

УДК 621.795

Яворовский В.Н., к.т.н., доц., **Корнийченко П.А.**, **Надводнюк Д.Н.**
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ОСОБЕННОСТИ ВЫРУБКИ КРУГЛЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТОНКОЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА

Iavorovskyi V., Korniytchenko P., Nadvodniuk D.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua)

SPECIFICS OF THE BLANKING ROUND DETAILS FROM THIN SHEET MATERIALS

На основании результатов теоретического исследования вырубки прямоугольной пластины из тонколистового материала, проведенного с использованием программной среды DEFORM-3D, проводится экспериментальное исследование вырубки круглой детали $\Phi 20,3$ мм из разного рода материалов: сталь 20, латунь Л68, технической меди М1 и алюминиевого сплава АМц-Н2 разной толщины листа: 0,15; 0,5 и 1 мм. Многочисленные эксперименты приводят к улучшению качества вырубки: достижению 8...11 квалитета точности, шероховатости поверхности среза R_a 1...1,5, меньшей высоте заусенца и отсутствию конусности. Предполагается, что все улучшения качества поверхности среза связаны с устранением фазы скола.

Ключевые слова: вырубка, прогиб, точность, шероховатость, заусенец, гибкая оболочка.

В листоштамповочном производстве тонким листовым материалом считается материал не более 3 мм толщиной, однако в нашем случае на исследуемый материал налагается дополнительное требование – размеры детали в плане (это – диаметр) отличается более, чем в десять раз от толщины листа.

Для таких деталей боковая поверхность (поверхность среза) не является рабочей и ее качеству в большинстве случаев не уделяется специальное внимание, она не участвует в последующей работе детали. И лишь для одной группы деталей, которые в последствии собираются в стопы или пакеты (пластины магнитопроводов, роторов и статоров электродвигателей и пр.) точность качества поверхности среза, а также высота допустимого заусенца (до $0,1S$, где S – толщина материала) влияет на трудоемкость сборки пластин в пакеты. Повышение качественных показателей операции сокращает объем слесарных работ по удалению заусенца и увеличивает эффективность работы магнитопроводов в готовом изделии.

То, что поведение тонколистового материала отличается от общепринятой теории разделительных операций, описано в [1], где названы несколько явлений, сопутствующих вырубке тонкого листа: смятие, утяжка материала, значительная упругая деформация, выражающаяся в искривлении заготовки. Тем не менее, в указанном исследовании отсутствуют системные эксперименты для заготовок в относительных размерах что приводит к использованию ненормированных зазоров между матрицей и пуансоном, перемычек между соседними деталями и от края полосы и пр. Все же авторы формулируют особенности и различия разделительных операций для толсто- и тонколистового материала. По-прежнему, как в указанном исследовании [1], так и в установившейся теории разделительных операций [2] не учитывается влияние жесткости вырубляемых деталей на напряженно-деформируемое состояние при вырубке. В теории лишь конфигурация деталей и их размеры включены в число факторов, если деталь имеет сложную форму.

Для выяснения влияния жесткости вырубляемой прямоугольной пластины, у которой три габаритных размера отличаются друг от друга на один порядок и более, проводилось теоретическое изучение процесса с использованием конечных элементов путем математического моделирования [3,4] для двух толщин: 0,5 и 3 мм. С помощью программного комплекса DEFORM-3D определялась конечная конфигурация изделия, напряженно-деформированное состояние заготовки, распределение удельных усилий вдоль периметра вырубки, силовые параметры процесса.

Найдено, что вырубка сопровождается значительными прогибами на стадии упругого и пластического нагружения, которые соизмеримы и даже превышают толщину материала, и они различны: наибольшие вдоль короткой стороны для толщины 0,5 мм и наибольшие по длинной стороне – для 3 мм. В результате значительных прогибов наблюдается перераспределение напряжений вдоль периметра среза еще на стадии упругого нагружения заготовки.

