

doi: 10.32620/oikit.2021.93.05

УДК 629.7

А.Н. Застела, В.В. Борисевич

Моделирование процессов вырубки-пробивки передающими средами

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

В условиях повышения качества выпускаемой продукции и снижения ее себестоимости, листоштамповочное производство, являясь базой для авиакосмической промышленности, должно более интенсивно внедрять современные технологии производства и особенно проектирования. Существует достаточно большое количество факторов, влияющих на протекание процесса штамповки (в особенности деталей со сложной геометрией), более полный учет которых позволил бы оптимизировать такого рода процессы, снизив тем самым себестоимость изготовления и повысив качество. В настоящее время интерес с точки зрения оптимизации и окончательного установления природы поведения материала представляют процессы формообразования и разделения сложных деталей посредством эластичной передающей среды. Сюда можно отнести уточнение таких параметров, как значения максимальных допустимых значений утонения, прочность матрицы. Уточнение этих и других параметров позволит существенно снизить энергетические затраты. Определение этих и других параметров процессов листовой штамповки возможно при использовании современных методов анализа. Для проведения численных исследований в области листоштамповочного производства наиболее подходящими являются вариационный метод или МКЭ. Компьютерное моделирование позволяет исследовать поведение материала, кинематику перемещения заготовки в процессе формообразования, выбрать правильную схему нагружения заготовки, а также дает возможность рассматривать несколько вариантов расположения заготовки в матрице, что очень важно при штамповке тонколистовых деталей. Это обеспечивает значительное сокращение времени и затрат на проведение натурных экспериментов, уменьшение объемов технологической подготовки листовой штамповки. Построение математической модели на основе МКЭ позволяет определять не только необходимые параметры процесса, но и рассматривать процесс формоизменения на отдельных его стадиях, определять картину напряженно-деформируемого состояния, указывая при этом на опасные зоны чрезмерного утонения, потери устойчивости, на необходимость применения матрицы с подпором при вырубке тонколистового материала. Это дает возможность оценить качество отштампованного изделия по рассчитанным параметрам, использовать полученные результаты для проектирования формблоков передающей среды.

Ключевые слова: моделирование процесса, листовая штамповка, вырубка-пробивка, листовая заготовка, передающая среда

Для обеспечения монтажа и обслуживания систем жизнеобеспечения самолетов в стенках, панелях управления предусматриваются отверстия различной конфигурации с отбортовкой и без нее. Прогрессивным направлением образования этих отверстий является использование передающей среды при вырубке – пробивке отверстий на металлической матрице. Для пробивки отверстий передающей средой применяются следующие материалы заготовок: алюминиевые и медные сплавы толщиной до 2,5...3,0 мм, различные стали (углеродистые, легированные, нержавеющей и др.), титановые сплавы и другие толщиной до 2,0 мм. Наименьшая толщина деталей практически не ограничена. При помощи передающей среды вырезают

и пробивают отверстия в деталях даже из тончайшей медной или алюминиевой фольги толщиной 0,02 мм. Штампы с жесткой матрицей и пуансоном для обработки такого рода материалов особенно сложны и дороги в производстве из-за практически безззорной подгонки матрицы с пуансоном и обеспечения такого условия в процессе штамповки.

Различают две схемы разделительных операций, осуществляемых давлением передающей среды. Первая схема – пробивка отверстия в листовой заготовке на провал с помощью матрицы без донной части - плоская заготовка, уложенная в матрицу с острыми режущими кромками, нагружается равномерно распределенной нагрузкой q (рис. 1 а). При этом предполагается, что за счет сил трения между рабочей частью матрицы и поверхностью заготовки последняя не может проскальзывать. Кроме того, большую роль играет жесткость фланцевой части заготовки, которая также препятствует ее смещению по поверхности матрицы. Эксперименты по пробивке, проведенные разными исследователями, подтверждают факт малого вовлечения фланца в пластическую деформацию. Таким образом, листовую заготовку, помещенную внутрь матрицы, можно считать абсолютно гибкой пластинкой, работающей на растяжение.

