

УДК 691.983

Холявик О.В.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА РАЗМЕРОВ И ФОРМЫ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ВЫТЯЖКИ КОРОБЧАТЫХ ИЗДЕЛИЙ

Методы определения размеров и формы заготовок для вытяжки коробчатых изделий прямоугольной и квадратной в плане формы, рекомендованные разными авторами [1, 2], справочной [3, 4] и нормативной литературой, существенно отличаются. Они зависят от многих параметров детали (относительной глубины, относительных размеров в плане, относительного радиуса, углов и др.) И, по сути, являются поиском первого приближения рациональных размеров формы заготовки, что требует дальнейшего уточнения.

На практике это связано со значительными материальными и интеллектуальными затратами, делает невозможным эффективное использование компьютерных технологий и вызывает увеличение сроков подготовки производства, что не отвечает современным требованиям.

В справочной литературе приведены различные рекомендации различных авторов. Они базируются на различных предположениях для различных соотношений параметров коробчатых деталей. К тому же алгоритм расчета и построения заготовок отличается не только у разных авторов, но и в пределах рекомендаций одного автора в зависимости от относительных размеров деталей (рис. 1, 2.).

Один из методов расчета формы и размеров заготовок для вытяжки высоких ($H/V > 0,7$) квадратных и прямоугольных коробок приведен в справочнике [4]. В зависимости от радиуса углового закругления r_k автор рассматривает два варианта метода:

а) при $r_k > 0,1\sqrt{H_p B_p}$, где H_p – расчетная высота с припуском на обрезку, B_p – расчетная ширина коробки по средней линии.

Формой заготовки для квадратной коробки на предпоследнем переходе является круговой цилиндр, а для прямоугольной коробки – овалый цилиндр.

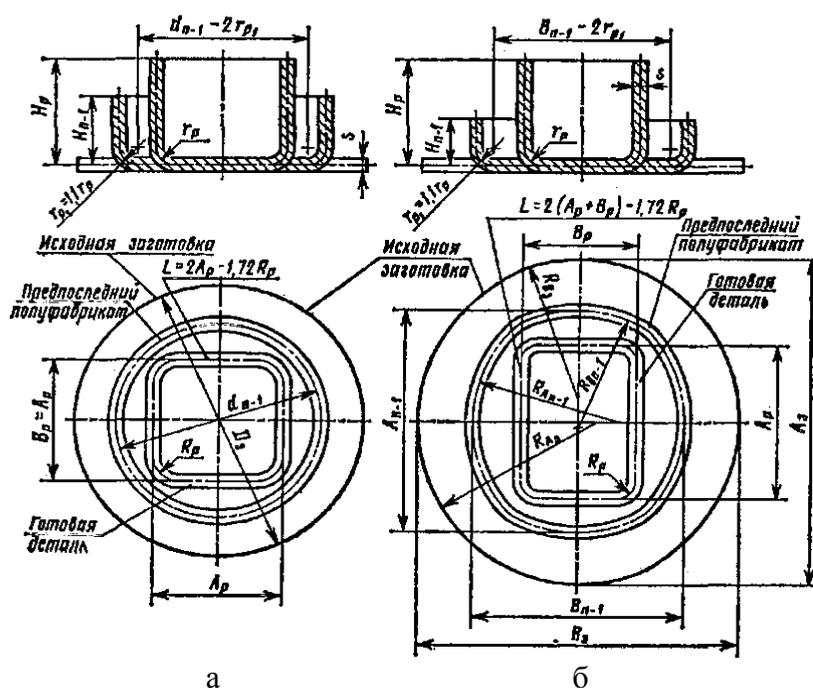


Рис. 1. Операции вытяжки глубоких коробок:
а – квадратной; б – прямоугольной

б) при $r_k < 0,1\sqrt{H_p B_p}$ для квадратной коробки предпочтительный полуфабрикат имеет форму не цилиндра, а квадратной коробки с выпуклыми сторонами. Для прямоугольной – не овального цилиндра, а прямоугольной коробки с овальными сторонами.