Максимум приложенных к детали удельных усилий соответствует вершине прямого угла пластины, и процесс отделения детали от заготовки начинается именно с вершин углов и распространяется к середине сторон с опережением по короткой стороне для толщины 0,5 мм и по длинной – для толщины 3 мм. Процесс отделения

происходит последовательно, начиная с малого участка контура до полного раздела, как это имеет место при резке скошенными ножами.

Это положение экспериментально проверяется теперь уже на операции вырубке круглых деталей диаметром $\varnothing 20,3$ мм и толщиной 0,15; 0,5 и 1 мм. Для получения разной величины прогибов заготовки перед началом процесса отделения, которые, как предполагается, создают условие для гладкого среза, используются разные материалы. Совокупность разнообразия материалов: сталь 20, медь М1, латунь Л68 и алюминиевый сплав АМц-Н2 и толщин приводит к различной цилиндрической жесткости $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu)^2}$, где E – модуль упругости, МПа, μ – коэффициент Пуассона, h – толщина листа, мм. Рассматриваемые примеры обуславливают прогибы заготовки в отверстие матрицы в пределах $(\frac{1}{5} \dots 5)S$, где S – толщина заготовки, что соответствует гибкой оболочке, если обратиться к теории гибких пластинок и оболочек, [5]. Процесс вырубке производится в экспериментальном штампе, фото и чертеж которого представлены на рис. 1

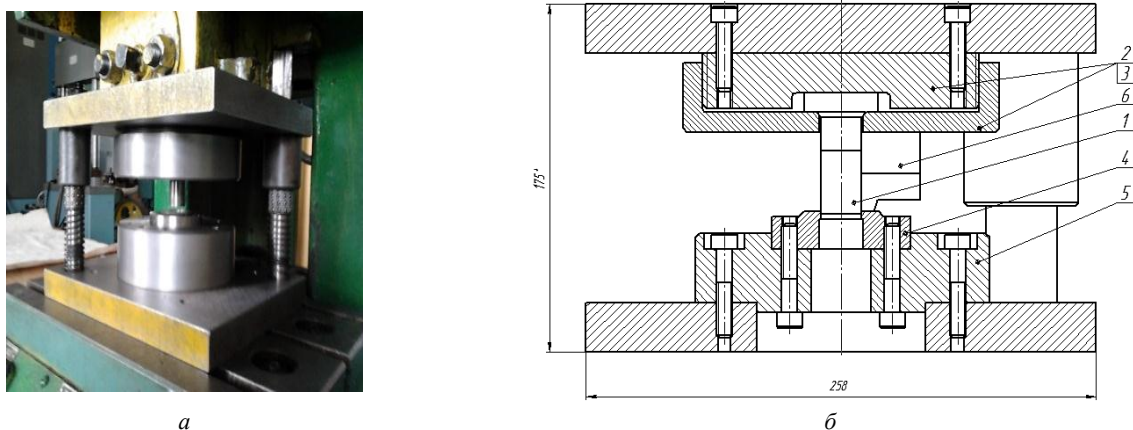


Рис. 1. Экспериментальный штамп для вырубке круглых деталей

1 – пуансон; 2-3 – пуансонодержатель с накладной гайкой; 4 – матрица; 5 – обойма матричная; 6 – прижим

Для всех толщин материала принят один и тот же зазор 0,01 мм между матрицей и пуансоном, то-есть штамп выполнен беззазорным. Качество вырубленных деталей проверяется измерением следующих параметров:

- высота заусенца по контуру вырубленной детали; мм;
- отклонение диаметра вырубленной детали от номинального значения $\varnothing 20,3$ мм;
- стрела кривизны в центре детали, мм, и отношение ее к толщине детали;
- величина конусности детали в ее диаметральном сечении, а также наличие зон пластического внедрения детали в матрицу и скола, для чего определяется;
- шероховатость поверхности среза на 1/3 толщины со стороны прогиба и на 2/3 толщины со стороны заусенца.

Наличие конусности и шероховатость поверхности среза обычно ведут к низкой точности деталей, получаемых разделительными операциями [6].

