

УДК 621.961.2.073.001.8

**Бень И. В.
Яворовский В. Н.****АНАЛИЗ ВЫРУБКИ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПЛАСТИНОК
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Среди плоских деталей, получаемых вырубкой, значительный их круг относится к деталям, где поверхность среза представляет собой рабочую контактную поверхность. Обычно это детали большой толщины, типа кулачков, копиров, лекал, контур которых представляет собой непрерывную кривую. Эти детали, толщиной 1,5...15 мм, находят широкое применение в печатных, швейных машинах, часах и других точных механизмах. В любом случае, к поверхности среза предъявляются строгие требования относительно точности и чистоты поверхности.

При обычной вырубке эти требования не могут быть выполнены из-за создающихся при нагружении заготовки и последовательно меняющихся как очага, так и схемы деформации, обязательным компонентом которой есть растягивающие напряжения. Они вызывают зернистую структуру поверхности среза, что соответствует чистоте поверхности $R_z 320...120$, с вероятностью возникновения поверхностных вырывов, на этой поверхности, как это видно на рис. 1.



Рис. 1. Профиль образующей поверхности среза круглой детали $\varnothing 20,8$ мм толщиной 5 мм

Эта деталь вырублена в лабораторном экспериментальном штампе, имеющем оптимальный зазор. Измерение профиля образующей поверхности, которая представлена в увеличенном масштабе, производится на универсальном модуле для измерения фасонных профилей, собранном на основе профилометра модели 296. Модуль отличается широкими пределами измерения размеров от десятков миллиметров до десятой доли микрометра, что дает возможность измерять как конечные линейные размеры (в нашем случае – толщину детали 5 мм), так и шероховатость поверхности обработки. Этот модуль сконструирован и изготовлен на кафедре интегрированных технологий машиностроения НТУУ «КПИ», опробован и предлагает точные и надежные результаты.

Здесь, (рис. 1), на горизонтальной оси, фиксируется время прохождения алмазным наконечником трассы измерения в секундах. Расстояние между точками пересечения кривой 1 горизонтальной оси составляет приблизительно толщину 5 мм. Вдоль вертикальной оси видны неровности профиля вырубленной толстолистовой заготовки (рис. 2). Левая её часть (рис. 1) почти горизонтальна и соответствует вдавливанию пояса 1 (рис. 2) приблизительно на $1/3$ толщины в матрицу. Остальная часть 1 (рис. 1) вырубленной детали – это поверхность скола 2 (рис. 2) [1], которая, как считается, представляет собой усеченный конус, но, будучи увеличенной в 200 раз на рис. 1, показывает значительные отклонения от гладкой поверхности с сопутствующими вырывами и выступами размером в $0,01...0,02$ мм.

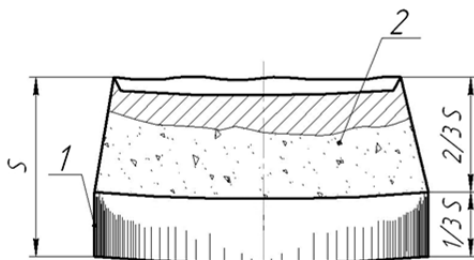


Рис. 2. Особенности внешнего вида толстолистовой заготовки после вырубки [1]:

1 – блестящий пояс, вдавливающийся в матрицу, $R_a 1,5 \dots 1,0$; 2 – грубая коническая поверхность $R_z 350 \dots 120$

Толщина линии 1 на рис. 1 определяет шероховатость поверхности среза, R_a , для горизонтального участка она соответствует $R_a 1,5 \dots 1,0$, т. е. операции грубого шлифования, в то время как вдоль поверхности скола амплитуда колебания алмазного наконечника значительно увеличивается, что видно из элемента А на рис. 1, она становится $R_z 120 \dots 100$.