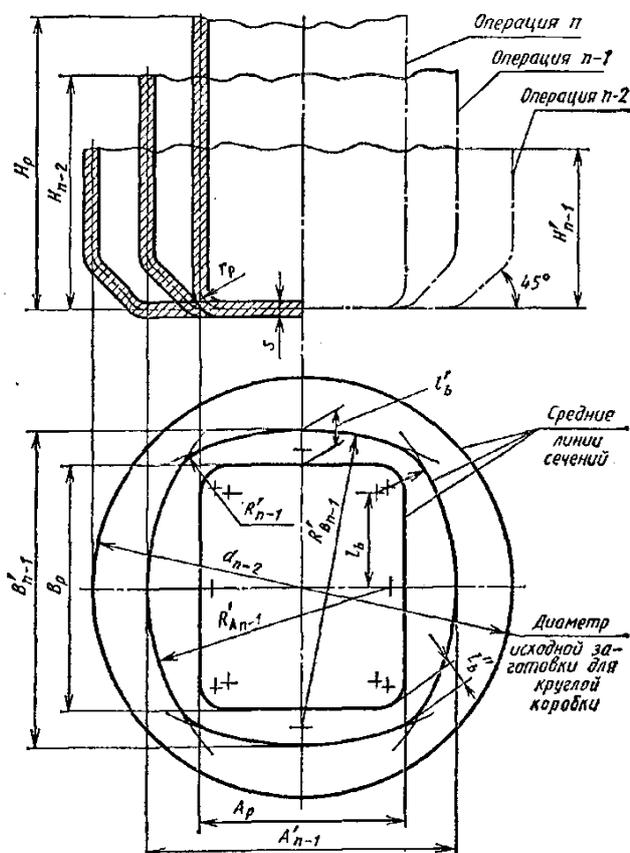


Рис. 2. Схемы к расчету параметров вытяжки высоких квадратных коробок при $r_k < 0,1\sqrt{H_p B_p}$.

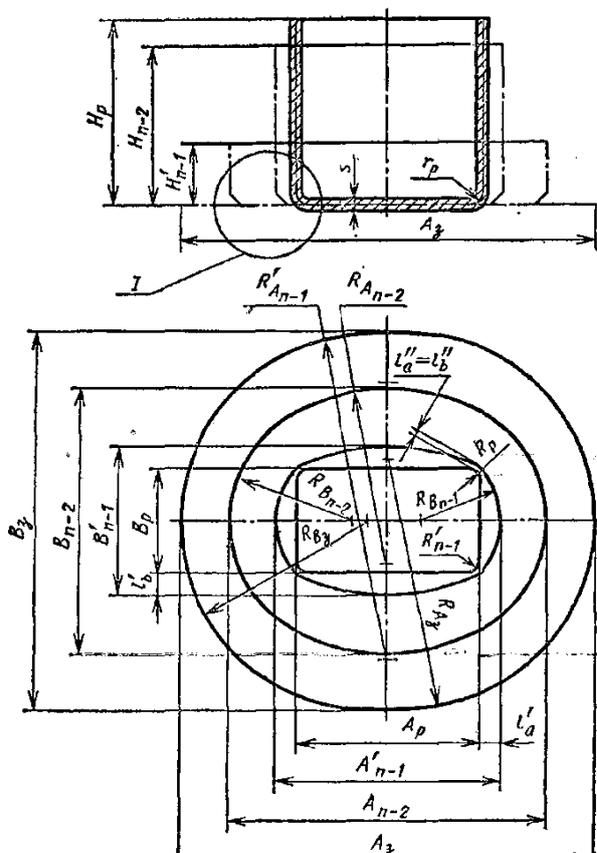


Рис. 3. Схемы к расчету параметров вытяжки высоких прямоугольных коробок при $r_k < 0,1\sqrt{H_p B_p}$.

Даже при соблюдении всех рекомендаций приведенных в справочной литературе невозможно получить рациональную форму заготовки (рис. 4).

