

УДК 621.73.06-52

**Яворовский В. Н.  
Кальченко И. Н.****ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ВЫРУБКИ  
ТОНКОЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

За исключением плоских вырубаемых деталей, у которых поверхность среза является контактной рабочей поверхностью, для большинства вырубок, особенно из тонколистового материала, боковая поверхность не является рабочей и ей не уделяется никакого внимания при последующей работе детали. Остальные группы деталей – это заготовки для последующих формоизменяющих операций. Здесь качество среза не влияет на последующую формовку, в этом случае лишь следует следить за расположением допустимого заусенца, который должен остаться на сжатых волокнах после операции гибки или формовки. Это могут быть также детали, собираемые в стопы или пакеты, и тогда даже допустимая высота заусенца ( $0,1s$ , где  $s$  – толщина материала) ведет к очень трудоемкой операции удаления его вручную слесарным инструментом (из-за малой жесткости таких деталей механические способы удаления затруднены), обычно на этой операции заняты десятки рабочих. Наконец это могут быть плоские детали, где поверхность среза ни на что не влияет (шайбы, прокладки, дистанционные кольца).

Обычно указанные детали из тонколистового материала имеют два других габаритных размера в несколько десятков раз больше толщины. При таких исходных соотношениях размеров процесс вырубки [1] существенно отличается от традиционной схемы, созданной для толстолистовых материалов, где размеры детали в плане одного и того же порядка, что и толщина [2, 3].

Если выяснять главное отличие в поведении тонколистового материала при вырубке, то следует отметить значительные прогибы заготовки на стадии упругого нагружения, а также при утяжке заготовки (а не внедрения пуансона в заготовку) на второй стадии, где наблюдается пластическая деформация, сопровождаемая значительной упругой [1].

Если возникающие прогибы заготовки в матрицу и отход детали от плоскости пуансона соизмеримы с толщиной материала или превышают ее, то в случае прерывистого контура детали (контур описывается не непрерывной кривой) условия для начала пластической деформации не могут достигаться одновременно в каждой точке контура из-за различных граничных условий на контуре, например, различной жесткости детали вдоль длинной и короткой стороны для прямоугольной пластины.

Результаты, полученные из косвенных экспериментов по износу рабочих деталей совмещенного вырубного-пробивного штампа, демонстрируют неравномерность износа вдоль короткой и длинной кромок инструмента. Если предполагать, что износ инструмента связан с интенсивностью напряжений, действующих на режущих кромках, то это как раз и означает неравномерность напряжений, обусловленную неравномерностью деформаций [4]. В экспериментах [4] необходимо было определить оптимальный начальный радиус, создававшийся на режущих кромках матрицы и пуансона при электроимпульсном упрочнении инструмента, который бы обеспечивал наибольшую стойкость штампа при последующей работе. Для этого проводилась вырубка прямоугольной пластины, рис. 1 с размерами, отличающимися друг от друга на порядок из разных материалов, указанных в табл. 1.

Таким оптимальным радиусом был найден радиус затупления пуансона  $r = 0,2$  мм, однако в конце штамповки исходный радиус затупления изнашивался в разной степени для различных кромок (короткой и длинной) и разных толщин материала.

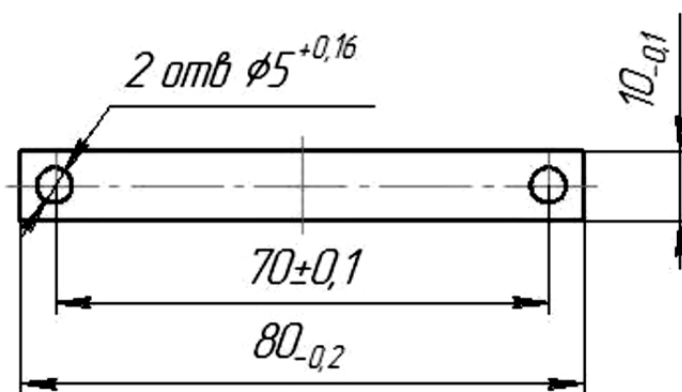


Рис. 1. Деталь – пластина магнитопровода

Таблица 1

## Характеристики исследуемых материалов

Материал	Толщина $s$ , мм	Ширина $B$ , мм	Длина $L$ , мм	Количество деталей в полосе
Сталь 10	0,5	84	1005	80...81
Алюминий АМц-Н2	1,0	84	1210	98...100
	0,5	84	1260	100...102
Латунь Л68	1,0	84	600	48...50
	0,5	84	1270*	100
Сталь 20	1,0	84	1270	100
Электротехническая сталь 3413	0,35	84	750	60

\* Материал поставляется в рулонах, но разрезается на полосы указанной длины.