Для измерения всех указанных параметров используется модуль для измерения фасонных профилей [7], разработанный и изготовленный на кафедре интегрированных технологий НТУУ «КПИ». Широкий диапазон измерений от десятков мм до сотых долей микрометров позволяет измерение всех представленных параметров при нескольких установках испытуемых деталей на модуле¹.

Модуль, блок-схема которого изображена на рис.2, собран на основе профилометра мод.296, предназначенного для измерения шероховатости поверхностей в диапазоне R_a 0,02-10 мкм с длиной трассы измерения 0,1-6 мм. Действие модуля основано на принципе ощупывания исследуемой поверхности алмазной иглой щупа с малым радиусом скругления при вершине и превращения, возникающих при этом механических колебаний щупа в измерение электрического сигнала, пропорционального этим колебаниям.

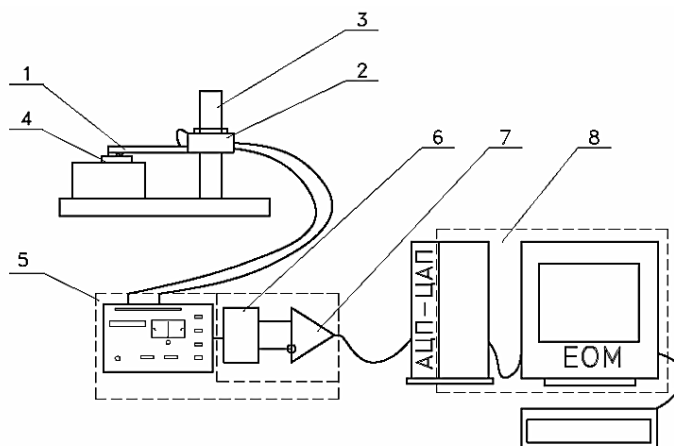


Рис. 2. Блок-схема модуля для измерения фасонных профилей
 1 – датчик, 2 – моторпривод, 3 – стойка, 4 – измеряемая поверхность, 5 – блок питания, 6 – фильтр низких частот типа RC, 7 – усилитель, 8 – ЭОМ

Модуль позволяет проводить запись и обработку сигнала, а так же сравнение полученных измерений и профиля поверхности с существующей моделью или с результатами, полученными с помощью других средств измерения. Необходимые размеры и характеристики поверхности определяются с помощью специально разработанных методов и прикладных программ.

При измерении используются две установки вырубленной детали: первая, когда деталь своей выпуклой поверхностью устанавливается на кронштейны модуля, а щуп перемещается вдоль диаметра по ее вогнутой поверхности. На этой установке определяется высота получившегося заусенца, прогиб заготовки и отклонение от номинального диаметра круга (попутно также фиксируется чистота поверхности холоднокатаного листа); вторая, когда вырубка устанавливается на образующую вырубленной цилиндрической поверхности в зажимное приспособление модуля и определяется конусность и шероховатость среза. В обоих случаях толщина линии зафиксированного пути движущегося щупа представляет собой сжатую профилограмму ощупываемой поверхности. На рис. 3 и 4 представлены диаграммы движения алмазного щупа по указанным поверхностям.

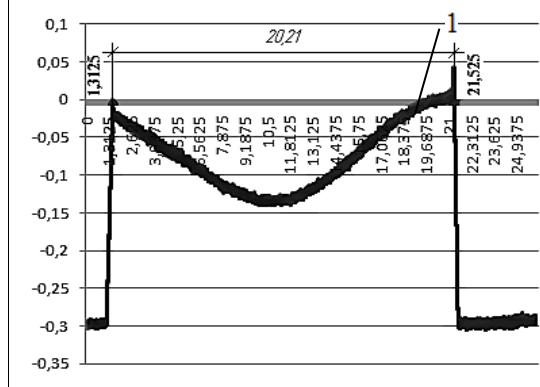


Рис. 3. Диаграмма движения алмазной иглы вдоль диаметра заготовки для алюминиевого сплава АМц-Н2 толщиной $S=0,15$ мм, заусенец $h_3=0,002...0,003$ мм, стрела прогиба $S=0,15$ мм