Если для деталей требуются гладкая поверхность среза, перпендикулярная основаниям и имеющая шероховатость $R_a 1,25 \dots 0,625$, то это достигается последующей доработкой на фрезерных, профилишлифовальных и доводочных станках – механической обработкой. Механическая обработка может быть заменена 2–3-х ступенчатой зачисткой – технологией меньшей трудоемкости. Совершенным решением получения таких деталей является технология чистовой вырубке, при которой прежняя схема напряженно-деформированного состояния радикально изменяется:

- для получения цилиндрической конфигурации используют безззорные штампы или штампы с минимальным зазором $Z = 0,005 \dots 0,01$ мм;
- полностью устраняются растягивающие напряжения в очаге деформации, наоборот, в заготовке создается гидростатическое давление сжатия большой интенсивности, что приводит в очаге деформации к схеме всестороннего объемного сжатия за счет вдавливания клинового ребра, эквидистантного контуру детали;
- для исключения случайных сколов в штампе используется узел, обеспечивающий противодействие.

Все названные меры в несколько раз увеличивают усилие нагружения дорогостоящего штампа специальной конструкции, которое существенно уменьшает стойкость штампа. Они также требуют специального оборудования с несколькими рабочими движениями ползунов, работающими в соответствии со сложной циклограммой [2].

В то время как такие детали сложных конфигураций, описываемых непрерывной кривой, можно получить очень дорогостоящими методами, ничего не известно в литературе о чистовой вырубке контуров, не имеющих производных в углах пересечения, простейшим из которых есть обычная прямоугольная пластина.

Известно, что при вырубке прямоугольных пластин наблюдается неравномерность напряжений по длинной и по короткой стороне контура, что определено косвенными методами по износу режущих кромок матрицы и пуансона [3]. При этом интенсивность износа меняется, для тонких полос в наибольшей степени изнашивается короткая кромка, для более толстых, например, 1...3 мм, в большей степени затупляется длинная сторона. И интенсивность деформации по длинным сторонам контура также зависит от жесткости подаваемой полосы. Износ рабочих деталей больше со стороны недеформируемого конца, чем со стороны перемычки. Разная жесткость полосы (большая со стороны подаваемой полосы), способствует повышению сопротивления деформации заготовки со стороны подачи [3]. Эти экспериментальные данные, полученные на большом количестве деталей (около 400 тыс.), не описаны в терминах напряженно-деформированного состояния и требуют теоретического подтверждения. Моделирование процесса вырубке-пробивки находит в последнее время широкое распространение для тонко- и особо тонколистовых материалов и фольги [4–7].

Целью данной работы является теоретический анализ методом конечных элементов процесса вырубki прямоугольной пластины толщиной 3 мм, эта деталь с учетом относительных размеров может быть отнесена к жестким пластинам. Также по известным, полученным ранее экспериментальным результатам следует подтвердить предположение о перераспределении напряжений на разных стадиях вырубki. Для решения данной задачи используется компьютерное моделирование в программной среде Deform-3D.

Для заготовки (рис. 3) выбрана упругопластическая схема деформирования, свойства материала сталь 20 заданы согласно справочным данным. При расчете ширины полосы в качестве заготовки используются производственные нормы для определения величин переминок вдоль короткой и длинной стороны, учитывается также то, что деталь вырубается из полосы и при каждом шаге подачи жесткость тонкой перемины с фронта полосы на много меньше ещё неотштампованного запаса.