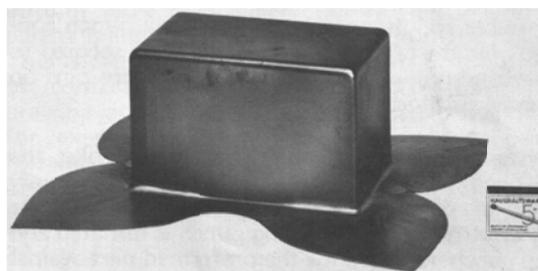


Рис. 4. Образование различного по ширине фланца при вытяжке прямоугольных коробчатых деталей [5]

Ранее на практике приходилось поэтапно корректировать размеры и форму заготовки, а иногда и рабочего инструмента, методом «проб и ошибок», что требовало значительных материально-технических, а соответственно и экономических затрат, вызывало рост сроков подготовки производства, делало невозможным эффективное использование современных компьютерных методов проектирования технологии и оснастки для производства деталей указанного типа.

Целью работы является развитие аналитического метода определения рациональной формы и размеров заготовок и технологии изготовления изделий коробчатой формы, который позволяет сократить сроки и снизить затраты на подготовку производства и повысить эффективность штамповочного производства в целом.

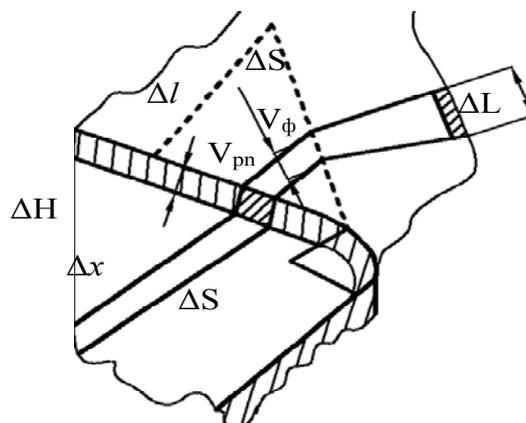


Рис. 5. Векторы скорости в пластической и жесткой зонах в момент пересечения границы между ними и поток вектора скорости на границе, на контуре матрицы и на контуре заготовки

Для достижения поставленной цели предложен метод определения в первом приближении рациональной формы и размеров заготовки для вытяжки пустотелых изделий коробчатых деталей квадратной и прямоугольной в плане формы с помощью метода потенциала скоростей течения идеальной несжимаемой жидкости «обратного» процесса. Суть его заключается в том, что контур матрицы делится на участки длиной Δx (Δy), которым соответствуют участки границы между жесткими и пластичными зонами длиной Δl . Скорость течения на каждом из них направлена по нормали к контуру матрицы и по модулю равна скорости пуансона v_n , а поток Δq сквозь отрезок Δx соответственно определяется формулой:

$$\Delta q = v_n \Delta l. \quad (1)$$

В жестких зонах, расположенных напротив прямолинейных участков матрицы, направление скорости и значение потока остаются неизменными. При пересечении границы между жесткой и пластичной зонами, которая является границей разрыва скорости пластического течения, неизменной остается нормальная к границе составляющая скорости:

$$v_n = v_{nn} \cdot \cos \alpha, \quad (2)$$

где α – угол наклона линии разрыва к горизонтальному участку контура матрицы.

Отрезку Δx контура матрицы на границе жесткой и пластической областей соответствует отрезок:

$$\Delta l_{zp} = \frac{\Delta x}{\cos \alpha}. \quad (3)$$

Поток сквозь этот отрезок q_{zp} будет равным:

$$q_{zp} = l_{zp} \cdot v_n = \frac{\Delta l_{zp}}{\cos \alpha} \cdot v_{nn} \cdot \cos \alpha = v_{nn} \cdot \Delta l_{zp} = const. \quad (4)$$

Условно сосредоточим в середине отрезков Δl линии разрыва истоки интенсивностью $v_{nn} \cdot \Delta l$, а в середине участков угловых закруглений радиуса r_k , ограниченных углом $\Delta \varphi$ – истоки интенсивностью $r_k \cdot \Delta \varphi \cdot v_{nn}$.

