

УДК 621.7.044

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА ИСПОЛНЕНИЯ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ
ДЛЯ ВЗРЫВНОЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ****В. В. Драгобецкий, Е. А. Наумова, С. В. Шлык, Р. И. Рей, Ю. С. Саленко**

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Решение задач унификации конструктивных элементов штамповой оснастки и применения универсальных систем бандажирования чрезвычайно актуально в штамповочном производстве. Это снижает технологическую себестоимость производства деталей и освобождает производственные площади. Построена модель линейного программирования поиска оптимального варианта исполнения штамповой оснастки и системы бандажирования. Технологическая себестоимость является целевой функцией, которая выражается корреляционной зависимостью от конструктивно-технологических параметров. Представлена конструкция, дан анализ схем матриц для гидровзрывной штамповки и силового замыкания формующих элементов. Предложена универсальная система бандажирования разъемных матриц.

Ключевые слова: штамповка взрывом, матрица, бандаж, линейная модель, целевая функция.

**ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ВАРІАНТУ ВИКОНАННЯ ШТАМПОВОЇ ОСНАСТКИ
ДЛЯ ВИБУХОВОЇ МЕТАЛООБРОБКИ****В. В. Драгобецький, О. О. Наумова, С. В. Шлик, Р. І. Рей, Ю. С. Саленко**

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: vldrag@kdu.edu.ua

Рішення задач уніфікації конструктивних елементів штампового оснащення та застосування універсальних систем бандажування надзвичайно актуально в штампувальному виробництві. Це знижує технологічну собівартість виробництва деталей та звільняє виробничі площі. Побудована модель лінійного програмування пошуку оптимального варіанту виконання штампового оснащення й системи бандажування. Технологічна собівартість є цільовою функцією, яка виражається кореляційною залежністю від конструктивно-технологічних параметрів. Представлено конструкцію, надано аналіз схем матриць для гідровибухового штампування та силового замикання формуючих елементів. Запропоновано універсальну систему бандажування роз'ємних матриць.

Ключові слова: штампування вибухом, матриця, бандаж, лінійна модель, цільова функція.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Применение импульсных источников энергии, в частности, бризантных взрывчатых веществ (ВВ), позволяет в ряде случаев отказаться от дорогостоящего энергоемкого оборудования и металлоемкой технологической оснастки, обеспечить производство крупногабаритных высокоточных изделий нового качества, повысить эффективность процесса формообразования. Одной из проблем гидровзрывной штамповки является низкая стойкость технологической оснастки, подверженность формообразующих поверхностей выкрашиванию и необратимым пластическим деформациям. Поэтому чрезвычайно актуальным является решение комплекса задач, связанных с повышением динамической стойкости технологической оснастки, применения для ее изготовления и ударопрочных материалов изыскания резервов повышения прочности матриц и эффективных схем формообразования и снижения металлоемкости оснастки. Одним из путей решения ряда организационно-технических мероприятий является унификация конструктивных элементов штамповой оснастки и применение универсального вспомогательного оборудования. Унификация, как правило, состоит в многократном применении в конструкциях одних и тех же элементов, в частности бандажных колец. Это будет способствовать сокращению номенклатуры штамповой оснастки, снижению ее металлоемкости и освобождению дополнительных производственных площадей.

Цель работы – систематизация существующих конструкций матриц с классификацией системы их силового замыкания, обоснование оптимального конструктивного варианта технологической оснастки. Разработка универсальной системы замыкания.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Конкретный технологический процесс гидровзрывной штамповки может быть выполнен с применением различных вариантов оснастки, отличающегося по своей экономической эффективности. Выбор конструкции штампа, материала из которого изготовлен штамп, конструкции системы бандажирования, способа изготовления и упрочнения перед проектированием необходимо обосновать путем вычислений, например, методами линейного программирования путем построения математической модели. Линейное программирование – основной метод отыскания оптимального решения с альтернативными вариантами. Непосредственно для процесса листовой штамповки взрывом в качестве целевой функции принимается себестоимость изготовления детали.