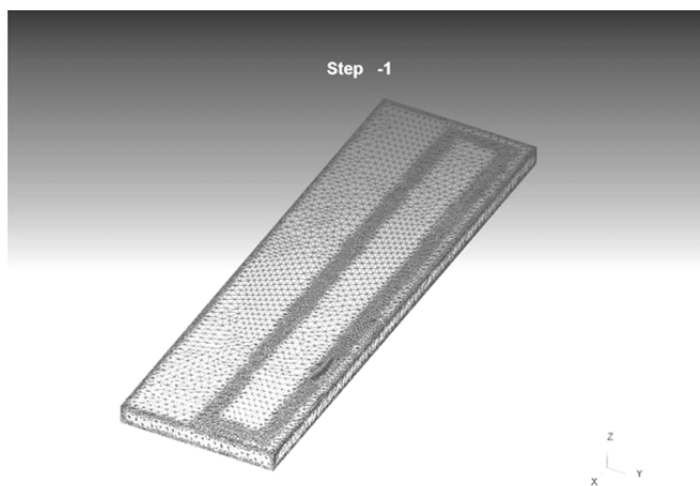


Рис. 3. Заготовка с нанесенной сеткой

При построении сетки главными факторами являются: величина элемента, время расчета и возможности ЭВМ. С учетом всего вышесказанного, выбрано количество элементов 200000, которому соответствуют элементы размером 0,2 мм. Также использованы окна плотности, для сгущения сетки в зоне вырубki, окна шириной 5 мм, расположены по периметру режущей кромки таким образом, чтобы середина окна совпадала с режущей кромкой пуансона. Коэффициент уплотнения 0,1. И величина элемента в зоне деформации соответствует 0,02 мм, такая величина элемента является приемлемой для данного расчета.

В качестве критерия разрушения выбран критерий Коккрофта и Лехема и задано его критическое значение 0,4. Также задано количество смежных элементов, разрушение которых считается началом разрушения пластины, $n = 4$. При данном расчете не изучается процесс скола (разрушения), задача доводится лишь до падения до 0 действующих усилий и напряжений.

В представленном расчете инструмент считается абсолютно жестким, что соответствует действительности, так как матрица и пуансон изготовлены из стали X12M и закалены до HRC 56...58, а это значительно упрощает моделирование, радиус на режущих кромках матрицы и пуансона не учитываются как для нового штампа. Также использован жесткий прижим-съемник, который существует в штампе (рис. 4). Коэффициент трения принят 0,08 на всех контактных поверхностях. Пуансон перемещается со скоростью 0,5 мм/с, которая соответствует лабораторному прессу. Расчет осуществляется за 300 шагов, величина которых 0,01 мм, сохранение данных проходит при каждом 2-м шаге.

На рис. 5 приведен график усилия при вырубке по данным решаемой задачи. Здесь обычно треугольная диаграмма, [4], вытянута по горизонтальной оси, ординаты же соответствуют значениям усилий при обычной вырубке. Это еще раз доказывает соответствие моделирования действительности и свидетельствует о корректности решаемой задачи.

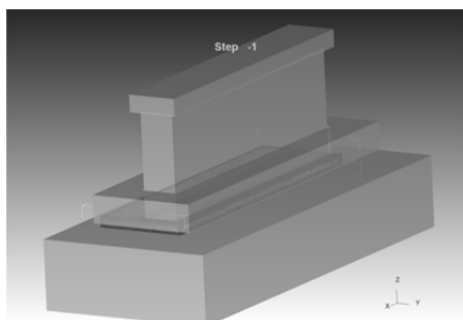


Рис. 4. Модель расчетной схемы

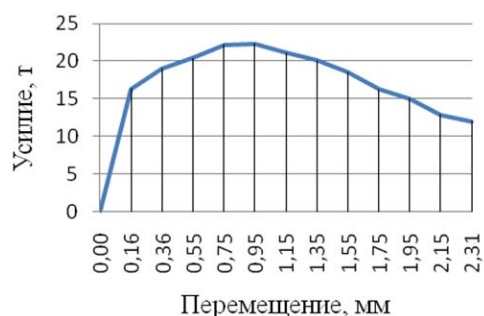


Рис. 5. График зависимости усилия от перемещения

Все расчеты выборочно для 100 шагов сведены в табл. 1, при этом находятся напряжения в точках 1...5, которые указаны на рис.6. Из таблицы видно, что задача не доведена до полного разрушения и отделения детали от заготовки.

