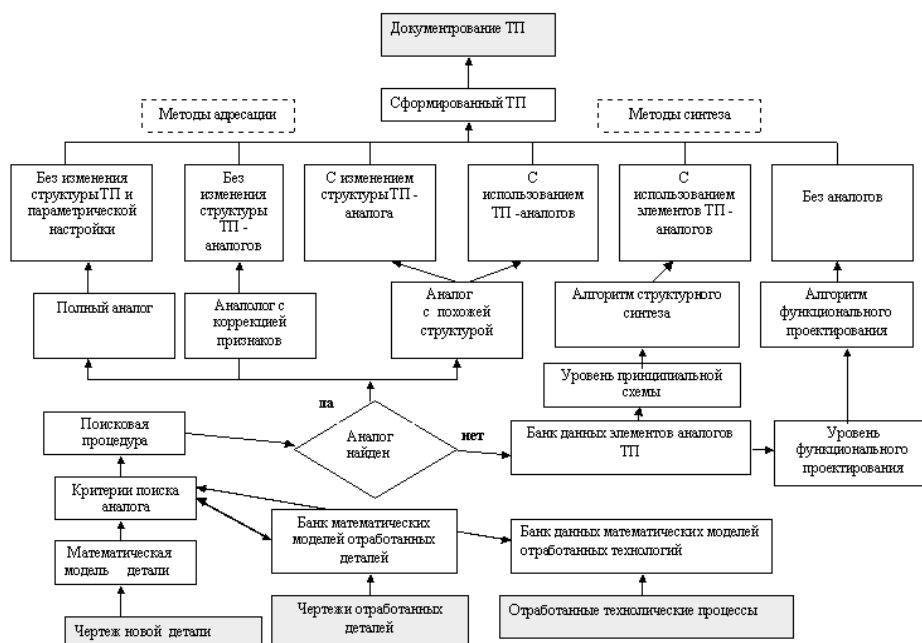


Рис. 1. Методы и алгоритмы проектирования взрывной штамповки

На практике для проектирования используются методы синтеза и адресации [1], отличающиеся сложностью алгоритмов проектирования. Наиболее прогрессивными являются методы, использующие накопленный опыт практики штамповки. Наиболее прост и легко осуществим метод адресации. При этом способе создается банк данных типовых деталей, обладающих соответствующими общими элементами и их свойствами [2, 3].

При проектировании структуры технологических процессов импульсной штамповки этот способ наиболее эффективен при использовании групповых технологических процессов.

Групповые технологические процессы используют для деталей, обладающих общностью структуры конструкторско-технологических признаков и подобных в технологическом плане.

На основе выбранного множества деталей, входящих в группу, может быть разработана комплексная деталь, включающая все типы элементов, встречающихся у деталей этой группы (рис. 2).

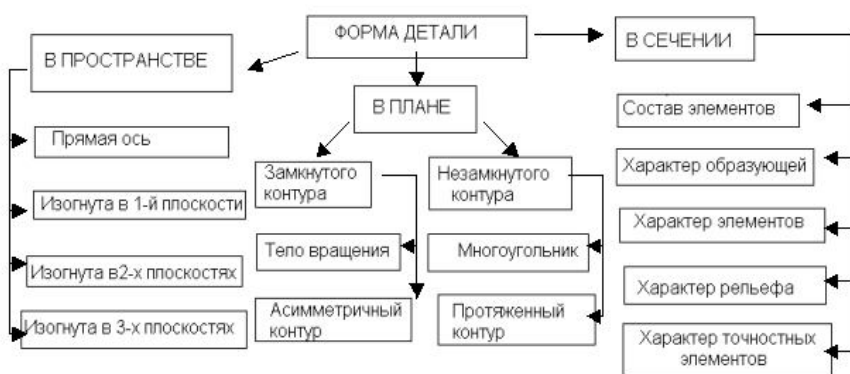


Рис. 2. Метамоделю листовой детали

Для этой детали разрабатывается комплексный технологический процесс и оснастка. Рабочий ТП для каждой детали из группы определяется составом ее элементов и представляет собой подмножество комплексного (рис. 3).

Метамоделю детали является наиболее общей, так как она интегрирует в себя и типовую и групповую. Простейший способ ввода таких знаний заключается в создании графа с постановкой в соответствующих местах на его ребрах условий выбора решений. Сам такой граф в целом также имеет условия своего применения [4].

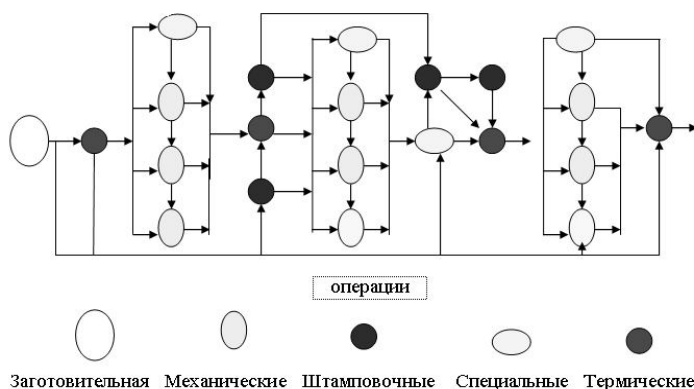


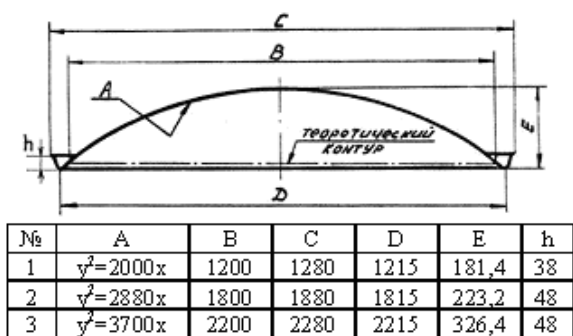
Рис. 3. Мета модель структуры технологического процесса

На основе этой информации формируются программные средства базы знаний, которые затем используются при проектировании ТП. По разработанным методикам проектирования созданы и апробированы технологии изготовления типовых представителей деталей сложной формы.

При проектировании операционной технологии ввиду сложности физических процессов необходимо корректировать технологические параметры по ближайшему аналогу.

В методах проектирования ТП с использованием аналога по технологическому подобию детали в созданном банке с помощью поисковой системы находят ближайший аналог, и корректируют параметры заряда по известным эмпирическим зависимостям.

Проектирование ТП по ближайшему аналогу выполнено для параболических рефлекторов. В качестве аналога выбран рефлектор (рис. 4) с диаметром рабочей поверхности $D_T = 1200$ мм и фланца $D_\phi = 1260$ мм с относительным фокусом $f/D_T = 0,4$ из алюминиевого сплава АМГ-2М толщиной $S = 1,5$ мм. Параметры искомой детали: $D_T = 2200$ мм, $D_\phi = 2280$ мм, $f/D_T = 0,42$, материал сплав АМцАМ толщиной $S = 2,5$ мм. Отличие в относительной высоте деталей порядка 5 %, не оказывает влияние на маршрут обработки. Характерная особенность зеркал – высокая точность рабочей (внутренней) поверхности: у аналога отклонение от теоретического контура $\Delta = 0,5$ мм. Для получения такой высокой точности в разработанной технологии предусмотрено получение вытяжкой полуфабриката с



а



б

Рис. 4. Параметры деталей – параболических рефлекторов: а – параметры рефлекторов; б – отштампованные детали

искомой детали близкие, поэтому маршрут обработки одинаков – выполняется одна штамповочная операция.

меньшей, чем у детали глубиной, а затем его обжимаем по пуансону.

На первом переходе обжима получали сферическим зарядом генеральную форму, а на втором – линейным зарядом элемент жесткости. Параметры фрагментов представлены в табл. 1. Возможность их получения взрывной штамповкой обусловлена устойчивостью процесса формоизменения, т.е. соотношением параметров $\eta = \gamma_o \cdot H_{\phi}(d_o \cdot \delta_p)^{-1}$, которые у аналога и

Таблица 1

Параметры искомой детали и детали-аналога

Тип детали	Признаки						Маршрут обработки		
	d_0	H_f	S_{ϕ}	α_{ϕ}	δ_p	σ_{ϵ}	$Ш_3$	$ТО$	$Ш_4$
Аналог	80	9	1	90	0,22	500	1	0	0
Искомая	50	5	1,5	90	0,18	90	1	0	0

Тип детали	Признаки						Маршрут обработки		
	D_0	D_f	f	S	δ_p	σ_{ϵ}	$Ш_1$	$ТО$	$Ш_2$
Аналог	360	420	30	1	0,12	700	1	1	1
Искомая	200	220	10	1,5	0,18	90	1	0	0

Так как для искомой детали (табл. 1) соотношение $\bar{\eta}_{пл} < 1$, то необходима корректировка маршрута, т.к. нет необходимости в операции *ТО*: ресурса пластичности вполне достаточно $2f/D_f < \delta_p$ и доработанный маршрут обработки представлен одной штамповочной операцией.

Для проектирования детали (рис 5, а) найден аналог – отбортованное отверстие в детали, изготавливаемой из плоской заготовки (рис. 5, б).

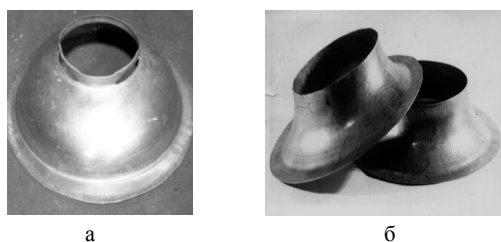


Рис. 5. Деталь и ее аналог для проектирования методом адресации

Разработка технологии осуществлялась в соответствии с созданным методом проектирования единичных ТП.

В методе для наиболее сложного начального этапа проектирования, выполняемого в условиях недостатка исходной информации, разработаны графы для

проектирования принципиальной схемы ТП и элементов маршрутной технологии. Они позволяют по конструкторско-технологическим признакам детали отнести искомую к тому или иному массиву деталей, для которых установлены проектные процедуры. Последние обеспечивают выбор формы заготовки, технологической схемы штамповки, возможность реализации заданных форм при накладываемых ограничениях на пластическое течение как свойствами материала, так и техническими условиями на изготовление.

При анализе возможности изготовления штамповкой детали используют соотношения параметров свойств технологической модели детали. Эти соотношения характеризуют устойчивость формоизменения в реализуемых схемах штамповки (формовке, вытяжке, раздаче, обжиме), обуславливают необходимость и целесообразность восстановления пластических свойств для обеспечения устойчивости формоизменения на последующих этапах деформирования, а также использования специальных операций $C_{пО}$ и технологических приемов СТП для интенсификации пластического течения в требуемом направлении.

При выборе рационального ТП в качестве критериев отбора использованы затраты на совместимость схемы штамповки и формы заготовки: коэффициент использования материала (КИМ), сложность штампа, качество

детали. При раскрое для конической заготовки (изготовление сегмента) значительно ниже КИМ. К тому же необходим технологический припуск в такой заготовке в зоне направляющих опор ее торцов и их фиксации. Это усложняет и конструкцию штампа для раздачи. Затраты на изготовление конической заготовки также выше: необходима вальцовка сегмента и сварка, а деталь со сварным швом всегда уступает по качеству цельной. Поэтому в данном случае ТП проектируются по более рациональной схеме штамповки – вытяжке. Вырезку дна предложено осуществлять за один взрыв благодаря совмещению операций: вытяжка, пробивка отверстий и его отбортовка. Это позволило снизить утонение кромки борта. Чтобы снизить нагрузку на штамп при пробивке отверстия, пуансон (кольцо) закреплен на подвижной опоре, подпружиненной резиновым амортизатором.

В соответствии с разработанной методикой расчета режимов обработки, в которой учтена энергия для пробивки и отбортовки отверстия, определен вес сферического заряда и его месторасположение.

Проектирование ТП с использованием метода аналога реализовано с использованием структурно-аналитического метода (С-А) распознавания

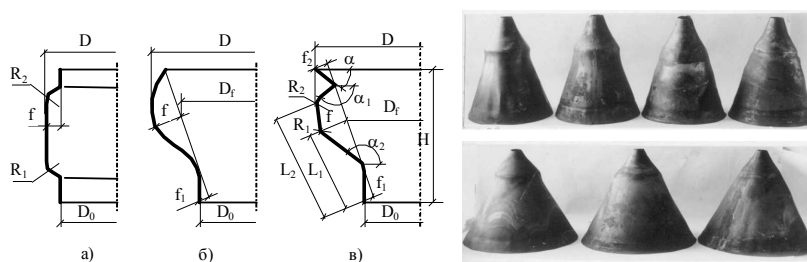


Рис. 6. Математическая модель детали типа обечайки

образов (РО) [4, 5]. Технология апробирована при изготовлении двух типов обечаек (рис. 6) с разными свойствами.

На рис. 7 представлен граф выбора принципиальной схемы ТП. В графе для деталей D1 и D2 выбрана схема штамповки использующая, схему N5 - метод раздачи конической заготовки.

Использование метода синтеза с использованием С-А моделей РО осуществлено при существенном наполнении ТЭД реализациями при других схемах штамповки (вытяжки, обжима, обтяжки, формовки), а также благо-

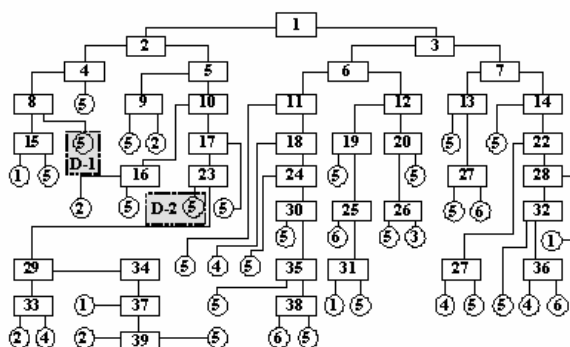


Рис. 7. Граф для выбора схемы штамповки

даря подготовке для дерева решений комплексных признаков, отражающих все особенности динамического поведения заготовки и пластического течения ее материала. Большинство из таких информативных признаков реализованы в методах проектирования единичных ТП.