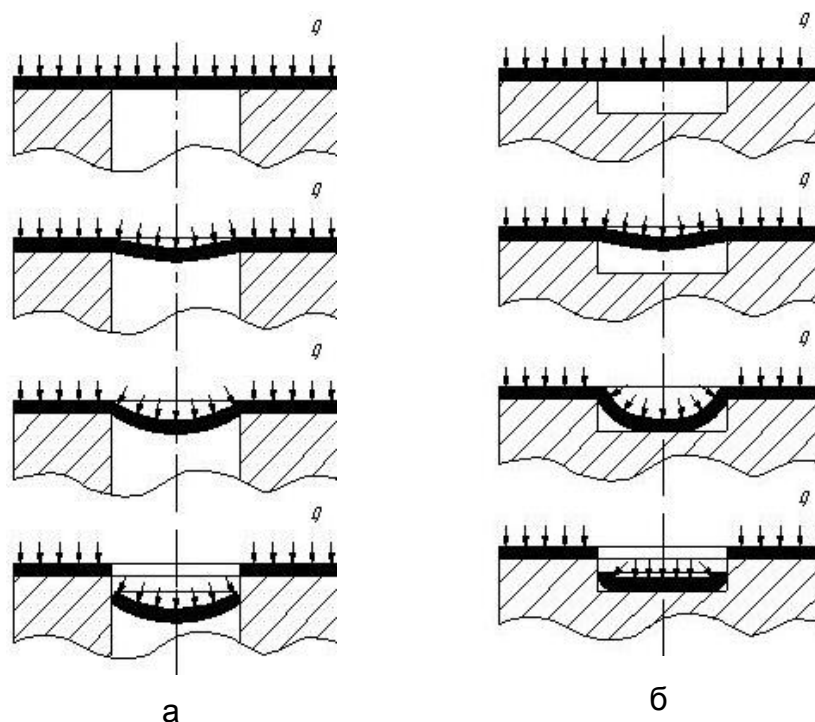


Рисунок 1 – Схемы пробивки отверстия в листовой заготовке
а - на провал; б - пробивка в матрицу с глухим дном

С увеличением внешней нагрузки упругие, а затем пластические деформации сосредотачиваются на провисающем участке заготовки. Рост давления q приводит к уменьшению радиуса кривизны в поперечном сечении с одновременным уменьшением ее толщины. С ростом уровня внешней нагрузки повышаются напряжение и деформации провисающего участка, заостренные режущие кромки матрицы в месте контакта с нагруженной заготовкой создают в последней концентрацию напряжений, которые по мере повышения уровня

внешней нагрузки достигают предела прочности материала, пластичность материала заготовки при этом исчерпывается. Возникающие микротрещины в зоне контакта с режущими кромками матрицы перерастают в макротрещины, при которых происходит отделение отхода от детали [1, 5].

Описанная выше технологическая операция находит применение, в основном, при пробивке одиночных отверстий. При групповой пробивке отверстий в тонколистовых заготовках применяют вторую технологическую схему – пробивку отверстия в матрице с глухим дном (рис. 1, б). Физическая сущность этого процесса аналогична вышеописанному.