Элементарные истоки для расчета потенциала распределяем не по всему контуру матрицы, а по контуру углов и вдоль границы между жесткими и пластическими зонами. Для определения координат точек эквипотенциала, которая является контуром начальной заготовки, необходимо знать координаты одной точки, принадлежащей контуру заготовки.

Эта точка лежит на оси симметрии на расстоянии от контура матрицы, равному длине образующей изделия:

$$\Pi(x_n, y_n) = \frac{v_n}{2\pi} \sum_{j=1}^n \ln \left[(\xi_j - x_k)^2 + (\eta_j - y_k)^2 \right] = C_K \quad (5)$$

Выбирая различные точки на оси симметрии, или на границе жесткой и пластической зон, отвечающих разной глубине вытяжки, мы находим постоянные для потенциалов, проходящих через эту точку и определяющих рациональную форму и размеры заготовок.

Для построения семейства эквипотенциалей разработан алгоритм и программа расчета координат точек контура [8]. Для этого нужно решить уравнение потенциала относительно одной координаты, а затем найти другую координату:

$$\sum_{j=1}^n \ln \rho_j(x, y) = C'_k \quad y = y(C_i, x) \quad (6)$$

По семейству эквипотенциалей можно построить семейство линий тока.

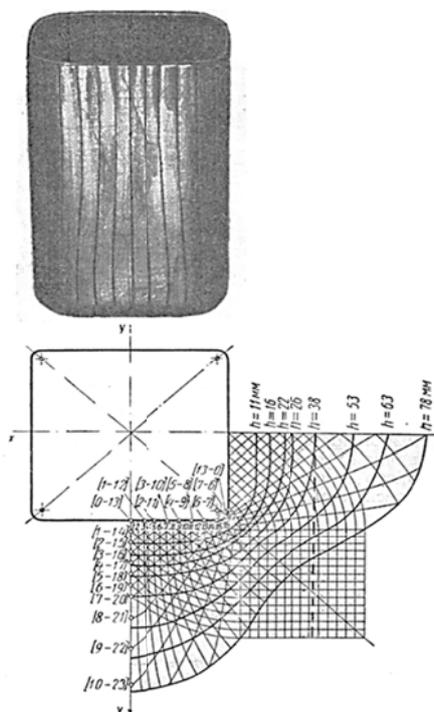


Рис. 6. Размеры и форма оптимальных заготовок для вытяжки квадратных коробок различной высоты и деталь, полученная из оптимальной заготовки ($H/B=0,95$) [6]

Ширина полосы Δl между двумя смежными линиями тока на кромке матрицы одинакова $\Delta l = const$. Ширина соответствующих полосок на внешнем контуре заготовки – разная. Наибольшая ширина ΔL_{max} находится в зоне угловых закруглений. Ее мы можем найти методом упорядочения массива.

Сравнивая эту величину с размером окружной деформации для осесимметричных изделий можно утверждать, что $\frac{\Delta l}{\Delta L_{max}}$ эквивалентно коэффициенту вытяжки $m = \frac{d}{D_{заг}}$

и при одинаковых значениях $\frac{S}{B}$ и $\frac{S}{D}$ этот параметр может быть использован для определения допустимого коэффициента вытяжки согласно аналогичному параметру для цилиндрических изделий.

Возможность такого подхода была подтверждена в работах Каткова В. Ф. (МАТИ).

Так как реологические свойства деформированного твердого тела существенно отличаются от деформации несжимаемой идеальной жидкости – этот метод можно рассматривать только в качестве первого приближения для определения рациональной формы заготовки.

Зная первое приближение (форму и размеры заготовки) следующие приближения можно уточнить методом компьютерного моделирования.