Литература

1. Митрофанов С.П. Технологическая подготовка гибких производственных систем. – Л-д: Машиностроение. 1987. – 322 с.
2. Борисевич В.К., Третьяк В.В., Клыгина И.В.. Математическое моделирование ресурсосберегающих технологий // НМК «Впровадження нових інформаційних технологій навчання». – Х. ХАІ, 2004. – С. 227-232.
3. Зорик В.Я., Филипповская 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. – Краматорськ: Донбаська державна машинобудівна академія, 2001. – С. 286-289.
4. Сироджа И.Б. Структурно-аналитический метод распознавания образов с разнотипными признаками. // Математические методы анализа динамических систем. – Х., 1981. – Вып. 5. – С. 91-107.
5. Филипповская Л.А. Структурно-аналитическая модель распознавания образов в управлении производственными процессами // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Х.: НТУ «ХПИ». – 2001. – № 6. – С.279-283.

Поступила в редакцию 10.06.2007

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

А.Я. Мовшович¹, В.Н. Остапчук²

*¹ГП “Харьковский научно-исследовательский институт
технологии машиностроения”*

²Южная железная дорога, Харьков

ТЕНДЕНЦИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

В статье определены основные технологические направления при получении деталей двигателей и методы их обработки.

рынок, высокие технологии, интенсификация, новые материалы, нанесение покрытий, детонационно-газовый метод.

Современное производство изделий двигателестроения характеризуется как гибкое рыночно-ориентированное. При этом рынок определяет требования не только к конечному продукту, но и к его производству практически на всех этапах разработки и освоения.

В ускорении научно – технического прогресса двигателестроения определяющим является комплексное рассмотрение и оптимизация потоков материалов, исключение расточительных затрат ресурсов любого вида, применение высоких технологий, широкая автоматизация производства на базе вычислительной техники, минимизация расходов при эксплуатации готовой продукции.

Среди вопросов, требующих исследования, разработки и интенсивного решения опережающими темпами, первоочередными являются следующие:

– создание быстро перестраиваемых комплексов различного технологического назначения, оснащенных автоматизированной и механизированной технологической оснасткой второго поколения;

– широкое применение систем автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и интегральных систем управления производством;

– применение принципиально новых видов материалов, обладающих по сравнению с традиционными материалами высокими физико-механическими свойствами, устойчивостью к износу и изменению геометрической формы;

– создание и совершенствование промышленной технологии и оборудования для получения широкой номенклатуры высокопрочных, коррозионно-стойких, жаростойких композиционных покрытий на основе вакуумно-плазменного и детонационно-газового методов;

– широкое применение при конструировании и применении технологической оснастки композиционных материалов и пластических масс, способных заменить черные и цветные металлы и сплавы, существенно улучшить эксплуатационные свойства, качество и долговечность оснастки;

– внедрение ресурсосберегающих высокоэффективных технологических процессов, в том числе литья под высоким и низким давлением, с противодавлением, малодеформационной упрочняющей термической обработки;

– создание новых видов металлообрабатывающего оборудования с электрофизическими принципами обработки металлов, обеспечивающего повышенный в десятки раз съем металла и безотходность процесса;

– дальнейшая разработка и внедрение технологии формообразования деталей из труднообрабатываемых материалов;

– применение диффузионной сварки, принципиальное расширение сферы применения таких прогрессивных технологий, как гранульная и порошковая металлургия, широкое использование композиционных и неметаллических материалов, новых видов штамповки, детонационного напыления, электронно-лучевой, вакуумно-плазменной и лазерной обработки, средств автоматизации в конструировании, технологии производства и контроля.

– разработка технологии и оборудования с применением высоких давлений и вакуума для формирования [1] и калибровки изделий сложной формы, синтеза инструмента.

Все перечисленные выше направления должны решаться уже на стадии разработки проективных технологий с последующей их реализацией в ра-

бочих технологических процессах.

Размерная обработка является определяющей в цепочке технологических пределов, так как она в основном обеспечивает реализацию замысла конструктора по созданию деталей с заданными служебными свойствами. Кроме этого совершенствование технологии размерной обработки, на долю которой приходится не менее 40% общей трудоемкости изготовления машин (около 80% их деталей подвергаются размерной обработке), определяет технический прогресс в машиностроении.

Развитие обработки резанием связаны с ее интенсификацией за счет новейших и синтеза существующих методов обработки. Основная тенденция – смещение технологических показателей в размерной обработке в направлении более высокой степени точности и качества в результате изменения соотношения отдельных видов обработки. Уменьшается объем токарной обработки за счет внедрения абразивной обработки, увеличивается доля прецизионного шлифования и, напротив, внедрения лезвийной обработки сверхтвердыми материалами может вытеснить абразивную обработку.

В то же время, лезвийная обработка будет использовать методы сверхскоростного резания, позволяющего повысить скорости и подачи в несколько раз по сравнению с существующими на сегодняшний день. Так, например, для фрезерования до 100 м/с.

Соответственно, новый уровень финишной обработки, может быть достигнут на основе развития триботехнологии. Триботехнология финишной обработки обеспечивает создание практически безизносных пар трения за счет комбинированного воздействия алмазноабразивного, деформирующего и антифрикционного инструмента, обеспечивающего управления как геометрическими, так и физико-химическими параметрами поверхности. При этом обеспечивается повышение ресурса пар трения в 3-10 раз.

Применение плазменно-механической обработки, обеспечивающей повышение производительности в 1,2-10 раз и стойкости режущего инструмента в 2-5 раз.

При обработке ювенильных (сверх гладких и сверхчистых) поверхностей деталей с субмикронной точностью применяются методы нанотехнологии, базирующейся на принципиально новых физико-химических про-

цессах размерной обработки, обеспечивающих шероховатость в тысячных долях мкм.

В области технологической оснащенности перспективы технического совершенствования автоматизированных производств требуют создания гибких средств технологического оснащения. Материальной базой в данном случае является система переналаживаемой технологической оснастки (ПТО).

В рабочих технологических процессах, наряду с высоко производительным, многооперационным оборудованием и быстродействующей технологической оснасткой, особое внимания заслуживают вопросы механизации слесарных ручных операций, в т.ч. доводочных, путем применения автоматов, автоматизированных многошпиндельных станков для завертывания крепежных деталей, пневматического и электрического механизированного инструмента, применения электроэрозионной и электрохимической обработки в местах пересечения каналов в корпусах, снятия фасок при изготовлении шестерен и др.

При изготовлении прецизионных деталей дизельной топливной аппаратуры и гидравлики следует шире использовать процессы шлифования на высокоточных круглошлифовальных станках не только на предварительных, но и на оригинальных операциях при обработке сопрягаемых поверхностей.

Как показала практика, при этом обеспечивается размерная точность обработки до 0,001 мм, точность формы обрабатываемой поверхности в поперечном сечении составляет 0,0005 мм, а в продольном – до 0,001 мм в пределах R_a от 0,063 до 0,08.

Метод тонкого шлифования позволяет использовать его в место доводочных операций. Совместная практика при сборке деталей прецизионных пар заменяется комплектным шлифованием детали – вала по размеру ряд трудоемких ручных операций.

Одним из путей повышения производительности при механической обработке является широкое применение в производстве глубинного шлифования, более эффективного, если обработка лезвийным инструментом, особенно при изготовлении деталей из жаропрочных сплавов, коррозионноустойчивых высоколегированных и инструментальных сталей [2]. Как по-

казали исследования, применение глубинного шлифования позволяет:

- в 2-5 раз повысить производительность труда;
- исключить фрезерные операции, а, следовательно, расходы на дорогостоящий твердосплавный, быстрорежущий инструмент;
- снизить потери от брака.

Применение при этом устройств непрерывной правки шлифовального круга и станков с ГПУ позволяет расширить многостаночное обслуживание и встраивать станки в поточные и автоматические линии.

Рассматривая перспективы теории размерной обработки, следует считать, что их теоретическими основами являются последние достижения фундаментальных наук, которые дают возможность применять при изготовлении двигателей все многообразие физико-механических явлений; особенно эффективны разработки по созданию калибровочных методов обработки, использующих последовательное или одновременное воздействие ряда механических, электрических, магнитных процессов. В конструктивном плане развитие двигателе строения идет в направлении повышение мощности и экономичности силовых установок при сохранение или снижении их массогабаритных показателей.

Основные пути совершенствования дизельных двигателей связаны с применением газотурбинного наддува и теплоизоляционных материалов и покрытий для снижения тепловых потерь и более эффективного использования энергии топлива.

Очевидно, что для обеспечения ресурса и показателей надежности обуславливают рост требований к применяемым в двигателе строения материалам, и стимулирует разработку металлических сплавов, металлокерамики и покрытий с заданными свойствами.

Кроме специфических отдельных свойств, определяемых особенностями конструктивного решения деталей, новые конструкционные материалы должны удовлетворять следующим общим требованиям, в том числе с позиций их совместной работы с традиционными материалами:

- высоки теплоизоляционные свойства;
- сравнительно высокий коэффициент линейного расширения (приближающийся к значению этого параметра у металла сопряженных деталей);

- высокая теплостойкость;
- достаточная прочность;

В настоящее время разработана гамма новых материалов, которые по гамме свойств могут быть использованы как для замены традиционно применяемых, так и в качестве альтернативных, повышающих ТЭП.

К ним относятся:

- жаростойкий, жаропрочный плав аустенитного класса, содержащий в 2 раза меньше никеля, чем сплава с аналогичным уровнем свойств и практически не включающих дорогих элементов: вольфрама, молибдена, кобальта и др. Его жаростойкость – 100.000 часов при $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, а жаропрочность – $4,0 - 5,3\text{ кг/мм}^2$ при $T = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- супержаростойкий материал для работы при температуре $T = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течении длительного времени (100.000 часов);
- супержаростойкая сталь с низким содержанием никеля (в 3 раза ниже стали-аналога), способная работать под нагрузкой при температурах до $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- сверхжаростойкий материал для работы при температуре $T=1400^{\circ}\text{C}$ в течение длительного времени (1000 часов);
- новый в 3 раза более легкий, чем сталь, жаростойкий и жаропрочный карбоборид легких сплавов с фибровым наполнителем (и без него), по прочности близок к алюминиевым сплавам, с низкой теплопроводностью (в 5 раз ниже, чем у алюминиевых сплавов);
- композиционный материал сверх жаростойкий, сверхлегкий, мало теплопроводный с фибровым наполнителем (и без него);
- карбидостали сверхжаростойкие и жаропрочные.

Перечисленные выше материалы целесообразно использовать для особо напряженных узлов и деталей двигателей (рабочих колес, поршней, жаропрочных накладок, коллекторов и др.), работающих в условиях высоких температур, высокоциклического теплового и механического нагружения.

Обычно эти материалы характеризуются трудной обрабатываемостью лезвийным инструментом.

В связи с этим, для эффективной обработки трудно обрабатываемых материалов разработан ряд покрытий для режущих инструментов приме-

нительно к определенным группам жаропрочных и высоколегированных сталей и сплавов.

Эффективные покрытия:

- для жаропрочных де формируемых сплавов и высоколегированных сталей – композиционное покрытие нитридов титан-хром (Ti/CrN), состоящее из 30% хрома и 70% титана (по массе);
- для хромистых нержавеющей и хромо-никелиевых сталей и сплавов композиционное покрытие нитридов цирконий-гафний (Zr/Hf.N), состоящее из 80% циркония и 20% гафния (по массе);
- для титановых сплавов – нитрид циркония (ZrN).

Нанесение этих покрытий на режущий инструмент позволяет увеличить его стойкость в 1,6 – 2 раза.

Путем реализации предложенных решений предусматривается радикально повысить технический и технологический уровень производства двигателей, существенно повысить их надежность и долговечность, снизить металлоемкость и трудоемкость изготовления технологической оснастки, сократить сроки подготовки производства, создать технологические задачи для разработки техники нового поколения.

Литература

1. Мовшович А.Я., Буденный М.М. Основные тенденции развития высоких технологий в машиностроении // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Х.: НТУ "ХПИ", 2001. – Вып. 11. – С. 3-13.
2. Горелик В.М., Жилин Я.К. Состояние и основные направления развития и совершенствования технологии двигателе строения // Вопросы оборонной техники. – 1988. – Вып. 8 (204). – С. 3-5.
3. Мовшович А.Я., Кобзев А.С. Выбор средств технологического оснащения для много инструментальных станков и ГПС // Вопросы оборонной техники. – 1988. – Вып. 8 (204). – С. 5-7.

Поступила в редакцию 10.06.2007

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

УДК 621.7.044

С.И. Молодых, А.Г. Нарыжный*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского
"Харьковский авиационный институт", Украина***ПРАВКА ВЗРЫВОМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБОЛОЧЕК**

Рассмотрен процесс косо́го столкнове́ния заготовки с криволинейной поверхностью матрицы, присущий всем динамическим процессам листовой штамповки. Математическое моделирование подтверждает механизм правки-прокатки и приближения заготовки к форме матрицы. Разработаны типовые технологические процессы для трех классов деталей – оболочек двойной кривизны, желобов и емкостей. Обоснованы преимущества безбассейновых схем штампования правкой энергией взрыва. Технология апробирована на типовых промышленных деталях.

технология, деформирование, динамическая правка, косой удар, матрица, кривизна, точность, пружинение, расчет, обобщенная деталь, область применения, машиностроение, авиа и ракетостроение

Области рационального применения импульсных методов обработки листа достаточно четко определены [1], хотя и зависят от местных условий конкретного предприятия. Учитывая глобальные тенденции развития технологии машиностроения [2], авторы обратили свое внимание на проблемы получения точных оболочек двойной кривизны. Более половины объема всех деталей занимают штампованные и штамповарные детали. Их доля в производстве увеличивается, что объясняется высокой весовой отдачей, производительностью процессов штамповки, стабильностью качества и размеров деталей, малой долей ручного труда, высоким коэффициентом использования материала, и как следствие этого низкой себестоимостью продукта [2]. Поэтому все работы и усилия направленные на разработку новых методов, совершенствование существующих методов обработки листового металлов давлением методом штамповки не напрасны и способствуют совершенствованию всего машиностроения.

Однако, производство маложестких, точных оболочек связано с большими трудностями и, несмотря на очевидные преимущества перед другими методами обработки металлов, прессовая штамповка имеет сущест-

венные недостатки и ограничения, которые нередко отрицают сам принцип обработки металла давлением.

