

УДК 621.7.044

doi: 10.32620/akt.2020.8.19

В. В. ТРЕТЯК

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна*

ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ОБОЛОНОК ЗА ДОПОМОГОЮ ВИБУХОВОГО ШТАМПУВАННЯ

Мета роботи - перевірка адекватності теоретичної моделі правки динамічною складкою і перевірка працездатності принципових технологічних схем вибухового штампування плоских заготовок. Задачею досліджень є виявлення технологічних залежностей, отримання яких можливо тільки експериментальним шляхом. В статті представлені результати експериментальної перевірки технологічного процесу формоутворення просторових оболонок на типових моделях. Проведена робота, мета якої є перевірка правильності теоретичних положень, результатів математичного моделювання і висновків, а також апробації методик розрахунків технічних параметрів і схем штампування. Експерименти проведені на плоских моделях обшивок, сферичних і параболічних обшивках великої гнучкості, а також криволінійних коробах моделях, макетах і натурних зразках. В статті досліджується процес косоного зіткнення, залишкові напруги, деформації і форму обшивок після деформації. Вплив величини, форми і дистанції заряду на відхилення від матриці. Апробація проводилася на партії сферичних трапецеїдальних натурних обшивок. Заготовки апробовано на натурному фрагменті. Сформульовані висновки і перспективи розвитку і упровадження техніки в термоядерних дослідженнях, будівництві, горно-добувній промисловості, авіаракетобудуванні. Експериментально встановлено, що зменшення дистанції нижче за рекомендовану приводить до перевищення деформації штампування середньої частини (кривизна більше, ніж матриця) і зменшення деформації штампування периферії (кривизна менше ніж матриця). Найбільші відхилення помітні в кутових зонах деталі. Це можна пояснити крайовим ефектом від хвиль розвантаження, і деякою асиметрією установки заряду. Велика частина поверхні має відхилення до 1 мм, що перевищує точність 8 квалітету на базі 1200мм. Застосування технологічних припусків величиною до 50 мм з подальшим їх видаленням, дозволяє зменшити середнє відхилення удвічі (до 0,5мм), і підвищити точність готових обшивок. Експериментальний відробіток технології правки плоских пелюсток подвійної кривизни показав правильність висновків теоретичної частини.

Ключові слова: штампування вибухом; плоска заготовка; принципова схема; експериментальні дослідження.

Вступ

Метою роботи є перевірка адекватності теоретичної моделі правки динамічною складкою і перевірка працездатності принципових технологічних схем штампування. Задачі, витікаючи з поставленої мети такі: довести на практиці наявність динамічної складки при зіткненні заготовки з матрицею і істотність її для всього процесу штампування, відпрацювати прийоми управління остаточною формою листових деталей подвійної кривизни. Також необхідно виявити технологічні залежності, отримання яких можливо тільки експериментальним шляхом, або скрутно аналітичними методами, наприклад відхилення форми залежно від швидкості зіткнення або її оптимізація.

1. Методика, інструменти і оснащення

Загальні вимоги, що пред'являються до експериментальних досліджень, які враховувалися при

плануванні і їх проведенні: достовірність і повторюваність результатів, відтворність, адекватність моделей або геометрична і фізична подібність з натурними зразками.

Окрім перерахованого враховувалися і специфічні вимоги, витікаючи з економічних і тимчасових обмежень.

Мінімальна кількість експериментів, виходячи з наукового їх планування. Використовування узагальнених представників класів деталей, в яких необхідно об'єднати всі значущі ознаки деталей класу. Мінімально достовірний масштаб моделювання.

На першому етапі перевірялись принципові відмінності плоского і косоного зіткнення і виявляли найзначущі чинники, ступінь деформацій і залишковий резерв пластичності матеріалу після деформації в різних зонах заготовки. Ступінь деформації визначали по розподілу мікро твердості відповідно до методики Г. Д. Деля [1].