Однако учитывая, что точную экономическую оценку технологической себестоимости изготовления деталей методом гидровзрывной штамповки дать затруднительно вполне целесообразно использовать корреляционные зависимости технологической себестоимости от конструктивно-технологических параметров деталей. В состав конструктивно-технологических параметров следует внести: площадь поверхности детали S , толщина стенки

заготовки δ , минимальный радиус сопряжения поверхностей, ресурс пластичности Φ , количество переходов, масса оснастки m_o , масса детали m_d , максимальный диаметр раздачи D , длина цилиндрической заготовки H в зоне раздачи. Если для изготовления партии детали приходится использовать несколько комплектов штамповой оснастки массу штамповой оснастки следует умножить на коэффициент кратности K . Т.е. при изготовлении комплекта деталей матрица разрушается и возникает необходимость в ее замене. Кроме того, при штамповке деталей из цилиндрических и конических заготовок, используются бандажные кольца стойкость которых, как правило, выше стойкости матриц, поэтому массу оснастки выражаем как

$$m_o = Km_m + K_1m_o, \quad (1)$$

где m_m – масса матрицы; K_1 – коэффициент кратности стойкости бандажных колец; m_o – масса бандажных колец (возможно применение одного или двух бандажных колец).

Для деталей типа обечаек, получаемых из цилиндрических и конических заготовок, получаемых методами гидровзрывной и гидродинамической штамповки получена следующая зависимость от конструктивно-технологических параметров [5]:

$$C_m = 18,48D^{0,3317} H^{0,4387} m_d^{-0,0323} x \cdot x\delta^{-0,258} m_o^{-0,0547} N^{-0,2148} \quad (2)$$

Прологарифмировав эту зависимость, получим

$$\ln C = \ln 18,48 + 0,3317 \ln D + 0,4387 \ln H - 0,0323 \ln m_d - 0,258 \ln \delta - 0,0547 \ln m_o - 0,2148 \ln N$$

Приняв обозначения

$$\ln D = X_1; \ln H = X_2; \ln m_d = X_3; \ln \delta = X_4; \ln m_o = X_5; \ln N = X_6; \ln C = L$$

получим целевую функцию в виде

$$L = 0,3317 X_1 + 0,4387 X_2 - 0,0323 X_3 - 0,258 X_4 - 0,0547 X_5 - 0,2148 X_6 + \ln 18,48 \quad (3)$$

При этом следует заметить, что при расчете технологической себестоимости из всех конструктивно-технологических параметров, которые косвенно связаны с затратами на оборудование, основной материал, штамповую оснастку и заработную плату производственных рабочих, можно повлиять на количество переходов штамповки и общую массу штамповой оснастки. Общая масса штамповой оснастки в целом зависит от количества замен матриц на

всю программу выпуска деталей. Т.е. затраты на штамповую оснастку зависят от ее эксплуатационной стойкости. Последняя, зависит как от твердости обрабатываемого материала, так и от твердости поверхностного слоя матрицы; времени деформации металла, в которое включено и количество переходов штамповки:

$$C = a_o (HB)^n \cdot \tau^{-k} \quad (4)$$

где a_o – функция учитывающая конфигурацию рабочей полости матрицы и характер нагружения; HB – исходная твердость поверхности матрицы; τ – время деформации; n, k – эмпирические константы.

Время нагружения матрицы включает время прохождения ударной волны через заготовку и непосредственно через стенку матрицы и время контактирования заготовки с матрицей в процессе формоизменения. Время прохождения ударной волны через стену матрицы $t_1 = \delta_m / c$, где δ_m – толщина стенки матрицы; c – скорость распространения ударной волны. Время соударения заготовки с матрицей зависит от скорости движения заготовки v_o , усилия соударения заготовки с поверхностью матрицы F и упругой постоянной или жесткости матрицы и составляет $6 \cdot 10^{-4}$ с.

Прологарифмировав (5) получим целевую функцию по стойкости

$$\ln C = \ln a_o + n \ln HB - k \ln \tau$$

обозначив $\ln C = L$; $\ln a_o = X_1$; $n \ln HB = X_2$ и $\ln \tau = X_3$ получим

$$L = X_1 + nX_2 - kX_3$$

Для оценки стойкости матрицы можно принять $a_o = 1$. Тогда целевая функция примет вид

$$L = nX_2 - kX_3$$

Влияние технических ограничений на стойкость матрицы представляется в виде неравенств представляющих зависимость стойкости матрицы от конструктивно технологических параметров. Установлено, что при твердости, соответствующей деформации равной предельной равномерной стойкость будет максимальной. Поэтому первое ограничение можно представить в виде $X_2 \leq HB$.