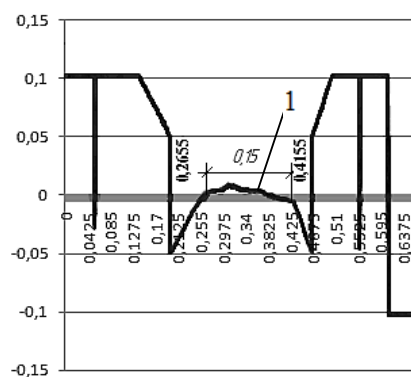


Рис. 4. Диаграмма движения алмазной иглы по образующей поверхности среза для алюминиевого сплава АМц-Н2 толщиной $S=0,15$ мм, конусность $K=0,005...0,007$ мм, чистота поверхности $R_a 1...1,5$ вдоль всей образующей

На исходных диаграммах, полученных после измерения на модуле, вдоль оси X указано время прохождения алмазной иглой исследуемой трассы (счетчик времени), по оси ординат – коды программы вертикального перемещения иглы. Для перевода секунд, отложенных вдоль оси абсцисс в миллиметрах, используется тарировочные графики, дающие размеры объектов в увеличенном масштабе, при этом точность изображения, как и измерения, соответствуют 1 микрометру. Коды вдоль оси ординат, также перестраиваются в линейные величины по тарировочным графикам с масштабом 200:1, то есть 1 см соответствует 0,05 мм. Таким образом, масштабы вдоль осей X и Y значительно отличаются, что дает возможность совмещать на одном объекте измерения параметров, отличающихся в 100 раз.

Толщина кривой линии 1 (рис.3) дает среднее арифметическое отклонение профиля R_a , измеренное по прокатной поверхности заготовки. Толщина кривой 1 на рис.4 также изображает шероховатость, но уже поверхности среза. Полученные данные обрабатываются с помощью программы Microsoft Office Excel.

Из рис. 3 видно, что заусенец на кромке вырубленной детали не отличается от среднего арифметического значения высоты микронеровностей, это $0,002...0,003$, то есть практически отсутствует, остаточная стрела кривизны после снятия упругого прогиба $f=0,15...0,16$ мм, что соответствует толщине материала, а на стадии вырубki она возможно вдвое больше, относительная стрела прогиба $f/s=1...2$. Отклонение диаметра вырубленной детали от номинального размера составляет $0,090$ мм, что соответствует 8...11 качеству.

Рис. 4 показывает, что при вырубке отсутствует видимая конусность – это скорее отклонение в размерах диаметра в несколько микрометров. Наконец видно, что чистота поверхности R_a не изменяется вдоль образующей – она одна и та же на $1/3$ толщины со стороны матрицы и на $2/3$ толщины со стороны пуансона, где она должна быть существенно ниже, если наблюдается скол детали. Найденные результаты очень существенны для получения качественных деталей, имеющих высокую точность и чистоту поверхности среза. На диаграммах рис. 3, 4 справа и слева от изображения заготовки виден путь алмазной иглы по установочным приспособлениям самого измерительного модуля.

На рис.5 представлены контуры среза вдоль образующей боковой поверхности детали для разных материалов и толщин.