Таблица 1

Пошаговые значения напряжений в контрольных точках

Шаг расчета	Напряжения в точках МПа				
	1	2	3	4	5
2	420	400	370	360	365
6	560	500	425	400	410
10	640	580	460	420	430
16	690	650	480	440	460
20	700	670	530	480	500
30	720	690	600	510	555
50	740	730	670	620	645
70	760	750	690	680	680
100	770	760	730	720	720

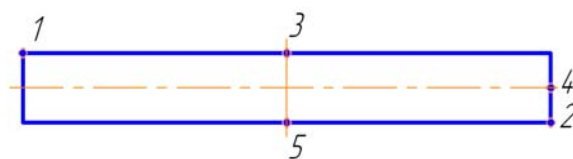


Рис. 6. Схема размещения точек, в которых определяются деформации и напряжения:

1 – угол со стороны исходной полосы; 2 – угол со стороны отхода; 3 – середина длинной стороны со стороны исходной полосы; 4 – середина короткой стороны; 5 – середина длинной стороны со стороны отхода

Согласно таблице построены графики (рис. 7), из которых видно наращивание напряжений в 5 контрольных точках режущего контура пуансона и матрицы, указанных на рис. 6.

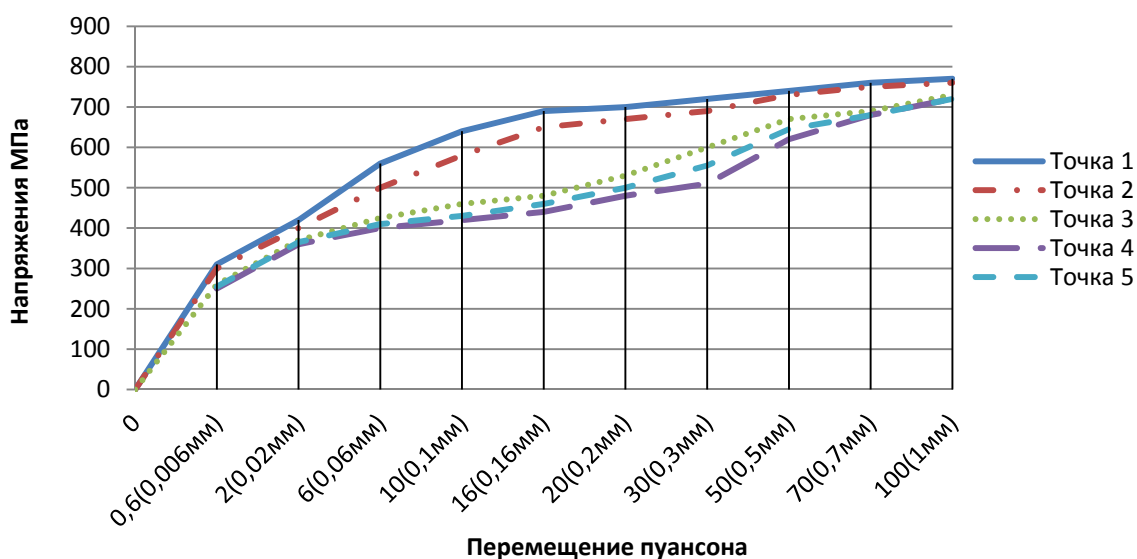


Рис. 7. Графики зависимости напряжений от перемещения в выбранных точках на кромке пуансона

Видно, что на первых шагах хода пуансона напряжения растут на стадии упругой деформации до достижения предела текучести σ_m , и дальше наращивание замедляется и продолжается за счет упрочнения материала, причём разный наклон кривых свидетельствует о разной степени пластической деформации в точках 1...5, а в случае, если кривая проходит горизонтально, то и в отсутствии её на каких-то шагах в течение некоторого времени. Из кривых видно, что напряжения в углах контура всегда больше, чем в точках на середине ребер, но по мере вырубki постепенно напряжения сближаются по величине. Неравномерность напряжений вдоль режущих кромок наблюдается с первых шагов расчета.