Составляющей целевой функции являются и затраты на штамповую оснастку, которые рассчитываются по зависимости

$$Z_{ш} = C_{изг} (N_3 + 1) + (K_6 N_3 + K_0) C_6 n^{-1},$$

где $C_{изг}$, C_6 – стоимость изготовления и восстановления штампа (матрицы); $N_3 + 1$ – число комплектов матриц или матриц и ее элементов для выполнения программы выпуска; K_6 – допустимое число восстановлений комплекта штамповой оснастки (матрицы и ее элементов); K_0 – число восстановлений последнего штампа.

При этом в стоимость изготовления штамповой оснастки входит стоимость изготовления матрицы и ее элементов и стоимость изготовления бандажных колец.

$$C_{изг} = C_m + C_6$$

где C_6 – стоимость изготовления бандажных колец.

В свою очередь

$$N_3 = \frac{n}{(K_6 + 1)C},$$

где C – стойкость матрицы.

Стойкость матрицы представляет собой функцию переменных габаритных размеров штампуемой детали (высота, диаметр и толщина стенки) H, D, S твердости HV и прочности σ_6 штампуемого мате-

риала, критерия сложности получаемой детали и является определяющей при снижении затрат на изготовление деталей штамповки взрывом. Определяющими параметрами является твердость формообразующей поверхности матрицы и ее жесткость. Поэтому кроме рациональных вариантов конструкции матрицы чрезвычайно важен и подбор материалов обладающих высокой твердостью, жесткостью и низкой стоимостью. Эти параметры не описываются методами линейного программирования, однако приведенные зависимости показывают, что снижение стоимости технологической оснастки и ее номенклатуры оказывают наиболее существенное влияние на себестоимость полученных деталей. Модель (3), (4) трансформирована в виде, удобном для решения линейного программирования (Симпсона) и реализована в программном пакете MATLAB.

Формующие элементы составных матриц при взрыве удерживаются в рабочем положении силовыми замыкающими элементами.

Основные конструктивные решения, применяемые в современных штампах для выдавливания в разъемных матрицах, можно сгруппировать по следующим направлениям (рис. 1):

- 1) применение запирающих устройств, встроенных в штампы;
- 2) применение устройств (схем деформирования), позволяющих использовать для зажима полуматриц технологическую силу.