В качестве тестовой решалась задача о пробивке прямоугольного отверстия в листовой заготовке на провал. Материал заготовки – Д16 ГОСТ 4784-97 ($E=72$ ГПа, $\mu=0,33$, $\sigma_v=450$ МПа, $\sigma_{0,2}=320$ МПа), АМг6 ГОСТ 4784-97 ($E=71$ ГПа, $\mu=0,32$, $\sigma_v=340$ МПа, $\sigma_{0,2}=170$ МПа), Амц ГОСТ 4784-97 ($E=71$ ГПа, $\mu=0,32$, $\sigma_v=110$ МПа, $\sigma_{0,2}=60$ МПа); материал матрицы – сталь У8 ГОСТ 1435-99 ($E=200$ ГПа, $\mu=0,25$) [49]; коэффициент трения между заготовкой и матрицей принят 0,3; габаритные размеры заготовки – (180x260x0,5...1,5) мм; габаритные размеры пробиваемого окна – 140x60 мм; схема приложения нагрузок и наложения ограничений на передвижение элементов модели представлена ниже (рис. 2). Расчеты и сравнение полученных результатов с ранее приведенными в литературе выполнялись по схеме, которая описана на примере штамповки гибкой в [2], были использованы материалы общей постановки и указаний по работе в среде LS-DYNA [7]. Сопоставление результатов проведенных расчетов с использованием метода конечных элементов с известными ранее результатами приведено ниже (рис. 3). Расхождение результатов моделирования с данными, полученными непосредственно при натурных опытах, обусловлено следующими факторами: при моделировании процесса модель материала заготовки принималась изотропной; диаграмма истинных напряжений была аппроксимирована билинейной кривой; при моделировании процесса использовался статический процесс нагружения.

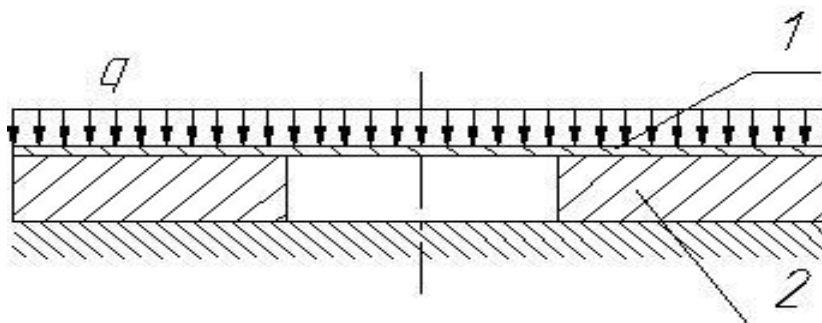


Рисунок 2 – Схема пробивки прямоугольного отверстия, примененная в тестовой задаче
1 – заготовка; 2 – матрица

Сопоставление результатов проведенных расчетов в [2,4,5,6,8] позволяет сделать следующий вывод: выбранную расчетную схему и принятые допущения можно считать правомерными, поскольку расхождение результатов расчета в зоне $0,65-1,10 \times 10^{-3}$ м с ранее полученными данными, лежит в

пределах, приемлемых для инженерных расчетов, указанные же допущения следует исключить в случае постановки более сложных и точных задач.

Помимо описанной выше задачи был проведен ряд численных экспериментов по определению необходимого давления для пробивки отверстий различной конфигурации, а именно: отверстий, представляющих в плане правильные многоугольники (рис. 4), площадь которых совпадает с площадью отверстия задачи (рис. 2); отверстий, представляющих в плане прямоугольники с различным соотношением сторон (рис. 5), площадь которых совпадает с площадью отверстия задачи (рис. 2). Начальные и граничные условия аналогичны приведенным выше.

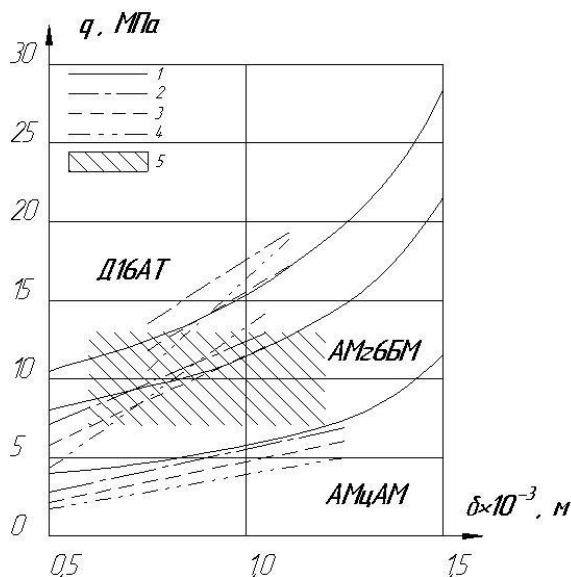


Рисунок 3 – График потребных давлений пробивки отверстия в листовой заготовке:

- 1 – по результатам расчета с использованием МКЭ; 2 – экспериментальные данные по Н.Д. Лозенко [5]; 3 – по формуле А.Д. Комарова [8];
- 4 – по результатам расчёта в среде «ПОЛЕ» [5, 6];
- 5 – экспериментальные данные по В.П. Романовскому [4]

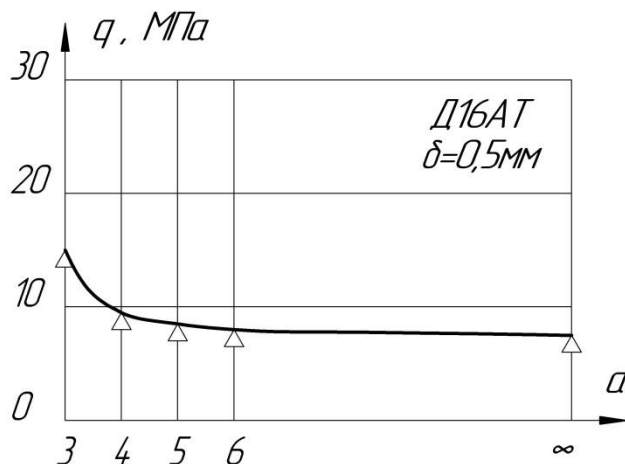


Рисунок 4 – Зависимость величины давления q , необходимого для пробивки правильных многоугольных отверстий (a – количество сторон)

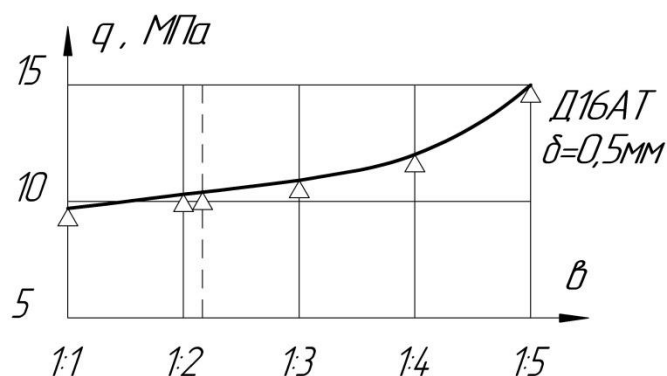


Рисунок 5 – Залежність величини тиску q , необхідного для пробивки прямокутних отверстий (b - відношення короткої сторони прямокутника до довгої)

Рекомендації к вибору методів моделювання для визначення енергосилових параметрів процесів вирізки-пробивки і кінематики переміщення окремих частин заготовок при формоутворенні

Аналіз результатів рішень, точність яких відповідає вимогам інженерних розрахунків, а також аналіз фізических основ процесів дозволяють сформулювати ряд рекомендацій к вибору методів моделювання:

- При аналізі складних процесів раціонально виробити умовне ділення процесів для поетапного рішення, що значно прискорює процес обчислення і дозволяє отримувати більш точний результат.
- При аналізі складних процесів в системах моделювання на основі МКЕ слід виключати з розрахунку параметри незначально впливаючі на результат рішення.
- При моделюванні простих в геометричному сенсі процесів використовувати описані допущення, з ускладненням процесу – адекватно їх змінювати.

Список літератури

1. Авдеев В.М., Аксенов Л.Б., Алиев И.С. Изготовление заготовок пластическим деформированием. Л.: Политехника, 1991.351с.
2. Застела О. М. Моделювання процесу штампування діафрагми згинанням листової заготовки еластичним середовищем / О. М. Застела, О. В. Трифонов, В. П. Водолажський // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. Аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 84. – Харків, 2019. – С. 93-109.
3. Арзамасов Б.Н. Конструкционные материалы. Справочник. М, «Машиностроение», 1990. 688с.
4. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л., «Машиностроение», 1971. 782с.
5. Сухов В.В. Оптимизация конструктивно-технологического облика деталей заготовительно-штамповочного производства в авиастроении. К. Техніка, 1997. 161 с.
6. Лимберг Э.А. Исследование основных технологических параметров

процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства математическим моделированием с использованием структурно-вариационного метода. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. X. 1993. 35 с.