Из многочисленных экспериментов найдено, что при вырубке пластины из полос толщиной 0,5 мм и меньше преимущественный износ претерпевают короткие режущие кромки, тогда как с увеличением толщины большая интенсивность износа переходит к длинным сторонам. Значительно отличается и внешний вид деталей, вырубленных из толстого и тонколистового материала.

Уже в [1] указываются значительные отличия в форме деталей после вырубки, однако, описание абсолютных, а не относительных размеров, зазоров, прогибов при вырубке не позволяют анализировать эти эксперименты последовательно.

Поэтому проведены контрольные эксперименты по вырубке тонколистовой стали, алюминиевого сплава и латуни толщиной 0,5 мм и 0,15 мм для оценки качества самой детали и выбора дальнейшего направления исследований.

Как и в [1], производится вырубка круглых заготовок  $\varnothing 20,3$  мм с малой относительной толщиной в штампе с оптимальным зазором для данного случая 0,01 мм. После экспериментов осуществляется измерение основных параметров детали на универсальном модуле для измерения фасонных профилей, собранном на основе профилометра мод. 296, который имеет широкие пределы измерения размеров от десятка миллиметров до 0,0001 мм, что дает возможность измерять как конечные линейные размеры, так и шероховатость поверхности обработки. Этот модуль сконструирован и изготовлен на кафедре интегрированных технологий машиностроения НТУУ «КПИ», испробован и обеспечивает точные и надежные результаты измерений.

Вырубленная деталь обмеряется по верхнему наружному контуру (рис. 2, а) и по образующей боковой поверхности (рис. 2, б) диаметрального сечения. На обоих рисунках вдоль горизонтальной оси откладывается время прохождения трассы алмазным наконечником, и этот отрезок представляет линейный отрезок диаметра, сжатый малым линейным

масштабом (рис. 2, а), в то время как по оси ординат отложены в уменьшенном масштабе десятые доли миллиметра величины прогиба, он соответствует 0,2...0,3 мм, что представляет значительную величину по сравнению с толщиной материала 0,5 мм.

Толщина кривой линии 1 (рис. 2, а) дает среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ , измеренное по прокатанной поверхности заготовки. На рис. 2, б представлен путь алмазного наконечника по боковой образующей поверхности среза, здесь вовсе не наблюдается конусности на заготовке, которая свойственна вырубкам из материала большой толщины. Вновь толщина линии 1 измеренная в увеличенном масштабе (масштаб соответствует 0,05 мм в 1 см) дает шероховатость среза  $R_a$ , здесь она  $R_a = 1,25...1,50$ , что соответствует грубому шлифованию, по всей толщине. Это подтверждает, что поведение тонколистового материала существенно отличается от того, которое рассматривается в теории разделительных операций. Эта неприменимость общей теории разделительных операций требует обширной экспериментальной работы с варьированием природой материала, толщиной листа, зазорами, относительными размерами и пр., для усовершенствования прежней или создания новой теории. Этот путь может быть сокращен на первой стадии – теоретическим анализом вырубki прямоугольной детали, изображенной на рис. 1