Надеясь, что построенная методом потенциала скорости идеальной несжимаемой жидкости, заготовка во всех случаях будет удовлетворять требованиям вытяжки из заготовки рациональной формы и размеров (как с точки зрения минимальности припуска на обрезку, так и количества переходов) нельзя, благодаря различным реологическим свойствам моделирующей среды и жестко-пластического материала (с деформационным упрочнением или без него). Поэтому полученные предложенным методом форму и размеры заготовки принимаем как первое приближение с последующей корректировкой их при компьютерном моделировании вытяжки. Для оценки возможности практического применения полученных результатов и необходимости внесения корректировки (учитывая различные реологические свойства моделирующей жидкости и упругопластического металла), было проведено компьютерное моделирование вытяжки коробчатых деталей с использованием программы DEFORM-3D.

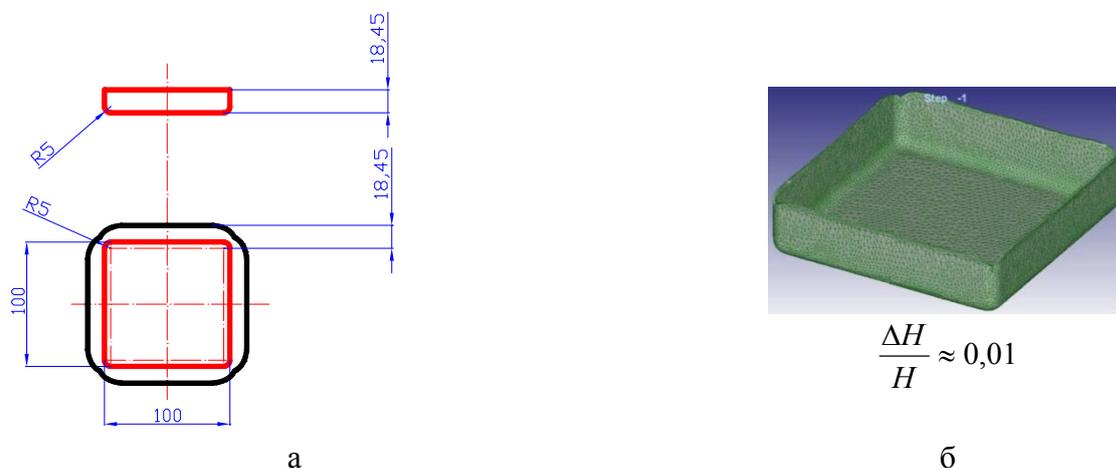


Рис. 7. Результат моделирования вытяжки:

а – относительно низкая квадратная коробка и контур заготовки, рассчитанный методом потенциала; б – относительно низкая квадратная коробчатая деталь, полученная с помощью DEFORM-3D [5]

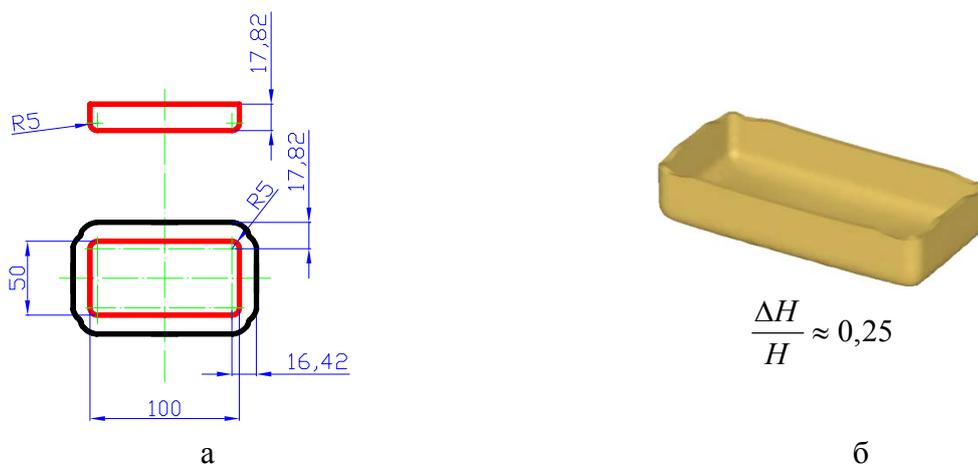


Рис. 8. Результат моделирования вытяжки:

а – относительно низкая прямоугольная коробка и контур заготовки, рассчитанный методом потенциала; б – относительно низкая прямоугольная коробчатая деталь, полученная с помощью DEFORM-3D [5]

В результате компьютерного моделирования процесса вытяжки квадратных и прямоугольных изделий различной относительной высоты из заготовок, рассчитанных методом гидродинамической аналогии, были получены детали, имеющие относительную неравномерность по высоте $\frac{\Delta H}{H} \approx 0,01 \div 0,25$ (рис. 7–9).