7. Hallquist J. O. *LS-DYNA theoretical manual* / J. O. Hallquist. Livermore Software Technology Tsorporation: Livermore, TsA, 2006. - 498 p.

8. Комаров, А.Д. Опыт штамповки полиуретаном стальных деталей сложной формы / А.Д. Комаров // КШП: научно-технический журнал. – М.: 1991. - № 8. – С. 11 – 19.

References

1. Avdeev V.M., Aksenov L.B., Aliev I.S. *Izgotovlenie zagotovok plasticheskim deformirovaniem*. [Manufacturing of the blanks by plastic deformation]. Leningrad, Politehnika Publ., 1991, 351p.

2. Zastela, O. M., Trifonov, O. V., Vodolazhs'kii, V. P., *Modelyuvannya protsesu shtampuvannya diafragmi zginannyam listovoї zagotovki elastichnim seredovishchem* [Simulation of sheet metal bending of dyafragm by elastic pad] *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii*, sb. nauch. tr. Nats. Aerokosm . un-ta im. N.E. Zhukovskogo «KhAI». Publ., Kharkiv, 2019, no. 84, pp. 93-109.

3. Arzamasov B.N. *Konstruksionnye materialy*. [Engineering materials] *Spravochnik*. Moskva, «Mashinostroenie». Publ., 1990, 688 p.

4. Romanovskii V.P. *Spravochnik po kholodnoi shtampovke*. [Cold stamping reference book] Leningrad, «Mashinostroenie». Publ., 1971, 782 p.

5. Sukhov V.V. *Optimizatsiya konstruktivno-tekhnologicheskogo oblika detalei zagotovitel'no-shtampovochnogo proizvodstva v aviastroenii*. [Design and engineering features optimization of the parts for preliminary production in aircraft manufacturing] Kiev. Tekhnika. Publ., 1997, 161 p.

6. Limberg E.A. *Issledovanie osnovnykh tekhnologicheskikh parametrov protsessov i osnastki zagotovitel'no-shtampovochnogo proizvodstva matematicheskim modelirovaniem s ispol'zovaniem strukturno-variatsionnogo metoda*. Avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of the main engineering parameters of the processes and tooling of the preliminary stamping production by mathematic modelling with the help of structural-variational method. Avtoref. diss. ... cand. tech. sci.]. Kharkiv. «KhAI» im. N.E. Zhukovskogo. Publ., 1993, p. 35.

7. Hallquist J. O. *LS-DYNA theoretitsal manual*. J. O. Hallquist. Livermore Software Technology Tsorporation: Livermore, TsA, 2006, 498 p.

8. Komarov, A.D. *Opyt shtampovki poliuretanom stal'nykh detalei slozhnoi formy*. [Experience of complex part stamping by elastic pad] *KShP: nauchno-tekhnny`chesky` j zhurnal*. Moskva. 1991, no. 8, pp. 11 – 19.

Надійшла до редакції 22.10.2021. Розглянута на редколегії 22.10.2021.

Моделювання процесів виробки-пробивки передавальними середовищами

В умовах підвищення якості продукції та зниження її собівартості, листоштампувальне виробництво, що є базою для авіакосмічної промисловості, має більш інтенсивно впроваджувати сучасні технології виробництва і особливо