Потім вибирали зразки для експериментальної перевірки технології, розробленої в другій частині

роботи. Як образ вибрали узагальнений представник класу деталей, в якому з'єднані всі значущі ознаки класу деталей. За відсутності такого створювали штучну деталь. Потім вибирали параметри, які могли характеризувати процес, що вимірюються. В нашому випадку це швидкість розгону заготовки за рахунок зміни навантаження при різній величині заряду, товщина металу, прогинання і кривизна деталі, деформації і залишкові напруги.

Варіювали одну, найзначущу ознаку, при фіксованому значенні всіх інших.

Повторювали досвід аналогічно для решти параметрів, виявляючи істотні зв'язки при експерименті багаточинника.

Глибини деталей виміряли рівнеміром ($\pm 0,1$ мм). Деформації оцінювали по зміні товщини стінок деталей після штампування – вимірювальною скобою, забезпеченою стрілочним індикатором з ціною розподілу 0,01 мм.

Для визначення резерву пластичності металів, що залишився, використовували розривну машину Р-05, а зони підвищеної твердості визначали за допомогою твердоміра типу ПМТ-3 при навантаженні 100 гс.

2. Експериментальні дослідження

Експериментальні дослідження процесу зіткнення швидко летючої заготовки з поверхнею жорсткої матриці є найскладнішою задачею із двох основних причин [3]. Перша це складність і багатофакторність самого процесу.

Взаємодія штампованої вибухом заготовки з перешкодою – матрицею або пуансоном, супроводжується комплексною деформацією розтягування–стиснення та вигину–зсуву в площині листа заготовки, пружного відскоку від удару, нагріву з розміщенням, деформацією матриці діючі притому одночасно.

Перераховані чинники сильно ускладнюють спостереження і трактування отриманої форми деталей, а виділення впливу кожного з чинників зв'язано з величезною кількістю дослідів і великими матеріальними витратами.

Другою причиною є висока швидкість явищ і трудність візуалізації просторової взаємодії.

Безпосередньо спостерігати процес практично не представляється можливим, тому доцільно звернутися до непрямих методів дослідження, спостерігаючи залишкові напруги, деформації і кінцеві форми виробів.

Ефективно виявилось також використання математичного моделювання за допомогою кінцево-різницевої моделі і зіставити результати практики

і теорії, за однакових умов, перевірити основні допущення по кінцевому результату.

При доброму збігу можна затверджувати про адекватність моделі процесу правки і проміжних станів деталі усередині процесу [2].

Згідно висунутої концепції динамічної правки вибухом просторових оболонок доведено, що ідеально плоске зіткнення не викликає деформацій в листових деталях оскільки реалізується об'ємне стиснення не веде до зміни форми.

До того ж, воно реалізується у край рідко і обмежено купольною або донною частиною деталей, у яких необхідна кінцева форма близька до форми руху заготовки – еліпсоїду.

Реальний і більш істотний процес косоного зіткнення, супроводжуваний подовжнім і поперечним зсувом металу.

З метою перевірки принципів відмінностей плоского і косоного зіткнення було проведено метання плоских металевих заготовок на плоску матрицю.

Заряди встановлювалися різної величини від 5 г до 50 г.

Дистанція вибиралася відповідно для забезпечення рівномірного навантаження всієї поверхні пластини $H=0,5D$.

Дистанційний проставки заввишки 10 мм забезпечувала відсутність хвильового каналу між матрицею і заготовкою, що відповідає схемі метання і наближає її до натурної моделі штампування.

Швидкості зіткнення визначали розрахунковим шляхом і виміряли гребінкою контактних датчиків, а варіювали швидкості від 20 до 200 м/с.

Після зіткнення пластини піддавали вимірюванню мікротвердості на поверхні зіткнення.

Схема метання представлена на рис. 1. Графічне зображення результатів вимірювання мікро твердості на рис. 2.

При аналізі вимірювань рівня твердості і перерахунку залишкових напруж виявилось, що зона підвищеної твердості має кільцеву форму, а рівень залишкових напруж в ній відповідає межі міцності матеріалу заготовки.

Це встановлено спеціальними дослідженнями, в яких з пластин готувалися препарати для розтягування з кільцевої, периферійної і центральної зон.