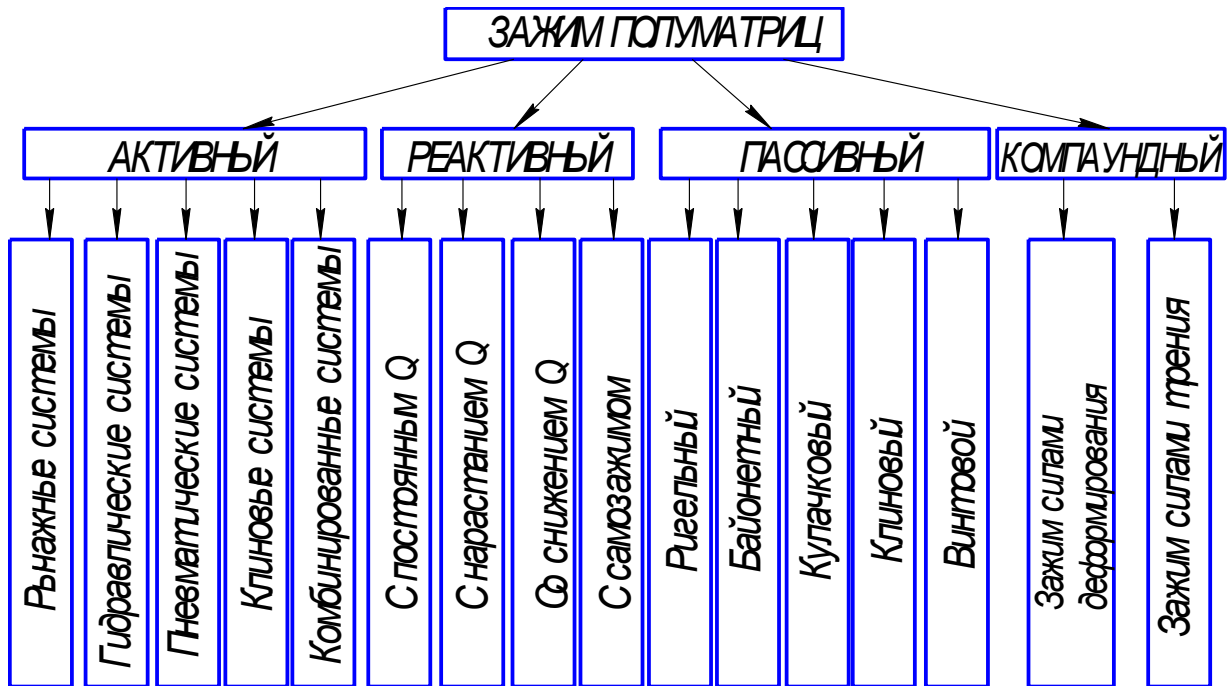


Рисунок 1 – Классификационные признаки замыкающих устройств штампов с разъемными матрицами

Цельные неразъемные матрицы применяют для ограниченного класса

деталей, как правило, небольших габаритов.

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. 2).

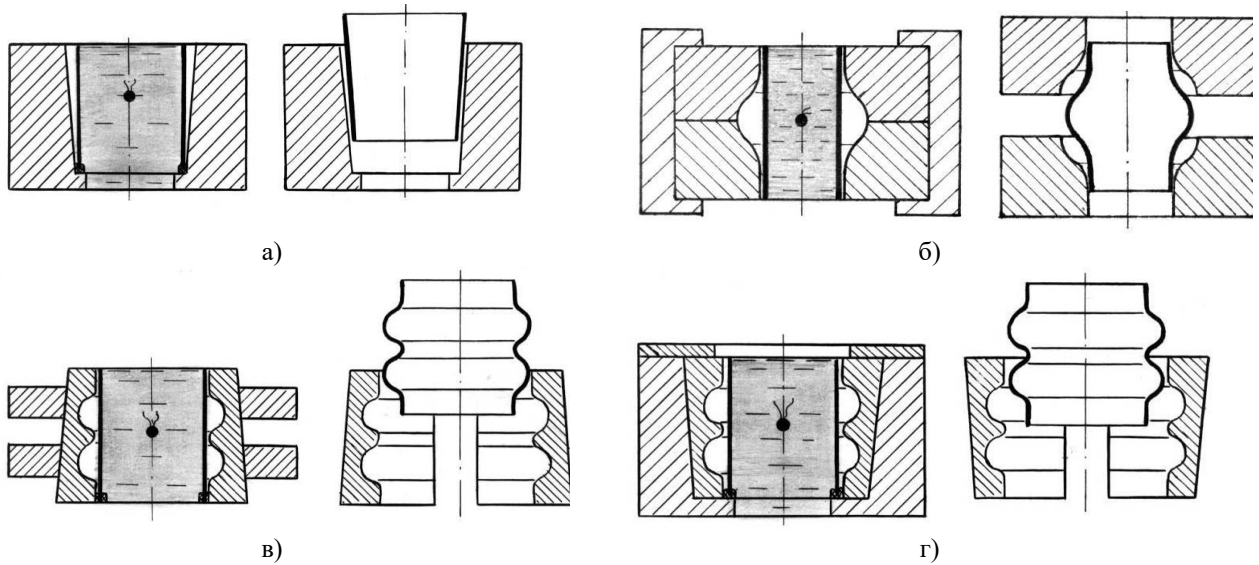


Рисунок 2 – Схемы оснастки с различными типами матриц для взрывной штамповки обечаек в положении сборки и разборки: а – неразъемные матрицы; б – составные матрицы с горизонтальным разъемом; в – составные матрицы с вертикальным разъемом и силовым бандажом; г – составные матрицы с вертикальным разъемом и силовым корпусом

При росте габаритов деталей до 1000 мм и более, масса матриц возрастает настолько, 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 формующих элементов непосредственно в зоне штамповки [1].