Основной недостаток это высокая стоимость оборудования - прессов, большой срок окупаемости капитальных затрат, сложность наладки и обслуживания, требование высокой квалификации рабочих и, особенно, наладчиков, дороговизна технологического оснащения [3].

Ну и, конечно, чисто технологические ограничения прессов – ограниченные давления и габариты изделий, вертикальное направление нагрузки, если не применять дорогостоящий жидко-эластичный пуансон.

Оболочки двойной кривизны (рис. 1) можно классифицировать по знаку Гауссовой кривизны и соотношению величин радиусов кривизны. Тогда они разделяются на два класса – обшивки и желоба не только конструктивно, но

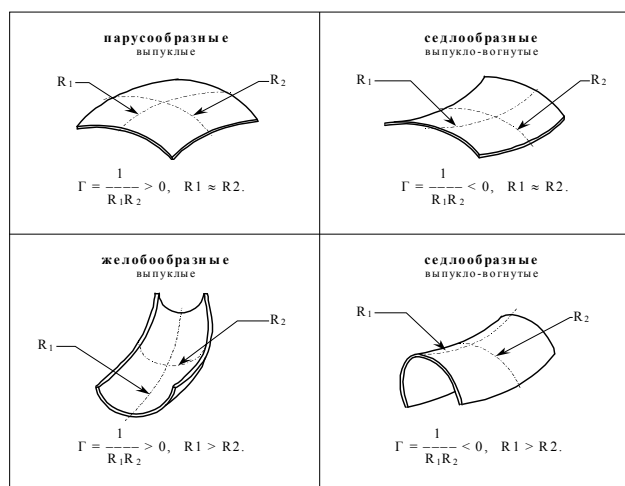


Рис. 1. Классификатор оболочек двойной кривизны

и технологически.

Существуют два основных прессовых метода изготовления крупногабаритных оболочек: мелкое технологическое членение с штамповкой частей на большом количестве дорогостоящей оснастки и последующую сборку их в стапеле со сваркой и ручной рихтовкой для уст-

ранения поводок. Другой метод последовательных нажатий с постепенным приданием заготовке требуемой формы и контролем процесса шаблонами. Методы трудоемки и не позволяют достичь высокого качества поверхности и точности.

Более перспективна по большинству показателей качества импульсная обработка металлов взрывом (ИОМД). Этим методом освоены все процессы формовка, вытяжка, растяжка, однако, в основном они повторяют прессовые схемы и методы деформирования. Поэтому ИОМД имеет почти

те же и ограничения по формам и предельной штампуемости, что и прессовая штамповка. В результате область эффективного применения этого ресурсосберегающего метода неоправданно сужается, имея дополнительные ограничения по производительности и совместимости с традиционным производством. Известны такие недостатки, как необходимость вакуумирования матриц, многопереходность при больших деформациях, малая прочность оснастки при высокой ее стоимости.

Корни многих из перечисленных проблем лежат в копировании принципиальных схем штамповки на прессах без учета особенностей динамики деформирования, а именно не точном, упрощенном представлении финальной фазы динамического деформирования и теоретического его описания, пренебрежением некоторыми факторами, считавшихся второстепенными. Известные модели рассматривают весь процесс штамповки интегрально, энергетически, и лишь до момента касания матрицы с нулевой скоростью заготовки [4], опуская при этом самый сложный процесс взаимодействия матрицы с быстролетящей заготовкой. Отдельные попытки исследования соударения ограничивались плоским его вариантом и носили качественный характер, поскольку такая постановка вопроса не давала удовлетворительного объяснения многим наблюдаемым явлениям, таким, например, как нагрев, аномальная потеря пластичности, уменьшенная величина пружинения [5].

Процесс косоугольного соударения подробно рассматривался в Новосибирском институте гидродинамики, но лишь в гидродинамической постановке, применительно к задаче сварки взрывом. При этом пренебрегали силами сопротивления металла, что было оправдано при сварочных режимах нагружения – скоростях несколько сотен метров в секунду, и давлениях сотни килобар. Естественно, конечные формы изделий-полуфабрикатов в этом случае не рассматривались, и не были управляемым технологическим параметром.

Между тем, авторы утверждают, что при реальных скоростях штамповки взрывом листовых металлов (от 40 до 250 м/с) прочность металла вносит существенный вклад в формообразование. Эффект косоугольного соударения значительно меняет характер и результат соударения. Плоская, одновременная модель встречи с матрицей имеет отношение только к особым

формам деталей, либо к тем точкам поверхности деформируемой заготовки, которые случайно оказались параллельными формирующей поверхности матрицы в момент завершения движения (купол сферы, ребра жесткости). Причиной этого является несовпадение формы движения заготовки при динамической штамповке с формой матрицы. [6], и мало зависит от условий нагружения. Это означает, что только когда формы движения детали совпадают с формой матрицы, возможен режим плоского соударения. Во всех остальных 99% случаях соударение происходит под углом, по линии движущейся к середине детали. Такое косое соударение присутствует в разной мере абсолютно во всех динамических процессах листовой штамповки и сильно влияет на его результаты. Оно сопровождается комплексом сложных и малоизученных явлений. Значительные сдвиговые и контактные напряжения вызывают существенное изменение размеров и формы деталей, потерю пластичности и устойчивости, упрочнение и разупрочнение металла, перераспределение напряжений и пружинение.

Цель нашего исследования – существенно расширить области эффективного применения импульсной обработки листовых металлов давлением взрыва, повысить технологические возможности производства при снижении затрат и повышении качества разнообразных сложных и крупногабаритных оболочек двойной кривизны повышенной точности из высокопрочных сплавов. Эта цель достигнута благодаря изучению эффекта косого соударения заготовок с матрицей при формоизменении и создании системы технологий, в которых параметрами удара управляют (используют при положительном его воздействии и устраняют или уменьшают эффект при отрицательном влиянии его на процесс формоизменения).

Рассмотрим процесс косого соударения заготовки с криволинейной по-

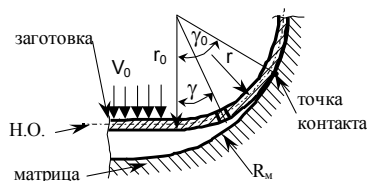


Рис. 2. Расчетная схема зоны складки

верхностью матрицы в досварочном режиме, свойственный всем динамическим процессам листовой штамповки. На рис. 2 представлена расчетная схема зоны складки при

натекании листовой заготовки на матрицу со скоростью V_0 . Здесь возни-

кают особые, не описанные ранее, условия со сдвиговыми, растягивающими, изгибающими и контактными напряжениями, приводящие к смещению металла вместе со складкой и повторному нагружению при распрямлении складки о матрицу. Поле проекций скоростей, полученное из решения уравнений неразрывности и граничных условий, имеет вид:

$$V_r = V_0 \left(1 - \frac{\cos \gamma}{r/r_0} \right) \left(1 - \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} \right); \quad (1)$$

$$V_\gamma = V_0 \left[\gamma \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} + V_{\gamma r} \right] = V_0 \left[\gamma \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} + \ln \frac{r}{r_0} \right].$$

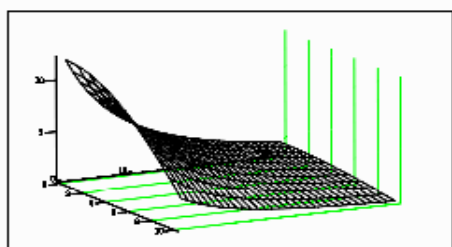


Рис. 3. Поле скоростей в зоне

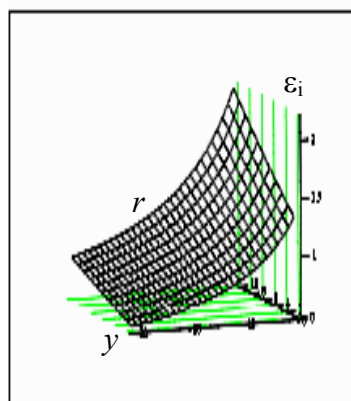


Рис. 4. Распределение интенсивности

График этих зависимостей представлен на рис. 3. Интенсивность деформаций получаем из известных формул и полученного поля скоростей. Конечные уравнения для интенсивности деформаций в зоне складки дают распределение деформаций, изображенное на рис. 4.

Как видно из графика, деформации возрастают к точке контакта, достигая предельных значений на внешней стороне складки. Четко виден вклад изгибных составляющих по толщине заготовки в общую картину деформаций. Интенсивность здесь изображена без учета общего растяжения характерного для бесприжимной штамповки – правки линейчатых полуфабрикатов. Найденное поле скоростей деформаций не может быть реализовано во всем диапазоне переменных, поскольку процесс идет в пластической области и реальные значения деформаций не могут превысить значения предела физического закона $\sigma - \epsilon$. Ограничения накладываем услови-

ем пластичности Мизеса для линейного упрочнения совместно с уравнениями равновесия.

Используя последние с учетом сил инерции в правой части, как движущих сил, можно записать замкнутую систему дифференциальных уравнений, решение которой, однако, получается только численным методом, из которого нельзя извлечь зависимости необходимые для изучения технологических закономерностей.

Для решения неоднородного уравнения равновесия с правой частью найдем неизвестные касательные напряжения из принципа Даламбера: $\sum F_r = 0$, для фрагмента складки dm толщиной h (рис. 2) в соответствии с найденным полем скоростей.

$$h \cdot d\tau = \frac{dV_r}{dt} \cdot d\bar{m} \quad (2)$$

Считаем процесс установившимся во времени, когда динамика описывается скоростью характерной точки $dt = \frac{r}{V_\gamma} \cdot d\gamma$ в подвижной системе координат, связанной со складкой.

После подстановок, интегрирования и приведения подобных с использованием граничных условий, получим формулу для вычисления касательных напряжений сдвига, являющихся важнейшими для рассматриваемого процесса.

$$\tau_{r\gamma} = \rho V_0^2 \cdot \aleph_0 \cos \gamma \cdot \left[\left(\frac{1}{\bar{r}} + \frac{1}{1 \pm h/2r_0} \right) \left(1 + \gamma \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} \right) + \ln \frac{\bar{r}}{1 \pm h/2r_0} \right], \quad (3)$$

где $\aleph_0 = 1 - \sin y / y_0$ – константа, зависящая о геометрии матрицы; $\bar{r} = r / r_0$ – относительный радиус кривизны складки.

Зная одно из напряжений, можем найти его частные производные, входящие в уравнение равновесия. Следовательно, комбинация касательных напряжений и их частных производных, входящая в систему может быть определена.

Второе уравнение равновесия позволяет найти нормальные напряжения, которые получим после интегрирования и преобразований: При отсутствии общего растяжения нейтральной оси, когда нет прижима, гра-

нические условия $\sigma_y = 0$ при $y = 0$, дают константу $C_y = 0$, которая характеризует наличие прижима.

При малых углах соударения имеем упрощенную формулу напряжений вдоль образующей:

$$\sigma_\gamma = \frac{V_0^2 \rho}{\bar{r}} \left[\gamma \ln \bar{r} + \frac{\gamma^2}{2} \cdot \frac{\sin \gamma_0}{\gamma_0} \right]. \quad (4)$$

Интегрирование выражения для σ_r весьма затруднительно, учитывая громоздкое выражение для ε_i и τ (3). Поэтому на первом этапе предлагается воспользоваться условием пластичности для линейного упрочнения, и зная σ_γ (4), получить σ_r прямой подстановкой без решения уравнения равновесия, а затем сравнить численные решения с полученными:

$$\sigma_r = \sigma_y - \sqrt{2} \sqrt{(\sigma_{02} + P\varepsilon_i)^2 - 3\tau_{r\gamma}^2}. \quad (5)$$

Таким образом, есть все компоненты интенсивности напряжений, которое можем найти по формуле (6) для цилиндрической системы координат при осевой симметрии

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_\gamma^2 - \sigma_r \sigma_\gamma + 3\tau_{r\gamma}^2}. \quad (6)$$

При касании матрицы заготовка останавливается ударом со скоростью $V_r = V_0 \cdot \cos \gamma_0$, возникают контактные напряжения, которые исследованы и описаны [6]:

$$\sigma_{rk} = -\frac{2P \cos \theta}{\pi R}, \quad (7)$$

($P = \rho V_r C$) с началом координат в точке касания. Перенесем начало в центр изгиба складки $R_k = R^1 - r_0$.

Поле деформаций в точке контакта

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U}{\partial R} = \left(-\frac{2\rho \cos \theta}{\pi R} - \sigma_{02} \right) \frac{1}{P}. \quad (8)$$

После интегрирования получим поле перемещений в точке контакта

$$U = \frac{2P \cos \theta}{\pi P} \ln R - \frac{\sigma_{02}}{P} R = \frac{2SV_r C \cos \theta}{\pi P} \ln R - \frac{\sigma_{02}}{P} R \quad (9)$$

В точке контакта меняется НДС заготовки (рис. 5), и в условие пластичности добавляются напряжения сжатия σ_r , увеличивая интенсивность

напряжений σ_i .

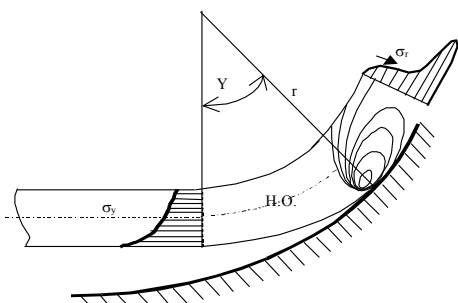


Рис. 5. Напряжения и изобары при штамповке правкой

Учитывая, что величина σ_{rk} достигает больших значений, превышающих все остальные компоненты напряжений, главными напряжениями становятся радиальные, определяемые взаимодействием с матрицей и благодаря этому заготовка дублирует ее форму.

Формула, описывающая контактные напряжения сжатия после достижения пластичности:

$$\sigma_{Rk} = -\frac{2V_0 \cos \theta \cdot \cos \gamma \cdot \sqrt{1/\rho \cdot d\sigma/d\varepsilon}}{\pi R}, \quad (10)$$

где: θ и R – угол и расстояние, определяемое из точки контакта до рассматриваемой точки; γ – угол между матрицей и направлением исходного движения заготовки; $d\sigma/d\varepsilon$ можно заменить касательным модулем пластичности.

Математическое численное моделирование (рис. 6) подтвердило механизм прокатки и приближение заготовки к форме матрицы – эффект правки при определенной, оптимальной скорости в диапазоне 120-180 м/с.