Після випробування на розтягування виділених зразків, ми отримали підтвердження того факту, що метал в цій кільцевій зоні вичерпав весь ресурс пластичності за відсутності видимих деформацій (заготовка залишилася плоскою, а сітка не деформована).

При цьому сусідні зони плоского зіткнення (центр і периферія) практично не мають залишкових деформацій і не зміцнюються (див. табл. 1).

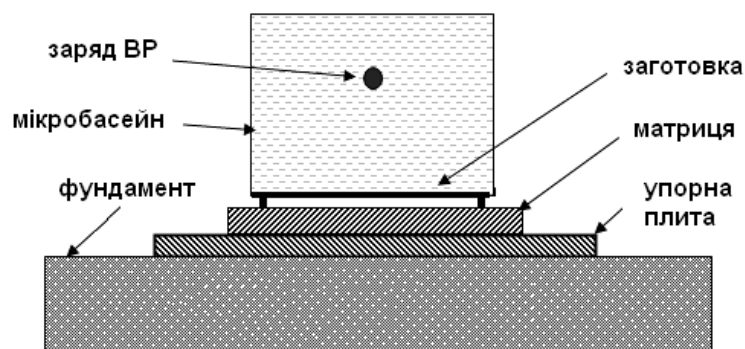


Рис. 1. Схема експеримента по метанню пластин

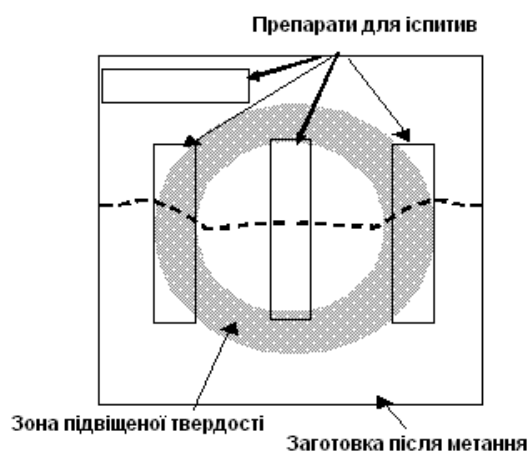


Рис. 2. Препарат зразка, що метається. Пунктир – форма заготовки, що рухається

Таблиця 1

Залишкові деформації препаратів

Обробка, місце вирізки	№ обр.	t_0	σ_{02}	σ_B	δ_p	δ_5	
		мм	Мпа	Мпа	%	%	
Вихідний стан	02	0,98	231	331	19	37,9	
G40	Центр	11	0,97	259	340	16,5	36,7
	Кільце	14	0,93	382	413	1,4	18,6
G10	Центр	21	0,96	228	338	18,5	41,2
	Кільце	24	0,93	353	374	0,6	19,2

При цьому стоншування зразків №14 і 24 складає 5 %, а що залишився після зіткнення резерв пластичності склав тільки 0,6-1,4 % (виділено курсивом).

Найвірогідніше пояснення цьому факту автори бачать в тому, що заготовка в процесі метання і розгону до великих швидкостей (до 200м/с) згинається, одержуючи хвилясту поверхню (пунктир на рис. 2), яка при зіткненні з матрицею має кільцеві зони косяго зіткнення, в яких матеріал зміцнюється до межі міцності.

Факт має добру повторюваність за різних умов навантаження, змінюючи лише розміри кільця і ступінь зміцнення.

Для вимірювання розподілу твердості по товщині заготовки з препаратів кільцевої зони були виготовлені спеціальні клиновидні шліфи. В розподілі твердості по перетину спостерігається підвищення її на 30 % тільки у вузькій зоні прилеглої до контактної поверхні. На глибині більше 0,3 мм твердість залишається початковим. З цього виходить, що навіть поверхневий наклеп приводить до вичерпання ресурсу пластичності матеріалу і вимагає термообробки після кожного навантаження заготовки при правці її ударом об матрицю.

Таким чином, виявлені найзначущі чинники – ступінь деформацій і залишковий резерв пластичності матеріалу після деформації в різних зонах заготі-

вки. Ступінь деформації визначений по розподілу мікро твердості.