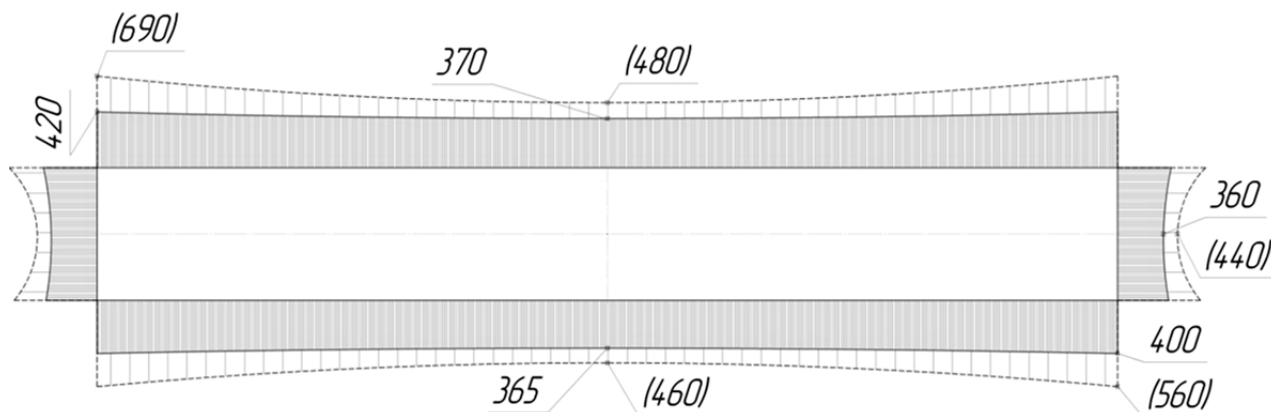


Рис. 8. Распределение напряжений (МПа) на пуансоне на 2-м шаге, 0,02 мм, и на 16-м шаге, (0,16 мм). Эпюры наложены друг на друга

Из эпюр (рис. 8) видно, что величина напряжений в углах контура значительно выше, чем в центре кромки пуансона, также заметно выше напряжение на кромке со стороны исходной полосы (рис. 9), что вполне соответствует величине деформации. Это обуславливается упругим изгибом полосы, на начальной стадии вырубki.

Step 2

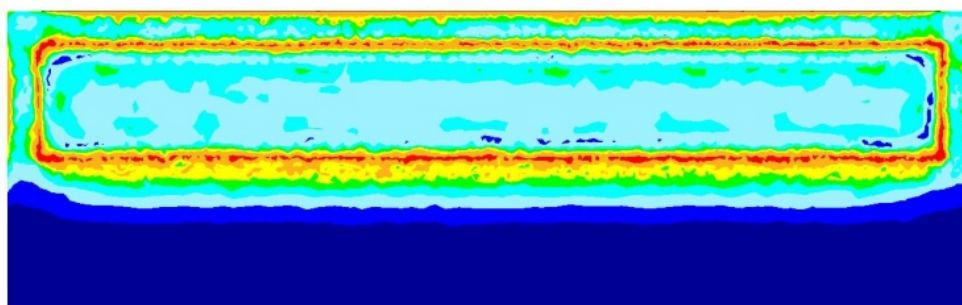


Рис. 9. Палитра поля напряжений на 2-м шаге (0,02 мм)

На следующих шагах расчета напряжения в углах растут быстрее, чем в центре режущей кромки пуансона. Такая картина наблюдается на большей части деформирования.

По мере вырубki эпюры несколько меняются, разница между напряжениями в углах контура и в центре кромки пуансона уменьшается, и эта картина наблюдается до конца исследуемого процесса, но неравномерность напряжений уменьшается. Из-за большей жесткости пластины в углах контура величина напряжений в углах выше, чем в центре пуансона или матрицы, также напряжения выше и со стороны исходной полосы, рис. 10.

Это обусловлено различным напряженным состоянием вдоль кромок пуансона. Так, большим напряжениям соответствует большая жесткость материала со стороны неотштампованной полосы по сравнению с остальной тонкой перемычкой, несколько миллиметров толщиной.