Иные методы визуализации не позволяют наблюдать описываемый эффект. Экспериментально установлено, что при дальнейшем увеличении скорости точность падает из-за упругого отскока, нарушающего точное повторение формы матрицы.

Разработаны типовые технологические процессы, методики их расчета и проектирования для трех типовых деталей – оболочек двойной кривизны повышенной точности класса пологих обшивок, незамкнутых желобов и емкостей. Полнота описания обеспечивается многоуровневой структуризацией элементов техпроцесса, начиная с верхнего уровня – принципы

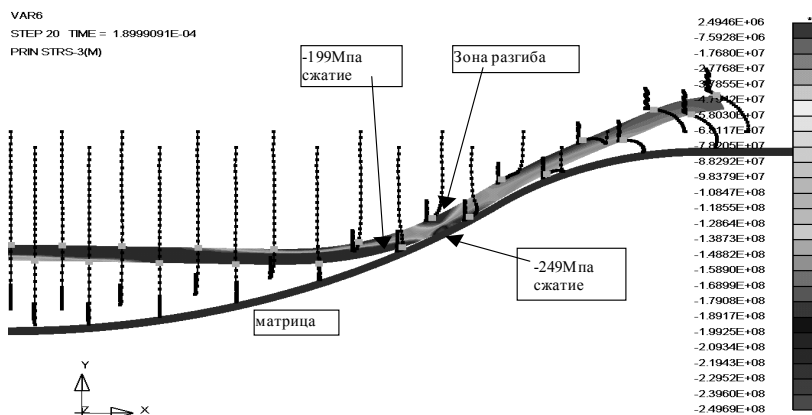
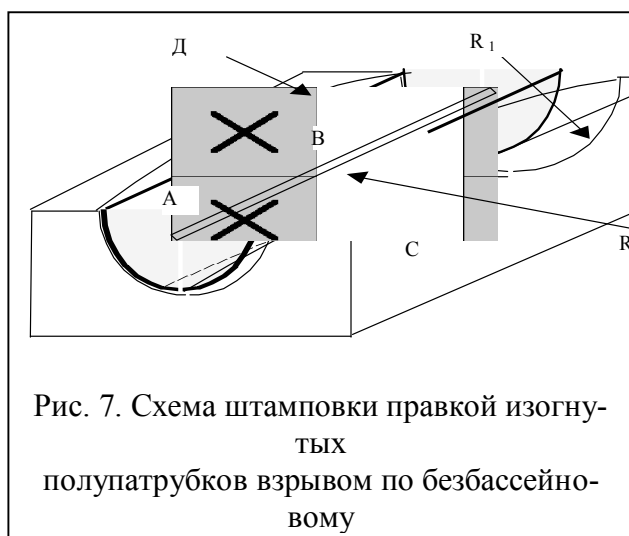


Рис. 6. Наибольшие сжимающие напряжения в заготовке из АмГЗ, 4мм

альной схемы обработки, технологического маршрута ТМ и заканчивая операционной технологией.

Предложена безбассейновая схема штамповки правкой энергией взрыва



как лучшая по сравнению с традиционной штамповкой в бассейнах для рассматриваемого класса деталей (рис. 7).

Во-первых, схема позволяет не перемещать крупногабаритные матрицы внутри технологического цикла, а пользоваться стационарным или подвижным защитно-технологическим оборудо-

ванием типа бронеям [8] или бронекамер [9]. Это оборудование в 2-10 раз дешевле и менее сейсмично по сравнению с бассейнами [10]. Во-вторых, герметизация внутри штамповой полости не обязательна. Передающая среда заключена в полиэтиленовом мешке или в полости полуфабриката. А благодаря открытости полости матрицы и малым объемом воздуха между заготовкой и матрицей отпадает необходимость вакууми-

рования (рис. 6). Этому же способствует волнообразный, складчатый характер перемещения заготовки по поверхности матрицы и «выжимание» воздуха в сторону открытых краев детали. Такая схема позволяет отойти от традиционной прессовой схемы нагружения динамическим гидроэластичным пуансоном и расширить возможности по габаритам и формам заготовок и деталей до невообразимо сложных. Например, vacuum-vessel для реакторов термоядерного синтеза. Заготовка в новой схеме не обязательно должна прилегать к матрице по всему контуру фланца. Достаточно трех фиксирующих точек прижима для крепления – позиционирования заготовки на штампе. Заготовка в новой схеме может быть максимально приближена к матрице, имея форму многогранного, пространственного полуфабриката (рис. 7).

Малые перемещения требуют в несколько раз меньших деформаций. Следовательно, и энергии для деформации потребуется меньше в несколько раз, а значит, число переходов приблизится к единице, нагрузка на окружающую среду снизится, стойкость оснастки увеличится.

Кроме того, получение деталей при меньших деформациях позволяет уменьшить пружинение после снятия нагрузки, а значит увеличить точность, либо уменьшить коррекцию оснастки. Также снизив деформации, мы можем успешно штамповать детали из малопластичных сплавов бора, ниобиевых, титановых (ВТ-5; ВТ-20); МА-8; САП, из металлокерамических композиций и порошков. Этот процесс может стать единственно возможным методом штамповки ответственных деталей из таких материалов, поскольку только в динамике (при взрыве) возникает эффект динамической прокатки поперечным сдвигом – изгибом с помощью волны – складки. Повышается также устойчивость процесса, поскольку малые перемещения приводят к уменьшению времени деформирования, в течении которого заготовка не успевает изменить свое положение относительно штампа. Каждая часть детали деформируется автономно без взаимного влияния на другие части. Это способствует стабильности и устойчивости процесса. Некоторое повышение трудоемкости изготовления заготовки компенсируется снижением трудоемкости процесса штамповки и расширенными возможностями.

Допустимы три различных варианта принципиальных схем: типовые

для безбассейновой штамповки правки – прокаткой по трем типам штампуемых деталей: из плоской заготовки, пространственной вальцованной полуцилиндрической, и из многогранной заготовки. Преимущества новых решений заключаются в меньшей энергоемкости процесса, повышенной точности, сокращении затрат, расширении технологических возможностей по габаритам, повышении прочности и снижении потребной пластичности обрабатываемых металлов.

Авторами найдены методы управления процессом, разработаны методики расчета технологии и определены пределы ее применимости.

Поскольку устраняются проблемы существующих технологий: штамповки крупногабаритных деталей, разработка имеет два принципиальных выхода. Модернизация, улучшение ранее созданных процессов (вытяжки, формовки, растяжки и т.д.) для малопластичных сплавов, а также создание новой технологии правки, которая охватывает два класса деталей.

В качестве примера для апробации метода были выбраны типовые промышленные детали – обшивки ротора и статора обогатительной центрифуги с радиусом кривизны 11 метров (рис. 8), камеры термоядерных установок стеллораторного типа (рис. 9), и полусферические ёмкости.

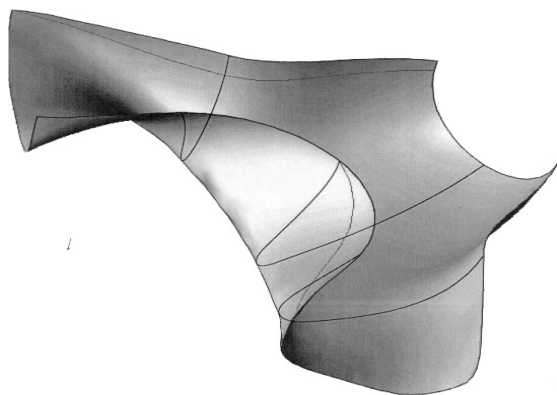


Рис. 9. Типовой фрагмент вакуумной камеры «Стеллоратора», заготовка для которого состоит из 4-х элементар-

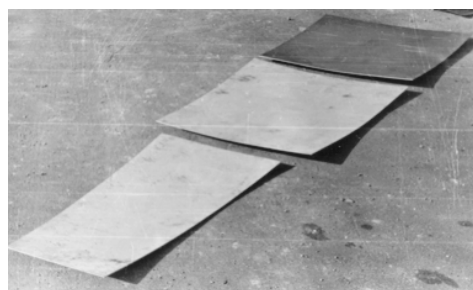


Рис. 8. Лепестки двойной кривизны малого прогиба, $R_{кр} = 11$ м

Класс обшивок двойной кривизны с малым прогибом охватывает также такие детали как параболические антенны и их фрагменты, элементы корпусов судов, ракет и крыш). Проблема получения таких деталей состоит в том,

что величина упругого пружинения при статической штамповке лепестков больше потребной геометрической деформации. Это означает, что все деформации будут упругие, и форма заготовки остается плоской. Только благодаря динамической правке с локальной складкой при косом соударении удалось получить такую пологую форму обшивки.

Класс изогнутых коробов или желобов включает полуторы и их фрагменты, пустотелые лопатки ГТД, камеры термоядерного синтеза (рис. 8), пилоны ЛЭП (рис. 10).

Разработана и апробирована конструкция упрощенной крупногабаритной оснастки для промышленной реализации технологии правки взрывом пространственных оболочек двойной кривизны для мачт линий электропередачи. Толщина стенки предварительно изогнутой заготовки составляет от 10 до 20 мм, поэтому формообразующая поверхность образована прямоугольными прутками, опирающимися на поперечные шпангоуты, подкрепленные бетоноподобным наполнителем 3.

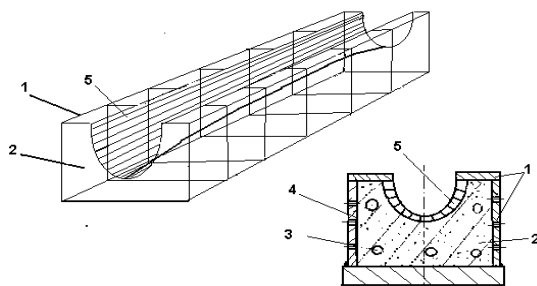


Рис. 11. Упрощенная матрица для штамповки правкой изогнутых желобов ЛЭП

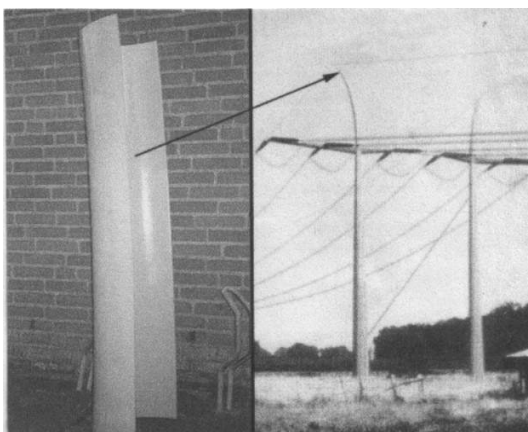


Рис. 10. Концевой фрагмент полумачты евро-ЛЭП, длиной 1,5 м., имеющий каплеобразное сечение

Перспектива коммерческого применения этого ресурсосберегающего метода в энергетике, судостроении, средствах связи, строительстве и архитектуре.

Развитие получают также работы по созданию термоядерных установок – стеллараторов для национальных и международных токамаков (ITER) проектов.

Литература

1. Молодых С.И. Технологические аспекты импульсной штамповки // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х.: ХАІ, 1999. – Вип. 14. – С. 68-71.
2. Борисевич В.К., Молодых С.И. Количественный анализ областей эффективного применения импульсных методов штамповки.// *Технологические системы*. – 2002. – С. 23-28.
3. Романовский Р.В. Справочник по холодной штамповке. – М. Машиностроение, 1990. – 385 с.
4. Борисевич В.К. Разработка научных основ проектирования оптимальных технологических процессов листовой штамповки взрывом деталей летательных аппаратов и двигателей: Дис... д-р. техн. наук. – Х. ХАИ, 2761979. – 409 с.
5. Сборник технологических материалов «Организация производства обработки металлов взрывом». – М.: НИАТ, 1969. – 224 с.
6. Штамповка взрывом / М.А. Анучин, О.Д. Антоненко, Ю.П. Жбанков и др. – М.: Машиностроение, 1972. – 410 с.
7. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. – Л.: Судостроение, 1967. – 384 с.
8. Броняма для штамповки взрывом / Ю.В. Яковлев, А.А. Губский, В.И. Шалыгин и др. // *Использование энергии взрыва в машиностроении*. – К.: НИИНТИ, 1967. – С. 74-78.
9. Пихтовников Р.В. Некоторые пути развития штамповки взрывом // *Сб. ИОМД*. – Х.:, 1970. – № 2. – С. 5-9.
10. Исследование параметров сейсмических колебаний грунта и напряжений элементов конструкций при взрывной штамповке: Отчет о НИР / МинВуз СССР, ХАИ, 1979 №Б803071. – 149 с.

Поступила в редакцию 10.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Я. Мовшович, ГП “Харьковский научно-исследовательский институт технологии машиностроения”, Харьков.

А.Е. Проволоцкий, Т.М. Кадильникова

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматриваются технические средства диагностирования зубчатых передач и методы получения первичной информации.

диагностика, зубчатые передачи, первичная информация, средства измерения

Зубчатые передачи являются одной из основных частей машин различного назначения, от их качества зависят основные характеристики машин. К настоящему времени достигнут определенный прогресс в их проектировании и технологии изготовления, исследованы вопросы их надежности при интенсивной эксплуатации [1 – 3], однако в области теории и технических средств диагностирования наблюдается заметное отставание. Это отставание вызвано, во-первых, сложностью методов получения первичных информационных сигналов, так как требует для их построения привлечения разнообразных физических явлений (акустических, тепловых, тензометрических, лазерных), во-вторых, необходимостью получения таких свойств этих средств измерения, которые бы могли производить прямые, а не косвенные измерения и, последнее, не менее важным является требование удобства монтажа первичных средств измерения систем диагностики в малых замкнутых объемах без нарушения конструкции механизмов.

Успех внедрения средств вычислительной техники в системах диагностики зубчатых передач во многом зависит от наличия и качества средств отбора первичной информации, которые должны обладать информативной надежностью, высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками, удобством монтажа, а также возможностью проводить диагностику, не прерывая эксплуатации машины.