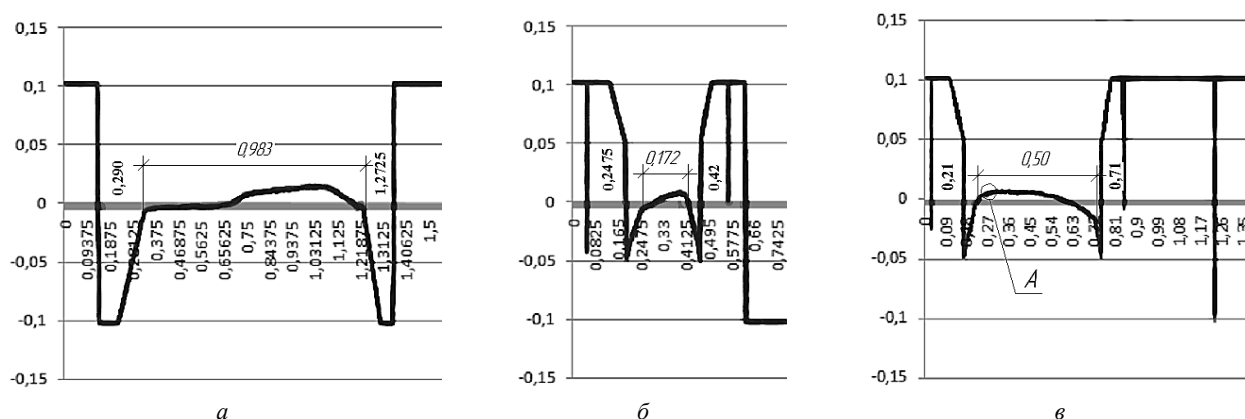


Рис. 5. Диаграмма движения алмазной иглы по образующей боковой поверхности среза.
а – сталь 20, $S=1$ мм; б – медь М1, $S=0,15$ мм; в – латунь Л68, $S=0,5$ мм

Найденные кривые однотипны, имеют одинаковую чистоту поверхности, также налицо отклонение от прямолинейности образующей, которое наблюдается как со стороны матрицы, так и со стороны пуансона и не может считаться конусностью. По величине оно находится в пределах соответствующего качества на саму деталь. Для каждого образца также находятся привычные профилограммы боковой поверхности, для чего используется соответствующая программа указанного модуля. Такая профилограмма поверхности для латуни Л68 толщиной $0,5$ мм приведена, как элемент рисунка 5в, на рис. 6. Эта профилограмма соответствует средней арифметической высоте микронеровностей $R_a 1...1,5$ – она отвечает грубому шлифованию и не достигается для обычных разделительных операций.

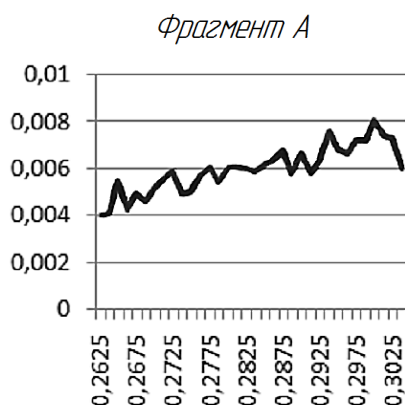


Рис. 6. Профилограмма поверхности среза со стороны пуансона для латуни Л68, $S=0,5$ мм

Обработка протоколов экспериментов указывает на малую величину заусенца по кромке вырубki от нескольких до нескольких десятков микрометров, что соответствует допустимой их величине. Прогибы, как было указано в начале статьи, именно и приводят к изменениям параметров вырубki. Они различны для разных материалов и толщин и приведены в таблице 1.

Таблиця

Стрелы прогибов мм, и относительные прогибы в центре детали для вырубков с различной цилиндрической жесткостью

Материал, толщина	Стрела прогиба	Относительный прогиб $\frac{f}{S}$
Сталь 20 S=1 мм	0,1...0,2	0,1...0,2
Латунь Л68 S=0,5 мм	0,1...0,2	0,2...0,4
Сплав алюминия АМц-Н2 S=0,5 мм	0,1...0,2	0,2...0,4
Техническая медь М1 S=0,15 мм	0,06...0,07	0,4...0,5
Сплав алюминия АМц-Н2 S=0,15 мм	0,15...0,2	1,3...1,35

Эти остаточные прогибы, которые свидетельствуют, что на стадии упругого нагружения они должны быть вдвое и втрое больше, соответствуют поведению заготовки, как гибкой оболочки. Точность круглых деталей, измеренных на модуле для измерения фасонных профилей, соответствует отклонениям 0,040...0,120 и 8...11 качеству точности.