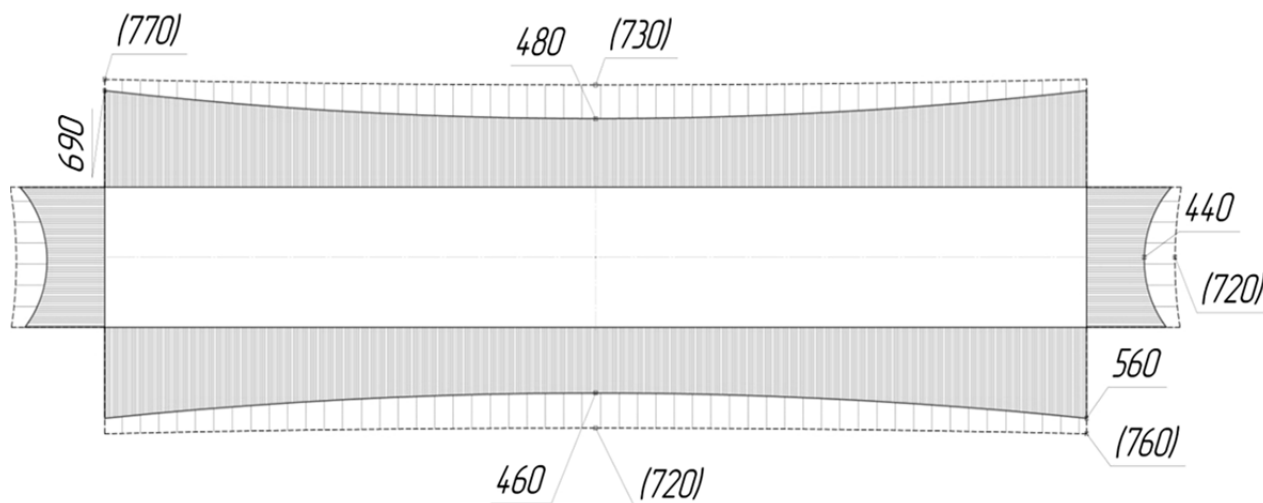


Рис. 10. Распределение напряжений (МПа) на пуансоне на 16-м шаге, 0,16 мм, и на 100-м шаге, (1 мм). Эпюры наложены друг на друга

Подсчеты деформаций в углах контура также дают величины, существенно более высокие, чем в центре длинных и коротких граней контура (рис. 11). Это означает, что после 100 шага моделирования скол должен начаться в углах детали, а не вдоль всего периметра одновременно, что уподобляется резке материала скошенными ножами, в данном случае пуансоном, и должен приводить к более высокому качеству среза и точности.