В настоящее время диагностирование зубчатых передач идет по пути использования упрощенных диагностических моделей, основное содержание которых состоит в распознавании дефектов по отслеживанию амплитуд вибрации на вычисленных информативных частотах появления возможного дефекта, а прогнозирование сводится к определению тенденций развития дефекта, в предположении постоянной скорости его изменения. Данные положения не всегда позволяют объяснить внезапные изменения технического состояния машин стационарного режима работы и абсолютно недостаточны для описания процессов, происходящих в механизмах с динамическим режимом нагружения. В реальном механизме наличие вибрации – это следствие комплекса причин: состояния элементов и узлов механизма; степени их износа, технологических параметров процесса, качества технического обслуживания. Каждый из этих факторов может стать основной причиной вибрации. Задача диагностики сводится к определению причины и способа устранения либо уменьшения уровня вибрации. Сложной проблемой является распознавание основного источника при одновременном проявлении нескольких причин. Зачастую гораздо более практичным является предварительное исследование механизма с использованием комплекса портативных диагностических приборов контроля взаимодополняющих параметров вибрации. Эти методы, несмотря на незначительную глубину поиска дефекта, позволяют получить первое предупреждение о происходящих изменениях в механизме при условии правильного выбора диагностических параметров.

Техническое состояние любой, даже практически идеально изготовленной зубчатой пары, может быть оценено в процессе работы при помощи сигналов датчиков скорости вращения (ДСВ). Значение таких измерительных преобразователей, как ДСВ, для систем диагностики чрезвычайно велико, так как весьма широк круг объектов, имеющих вращающиеся детали, а современные средства электроники и микропроцессорной техники позволяют при обработке выходных сигналов датчиков получать достоверную информацию не только о мгновенной и средней скоростях вращения, о моменте на валу, об ускорении вращения, но и о биениях, кинематической погрешности, поломках и износе зубьев.

Диапазон конструктивных решений ДСВ широк и особенности конст-

рукции контролируемых объектов весьма разнообразны. Особое место среди ДСВ занимают электромагнитные датчики, которые в отличие от фотоэлектрических, а также датчиков, основанных на других физических эффектах, имеют такие привлекательные особенности как возможность эксплуатации в условиях загрязненной и агрессивной среды, высокую эксплуатационную и информационную надежность, возможность изучать информацию о физическом состоянии металла зубьев. Монтаж электромагнитных ДСВ не требует значительных конструктивных изменений в контролируемом объекте, так как основной частью ДСВ является сам вращающийся вал, шестерня или зубчатое колесо, выполняющие трансмиссионные функции.

Феррозондовый метод позволяет контролировать изделие любых размеров и форм, если их отношение длины к наибольшему размеру в поперечном направлении и их магнитные свойствам дают возможность намагничивания до степени достаточной для создания магнитного поля рассеяния дефекта, обнаруживаемого с помощью феррозондового преобразователя (ФП).

Выбор феррозондов в качестве индикаторов магнитного поля рассеяния над дефектами в намагниченной детали обусловлен целым рядом преимуществ по сравнению с другими магниточувствительными элементами: малая потребляемая мощность, незначительные габариты, сравнительная простота в изготовлении, высокая надежность работы, большая помехоустойчивость, высокий коэффициент полезного действия и избирательность к локальным полям рассеяния. Чувствительность метода определяется магнитными характеристиками материала контролируемого изделия, его формой и размерами, способами контроля и видом намагничивания, чувствительностью применяемого ФП, устройством обработки выходного сигнала ФП, а также магнитным полем рассеяния дефекта. В зависимости от размеров выявляемых поверхностных и подповерхностных дефектов, а также глубины их залегания устанавливаются пять условных уровней чувствительности для феррозондового метода (табл. 1).

Минимальная длина выявляемого дефекта 2 мм и более. При скоростном автоматизированном контроле длина выявляемых дефектов определяется также шагом сканирования ФП.

Магнитоферрозондовый метод контроля предусматривает следующие

Таблица 1

Уровни чувствительности феррозондовых дефектоскопов

Условные уровни чувствительности	Минимальные размеры выявляемых дефектов, мм		Максимальная глубина дефекта, мм
	Ширина (раскрытие)	Глубина	
Поверхностные			
А	0,1	0,2	-
Б	Св. 0,1 до 0,5	Св. 0,2 до 1,0	-
Подповерхностные			
В	0,3	0,5	10,0
Г	0,3	Св. 0,5 до 1,0	10,0
Д	Св. 0,3 до 0,5	Св. 0,5 до 1,0	5,0

технологические операции: очистку поверхности и подготовку изделия к контролю; намагничивание контролируемого изделия; сканирование и получение сигнала от дефекта; размагничивание. Достоинством феррозондового метода контроля является возможность полностью автоматизировать процесс контроля, увеличить его производительность и исключить субъективный фактор. К безусловным достоинствам феррозондового метода следует отнести его высокую чувствительность: в то время как магнитопорошковый метод требует напряженности поля рассеяния 150-160 А/см, ФД уверенно работают при напряженности магнитного поля дефекта 5-10 А/см, что позволяет с их помощью устанавливать не только поверхностные и подповерхностные дефекты, но и залегающие на глубине 10-15 мм под поверхностью изделия. В неавтоматическом режиме применение феррозондового метода нецелесообразно, так как вручную очень сложно и долго сканировать контролируемую деталь. Однако для контроля ограниченных зон поверхности детали, в которых наиболее вероятно появление дефектов, феррозондовый метод в ручном режиме может быть достаточно эффективным и производительным. К недостаткам ФД следует отнести сложную многоканальную электронную аппаратуру и тот факт, что в автоматическом исполнении они применяются для контроля гладких деталей в форме тел вращения.

Трудность использования феррозондового метода для контроля крупногабаритных зубчатых колес, какими являются зубчатые колеса тяговых редукторов подвижного состава, заключается в том, что зубья зубчатых колес дают дополнительный градиент поля, который накладывается на поле дефектов и снижает надежность контроля, а также в том, что трудно осуществить контроля зубчатого колеса непосредственно во впадинах зубьев. Однако последний недостаток при введении компенсации краевого эффекта может успешно применяться для контроля зубчатых колес тяговых редукторов. Новые аморфные сплавы упрощают технологию изготовления феррозондов, а новые методы обработки их выходных сигналов значительно упрощают аппаратуру обслуживания одного измерительного канала.

В настоящее время существует довольно много приборов (дефектоскопов, магнитометров, измерителей магнитной индукции и т.п.), в которых используется в качестве магниточувствительного элемента феррозонд. Блок-схема наиболее распространенного вида феррозондового дефектоскопа приведена на рис. 1.



Блок-схема феррозондового дефектоскопа

Обнаружение усталостных трещин, возникающих во время эксплуатации на поверхностях сложной формы, таких как резьбовые соединения, зубчатые передачи, радиусные переходы можно контролировать при помощи приборов МД-40К, МД-41К [4-6], которые успешно эксплуатируются в различных отраслях промышленности. С учетом накопленного опыта их эксплуатации разработаны модернизированные дефектоскопы типа МД-42К. Контролируемый участок зуба локально намагничивают

переменным полем, а о дефекте судят по изменению поперечной тангенциальной составляющей магнитного поля. Локальное намагничивание осуществляется синусоидальным током, подводимым к контролируемой поверхности с помощью двух токовых электродов таким образом, чтобы прямая, проходящая через точки касания этих электродов, составила некоторый угол δ с вероятным направлением распространения усталостной трещины по витку зуба. На рис. 2 изображено взаимное расположение токовых электродов оси первичного преобразователя – ферроэлемента и контролируемой поверхности зуба.

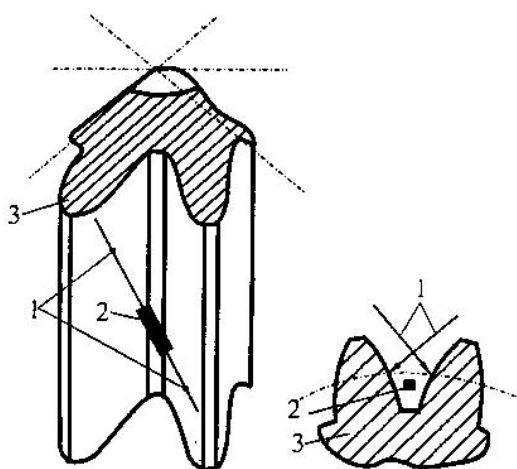


Рис. 2. Взаимное расположение токовых электродов, ферроэлемента и контролируемой поверхности зуба: 1 – точки касания токовых электродов; 2 – ферроэлемент; 3 – контролируемая поверхность зуба

Преобразователь прибора МД-41К выполнен в виде корпуса, в котором размещены подпружиненные токовые электроды, ферроэлемент и механизм перестройки ориентации оси ферроэлемента относительно линии, соединяющей точки касания токовых электродов. В преобразователе предусмотрены направляющие, обеспечивающие фиксацию его во впадине между зубьями заданного модуля. Токовые электроды при установке преобразователя во впадине опираются на смежные поверхности профиля зуба выше средней линии на 1-2 мм. Локальное намагничивание осуществляется переменным током промышленной частоты 50 Гц и амплитудой до

5 А. В качестве первичных преобразователей используется один ферроэлемент длиной 2 мм и наружным диаметром 0,2 мм. С целью повышения чувствительности и помехоустойчивости прибора обработка информации о дефекте ведется по амплитуде и фазе первой гармоники огибающей, модулирующее вторую гармонику ЭДС, наведенной во вторичной обмотке ферроэлемента.

При установке преобразователя на заведомо бездефектный участок производится настройка ферроэлемента с помощью перестройки так, чтобы магнитное поле рассеяния, обусловленное намагниченным током, минимально воздействовало на сердечник ферроэлемента. Вследствие этого ЭДС высокой частоты, наводимая в измерительной обмотке ферроэлемента, не модулирована намагничивающим низкочастотным полем. При прохождении преобразователя над дефектным участком, например над усталостной трещиной, расположенной вдоль впадины у корня ножки зуба, результирующее магнитное поле деформируется и появляется поперечная тангенциальная составляющая, воздействующая на сердечник ферроэлемента. В результате на измерительной обмотке ферроэлемента ЭДС высокой частоты оказывается промодулированной частотой намагничивающего поля. Из спектра ЭДС, наведенной в измерительной обмотке ферроэлемента, выделяется вторая гармоника возбуждающего тока. После детектирования и фильтрации от высших гармоник первая гармоника огибающей усиливается и поступает в блок амплитудно-фазовой обработки и далее на устройство световой сигнализации.

Дефектоскопы МД-42К предназначены для обнаружения поверхностных трещин в зубьях стальных прямо- и косозубых цилиндрических зубчатых колес диаметром от 200 мм и более с нормальными модулями зацепления 4,5; 5,0; 6,0; 8,0 мм; галтельных переходах деталей с радиусом кривизны от 6 до 30 мм и минимальным диаметром 200 мм; резьбовых участков болтов, шпилек, крюков и других ответственных деталей диаметром не менее 28 мм, изготовленных из ферромагнитных сталей. Шаг контролируемой резьбы (метрической, дюймовой, треугольной, трубной) от 2 до 12 мм, трапецеидальной – 3, 5, 8, 12 мм. Шероховатость поверхности контролируемых деталей в пределах $R_z = 40$.

С помощью дефектоскопов обнаруживаются поверхностные дефекты

типа усталостных трещин:

- по поверхности впадин зуба, ограниченной делительной окружностью, ориентированные вдоль зуба или под углом 30° к образующей и удаленные от края изделия не менее чем на 25 мм;
- вдоль нитки резьбы в глубине впадины, ограниченной средним диаметром метрического, дюймового и треугольного профиля, а также ориентированные под углом до 15° к образующей резьбы;
- во впадине резьбы трапецеидального профиля (с шагом до 5 мм) или в углах впадины (с шагом более 5 мм);
- на поверхности средней части радиусного галтельного перехода шириной 5 ± 1 мм и ориентированные вдоль образующей галтельного перехода или под углом к ней до 15° .

В зависимости от назначения дефектоскопы разработаны в четырех модификациях. Дефектоскоп ГСП МД-42К предназначен для обнаружения усталостных трещин в резьбе метрического, дюймового, треугольного профилей. Для контроля трапецеидальной резьбы предназначен дефектоскоп ГСП МД-42-01, для контроля зубчатых колес – ГСП МД-42_02, для обнаружения усталостных трещин на радиусных переходах – ГСП МД-42_03. Локальное намагничивание также осуществляется переменным током промышленной частоты амплитудой до 6А.

На рис. 3 изображено взаимное расположение токопроводящих электродов и контролируемой поверхности.

В одних случаях (например, при контроле резьбы с малым шагом, или радиусных переходов) токопроводящие электроды проходят по нормали к контролируемой поверхности, в других (например, при контроле зубьев крупного модуля) – составляют с контролируемой поверхностью угол, отличающийся от 90-градусного, что обуславливает наличие начального уровня сигнала даже при точной настройке ферроэлемента. Поэтому в дефектоскопе применена амплитудно-фазовая обработка информации, получаемой с огибающей, которой модулируется вторая гармоника высокочастотного сигнала.

В комплект дефектоскопа, кроме четырех преобразователей, входят выносной индикатор дефекта и имитаторы. Последние служат для проверки работоспособности прибора и представляют собой проводник, с помо-

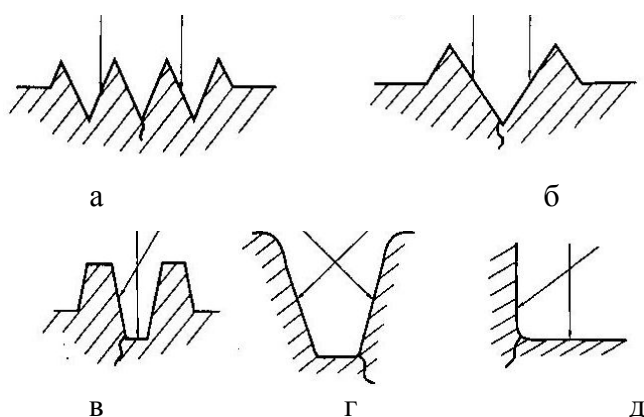


Рис. 3. Расположение токопроводящих электродов на контролируемой поверхности :

- а – резьбы метрического профиля с шагом до 2,5 мм;
 б – резьбы 3 – 12 мм; в – резьбы трапецеидального профиля с шагом 8 – 12 мм; г – зубьев зубчатого колеса;
 д – галтелей переходных поверхностей

щью которого моделируется поле дефекта.