Отже, ми отримали підтвердження, що саме косе зіткнення приводить до пластичних деформацій сумірних по величині з міцністю металу і кут зіткнення має вирішальне значення разом з швидкістю зіткнення, а глибина зони, що наклепується, не перевищує 30%.

3. Дослідження технології правки

З'єднані деталі обшивки мають прогинання не більше 15%. Вибір цього діапазону обумовлений значними труднощами використання пресових технологій, у зв'язку з малими деформаціями в пружній зоні, і повним або близьким до нього пружинням.

Динамічна правка-плющення імовірно повинна усунути проблему пружиння за рахунок локальної деформації в складці. Дослідження проводилися в три етапи: на модельних препаратах і натурних деталях сферичної форми і натурних деталях параболическої форми перетину, типу пелюсток відбивачів для антен.

Для сферичних зразків круглої і трапецеїдальної форми використовували витягну півсферичну матрицю Ф500мм.

Заготовки завтовшки 1,0...2,0 мм вирізували із сталі 08кп і алюмінієвого авіаційного сплаву АмГЗ без припуску на обрізання фланця. Схема штампування – безбасейнова витяжка – правка вибухом без притискної згортки.

Кругла заготовка Ø200мм фіксувалася по контуру гумовою накладкою і вакуумувалася.

Трапецеїдальна заготовка завдовжки 400 мм і шириною 200 мм заздалегідь вальцювалася уздовж довгої сторони на радіус кривизни матриці 250 мм. Таким чином, заготовка спиралася об матрицю довгою стороною.

Гумова накладка 10 мм перекривала контур заготовки на 30 мм і забезпечувала герметизацію при вакуумуванні.

Схема штампування приведена на рис 2.

Заряд сферичної форми розміщувався в поліетиленовий мішок з водою на відстані 100мм від поверхні заготовки $H=0,5D$.

Кривизну поверхні α виміряли індикаторним трьох точковим кривизноміром з перерахунком малих значень по формулі.

$$\alpha = 1/R = 2f / [f^2 + (b/2)^2],$$

де f – свідчення індикатора прогинання,

b – базова відстань між опорами індикатора,

R – радіус кривизни поверхні.

Після підриву заряду спостерігається повне проштамповування заготовки і щільне її прилягання до матриці.

Проте, в центральній частині купола помітний дефект у вигляді хвилястої пуклівки у бік заряду висотою до 8 мм і площею до 50 см² (рис. 3).

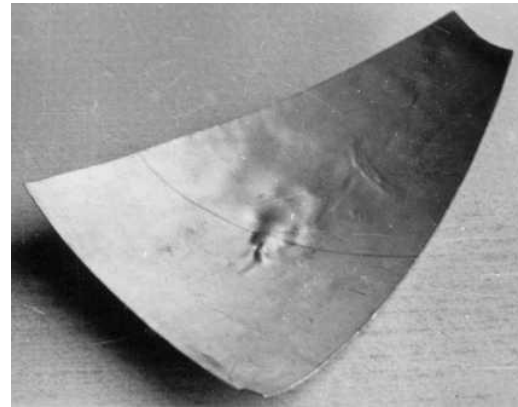


Рис. 3. Втрата стійкості у вигляді пуклівки в центрі купола трапецеїдальної заготовки при згортці в сферичну матрицю

Вимірювання товщини деталі показало, що в зоні хвилястості – в центрі купола зосереджені збільшення товщини до 15 %, на відміну від очікуваного розрахункового стоншування 5 %. Аналогічне явище спостерігали і у осі симетричних заготовок.

Виникнення подібного дефекту не може бути пояснено існуючою теорією і заперечує правильність рекомендацій за призначенням дистанцій вибуху.

Маючи механізм складчастого руху заготовки, який був розглянутий в першій частині, можна говорити про зсув металу заготовки у бік руху складки. При симетричному зближенні складки, в куполі утворюється надлишок матеріалу, що викликає стискуючі напруги і за певних умов (мала товщина металу) втрату стійкості форми у вигляді пуклівки.