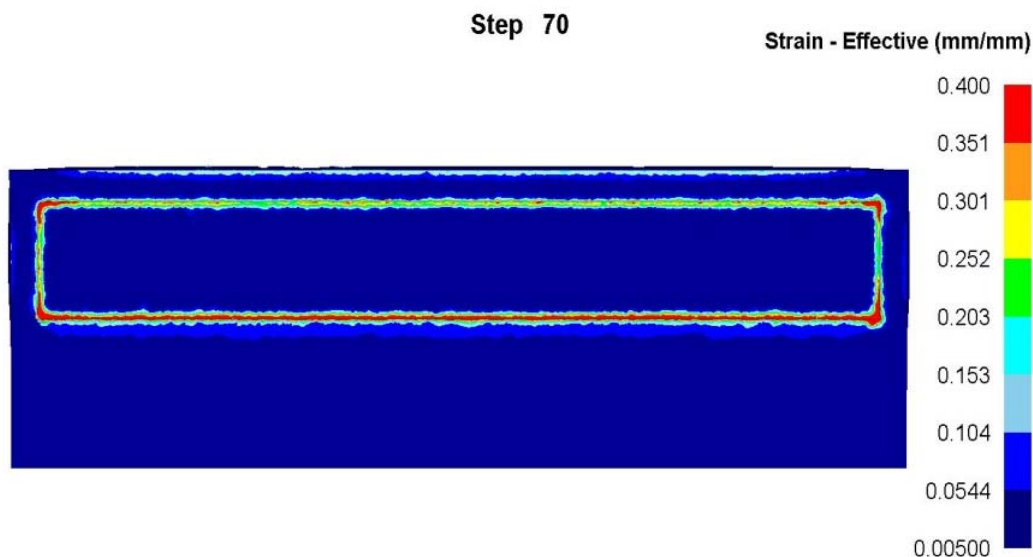


Рис. 11. Палитра поля деформаций, шаг 70

Найденные результаты позволяют сформулировать направление последующих исследований. Необходимо осуществление эксперимента для подтверждения результатов моделирования. Для этого планируется проведение пошаговой вырубки Г-образных деталей с разной толщиной полок (рис. 12) в штампе простого действия с измерением главных параметров вырубki.

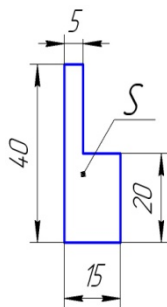


Рис. 12. Деталь Г-образной формы с разной шириной полок

ВЫВОДЫ

Теоретически исследован процесс вырубki пластины толщиной 3 мм путем моделирования процесса с использованием программной среды Deform-3D.

Полученные результаты показывают, что вид напряженно-деформированного состояния в очаге деформации зависит от толщины материала, конфигурации и относительных размеров детали, которые влияют на упругий прогиб детали.

Различные относительные размеры толщины вдоль длинной и короткой стороны обуславливают различную жесткость детали в каждой точке контура реза, и это приводит к перераспределению напряжений с большими значениями, соответствующими жестким участкам детали (в случае толщины 3 мм – это углы контура и длинные стороны).

Большая интенсивность напряжений соответствует длинной кромке матрицы и пуансона и является причиной их большего износа по сравнению с короткими режущими кромками.

Неодинаковая жесткость детали вдоль контура вырубki ведет к неравномерности деформаций вдоль контура вырубki, они больше в местах большей жесткости, и это приводит не к одновременному сколу по периметру среза, а к эффекту постепенного среза, как в случае реза скошенным ножом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубцов М.Е. *Листовая штамповка* / М. Е. Зубцов. – Л. : Машиностроение, 1980. – 432 с.
2. Романовский В. П. *Справочник по холодной штамповке* / В. П. Романовский. – Л. : Машиностроение, 1979. – 520 с
3. Яворовский В. Н. *Неравномерность износа штампа при вырубке прямоугольных деталей* / В. Н. Яворовский, И. А. Рощина, // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением.* – 2002. – № 4. – С. 19–24.
4. Donald F. Eary *Techniques of Pressworking Sheet Metal (An engineering approach to die design)* / Donald F. Eary, Edward A. Reed. – Gene : RAL Motors Institute. Industrial Engineering Department, 1976. – P. 1–19.
5. Мамутов В. С. *Компьютерное моделирование разрушения при вырубке-пробивке особо тонколистовых металлов* / В. С. Мамутов // *Современное машиностроение. Наука и образование : Материалы 2-й Международ. науч.-практ. конф.* – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – С. 465–470.
6. Яворовський В. М. *Теоретичний аналіз вирубki прямокутної пластини из тонколистової сталі* / В. М. Яворовський, І. А. Рощина, П. А. Корнійченко // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».* – 2012. – № 65. – С. 26–32. – (Серія «Машинобудування»).
7. *Особенности вырубki тонколистового материала и фольги* / В. Н. Яворовский, И. В. Бень, И. Н. Кальченко, И. А. Буглеева // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 3 (36). – С. 33–38.

Бень И. В. – аспирант НТУУ «КПИ»;

Яворовский В. Н. – канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПИ».

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

E-mail: k_omd@ukr.net; 0671253007@ukr.net

Статья поступила в редакцию 02.12.2013 г.