Впервые в мировой практике предложил силовое замыкание составных, сменных формующих элементов матриц при взрывной штамповке крупногабаритных обечаек производить с помощью одного универсального, фрикционного бандаж (рис. 3).

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

При этом, в технологическом процессе штамповки взрывом наиболее трудоемкими и длительными по времени являются операции сборки-разборки и транспортировки силовых замыкающих и формующих элементов оснастки. 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.

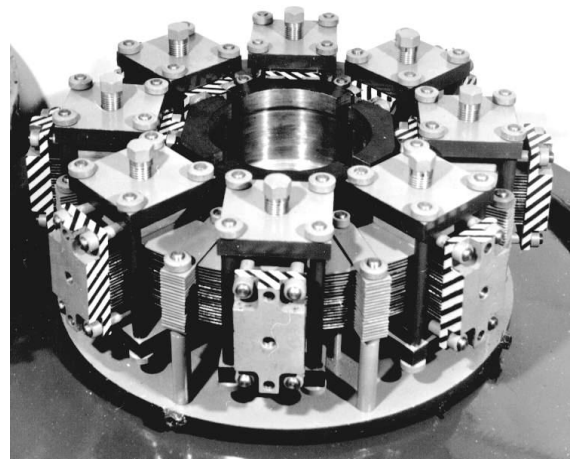


Рисунок 3 – Модель оснастки с фрикционным силовым замыканием формующих элементов матрицы при взрывной штамповке обечаек

Для устранения хлопнунов необходима герметизация и вакуумирование полости между заготовкой и поверхностью матрицы. При герметизации натурной заготовки необходимо применить резиновый уплотнитель. Четкая фиксация составных формую-

щих 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.



Рисунок 4 – Готовая деталь в разрезной матрице, состоящей из четырех формующих элементов

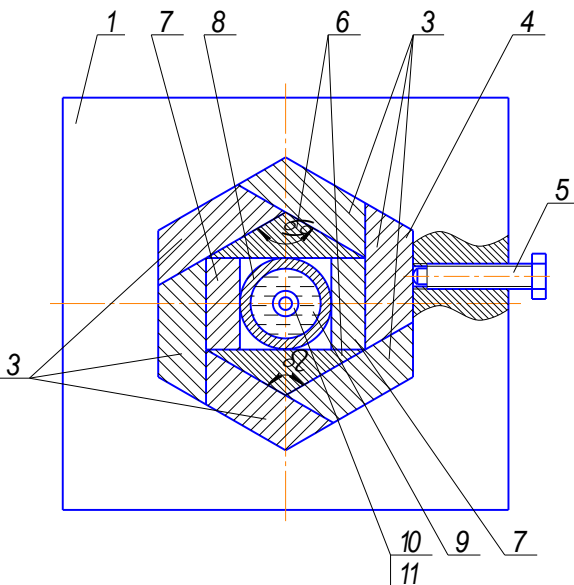


Рисунок 5 – Устройство для штамповки многогранных труб:

- 1 – корпус; 2,3 – трапециевидные призмы;
- 4 – призма-привод; 5 – винт; 6, 7 – дополнительные формообразующие элементы; 8 – заготовка;
- 9 – передающая среда; 10 – заряд ВВ;
- 11 – электродетонатор

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 ра-

бочем 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.

Альтернативным вариантом разработанной экспериментальной оснастки может быть устройство для штамповки многогранных труб [6]. Его можно использовать, как универсальный бандаж для замыкания формообразующих элементов матрицы (рис. 5). Бандаж состоит (рис. 6) из корпуса 1 с шестигранной полостью, в которой установлены трапециевидные призмы 2, 3, которые стыкуются между собой. Одна из них 4 перемещается винтом 5 установленным в корпусе 1. Необходимый размер обжатия матрицы 4 рис. 5 устанавливается винтами 5. Такой универсальный бандаж имеет механический привод и более прост в изготовлении и эксплуатации.