проектування. Існує досить велика кількість факторів, що впливають на перебіг процесу штампування (особливо деталей зі складною геометрією), більш повний облік яких дозволив би оптимізувати такі процеси, знизивши тим самим собівартість виготовлення і підвищивши якість. В даний час інтерес з точки зору оптимізації та остаточного встановлення природи поведінки матеріалу становлять процеси формоутворення та розподілу складних деталей за допомогою еластичного середовища. Сюди можна зарахувати уточнення таких параметрів, як значення максимальних допустимих величин утонення, міцність матриці. Уточнення цих та інших параметрів дозволить суттєво знизити енергетичні витрати. Визначення цих та інших параметрів процесів листового штампування можливе при використанні сучасних методів аналізу. Для проведення чисельних досліджень у галузі листоштампувального виробництва найбільш підходящими є варіаційний метод або МСЕ. Комп'ютерне моделювання дозволяє дослідити поведінку матеріалу, кінематику переміщення заготовки в процесі формоутворення, вибрати правильну схему навантаження заготовки, а також дає можливість розглядати кілька варіантів розташування заготовки в матриці, що дуже важливо при штампуванні тонколистових деталей. Це забезпечує значне скорочення часу та витрат на проведення натурних експериментів, зменшення обсягів технологічної підготовки листового штампування. Побудова математичної моделі на основі МСЕ дозволяє визначати не тільки необхідні параметри процесу, а й розглядати процес формозміни на окремих його стадіях, визначати картину напружено-деформованого стану, вказуючи при цьому на небезпечні зони надмірного утонення, втрати стійкості, на необхідність застосування матриці з підпором при вирубіванні тонколистового матеріалу. Це дає можливість оцінити якість відштампованого виробу за розрахованими параметрами, використовувати отримані результати для проектування формблоків еластичного середовища.

Ключові слова: моделювання процесу, листове штампування, вирубівання-пробивання, листова заготовка, середовище, що передає.

Simulation Of Elastic Pad Blanking-Piercing

During improvement of the quality of products and reducing its cost, sheet metal stamping production, being the basis for the aerospace industry, should more intensively introduce modern production technologies, especially design. There are a large number of factors influencing the stamping process (especially parts with complex geometry), more comprehensive consideration of which would allow to optimize such processes, thereby reducing the manufacturing cost and improving the quality. Currently the processes of forming and separation of complex parts by of an elastic pad are of interest from the point of view of optimization and the final determination of the nature of the behavior of the material. This includes the refinement of such parameters as the maximum permissible thinning, the strength of the die. Clarification of these and other parameters will significantly reduce energy required. Determination of these and other parameters of sheet metal stamping is possible due to application of the modern analysis methods. For numerical studies in the sheet stamping production, the variational method or FEM is the most suitable. Computer modeling makes it possible to investigate the behavior of the material, the kinematics of the workpiece movement during forming process, select the correct loading scheme for the workpiece, and also makes it possible to consider several options for the location of the workpiece in the die, which is very important for

stamping thin sheet metal blanks. It provides a significant reduction of the time and costs for carrying out natural experiments, and decrease of technological preproduction preparation of sheet metal stamping. The development of a mathematical model based on the FEM makes it possible to determine not only the required parameters of the process, but also to consider the forming process during its certain stages, to determine the stress-strain state, indicating at the same time the problem zones of excessive thinning, loss of stability, the need to apply a die with a back pressure for cutting of thin sheet metal blanks. It allows to evaluate the quality of a ready product according to the calculated parameters, to use the results obtained for the design of elastic pad.

Key words: process modeling, sheet metal stamping, blanking-piercing, sheetmetal blank, elastic medium.

Сведения об авторах:

Застела Александр Николаевич – к.т.н., доцент, профессор кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харковский авиационный институт», Харьков, Украина, sastela@khai.edu

Борисевич Владимир Владимирович – к.т.н., доцент, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харковский авиационный институт», Харьков, Украина, v.borisevich@khai.edu

About the Authors:

Zastela Oleksandr – PhD, Professor Assistant, Professor of the Airplane Manufacturing Department, National Aerospace University named after M. Ye. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, sastela@khai.edu

Borisevich Vladimir – PhD, Professor Assistant, Professor Assistant of the Airplane Manufacturing Department, National Aerospace University named after M. Ye. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, v.borisevich@khai.edu