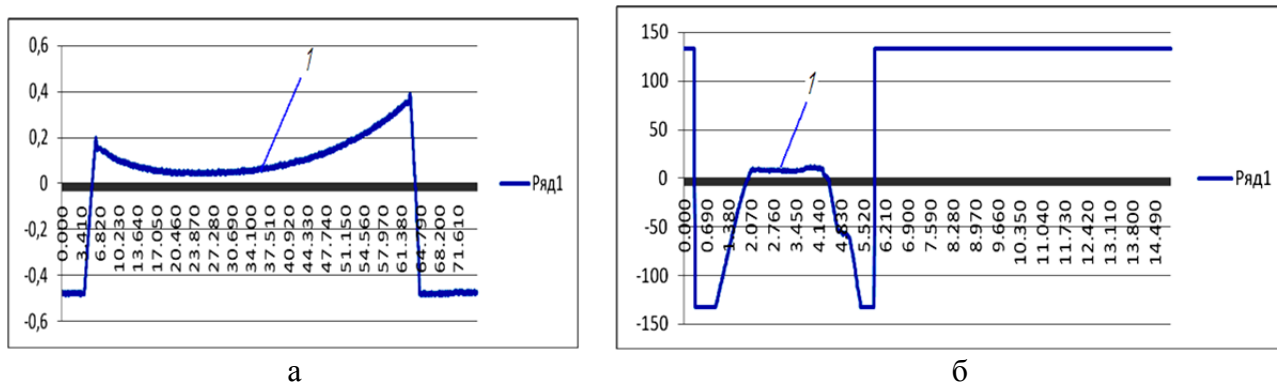
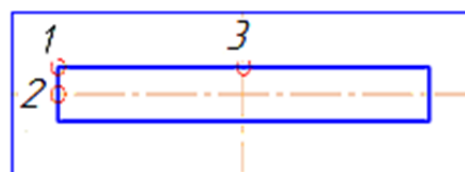
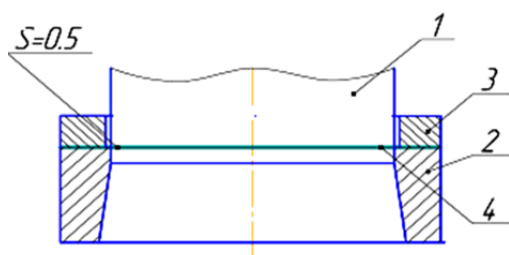


Рис. 2. Диаграммы движения алмазной головки по поверхности заготовки:  
а – прогибы; б – чистота поверхности

Целью представленной работы является теоретическое изучение процесса с использованием метода конечных элементов путем математического моделирования. С помощью программного комплекса Defom-3D определяется конечная конфигурация изделия, напряженно-деформированное состояние деформированной заготовки, распределение удельных усилий, силовые параметры.

На рис. 3. приведена расчетная схема вырубki заготовки. Схема расчета соответствует конструкции штампа [4] и имеет прижим-съемник 3, использовавшийся в совмещенном штампе. Усилие вырубki  $P_d$  прикладывается с помощью вырубного пуансона 1 (действие усилия определяется на каждом из пошаговых перемещений величиной 0,01 мм), при этом также фиксируется напряжения в характерных точках контура 1, 2, 3 (рис. 3).



Места подсчета напряжений:

1 – прямой угол режущего ребра;  
2 – середина короткой стороны; 3 –  
середина длинной стороны

Рис. 3. Расчетная схема вырубki:

1 – пуансон; 2 – матрица; 3 – прижим;  
4 – заготовка

Моделирование ведется для заготовок из стали 20, имеющей следующие свойства: коэффициент Пуассона 0,28, модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, условный предел текучести  $\sigma_{0,2} = 290$  МПа. Поскольку рассматривается упруго-пластический материал, то диаграммы упрочнения, пластичности, необходимые критерии разрушения принимались такими, как они используются в программе для стали 20.

При моделировании по мере погружения пуансона в деталь изменяются напряжения по контуру детали: исчерпываются ее пластические свойства и достигается предел прочности. Достижение этих условий обычно вызывает скол материала по контуру детали. Однако при решении этой задачи напряжения, превышающие предел текучести и в дальнейшем имеющие наибольшие значения возникают в углах контура детали, а затем они распространяются по всему контуру, после чего возникают первые скалывающиеся трещины (рис. 4).