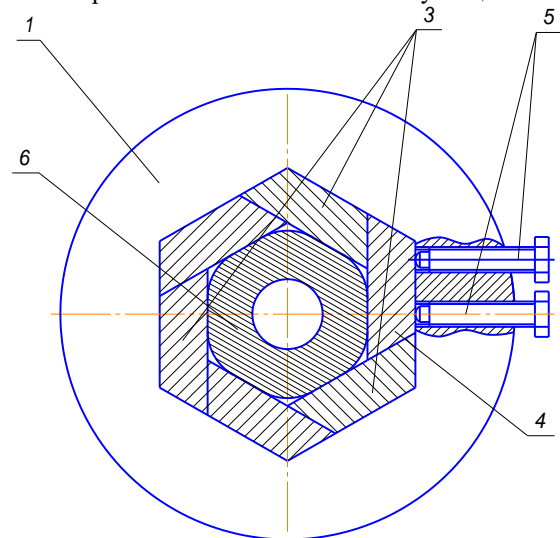


Рисунок 6 – Универсальный бандаж:
1 – корпус бандаж; 2, 3 – трапециевидные призмы; 4 – перемещаемая винтом призма; 5 – винты; 6 – матрица

Фото экспериментального образца бандаж представлен на рис. 7.



Рисунок 7 – Экспериментальный образец универсального бандаж с механическим приводом

ВЫВОДЫ. Выполнена систематизация существующих конструкций матриц и классификация систем их силового замыкания, что позволило путем математического описания затрат на технологическую себестоимость установить оптимальный вариант разборной матрицы с внешней многогранной поверхностью и универсальной системы силового замыкания матриц с варьированием габаритов в пределах 100÷500 мм. применение корреляционной зависимости для оценки технологической себестоимости позволило адаптировать расчетные уравнения удобные для решения методом линейного программирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование несущей способности универсального фрикционного бандажа для замыкания формирующих элементов матриц при взрывной штамповке / В.К. Борисевич, В.П. Павиченко, В.В. Третьяк, Н.Ф. Савченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. – №11(47). – С. 118–124.
2. Драгобецкий В.В. Практика и перспективы создания прогрессивных технологий импульсной металлообработки // *Сборник трудов международной научно-технической конференции в г. Севастополе 9–15 сентября. 2002 г. Машиностроение и техносфера XXI века. В 3-х томах.* – Донецк: Дон НТУ, 2002. Т.1. – С. 187–191.
3. Взрывная упрочняюще-стабилизирующая обработка крупногабаритных матриц для листовой штамповки / В.Ю. Коцюба, С.Н. Пахолка, С.В. Шлык, В.В. Драгобецкий, А.И. Галаган // *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва*. – Кременчук: КНУ, 2015. – Вип. 2/2015 (16). – С. 126–137.
4. Штамповка листовых деталей взрывом на ОАО «Мотор-Сич» / В. А. Богуслаев, О. И. Гавриш, С. А. Стадник // *Авиационно-космическая техника и технология*. – X. : ХАИ, 2007. – Вып. 11/47. – С. 194–195.
5. Многофакторность физических явлений при взрывной металлообработке / В. К. Борисевич, В. В. Драгобецкий, О. В. Троцко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – X.: ХАИ, 2007. – Вып. 11/47. – С. 62–73.
6. Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation / V.V. Dragobetskii, A.A. Shapoval, D.V. Mospan, O.V. Trotsko, V.V. Lotous // *Metallurgical and Mining Industry* – 2015, No. 4. – P. 363–368.
7. Lotous V., Dragobetskii V. New explosive welding techniques // *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. – Серія «Машинобудування», 2013. – № 67. – С. 149–154.
8. Mahajan S. Metallurgical effects of planar shock waves in metals and alloys II *Phys. status solid; Ser. A* 1970. – 2, N 2. – P. 187–200.
9. Shock waves and the mechanical properties of solids I Ed. by J.J. Burke, W. Weiss. – Syracuse. University Press, 1970. – 417 P.
10. Metallurgical effects at high strain rates / R.W. Rohde, B.M. Butsher, J.R. Holland, C.H. Games. – N. Y.; L.: Plenum Press, 1973. – 699 P.
11. Weertman J. Dislocation mechanics at high strain rates // *Metallurgical effects at high strain rate*. – N. Y.; L.: Plenum Press. 1973. – P. 319–332.