Для сравнения на рис.7 приводится диаграмма движения алмазной иглы по боковой поверхности среза круглой заготовки $\varnothing 20,3$ мм из стали 20 толщиной S=5 мм на лабораторном штампе с оптимальным зазором между матрицей и пуансоном $z=0,4$ мм и элемент А профилограммы для участка перехода блестящего пояска со стороны матрицы 1 к поверхности скола 2. Из рисунка видно, что поверхность среза представляет 2 зоны: зону внедрения заготовки в матрицу—блестящий поясок на детали шириной около 1/4 толщины, имеющий шероховатость R_a 1...1,5 и зону скола 2, имеющую конусность в пределах половины зазора между матрицей и пуансоном. На этой поверхности видны местные вырывы металла в пределах 0,02 мм. Поверхность грубая, ее профилограмма на рис. 7б дает шероховатость R_z 100...120.

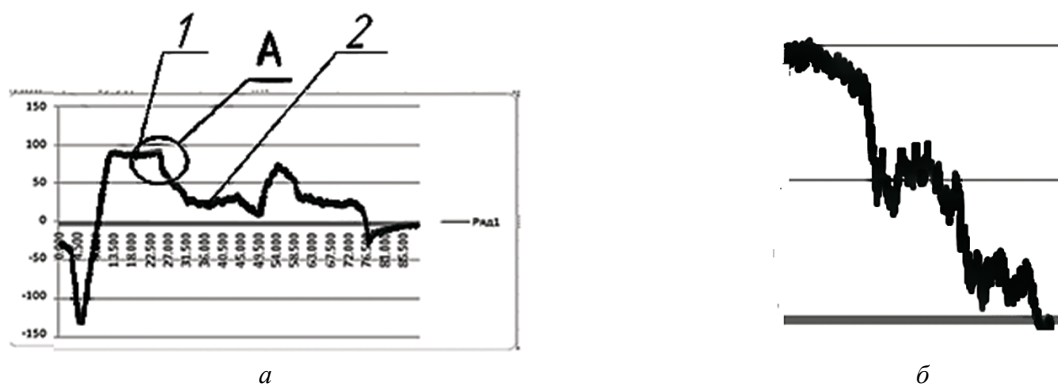


Рис. 7. Диаграмма движения алмазной иглы по образующей боковой поверхности среза для стали 20, S=5 мм, зазор $z=0,4$ мм

Выводы

1. Объяснена и подчеркнута важная роль прогиба тонколистового материала в отверстие матрицы, как фактор, предотвращающий скол и обеспечивающий высокое качество и точность поверхности среза.
2. Представлена новая информация, не встречающаяся в современной литературе, которая указывает пути повышения качества вырубки из тонколистового материала.
3. Повышена точность и чистота поверхности деталей круглой формы, полученных вырубкой из тонколистового материала до 8...11 качества и R_a 1...1,5 шероховатости.
4. Зависимости между механическими параметрами процесса вырубки тонколистового материала дают предпосылки для использования теории гибких оболочек для теоретического обоснования процесса вырубки пробивки.

Анотація. На основі результатів теоретичного дослідження вирубання прямокутної пластини з тонколистового матеріалу, проведеного з використанням програмного середовища DEFORM-3D, виконуються експериментальні дослідження вирубання круглих деталей $\Phi 20,3$ мм з різних матеріалів: сталі 20, латуні Л68, технічної міді М1, алюмінієвого сплаву АМц-Н2 різної товщини листа: 0,15; 0,5 та 1 мм. Чисельні експерименти призводять до поліпшення якості вирубання: досягненню 8...11 квалітету точності, шорсткості поверхні зрізу R_a , 1...1,5, меншої величини завусня і відсутності конусності. Припускаємо, що всі поліпшення якості поверхні зрізу пов'язані з усуненням фази сколу.

Ключові слова: вирубка, прогин, точність, шорсткість, завусень, гнучка оболонка.