Проверка работоспособности дефектоскопа проводится в следующей последовательности: имитатор с помощью специальных направляющих фиксируется на преобразователе, при этом прямой проводник имитатора проходит на расстоянии 6-8 мм от ферроэлемента и составляет с его осью угол 3-5°; при пропускании по этому проводнику тока возникает магнитное поле, поперечная составляющая которого будет эквивалентна полю от дефекта минимальной глубины.

В приборе предусмотрен режим проверки работоспособности с помощью дополнительной фазосдвигающей цепочки RC, обеспечивающей постоянный фазовый сдвиг, равный 15°.

Замена настроечных образцов имитаторами предложенной конструкции позволила повысить метрологические параметры прибора и исключить комплекты настроечных образцов, прикладываемые к прибору. Для обнаружения дефектов с минимальными размерами разработана технологическая инструкция на изготовление настроечных образцов, по которой потребитель сможет воспроизвести эти образцы с учетом специфики контролируемых объектов. Один из примеров ее реализации описан в [6].

В приборе предусмотрен выход для подключения внешнего милливольтметра, с помощью которого можно проводить количественную оценку по первой гармонике огибающей, поступающей на вход синхронного детектора. Это необходимо, например, при изучении усталостных накоплений, скорости роста усталостных трещин.

Дефектоскопы МД-42К находят применение не только для обнаружения усталостных трещин в узлах и деталях действующих машин и механизмов, как и приборы МД-40К и МД-41К, но и для изучения, например, усталостных накоплений при малоцикловых испытаниях [6], что позволяет уточнить механику их разрушения. Приборы вошли в нормативно-техническую документацию по дефектоскопии многих ответственных узлов и деталей.

Литература

1. Мужичкий В.Ф. Электромагнитные приборы для обнаружения усталостных трещин в резьбах и зубьях крупного модуля // Докл. X межд. конф. по неразрушающему контролю. – М., 1982. – С.201-207.
2. Левейбег Л.И. Неразрушающий контроль шахтных подземных машин // Дефектоскопия. – 1985. – № 12. – С.66-69.
3. Ознобихин Б.М., Гсишко В.Д. Контроль резьб методом вихревых токов // Тез. докл. V областной научно-технической конференции по неразрушающим методам контроля. – Братск, 1982. – С.54-55.
4. Гонтарь С.С. Опыт применения электромагнитных дефектоскопов типа МД-41К в эксплуатации и ремонте морских судов. ЦБНТИ ММФ // Экспресс-информация. – 1982. – № 4 (473). – С. 2-7.
5. Левенберг Л.И. Образцы контрольные цилиндрические для настройки электромагнитных дефектоскопов // Дефектоскопия. – 1985. – № 8. – С. 83-89.
6. Жученко Н.А. Магнитная диагностика зубчатого колеса тягового редуктора подвижного состава // Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В.Даля. – Луганськ: СНУ ім. Даля, 2004. – № 7 (76). – С. 86-89.

Поступила в редакцию 12.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.А. Колесник, Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск.

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

РАСЧЕТ РАБОТЫ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ОБЖИМА

Показано, что необходимую мощность импульсного источника энергии при деформировании заготовки можно определить через работу, затраченную на выполнение заданной деформации. Полная работа деформации определяется интегрированием удельной работы по всему объему изделия. Для оценки удельных работ использована зависимость по степенному закону.

пластическое деформирование, импульсный обжим, деформируемое состояние оболочки, тензор деформации, интенсивность деформации, цилиндрическая заготовка

Необходимую мощность импульсного источника энергии при деформировании заготовки можно определить через работу, затраченную на выполнение заданной деформации. Задача может быть решена на основании закона сохранения энергии. Полная работа деформации W_∂ может быть определена интегрированием удельной работы a_v по всему объему изделия:

$$W = \iiint_V a_v \cdot dV, \quad (1)$$

где удельная работа a_v является функцией величины деформации в разных точках деформируемой детали.

Для оценки удельных работ a_v используют зависимость по степенному закону:

$$a_i = \frac{B \cdot l_i^{m+1}}{1 + m}, \quad (2)$$

где l_i – интенсивность деформации, B и m – постоянные величины, представленные в табл. 1.

Размерность удельной работы – $н/м$. Размерность W в дальнейшем

дана в дж.

В процессе обжата каждый элемент заготовки переходит на профиль детали по сложной траектории.

Таблица 1

Значения параметров m и B для различных материалов

№	Материал	m	B , Па
1	Алюмин. сплав АМЦ-АМ	0,2	$0,22 \cdot 10^9$
2	Алюмин. сплав Д16АМ	0,15	$0,33 \cdot 10^9$
3	Сталь 12Х18Н10Т	0,29	$1,18 \cdot 10^9$
4	Сталь Ст.20	0,17	$0,72 \cdot 10^9$
5	Сталь Ст.3	0,24	$0,77 \cdot 10^9$
6	Сталь 10КП	0,3	$0,5 \cdot 10^9$
7	Титановый сплав	0,12	$1,3 \cdot 10^9$

В общем случае деформированное состояние металла в данной точке описывается симметричными тензорами деформаций, который может быть составлен из шести компонентов l_θ , l_r , l_l , $l_{\theta r}$, l_{rl} , $l_{l\theta}$ и имеет вид:

$$\begin{pmatrix} l_\theta & l_{\theta r} & l_{\theta l} \\ l_{r\theta} & l_r & l_{rl} \\ l_{l\theta} & l_{lr} & l_l \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Вследствие симметрии процесса выполняется:

$$l_{\theta r} = 0; \quad l_{el} = 0. \quad (4)$$

Если принять гипотезу плоских нормалей (она обычно выполняется для тонкостенных оболочек, $\frac{2 \cdot s}{D_3} < 0,01$), то в первом приближении $l_{rl} = 0$.

Таким образом, деформированное состояние оболочки характеризуется тремя деформациями: l_θ , l_r , l_l , которые при выбранных допущениях (процесс симметричен, выполняется гипотеза плоских нормалей) будут главными.

Для этих деформаций можно принять:

1. Широтная или тангенциальная деформация равна

$$l_{\theta} = \frac{\Delta D}{D_3}. \quad (5)$$

2. Радиальная или нормальная к поверхности оболочки деформация – как отношение толщины детали к толщине заготовки.

3. Меридианная деформация $l_l = \ln \frac{l}{l_3}$ или

$$l_l = \ln \frac{l}{l_3} = \ln \sqrt{1 + tg^2 \gamma} = \ln \sqrt{1 + \left(\frac{D_3 - D}{2 \cdot l} \right)^2}. \quad (6)$$

Эта величина может быть принята за 0. Следовательно $l_l = 0$.

Из условия постоянства объема: $l_{\theta} + l_r + l_l = 0$, получим, что $l_{\theta} = -l_r$.

Интенсивность деформации можно записать:

$$l_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(l_{\theta} - l_r)^2 + (l_{\theta} - l_l)^2 + (l_l - l_r)^2} = \frac{2 \cdot l_{\theta}}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{D_3 - D_i}{D_3} \quad (7)$$

или

$$l_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\Delta D_i}{D_3} \quad (8)$$

Если принять, что образующая заготовки описывается в декартовой системе координат при $y = 0$ как $x = f_1(z)$, а образующая детали при $y = 0$ как $x = f_2(z)$, то можно записать:

$$a(z) = \frac{B \cdot l_i^{m+1}}{1+m} = \frac{B}{1+m} \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_1(z) - f_2(z)}{f_1(z)} \right)^{m+1}. \quad (9)$$

Если заготовку по высоте вдоль оси OZ разбить на кольца, то объем материала i -го кольца можно записать как

$$\Delta V_i = 2\pi \cdot f_1(z) \cdot s \cdot \Delta z_i, \quad (10)$$

где Δz_i – длина i -го участка между точками i и $i+1$. Толщина детали s считается постоянной вдоль оси OZ .

В этом случае работа, необходимая для деформации детали A_d определяется как сумма работ по составляющим поясам i :

$$W = 2\pi \cdot \frac{B}{1+m} \cdot s \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{m+1} \int_{z_1}^{z_2} \left(\frac{f_1(z) - f_2(z)}{f_1(z)} \right)^{m+1} \cdot f_1(z) \cdot dz \quad (11)$$

Для расчета была выбрана цилиндрическая заготовка постоянного диаметра D_3 с постоянной разбивкой по слоям. Общая длина заготовки 355 мм, диаметр заготовки 696 мм, толщина 2 мм. На длине 178 мм диаметр цилиндрической заготовки изменяется на конус с диаметром 668 мм, а потом на оставшейся длине переходит в срезанный конус диаметром 574 мм. (Образующие представляют собой прямые).

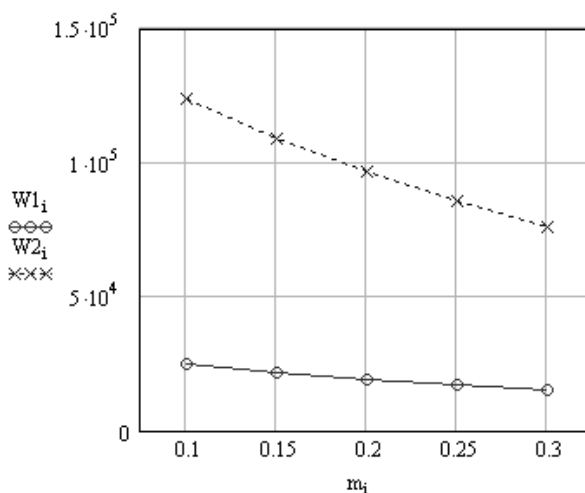


Рис. 1. Работа пластического деформирования в зависимости от параметров m и B

Расчет работы пластического деформирования выполнен в зависимости от параметра m для $B = 0,2 \cdot 10^9$ ($W1$) и $B = 1 \cdot 10^9$ ($W2$) и представлен на рис. 1. Полученные результаты позволяют оценить необходимое количество взрывчатых веществ для обеспечения заданной конфигурации.

Заключение

Работу пластической деформации можно оценить, задав аналитически вид образующих заготовки и детали. По сравнению с существующей технологией получения приведенной детали штамповкой взрывом существует расхождение в оценке количества взрывчатого вещества до 10%.

Поступила в редакцию 2.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина.

А.П. Брагин

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ШТАМПОВКА НА ПРЕСС-ПУШКАХ, КАК ОДНО ИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

В статье представлен обзор оборудования (пресс-пушек) для газодинамической штамповки. Приведены качественные и количественные описания процессов при получении деталей для производственных предприятий.

пресс-пушка, порох, снаряд, ствол, заготовка, деталь

В 1967 г. на Всемирной выставке «Экспо-67» в г. Монреаль (Канада) впервые была продемонстрирована оригинальная штамповочная машина гидроударного действия на пороховом энергоносителе, получившая название «пресс-пушка». Эта модель марки ПП7 сравнительно малой мощности (0,8 кДж) давала полное представление о технологических возможностях нового направления обработки материалов давлением и его несомненной перспективности.

Автором этого направления – как непосредственно способа гидродинамической штамповки (а.с. СССР №150084), так и устройств для его осуществления, был Юрий Георгиевич Мацукин, научный сотрудник Харьковского авиационного института (ныне Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»), аспирант Р.В. Пихтовникова.

До 1991 г. по проектам и при авторском надзоре специалистов ХАИ было реализовано в металле и эксплуатировалось на производстве 26 установок для гидродинамической штамповки 17-ти модификаций с различными технико-энергетическими характеристиками и мощностью от 10 до 55 кДж (табл. 1). По ориентировочным подсчетам, на них изготавливалась номенклатура деталей около 350 наименований, в том числе серийное производство касок для летчиков и головных обтекателей тактических ракет. Рис. 1 дает общее начальное представление об объекте последующего

описания.



Рис.1. Образцы некоторых промышленно изготовленных деталей

После известной демонстрации установки ПП7 на «Экспо-67» при сопровождении ее описанием принципиальных схем и типовых технологических процессов гидродинамическая штамповка получила распространение в виде целого ряда новых оригинальных процессов, оборудования, теоретических разработок, выполненных, кроме ХАИ, также другими творческими коллективами, например, ФТИ АН Белоруссии, Ижевским механическим институтом, Японской фирмой «Таминаго Хироси» и др.

Среди отечественных предприятий, способствовавших освоению и утверждению новой технологии, особая роль принадлежит Киевскому авиационному научно-техническому комплексу «Антонов» и Николаевскому южно-турбинному заводу «Заря».

Непосредственный вклад в теоретические, конструкторские и технологические работы по реализации этого нового направления в металлообработке внесли специалисты ХАИ – Мацукин Ю.Г., Брагин А.П., Бычков С.А., Крыжний Г.К., Полтарушников С.А., Родько С.Я. и другие.

Суть проблемы состоит в следующем.

В практике листовой штамповки давно известны и достаточно широко

используются такие способы обработки давлением, в которых инструментом служит жидкостная или эластичная несжимаемая субстанция (передающая среда). Этой передающей средой заполняется замкнутый объем, ограничиваемый поверхностями объекта обработки и толстостенными элементами, образующими камеру, называемую *формующей камерой*. Сама передающая среда, обычно — вода, которая и передает давление на грузки на объект обработки, называется *формующей жидкостью*. Рабочее давление в ней создается специальной насосной станцией.

Однако, получение и поддержание в течение рабочего цикла необходимого уровня *статического* давления, потребного для формообразования и калибровки детали (в пределах даже нескольких МПа) представляет собой сложную техническую задачу. Прежде всего, это необходимость в дорогостоящих насосно-распределительных гидравлических системах для создания, аккумулирования, управления и коммутации гидротоков высокого давления по определенной программе. Но еще более сложные проблемы возникают при создании технологической оснастки с неизбежно необходимыми устройствами и элементами специальных уплотнений в местах контактов заготовки с деталями штампового блока и элементов технологической оснастки между собой.

Известно, что потребность удержания утечек рабочей жидкости при возрастании ее давления на один порядок более чем вдвое увеличивает трудоемкость изготовления и стоимость оснастки. Прогрессивно увеличивается также сложность, стоимость, уровень технического обслуживания и эксплуатационные расходы для гидравлических систем со статическим давлением свыше 10 МПа.