На рис. 7. приведены чертежи относительно низкой квадратной детали и контур заготовки, рассчитанный методом потенциала, а также результат моделирования вытяжки относительно низкой квадратной детали с помощью DEFORM-3D, а на рис. 8 – для относительно низкой прямоугольной коробки.

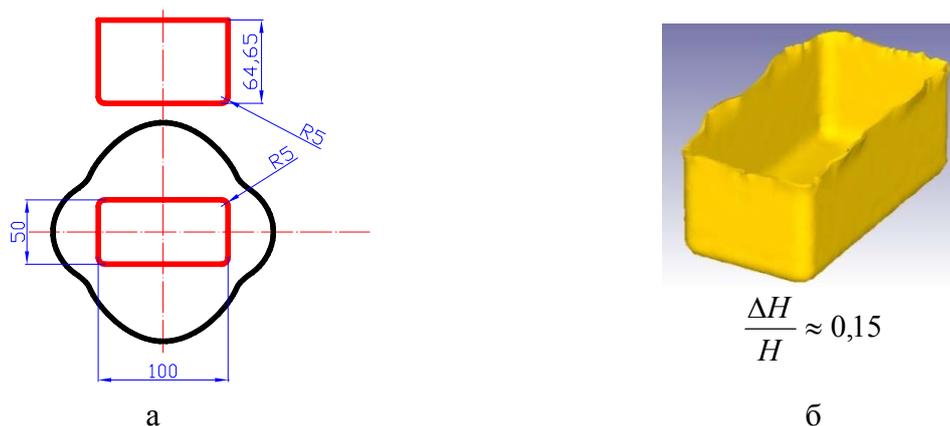


Рис. 9. Результат моделирования вытяжки:

а – относительно высокая прямоугольная коробка и контур заготовки, рассчитанный методом потенциала; б – относительно высокая прямоугольная коробчатая деталь, полученная с помощью DEFORM-3D [5]

При моделировании процесса вытяжки относительно высокой прямоугольной детали была получена коробка с почти равной по периметру высотой $\frac{\Delta H}{H} \approx 0,15$ (рис. 9).

Численным моделированием процесса вытяжки из заготовки, рассчитанной методом потенциала, с последующей корректировкой по результатам компьютерных вычислений (при вытяжке относительно средних $\frac{H}{B} > 0,4$ и относительно высоких $\frac{H}{B} > 0,7$ деталей) получена коробка, которая не требует послеоперационной обрезки, то есть разница в относительной высоте отдельных участков составляет лишь $\frac{H}{\Delta H} = 0,05$, в отличие от детали, полученной компьютерным моделированием из заготовки, рассчитанной инженерным методом, где этот показатель для квадратных в плане коробчатых изделий достигает $\frac{\Delta H}{H} = 0,3$, а для прямоугольных в плане коробчатых изделий – $\frac{\Delta H}{H} = 0,15$.

Поэтому в практической работе для коррекции формы и размеров заготовки и промежуточных переходов при вытяжке полых коробчатых изделий наряду с этим целесообразно использовать компьютерное моделирование процесса.

Таким образом, доказано, что заготовки, рассчитанные методом потенциала, являются оптимальными для низких коробчатых деталей ($\frac{H}{B} < 0,3$), а также деталей средней высоты ($0,7 < \frac{H}{B} < 0,3$), кроме того, хорошим приближением для высоких коробчатых деталей

($\frac{H}{B} > 0,7$). На основе моделирования проведен анализ оптимальности заготовок коробчатых изделий, рассчитанных различными методами. Оптимальную форму заготовки для вытяжки относительно высоких полых изделий можно получить только после коррекции, как формы, так и размеров заготовки и переходов. Целесообразно провести предварительное определение размеров и формы заготовки методом потенциала, после чего выполнить его окончательное (конечное) уточнение с помощью компьютерного моделирования.