Abstract. On the base of theoretical research of blanking a rectangular plate made of thin steel metal carried out with using software environment DEFORM-3D the experimental tests of blanking a round part $\Phi 20,3$ mm made of various materials are performed. These are steel 20, brass Л68, technical copper М1 and aluminum alloy АМц-Н2, also of various thickness: 0,15; 0,5 and 1 mm. Numerous experiments bring to improving blank quality: achievement of 8...11 qualitat of accuracy, roughness of shear surface R_a 1...1,5, more less burr height and absence of shear taper. To measure all these parameters module is used for measuring shapes, which is compiled on the basis mod.296 profilometer for measuring surface roughness R_a in the range of 0.02-10 microns long track measuring 0.1-6 mm. Action module based on the principle of the investigated surface feeling diamond stylus tip having a small radius of curvature at the vertex, and converting resulting mechanical vibrations with a probe measurement of the electrical signal proportional to these fluctuations. It is supposed that all improvements in quality of the shear surface are connected with eliminating fracture phase. Dependence between the mechanical parameters of the process cutting sheet material gives the prerequisites for use of the theory of flexible shells theoretical justification for cutting punching process.

Keywords: blanking, deflection, accuracy, roughness, burr, elastic shell.

Библиографический список использованной литературы

1. Залеский В.И. Механизм деформации при резке листового металла в штампах/ В.И.Залесский, В.В.Губарев. // Сб. «Технологические процессы обработки стали и сплавов». МИСиС – М.: Металлургия, 1955. – С.409-452.
2. Donald F. Eary. Techniques of Pressworking Sheet Metal. (An engineering approach to die design)/ Donald F. Eary & Edward A. Reed.// RAL, Motors Institute Engineering Department. – Gene. - 1976, pp 1 – 19.
3. Яворовский В.Н. Исследование специфического характера вырубki тонколистовых материалов с помощью компьютерного моделирования./В.Н.Яворовский, И.Н.Кальченко.// Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов - №4 (37) Краматорск, ДГМА, 2013 – С. 64 – 69.
4. Бень И.В. Анализ вырубki прямоугольных пластинок методом конечных элементов/И.В.Бень, В.Н.Яворовский.// Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов - №4 (37) Краматорск, ДГМА, 2013 – С. 69 – 74.
5. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. – М.: Гос. изд-во тех. теор. литературы. – 1956 – 413с.
6. Зубцов М.Е. Листовая штамповка.// Л.:Машиностроение, 1979. – 432с.
7. Майданюк С.В. Модуль для вимірювання фасонних профілів./С.В.Майданюк, О.А.Плівак, Р.А.Бекмуратов.// Вісник ЖДТУ - №2(41) – Житомир, 2007 – С 1 – 4.

References

1. Zalessky V.I., Ghubarev V.V. Mekhanizm deformacii pri rezke listovoho metalla v shtampakh. Sb. «Tekhnolohicheskie processy obrabotki stali i splavov». MISiS. Moscow:Metallurghia, 1955. pp. 409-452.
2. Donald F. Eary & Edward A. Reed. Techniques of Pressworking Sheet Metal. (An engineering approach to die design) RAL, Motors Institute Engineering Department. Gene.1976, pp. 1 – 19.
3. Iavorovskiy V. M., I.N.Kal'chenko. Issledovanie specificheskoho kharaktera vyrubki tonkolistovykh materialov s pomoshchiu komp'uternoho modelirovania/Obrabotka materialov davleniem. No4 (37) Kramatorsk, DGMA, pp. 64 – 69.
4. Ben I.V., V.M.Iavorovskiy. Analiz vyrubki priamouhol'nykh plastinok metodom konechnykh elementov. Obrabotka materialov davleniem. No4 (37) Kramatorsk, DGMA, pp. 69 – 74.
5. Vol'myr A.S. Hibkie plastinki i obolochky. Moscow: Ghos.izd-vo tekh. teor. Literatiry. pp. 1956 – 413.
6. Zubcov M.E. Listovaia shtampovka. Leningrad: Mashinostroenie, 1979, p. 432.
7. Maidaniuk S.V., Plivak O.A., Beckmuratov R.A. Modul dlia vymiryuvannia fasonnykh profilei.Visnyk GDTU No2(41) Zhitomir, 200. pp. 1 – 4.

Подана до редакції 20.12.2013