В 1961 г. Мацукиным Ю.Г. был предложен новый способ создания давления в формующей жидкостной камере — импульсный. Этот способ (рис. 2) заключается в том, что для генерирования высокого давления в жидкости ($W_{ko} + W_3$), находящейся в *неуплотненной* камере (поз. 2, 3, 4), ее (жидкость) нагружают ударом быстролетающего, кинематически свободного твердого тела-снаряда (поз. 5). Снаряд, по достижении им заданной скорости v_g в конце разгонного участка ($50...250 \text{ мс}^{-1}$), попадает в верхнюю часть формующей камеры (переходник ствола), представляющую собой

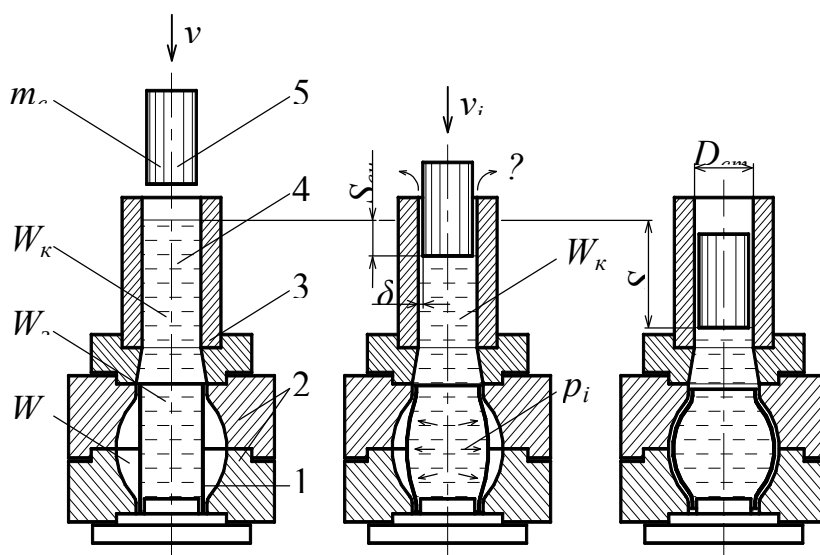


Рис. 2. Принципиальная схема технологического процесса гидродинамической штамповки:

1 – заготовка; 2 – оснастка; 3 – переходник ствола;
4 – передающая среда; 5 – снаряд

толстостенный цилиндр с внутренним диаметром « D », равным диаметру снаряда с минимальным допуском. Протяженность цилиндрического канала переходника ствола определяется для каждого процесса в зависимости от требуемого объема вытесняемой жидкости.

При ударе снаряда по поверхности жидкости и последующем ее вытеснении из канала переходника ствола за счет кинетической энергии движения снаряда ΔW_i , истечение жидкости через все имеющиеся в конструкции зазоры δ и др. встречает громадное гидравлическое сопротивление. Создается, за счет высоких скоростей проталкивания жидкости через зазоры, так называемый *гидравлический затвор*, и в камере развивается давление до нескольких сотен МПа.

Полученный таким образом импульс давления жидкости с продолжительностью от 0,1 до 0,001 с используется для воздействия на обрабатываемый материал в различных, в основном штамповочных, технологических операциях.

Физическая природа разгона снаряда может быть различной.

Принципиально источниками энергии разгона снаряда могут быть различные энергоносители.

Хронологически первыми были созданы установки на пороховом энергоносителе.

Известно, что использование пороха имеет ряд преимуществ перед другими энергоносителями - это предельно простая организация энергетического процесса (превращение потенциальной химической энергии порохового заряда в кинетическую энергию движения снаряда), компактность заряда, простая конструкция системы перезарядки и производства выстрела, высокая стабильность метательных характеристик.

Схема энергообмена в пресс-пушках на пороховом энергоносителе (рис. 3) такова.

Энергия горения пороха в виде газа преобразуется в энергетическом узле I при расширении в канале ствола 4 в кинетическую энергию снаряда, которая, при ударе его по жидкости в переходнике ствола трансформируется в работу сжатия жидкости. В гидравлической формующей камере возникает высокое давление, под действием которого осуществляется штамповка заготовки по матрице. Таким образом, энергия давления жидкости преобразуется в энергию пластического деформирования материала заготовки.

Весь этот многоступенчатый процесс энергообмена сопровождается рядом *побочных* явлений: потерями энергии при прорыве газов в зазоры между снарядом и стволом и зазоры казенной части; потерями, обусловленными неполным сгоранием и неполным расширением продуктов горения пороха, потерями на работу сжатия жидкости и т.д.

Исследования показали следующее:

- импульсное давление, создаваемое в формующей камере пресс-пушки, является наиболее благоприятным для формоизменяющих операций листовой штамповки, т.к. при реализуемых в данном случае скоростях деформации наиболее полно используются пластические возможности материала заготовки;

- способ гидродинамической штамповки дает возможность задавать и такой импульс, который при малых начальных скоростях нагружения заготовки может обеспечить высокое калибрующее давление и скорость деформации в конце процесса;

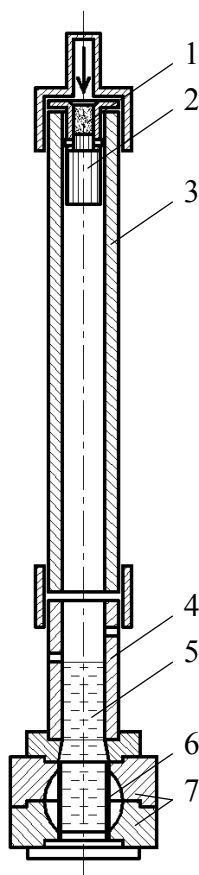


Рис. 3. Схема пресс-пушки:

- I – энергетический узел; II – технологический узел;
 1 – пороховой заряд; 2 – снаряд; 3 – ствол;
 4 – переходник ствола; 5 – передающая среда;
 6 – заготовка; 7 – оснастка

– схема энергетического процесса позволяет регулировать внешнюю нагрузку по величине располагаемой энергии снаряда, по скорости его соударения с жидкостью, по времени и форме (характеру) нагружающего импульса.

Поле давления в формующей камере может быть организовано по заданному закону путем ориентации динамических гидротоков и даже использованием эффекта волновых явлений, что, к примеру, невозможно при более продолжительных нагрузках.

Величины давлений, достигнутых в формующих камерах пресс-пушек без применения специальных приемов составляют для разных установок $3 \dots 5 \cdot 10^2$ МПа; при этом *в камерах не предусмотрено* (не имеется) *никаких уплотнительных устройств*.

Благодаря вышеперечисленным и некоторым другим особенностям процессов ГДШ, обуславливается возможность обработки нахолодно труднодеформируемых и высокопрочных сплавов, а отштампованные детали имеют высокую точность и чистоту поверхности.

Стойкость инструмента (матриц и пуансонов), используемого при ГДШ, в несколько раз превышает срок службы аналогичной штамповкой оснастки для традиционных процессов инструментальной штамповки благодаря равномерному распределению нагрузки и минимизации контактных напряжений.

Перечисленные выше особенности и преимущества гидродинамической штамповки позволили освоить довольно большой спектр технологического применения ее в машиностроении.

В числе освоенных производством процессов листовой штамповки деталей габаритами до 600 мм (рис. 1) можно назвать:

- растяжку, раздачу, формовку и калибровку трубчатых заготовок;
- вытяжку, формовку, калибровку и оформление сложного рельефа на листовых пространственных оболочках;
- формовку и калибровку обечаек двойной кривизны;
- сборочные операции путем создания неразъемных подвижных и неподвижных соединений;
- групповую беспуансонную пробивку точных близкорасположенных отверстий на плоских и пространственных заготовках;
- вырубку точных тонкостенных деталей с величиной перемычек между окнами, соизмеримых с толщиной заготовки;
- обжим тонко- и толстостенных трубчатых заготовок;
- штамповку крутоизогнутных патрубков с внутренним радиусом изгиба, соизмеримым с радиусом трубчатой заготовки;
- калибровку пористых оболочек из металлокерамических материалов.

Объективные особенности технологий ГДШ, подтверждены многолетним производственным опытом. В их числе:

-
- универсальность;
 - возможность изготовления сложных деталей из листовых заготовок вместо литых, кованных, механообработанных и сварных;
 - высокая точность получаемых деталей и узлов;
 - относительно низкая стоимость штамповой оснастки;
 - простота и технологичность оборудования при высоких относительных энергетических показателях;
 - возможность быстрой и простой переналадки при переходе на другой технологический процесс.

Выбор пороха изначально в качестве энергоносителя для ствольных установок гидроударного типа не был случайным. Порох обеспечивает высокую удельную энерговооруженность пресс-пушки. К достоинствам данного привода также следует отнести энергетическую автономность установки.

Применение высококалорийного монокомпонентного твердого топлива, обладающего стабильными метательными свойствами, обеспечивают достаточно простую организацию, регулировку и дозировку энергетики процесса. Однако, использование сыпучего легковоспламеняющегося материала вынуждает вводить дополнительную операцию снаряжения патронов, и создавать довольно сложные механические системы перезарядки. Огне- и взрывоопасность пороха вынуждает обеспечивать особые условия для его хранения, повышает требования к квалификации персонала.

Все это вызывает необходимость поиска новых альтернативных источников энергии, удовлетворяющих требованиям ГДШ, главным и самым сложным из которых является обеспечение высоких скоростей снаряда ($100 \dots 200 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$).

Основные принципиальные различия освоенных установок заключаются в компоновочной схеме машины в целом, силовой схеме рамы (лафета), кинематической схеме технологической зоны, конструктивном оформлении энергетического узла. Характерные параметры и отличительные особенности некоторых моделей эксплуатируемых пресс-пушек приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характерные параметры и отличительные особенности некоторых моделей эксплуатируемых пресс-пушек

Модель пресс- пушки	Калибр ствола, мм	Заряд пороха, г	Запас жидкости в камере, см ³	Размер техн. блока	Распо- лагаемая энергия, кДж	К-во ко- лонн
ПП2	60	20	750	600x800	8	6
ПП5	50	15	500	450x250	10	4
ПП6	60	16	600	600x300	25	4
ПП7П	35	8	350	300x250	0,8	2
ПП8	60	16	600	500x300	31	2
ПП9МУ	80	40	2000	600x800	80	4
ПП11М	80	35	1400	650x570	55	4

На рис. 4 приведен общий вид пресс-пушки модели ПП11МВ качестве иллюстрации одного из промышленных образцов оборудования.

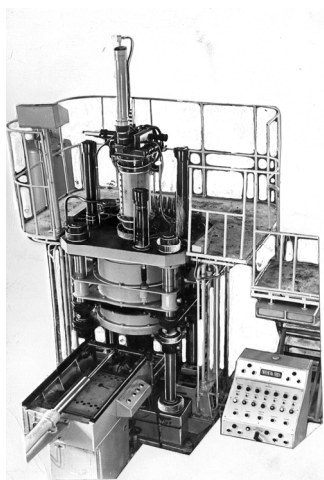


Рис. 4. Пресс-пушка ПП11М

По разработкам в области гидродинамической штамповки получено свыше 150 авторских свидетельств на изобретения, опубликовано около 60 научных трудов, защищено 11 кандидатских диссертаций, отдельные материалы вошли в две докторские диссертации.

В настоящее время проводятся разработки новых проектов энергетического обеспечения процессов ГДШ на экологически и социально безопасных энергоносителях.

Поступила в редакцию 12.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Лобанов, завод им. Малышева, Харьков.

А.С. Ревенко

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ПРОЦЕССАМ ШТАМПОВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ

Рассмотрена необходимость обоснования и совершенствования квалиметрического подхода в современных системах управления качеством. Оценка качества является неразрывным элементом любой системы управления качеством. Кроме того, до этапа управления процессом стоит не менее важная задача выбора конкретного процесса для производства данного изделия на основании заданных параметров качества. Эта задача стоит на стыке науки о качестве, теории и практики технологической подготовки производства.

квалиметрия, качество, количественная оценка, показатели качества, система управления качеством, листовая штамповка, крупногабаритные детали, весомость, метод

В последнее время появилось большое количество научных монографий и отдельных статей, посвященных обобщению опыта промышленных предприятий по повышению качества продукции и решению теоретических вопросов, связанных с целенаправленным улучшением качества [1 –17]. Изучение теоретических вопросов, затрагиваемых в научных публикациях по качеству продукции, позволяет сделать следующий вывод: с одной стороны, предметом науки о качестве продукции являются свойства продуктов труда, а с другой – их соотношения с возможностями общественного воспроизводства. В этом смысле особый интерес представляет оценка способности данных методов производства достигать заданных показателей качества продукции.

Как известно, любой предмет обладает практически бесконечным количеством свойств, составляющих в целом его качество. Но из этого бесконечного количества для характеристики качества продукции необходимо выделить лишь те свойства, которые в данный момент представляют интерес с точки зрения удовлетворения личных или общественных потребностей. Именно поэтому понятием качество продукции всегда связано

со степенью удовлетворения каких-то потребностей индивидуума или общества.

В связи с этим начали увязывать свойства предметов с характером потребностей и отождествлять эти связи с показателями, указанными в технической документации (чертежах, стандартах и технических условиях). Возникли понятия – брак, дефект, т. е. отклонение одного из показателей качества продукции от требований, указанных в чертежах, технических условиях или стандартах. Но подобное понимание характеризует скорее не качество продукции как таковой, а качество работы по ее изготовлению.

В дальнейшем в понятие качество стали постепенно включаться функциональные показатели, которые не зафиксированы в чертежах, технических условиях или стандартах, но, тем не менее, характеризуют качество. К ним относятся показатели надежности, долговечности, эстетичности и др. Наконец, в понятие качество стали включать и другие технические показатели, характеризующие потребительную стоимость изделия, функциональность, удобство, технологичность и т.д.

Вместе с тем, старое понимание качества продукции, как степени соответствия чертежам, техническим условиям и стандартам, стало ограничиваться рамками контроля качества на производстве – в цехах, на отдельных рабочих операциях, в отделах технического контроля предприятий, в инспекциях по качеству.

Таким образом, к настоящему времени выделилось три направления в трактовке понятия и термина "качество продукции". Первое, условно отождествляющее качество с каким-то одним, главным свойством продукции; второе, рассматривающее качество только с точки зрения соответствия чертежам, техническим условиям и стандартам (и, как уже отмечалось, фактически характеризующее не качество продукции, а качество работы); третье, новое, изучающее качество с точки зрения комплекса отдельных составляющих это качество полезных свойств.