DETERMINATION OF THE RATIONAL VARIANT OF THE STAMPING TOOL MANUFACTURING FOR EXPLOSIVE METAL WORKING

V. Dragobetsky, E. Naumova, S. Shlyk, R. Peyi, Yu. Salenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University

vul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: vldrag@kdu/edu.ua

Purpose. To systemize the existing constructions of dies with the classification of the system of their power closure, justification of the optimal design variant of the technological equipment, to development a universal closure system. **Methodology.** A systematic analysis of the existing die constructions and power closure systems has been performed. A classification of the bandage systems has been performed. The optimal variant of the construction is found by using linear programming methods. The solution has been found by the simplex method and implemented in the MATLAB software package. **Results.** The necessity of applying the universal system of force closure of elements of the demountable dies has been substantiated. A constructions of the universal bandage system with the unified elements has been developed. The overall dimensions of the dies for banding can be varied within 100 ÷ 500 mm. **Originality.** The model for estimating the technological cost is transformed to the form convenient for solving by the method of linear programming. The objective function is expressed by the correlation dependence of the technological prime cost on the construction parameters of the die tooling. **Practical value.** The construction of the universal system of bandage of the demountable dies is developed. Its application frees up 15-20 per cent of the production area of the site for stamping with an explosion while reducing the cost of making die equipment 5-7 times and reducing its metal consumption. References 11, figures 7.

Key words: explosive forming, dies, bandage, linear model, objective function.

REFERENCES

1. Borisevich, V., Pavichenko, V., Trtyak, V., Savchenko, N. (2007), "Research of beating strength of universal friction bracer for shorting of shaping elements of matrices a explosive stamping ", *Aerospace technics and technology*, "KHAI" M. Ye. Zhukovskiy National. aerokosm. Univ, Harkiv, vol. 11/47, pp. 118-124.
2. Dragobetskii, V.V. (2002), "Practice and prospects of creating advanced technologies of pulse metalworking", *Proceedings of the international scientific conference Don NTU [Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI century. The 3 volumes]*, Vol.1, pp. 187–191.
3. Kotsiuba, V.Yu., Pakholka, S.N., Shlyk, S.V., Dragobetskii, V.V., Galagan, A.U. (2015), "Explosive hardening and stabilizing treatment of a large die for sheet stamping" *Suchasni resurso-enerhozberihayuchi tekhnolohiyi hirnychoho vyrobnytstva*, vol. 2/2015 (16), pp. 126–137.
4. Boguslayev, V.A., Boguslayev V.A., Gavrish, O.I., Stadnik, S.A. (2007), "Stamping of sheet metal parts by the explosion at "Motor-Sich", *Aerospace technics and technology*, "KHAI" M. Ye. Zhukovskiy National. aerokosm. Univ, Harkiv, vol. 11/47, pp. 194-195.
5. Borisevich, V.K., Dragobetskii, V.V., Trotsko, O.V. (2007), "The many factors of physical phenomena during explosive metal", *Aerospace technics and technology: Scientific and Technical Journal*, "KHAI" M. Ye. Zhukovskiy National. aerokosm. Univ, Harkiv, vol. 11 (47), pp. 62–73.
6. Dragobetskii, V.V., Shapoval, A.A., Mospan, D.V., Trotsko, O.V., Lotous, V.V. (2015), "Excavator bucket teeth strengthening using a plastic explosive deformation", *Metallurgical and Mining Industry*, no. 4. [in English].
7. Lotous, V., Dragobetskii, V. (2013), "New explosive welding techniques", *Journal of mechanical engineering National technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute"*, vol. 67, pp. 149–154. [in English].
8. Mahajan, S. (1970), "Metallurgical effects of planar shock waves in metals and alloys", *II Phys. status solid*, no. 2. , pp. 187–200. [in English].
9. Burke, J.J., Weiss, W. (1970), "Shock waves and the mechanical properties of solids", *Syracuse University Press*, 1970, 417 p. [in English].
10. Rohde, R.W., Butsher, B.M., Holland, J.R., Games, C.H. (1973), "Metallurgical effects at high strain rates", *N. Y.; L.: Plenum Press*, 699 p. [in English].
11. Weertman, J. "Dislocation mechanics at high strain rates", *Metallurgical effects at high strain rate*, N.Y.; L.: Plenum Press. 1973, pp. 319–332. [in English].

Стаття надійшла 27.12.2017.