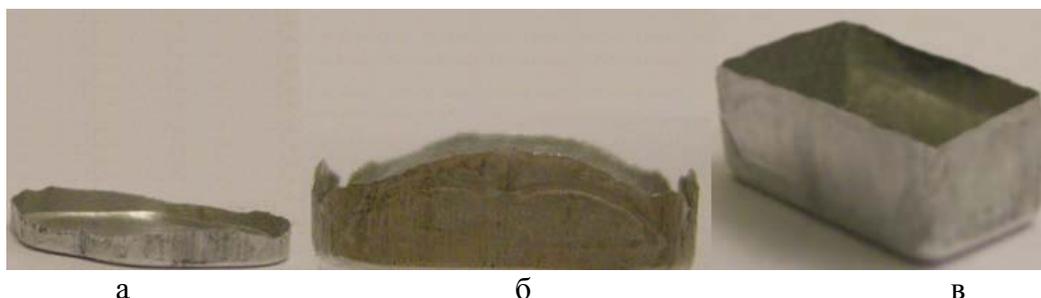
На базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований спроектировано и изготовлено универсальный вытяжной штамп-прибор (рис. 10.) для физического моделирования вытяжки коробчатых изделий из заготовок, форма которых рассчитана методом потенциала со сменными рабочими элементами (матрицами, пуансонами, прижимом и кольцами). Предложенный в работе метод расчета рациональной формы и размеров заготовки с последующим компьютерным моделированием позволяет на 30 % ускорить разработку технологического процесса и сократить сроки подготовки производства.



а б в г д е ж з

Рис. 10. Штамп для вытяжки [4]:

а – кольца для компенсации перекося; б – прижим; в – матрица; г – пуансонодержатель; д – пуансон; е – корпус; ж – винт; з – нижняя плита



а б в

Рис. 11. Изготовленные детали:

а – деталь после 1-го перехода; б – деталь после 2-го перехода; в – деталь после 3-го перехода

ВЫВОДЫ

Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили, что использование заготовок, предварительно рассчитанных методом потенциала, позволяет ускорить процесс расчета заготовок и промежуточных переходов для вытяжки полых коробчатых тонкостенных изделий почти на 30 %.

Предварительный расчет контура заготовки, формы и размеров промежуточных переходов, а соответственно и рабочего инструмента, позволяет повысить коэффициент использования металла до 80–90 % (рис. 11) за счет малоотходного раскроя материала и уменьшения, благодаря этому, количества промежуточных переходов и расходов на изготовление инструмента. Эффективность разработанного метода подтверждена соответствующим актом внедрения (Государственное предприятие Жулянский машиностроительный завод «Визар» г. Киев).