Квалиметрический подход к оценке качества продукции листоштамповочного производства и ее управлению позволяет решить следующие задачи:

- повысить качество продукции;
- оптимизировать качество продукции (что, как и предыдущий пункт, является частным случаем более общей задачи управления качеством продукции);
- обеспечить темпы развития производства и технического прогресса;
- обеспечить конкурентоспособности продукта на рынке;

-
- использовать потребительские показатели качества продукции в системе ценообразования;
 - обеспечение возможности выбора наилучшего варианта из нескольких альтернативных (наилучшего способа получения, наилучшего технологического процесса и т.п.);
 - создать предпосылки для разработки и внедрения методов оптимального автоматического проектирования листовых деталей.

Основными целями оценивания качества продукции на разных стадиях жизненного цикла изделия являются:

- на стадии маркетинговых исследований – определение соответствия продукции настоящим и перспективным потребностям с учетом уровня ее рыночной новизны на основе изучения и систематизации всех возможных сфер ее потребления (эксплуатации);
- на стадии проектирования – определение технического уровня и конкурентоспособности продукции на основе выявления и всестороннего анализа свойств, которые формируют качество продукции, и степени использования в проектируемой продукции современных научно-технических и конструкторско-технологических решений;
- на стадии производства – определение уровня качества продукции, которая внедряется и изготавливается, с учетом ее производственной новизны и стабильности технологических процессов;
- на стадии реализации и потребления (эксплуатации) – определение технического уровня и качества продукции с учетом конъюнктуры рынка и мероприятий по поддержке качества продукции при ее использовании, техническом обслуживании и ремонте (восстановлении).

Цель оценивания качества, а также назначение объекта оценки отражается в выборе такой целевой функции, максимально возможное значение, которой отвечало бы наилучшему из сравниваемых вариантов продукции.

Выбранная таким образом целевая функция используется как критерий оптимизации при постановке и решении соответствующих задач. Обоснование целевых функций в многих случаях является самостоятельной проблемой количественной оценки качества. Одной из форм проявления целевых функций есть комплексные показатели качества. При этом комплексное оценивание качества состоит в определении количественной характеристики (комплексного показателя), которое одновременно учитывает несколько свойств оцениваемого изделия. Комплексный показатель, таким образом, является функцией единичных показателей качества.

Чтобы иметь возможность правильно применить квалиметрический подход к оценке качества продукции листоштамповочного производства, необходимо описать круг основных теоретических проблем, с которыми сталкивается подобный подход. Это вытекает из основных принципов, на которых базируется квалиметрия [13, 14]:

1. Качество – это иерархическая многоуровневая совокупность особенностей, которые являются значимыми для производителя и потребителя. Если построить структурную схему свойств качества так, чтобы качество как наиболее обобщенное свойство рассматривалось на самом нижнем уровне (нулевом), а свойства, ее составляющие – на высших уровнях (чем меньшая комплексность свойства, тем более высокий уровень, вплоть до простейших, неразделимых на другие свойства последнего уровня), то свойства любого уровня будут обуславливаться соответствующими свойствами на более высоких уровнях.

2. Качество объекта оценивается с точки зрения степени удовлетворения какой-либо потребности. Условно эти потребности можно разбить на две группы: потребности отдельного производителя (индивидуальные потребности) и осредненные потребности группы потребителей, объединенные какими-либо общими особенностями (групповые потребности). Оценка качества всегда имеет социальный характер.

3. Свойства любого уровня обуславливаются, в конечном счете, простыми свойствами наивысшего уровня. Итак, чтобы определить показатели качества сложных свойств, необходимо объединить показатели соответствующих простых свойств. Поскольку эти показатели имеют разные размерности, то предварительно необходимо трансформировать разные шкалы измерения в одну общую шкалу.

4. Любое свойство качества необходимо и достаточно определяется тремя числовыми параметрами: значением (абсолютным показателем), оценкой (относительным показателем), которая характеризует степень удовлетворения потребностей в данном свойстве и весомостью, которая определяет вес данного свойства среди других свойств, которые составляют качество.

5. Численные значения указанных в предыдущем пункте параметров зависят от требований соответствующего, более сложного качества более низкого уровня.

6. Весомости всех свойств, находящихся на одном уровне и которые входят в одно более сложное свойство, связаны таким образом, что увели-

чение весомости какого-нибудь свойства может осуществляться только за счет весомостей других свойств, то есть сумма весомостей этих особенностей есть величиной постоянной. При выборе шкалы свойств могут приниматься и другие ограничения. Однако для всех свойств, находящихся на одном уровне, должен быть один единый принцип построения шкалы весомости.

7. Оценка весомости характеризует степень удовлетворения какой-либо потребности, то есть насколько удовлетворение потребности свойством с определенным значением показателя приближается к эталонной потребности определения оценки и заключается в сравнении значения показателя с базовым показателем (показателем эталонного продукта), то есть оценка свойства зависит от ее показателя и базового показателя.

8. Оценка качества заключается в определении того, насколько конкретный объект с некоторыми значениями показателей качества способен удовлетворять потребностям. Значения оценки качества объекта зависят от условий его потребления и требований потребителей. Поэтому один и тот же объект может иметь разные оценки качества.

Ниже перечислены основные проблемы, с которыми сталкиваются различные методы оценки качества.

Преимуществом дифференциального метода является его простота, но этот метод имеет больше недостатков, чем преимуществ, в частности его недостатком является сложность в принятии решения по значениям многих одиночных показателей качества, поскольку этих показателей может быть бесконечно большое количество. Также трудно оценить уровень качества в общем, поскольку при дифференциальном методе оценки уверенно можно лишь утверждать, что по одним показателями качества достигнут базовый уровень, а по другим – нет [2, 12].

Линейная зависимость между оценками показателей качества и значениями этих показателей сравнительно с нелинейной зависимостью более проста при расчетах, но нелинейная зависимость позволяет более объективно оценивать эти показатели. Основным недостатком методик, где используются эти две зависимости, есть использование одного и того же вида зависимости для всех показателей качества [15].

Преимуществом функциональной зависимости при комплексном методе оценки есть то, что выявляется основной показатель, который отображает возможность продукции выполнять ее основное назначение. К недостаткам можно отнести то, что при построении математической модели

учитывается очень незначительное количество свойств продукции и могут быть не рассмотрены довольно существенные свойства. Разработка более объективных математических моделей очень трудоемка и требует глубокого и всестороннего анализа оцениваемой продукции [1, 2].

К преимуществам интегрального показателя качества можно отнести то, что с его помощью можно оценить варианты достижения нужного уровня качества при минимальных затратах, поскольку он учитывает уровень качества и стоимость производства. Недостатком этого показателя есть то, что довольно затруднительно определить суммарный полезный эффект от эксплуатации или потребления продукции [2, 8, 12].

При использовании среднего арифметического показателя преимуществом является простота вычислений, а недостатком – его ограниченность в использовании, поскольку его целесообразно использовать только при незначительных отклонениях показателей качества одного от другого. Также к недостаткам среднего арифметического показателя относят то, что он в одинаковой мере зависит от всех подсчитанных величин [1, 2, 6, 26, 33].

Основным преимуществом среднего геометрического показателя считают то, что он владеет свойством превращать комплексную оценку в нуль, если оценка одного из показателей равняется нулю [1, 2, 15].

К преимуществам среднего гармоничного показателя относят простоту при расчетах, а также то, что он учитывает рассеяния показателей вокруг среднего значения [2, 4, 14].

Преимуществом метода определения средневзвешенных комплексных показателей качества есть его простота и наглядность результатов оценивания. А недостатком – данная экспертам возможность за счет подбора коэффициентов весомости получить желательный, иногда недостаточно объективный результат оценки. Кроме того, общим недостатком средневзвешенных комплексных показателей качества является отсутствие обоснования выбора того ли другого вида средневзвешенного показателя, поскольку разные функциональные зависимости приводят к получению разных количественных результатов оценивания, причем зависимости могут вызвать получение и качественно отличных результатов оценивания продукции относительно одного и того же базового образца [15, 16].

Основным недостатком всех средневзвешенных показателей для получения комплексной оценки качества есть то, что при их определении не учитываются реальные связи между показателями. При определении

средних величин считается, что корреляция между отдельными свойствами отсутствующая или настолько маленькая, что ею можно пренебречь. Однако, на самом деле, много показателей между собою тесно взаимосвязаны.

Недостатком средних показателей есть и то, что они дают разные результаты при расчетах, то есть оценки, определенные по формулам разных средних, будут отличными между собою. Таким образом, определение того, насколько одно изделие лучше другого, будет зависеть от вида используемого среднего показателя.

В общем, в комплексном методе оценивания качества продукции довольно часто присутствующая возможность "прикрытия" недостатков или низкого уровня одних показателей качества более высоким уровнем других. Но для преодоления этого недостатка уже создано немало математических способов, и поиск продолжается и в дальнейшем [2].

К недостаткам комплексного метода добавляют и то, что количество свойств, необходимых и достаточных для оценивания качества продукции, всегда меньше количества свойств, которые в полной мере характеризуют его качество. Итак, в процессе оценивания, отвергая некоторые свойства, мы упрощаем действительную картину, тем самым, вводя погрешность в комплексную оценку качества. Эта погрешность всегда будет присутствовать при расчетах, поскольку тяжело вообразить существования такой ситуации, когда будут учтенные все свойства продукции, которые характеризуют ее качество. Однако отсюда не следует вывод, что для повышения точности комплексной оценки нужно всегда стремиться учесть как можно больше свойств. Дело в том, что при выборе свойств, необходимых для оценки качества, считается, что весомость любого из отброшенных свойств меньше весомости любой из учтенных. При этом суммарная весомость отброшенных свойств в сравнении с суммарной весомостью учтенных свойств относительно небольшая. А вот сложность работы с большим количеством свойств вносит погрешности на следующих операциях, которые иногда могут превысить погрешности, вызванные учетом не всех свойств [15, 16].

Можно утверждать, что для оценки качества и выбора лучшего варианта продукции методика комплексного оценивания качества имеет больше преимуществ по сравнению с хорошо разработанной методикой дифференциальной оценки поскольку, тогда как с помощью первой методики все же можно сравнить между собою уровни качества нескольких образцов и вы-

брать лучший из них, то с помощью только дифференциальных оценок сделать это, не используя коэффициентов весомостей показателей, невозможно.

Недостатком смешанного метода есть то, что в конечном результате уровень качества продукции оценивается дифференциальным методом, а потому трудно утверждать, что продукция вообще имеет определенный, количественно определенный, уровень качества относительно базового уровня. Недостатком экспертного метода оценки качества есть то, что объективность экспертного оценивания и его точность зависит в основном от квалификации эксперта и от количества имеющейся информации о продукции. Экспертные методы довольно трудоемки. Недостатком есть и невысокая воспроизводимость результатов, поскольку на оценки, которые ставит эксперт, влияет целый ряд факторов непостоянного характера: возраст, пол, состояние здоровья и даже часть дня, когда принимается решения.

В результате бывают случаи, когда равные по численности группы экспертов одинаковой квалификации дают количественные оценки, которые довольно сильно отличаются между собою. Также тяжело, а иногда невозможно, найти ошибку в принятии решения экспертом.

Необходимо добавить то, что процессы, позволяющие достигнуть данных показателей качества, должны обязательно рассматриваться и с точки зрения их наукоемкости, стимулирования передовых методов производства и научных исследований. Как раз импульсные методы обработки крупногабаритных листовых деталей сложных форм представляют наибольший интерес в исследовании вышеуказанного аспекта.

Литература

1. Азгальдов Г.Г. Квалиметрия в машиностроении // Экономика и системы управления. – 1990. – № 4. – С. 43-48.
2. Азгальдов Г.Г. Квалиметрия – один из инструментов адаптации к рынку // Экономика и коммерция. – 1992. – № 2. – С. 37-42.
3. ГОСТ 15467 – 79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 48 с.
4. РД 50-149-79. Методические указания по оценке технического уровня и качества промышленной продукции. – М. Изд-во стандартов, 1979.
5. Методика оценки уровня качества продукции с помощью комплексных показателей и индексов. ВНИИС. – М. НИАТ, 1974. – 72 с.

6. Современные технологии авиастроения / А.Г. Братухин, Ю.Л. Иванов, В.И. Марьин и др.; Под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.
7. Горбунов М.Н. Основы технологии производства самолетов. – М.: Машиностроение, 1976. – 260 с.
8. Технология самолетостроения / А.Л. Абибов, Н.М. Бирюков, В.В. Бойцов и др.; Под ред. А.Л. Абибова. – М.: Машиностроение, 1982. – 551 с.
9. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
10. РТМ-1.4.449-78. Руководящие технологические материалы. – М.: НИАТ, 1979. – 107 с.
11. Перовициков Ю.С. Применение квалиметрии в технико-экономическом планировании машиностроительного производства // Сборник научных трудов Уральского политехнического института. – Свердловск, 1984. – С. 112-116.
12. Азгальдов Г.Г. Количественная оценка качества продукции – квалиметрия (некоторые актуальные проблемы) – М.: Знание, 1986. – 116 с.
13. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 172 с.
14. Перовициков Ю.С. Квалиметрический метод расчета производительности труда. – Устинов: УдГУ, 1988. – 21 с.
15. Перовициков Ю.С. Метрология и квалиметрия в экономике // Тез. докл. 1-й Рос. универ.-акад. науч.-практ. конф. – Ижевск, 1993. – С. 168-177.
16. Азгальдов Г.Г. О квалиметрии / Г.Г. Азгальдов, Э.П. Райхман. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 224 с.
17. Гличев А.В. Основы управления качеством продукции. – М.: АМИ, 1998. – 356 с.
18. Кононенко В.Г., Кушнарченко С.Г., Прямин М.А. Оценка технологичности и унификации машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 160 с.
19. Амиров Ю.Д. Научно-техническая подготовка производства. – М.: Экономика, 1989. – 230 с.
20. Минько Э.В., Кричевский М.Л. Качество и конкурентноспособность. – СПб.: Питер, 2004. – 268 с.
21. ОСТ 1.41803-78. Штамповка электрогидроимпульсная листовых деталей на прессах ПЭГ. Типовые технологические процессы. – М.: НИАТ, 1980.

Поступила в редакцию 1.06.2007

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