Цей ефект набору матеріалу можна використовувати в деяких схемах для деталей, що мають, наприклад, поглиблення – виштампування в центрі, або для напівфабрикатів, що підлягають подальшій витяжці із стоншуванням в куполі.

При достатній стійкості матеріалу на стиснення можна одержувати потовщення в куполі або управляти різновисочинності заготовки.

Уникнути подібного ефекту також можливо.

Для цього необхідно змінити форму руху заготовки, тим самим змінити параметри складки і кутів зіткнення.

Зменшуючи складку і кути зіткнення, зменшуємо зсув металу у бік центру, ослабляючи стиснення і уникаючи втрати стійкості форми.

З цією метою автори зменшили рекомендовану дистанцію вибуху більш ніж в два рази – до 0,1...0,25R.

На експериментальних деталях трапецієвидної форми в плані за нових умов отримана гладка поверхня купола без дефектів втрати стійкості (рис .4).

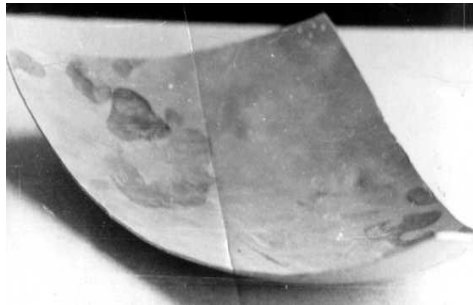


Рис. 4. Експериментальна деталь пелюстка без дефектів $L=400\text{мм}$, $R_{\text{сф}}=500\text{мм}$, $S=1\text{мм}$

Це також спричинило за собою зниження величини заряду, а, значить, підвищило і КПД процесу.

Відрізок такого рішення в промисловому експерименті вели на трьох типах пологих обшивок (рис. 5) центрифуг, що використовують ефект повітряної подушки.

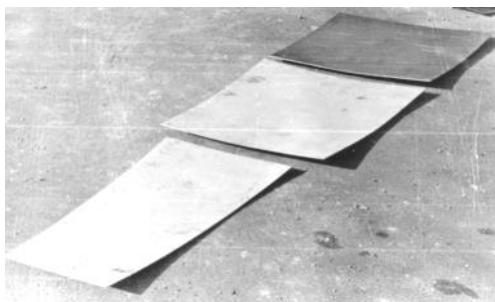


Рис. 5. Три типи пелюсток малого прогинання, подвійної кривизни $R_{\text{кр}}=11\text{м}$

Матеріал обшивок АМГ-6, завтовшки 4 мм, при кривизні 11000 мм, і габаритах 1200 мм, давав в статистиці 100 % пружиння. Використовування вибуху по колишніх рекомендаціях давало непоправний дефект в центрі і недостатню точність профілю. Застосувавши розроблену авторами технологію, вдалося уникнути всіх неприємностей, і отримати кондиційні деталі високої точності.

Максимальне відхилення не перевищило 0,88 мм. При цьому кривизна деталей в центрі може бути більше кривизни матриці при зменшеній дистанції вибуху, але при збільшенні відхилень на периферії деталей. Тобто, ми можемо управляти точністю деталей і її розподілом по поверхні, відхилення залежатимуть тільки від розкиду характеристик металу і характеристик параметрів заряду.

Тобто, ми можемо управляти точністю деталей і її розподілом по поверхні, відхилення залежатимуть тільки від розкиду характеристик металу і характеристик параметрів заряду. Таке недосяжно, ні якою іншою технологією деформації В процесі відрізки знайдений додатковий ефект. Знайдена оптимальна швидкість зіткнення, більше за яку відхилення збільшуються через пружний відскік деталей від матриці (рис. 6).

Як видно з графіка, із збільшенням імпульсу і швидкості зіткнення, відхилення від матриці знижуються, як і було передбачене в попередніх розділах, але тільки до певної межі швидкості, після якої досягнута точність знижується.