В работе предложен новый метод расчета формы и размеров заготовок для вытяжки полых коробчатых изделий с применением метода потенциала скорости идеальной несжимаемой жидкости. Данный метод позволяет совместить большой практический опыт для расчета коэффициента вытяжки первого и последующих переходов с возможностями компьютерного моделирования. Он значительно сокращает поиск рациональной формы заготовки (граничных и начальных условий) для компьютерного моделирования процесса вытяжки и позволяет сократить время моделирования. Метод позволяет в приемлемые сроки провести компьютерное моделирование, определение допустимых коэффициентов вытяжки на первом и промежуточных переходах с использованием коэффициента пластичности и прочности поперечного сечения для новых конструкционных материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. / В. П. Романовский – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с., ил.*
2. Вайнтрауб Д. А. *Технологические расчеты при вытяжке высоких прямоугольных деталей. / Д. А. Вайнтрауб – Л. : Ленинградский дом научно-технической пропаганды, 1969.*
3. *Руководящий технический материал. РТМ 34-65. Штампы для холодной листовой штамповки. Расчеты и конструирование. – М. : ВНИИНМАШ, Издательство стандартов, 1966.*
4. *Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / под общ. ред. Л. И. Рудмана. – М. : Машиностроение, 1988. – 496 с. : ил. – (Б-ка конструктора).*
5. *Ingegnerizzazione di processi di imbutitura di vaschette rettangolari / L. Fratini, E. Lo Valvo, I. Napoli, D. I. Russo – lamiera, è un mensile tecniche nuove, dicembre, 1997. – P. 77–80.*
6. *Основы теории обработки давлением / С. И. Губкин, Б. П. Звороно, В. Ф. Катков, И. А. Норицын, Е. А. Попов, Г. А. Смирнов-Аляев, А. Д. Томленов, Е. П. Унксов, Л. А. Шофман – М. : Машигиз, 1961.*
7. *Патент на корисну модель 31231 Україна, МПК (2006) B21D 22/20. Пристрій для визначення форми і розмірів заготовки для витяжки деталей складної форми / Холявік О. В., Стеблюк В. І., Тривайло М. С., Вишневецький П. С., Добровлянський С. М., Азарх І. П. (UA); заявник НТУУ «КПІ». – № у 2007 14709 ; заявл. 25.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6.*
8. *Стеблюк В. І. Побудова контуру заготовки на основі математичної моделі процесу витягування порожнистих виробів коробчастої форми / Стеблюк В. І., Холявік О. В. // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 63–66.*

REFERENCES

1. *Romanovskij V. P. Spravochnik po holodnoj shtampovke. – 6-e izd., pererab. i dop. / V. P. Romanovskij – L. : Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979. – 520 s., il.*
2. *Vajntraub D. A. Tehnologicheskie raschety pri vytjazhke vysokih prjamougol'nyh detalej. / D. A. Vajntraub – L. : Leningradskij dom nauchno-tehnicheskoy propagandy, 1969.*
3. *Rukovodjashhij tehničeskij material. RTM 34-65. Shtampy dlja holodnoj listovoj shtampovki. Raschety i konstruirovanie. – M. : VNIINMASH, Izdatel'stvo standartov, 1966.*
4. *Spravochnik konstruktora shtampov: Listovaja shtampovka / pod obshh. red. L. I. Rudmana. – M. : Mashinostroenie, 1988. – 496 s. : il. – (B-ka konstruktora).*
5. *Ingegnerizzazione di processi di imbutitura di vaschette rettangolari / L. Fratini, E. Lo Valvo, I. Napoli, D. I. Russo – lamiera, è un mensile tecniche nuove, dicembre, 1997. – P. 77–80.*
6. *Osnovy teorii obrabotki davleniem / S. I. Gubkin, B. P. Zvorono, V. F. Katkov, I. A. Noricyn, E. A. Popov, G. A. Smirnov-Aljaev, A. D. Tomlenov, E. P. Unksov, L. A. Shofman – M. : Mashgiz, 1961.*
7. *Patent na korisnu model' 31231 Ukraïna, MPK (2006) V21D 22/20. Pristrij dlja viznachennja formi i rozmiriv zagotovki dlja vitjazhki detalej skladnoï formi / Holjavik O. V., Stebljuk V. I., Trivajlo M. S., Vishnevs'kij P. S., Dobrovljans'kij S. M., Azarh I. P. (UA); zajavnik NTUU «KPI». – № u 2007 14709 ; zajavl. 25.12.2007; opubl. 25.03.2008, Bjul. № 6.*
8. *Steblyuk V. I. Pobudova konturu zagotovki na osnovi matematichnoï modeli procesu vitjaguvannja porozhnistih virobiv korobchastoï formi / Stebljuk V. I., Holjavik O. V. // Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnih trudov. – Kramatorsk : DGMA, 2009. – № 1 (20). – S. 63–66.*

Холявик О. В. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»

НТУУ «КПІ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: k_omd@ukr.net.

Статья поступила в редакцию 05.03.2015 г.