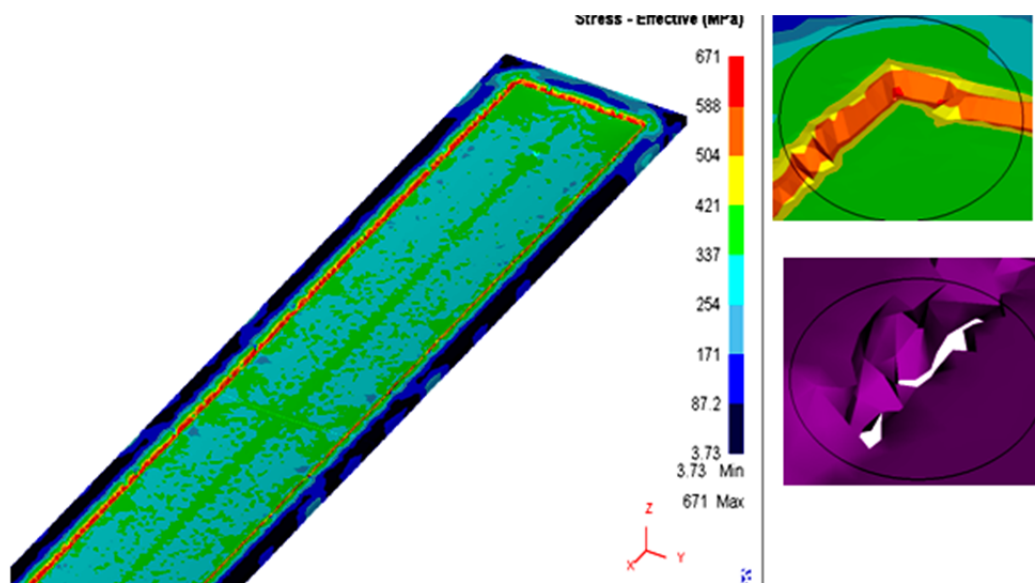


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений по контуру детали

Результаты вычислений напряжений приведены в табл. 2, и по ее данным построены кривые напряжений в реперных точках 1, 2, 3 на контуре пуансона, рис. 5.

Таблица 2

Напряжения на пуансоне

Шаг подсчета напряжений	Напряжения в точках, МПа			Шаг подсчета напряжений	Напряжения в точках, МПа		
	1	2	3		1	2	3
-1	0	0	0	18	624	617	577
2	409	399	386	20	624	617	581
4	445	449	425	22	626	620	630
6	489	483	478	30	657	635	622
8	542	520	489	40	665	647	609
10	548	546	512	50	675	663	565
12	570	582	533	60	0	0	0
14	590	604	540	70	0	0	0
16	612	608	559	76	0	0	0

Из табл. 2 и кривых (рис. 5) следует, что после упругого изгиба вырубаемой пластины на 2...3 шаге напряжения в точках 1, 2, 3 (рис. 3) постепенно увеличиваются в соответствии с кривой упрочнения для стали 20, но прослеживается четкая тенденция – напряжения

наибольшие в углах контура (точка 1), наименьшие – на серединах длинных сторон. То, что напряжения в т. 2 короткой кромки больше, чем в т. 3 длинной, косвенно объясняет преобладающий износ коротких граней пуансона и матрицы при вырубке тонколистового материала.