При цьому встановлено, що із збільшенням товщини заготовки в діапазоні від 1 до 3 мм оптимальна швидкість росте, а точність знижується. Із збільшенням міцності матеріалу, при переході на неіржавіючу сталь, оптимальна швидкість також росте, а усереднені відхилення залишаються практично незмінними.

Алюмінієві сплави типу АМГ-6 вимагають більших імпульсів, ніж сталь аналогічної товщини і відхилення дають великі в 1,5 рази.

При цьому встановлено, що із збільшенням товщини заготовки в діапазоні від 1 до 3 мм оптимальна швидкість росте, а точність знижується. В процесі відрізки знайдений додатковий ефект.

Знайдена оптимальна швидкість зіткнення, більше за яку відхилення збільшуються через пружний відскік деталей від матриці (рис. 6).

Як видно з графіка, із збільшенням імпульсу і швидкості зіткнення, відхилення від матриці знижуються, як і було передбачене в попередніх розділах, але тільки до певної межі швидкості. Із збільшенням міцності матеріалу, при переході на неіржавіючу сталь, оптимальна швидкість також росте, а усереднені відхилення залишаються практично незмінними. Алюмінієві сплави типу АМГ-6 вимагають більших імпульсів, ніж сталь аналогічної товщини і відхилення дають великі в 1,5 рази.

Висновки

Одже, експериментально встановлено, що зменшення дистанції нижче за рекомендовану приводить до перештаповування середньої частини (кривизна більше, ніж матриця) і недоштаповування периферії (кривизна менше ніж матриця). Найбільші відхилення зосереджені по краях деталей до 50 мм (рис. 6). І особливо відхилення помітні в куткових зонах деталі. Що можна пояснити крайовим ефектом від хвиль розвантаження, і деякою асиметрією установки заряду. Велика частина поверхні має відхилення до 1 мм, що перевищує точність 8 по



Рис. 6. Графік відхилень деталей 1200x700 мм S2-3 мм, «обшивка параболічна» залежно від швидкості зіткнення (імпульсу)

квалітету на базі 1200 мм. Застосування технологічних припусків величиною до 50 мм з подальшим їх видаленням, дозволяє зменшити середнє відхилення удвічі (до 0,5 мм) і підвищити точність готових обшивок. Експериментальний відробіток технології правки пологих пелюсток подвійної кривизни показав правильність висновків теоретичної частини і розроблених в другій частині рекомендацій.

Литература

1. Дель, Г. Д. *Технологическая механика [Текст] / Г. Д. Дель. – Москва : Машиностроение, 1978. – 174 с.*
2. Борисевич, В. К. *Влияние передающей среды на деформирование и точность детали при импульсной штамповке [Текст] / В. К. Борисевич, О. Г. Нарыжный, С. И. Молодых // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – Вып. 11(47). – С. 173-181.*

3. Пухтовников, Р. В. *Безбассейновая штамповка листового металла взрывом [Текст] / Р. В. Пухтовников, Б. А. Хохлов. – Москва : Машиностроение, 1972. – 164 с.*

References

1. Del, G.D. *Technologicheskaya mexanyka. [Technological mechanics]. Moscow, Mashynostroenye Publ., 1978. 174 p.*
2. Borysevych, V. K., Narizhnij, O. G., Molodix, S. Y. *Vlyyanye peredayushhej sredi na deformyrovanye y tochnost detaly pry ymпульsnoj shtampovke [Influencing of passing environment on deformation and exactness of detail at the impulsive stamping]. Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology, 2007, no. 11(47), pp. 173-181.*
3. Pyxtovnykov, R. V., Hoxlov, B. A. *Bezbassey-novaya shtampovka lystovogo metalla vzrviom [Stamping of sheet metal by the explosion without the use of pool]. Moscow, Mashynostroenye Publ., 1972. 164 p.*

Поступила в редакцию 11.06.2020, рассмотрена на редколлегии 15.08.20209

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ ВЗРЫВНОЙ ШТАМПОВКИ

В. В. Третьяк

Цель работы – проверка адекватности теоретической модели правки динамической складкой и проверка работоспособности принципиальных технологических схем взрывной штамповки плоских заготовок. Задачей исследований является выявление технологических зависимостей, получение которых возможно только экспериментальным путем. В статье представлены результаты экспериментальной проверки технологического процесса образования формы для пространственных оболочек на типичных моделях. Целью проведенной работы являлась проверка правильности теоретических положений, результатов математического моделирования и выводов, а также апробации методик расчетов технических параметров и схем штампования. Эксперименты проведены на плоских моделях обшивок, сферических и параболических обшивках большой гибкости, а также криволинейных коробах моделях, макетах и натуральных образцах. В статье исследуется процесс косоугольного столкновения, остаточные напряжения, деформации и форму обшивок после деформации. Влияние величины, формы и дистанции заряда на отклонение от матрицы. Апробация проводилась на партии сферических натуральных обшивок. Заготовки апробированы на натурном фрагменте. Сфор-

мулированные выводы и перспективы развития и внедрения техники в термоядерных исследованиях, строительстве, горной промышленности, авиаракетостроение. Экспериментально установлено, что уменьшение дистанции ниже рекомендованной приводит к превышению деформации штампования средней части (кривизна больше, чем матрица) и уменьшения деформации штампования периферии (кривизна меньше чем матрица). Наибольшие отклонения заметные в угловых зонах детали. Это можно объяснить краевым эффектом от волн разгрузки, и некоторой асимметрией установки заряда. Большая часть поверхности имеет отклонение до 1 мм, что превышает точность по 8 степени на базе 1200 мм. Применение технологических допусков величиной до 50 мм с последующим их удалением, позволяет уменьшить среднее отклонение вдвое (0,5мм), и повысить точность готовых обшивок. Экспериментальная отработка технологии правки пологих лепестков двойной кривизны показала правильность выводов теоретической части.

Ключевые слова: штамповка взрывом; плоская заготовка; принципиальная схема; экспериментальные исследования.

MATION OF FORM OF SPATIAL SHELLS BY METHOD OF EXPLOSIVE STAMPING

V. Tretyak

A target of work is verification of the adequacy of the theoretical model of correction by the dynamic fold and verification of capacity of principle technological charts of the explosive stamping of flat purveyances. Of researches, exposure is a task of technological dependences, the receipt of which is possible only by the experimental path. The article presented results of experimental verification of the technological process of formation of form for the spatial shells on the typical models. Of the conducted work verification was a target of the rightness of theoretical positions, results of mathematical design and conclusions, and also approbation of methods of computations of technical parameters and charts of punching. The experiments are conducted on the flat models of edging, spherical and parabolic edging of large flexibility, and also curvilinear baskets models, models, and model standards. In the article, a process is explored of slanting collision, remaining tensions, deformations, and form of edging after deformation. Influencing of size, forms, and distances of charge on deviation from the matrix. The approbation was conducted on the party of the spherical model edging. Purveyances are approved on the model fragment.

Formulated conclusions and prospects of development and introduction of technology in thermonuclear researches, building, mining industry, rocket, and air production. Experimentally it is set, that the reduction of distance below recommended results in exceeding of deformation of punching of the middle part (curvature more than matrix) and reduction of deformation of punching of the periphery (curvature is a less than matrix). Most rejections are details noticeable in the angular areas. This it is possible to explain by the regional effect from the waves of unloading, and by some asymmetry of installation of charge. The greater part of the surface has a rejection of about 1 mm, which is exceeded by exactness on 8 degrees on the base of 1200 mm. Application of technological admittances by the size of about 50 mm with subsequent their deleting, allows to decrease the mean deviation twice (0,5 mm), and promote exactness of the prepared edging. The experimental working off of technology of correction of declivous petals of double curvature showed a rightness of outputs of the theoretical part.

Keywords: stamping by the explosion; flat purveyance; of principle chart; experimental researches.

Третяк Володимир Васильович – канд. техн. наук, доцент, проф. каф. технологій виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Volodimir Tretyak – PhD in Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Department of Aircraft Engine Manufacturing Technologies, National Aerospace University “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: v.tretyak@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0003-4493-2689.