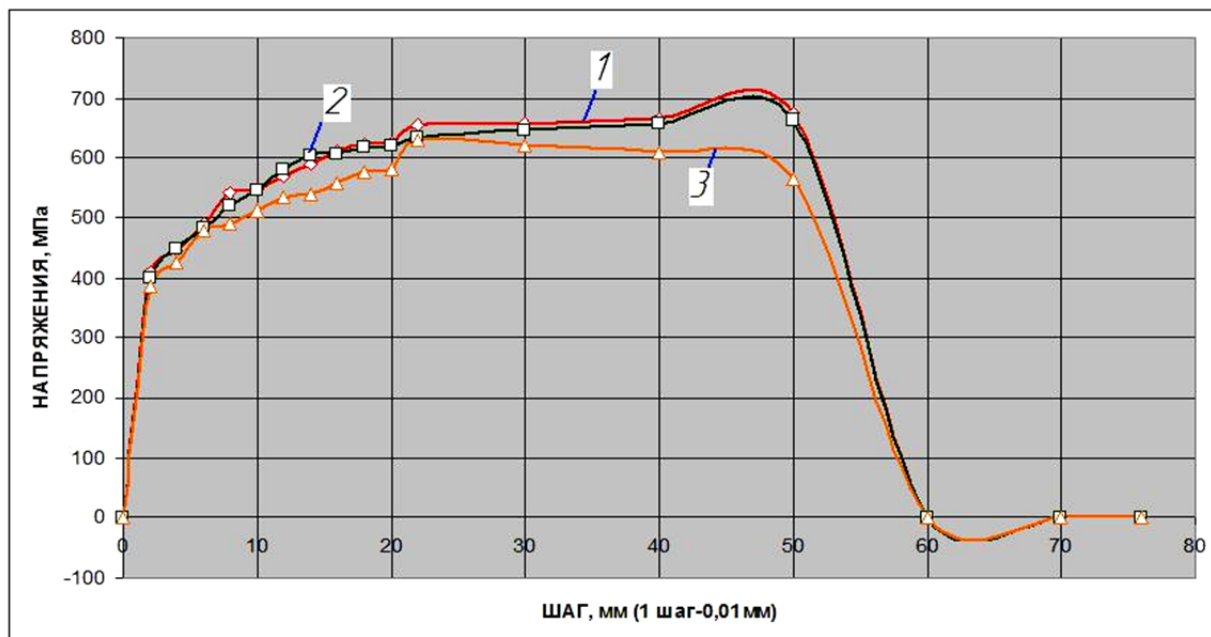
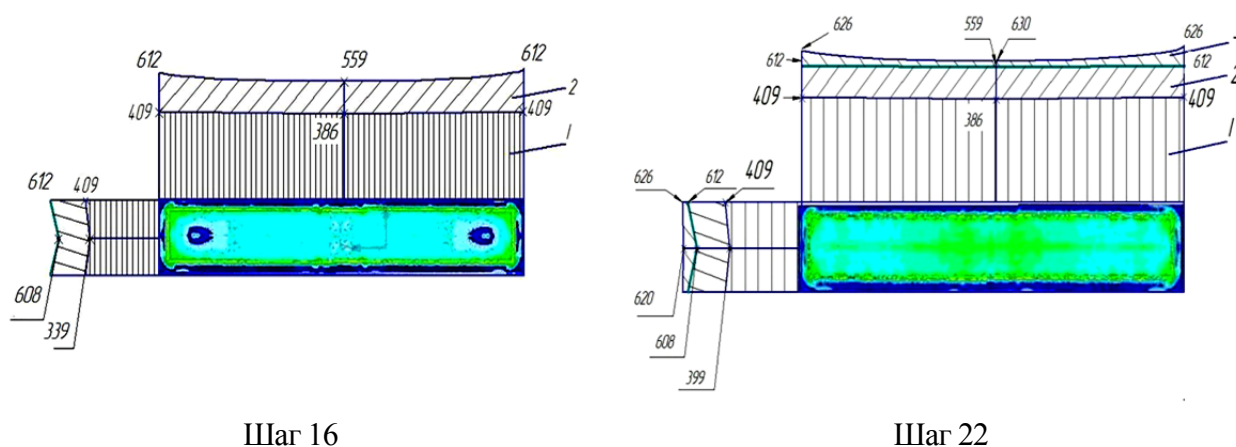


Рис. 5. Диаграмма напряжений в отдельных точках очага деформации:

1 – напряжения в углах детали; 2 – напряжения вдоль короткого ребра; 3 – напряжения вдоль длинного ребра

На рис. 6 показаны эпюры напряжений на режущих кромках для 16 и 22 шагов внедрения пуансона. Из рис. 6. видно, что напряжения в углах детали значительно выше, чем по середине ребер, но напряжение в середине коротких сторон детали превышает напряжения, в середине длинных сторон детали, что обусловлено упругим изгибом полосы на начальной стадии вырубке и при последующем пластическом внедрении пуансона. На рис. 6 видно, как изменяются напряжения на стадиях упругой и пластической деформации (зоны 1, 2, 3). На рис. 6 для шага 16 сравниваются эпюры напряжений и те, которые соответствуют началу пластического течения (шаг 2). Для шага 22 наложены уже 3 вида эпюр и видно, что напряжения в углах контура растут в самой большой степени.



Шаг 16

Шаг 22

Рис. 6. Пошаговые эпюры напряжений (МПа) в определенных точках:

1 – напряжения, возникающие при внедрении пуансона в заготовку; 2 – напряжения, возникающие при 1/3 внедрения пуансона в заготовку; 3 – напряжения, возникающие при распространении трещин по заготовке

## ВЫВОДЫ

Проведено теоретическое исследование методом конечных элементов процесса вырубки прямоугольной пластины из тонколистового материала для определения деформаций, которые определяют стрелу прогиба детали в процессе сначала упругого а затем и пластического внедрения пуансона в заготовку. Как показывают контрольные эксперименты, вырубка деталей круглой формы из тонколистовых материалов малой относительной толщины, сопровождается прогибами, соизмеримыми с толщиной материала, так что это приводит к неодновременному сколу вдоль всего периметра, но последовательному срезу на небольшом участке периметра среза и меньшей шероховатости.

Такое утверждение проверяется теперь уже для прямоугольной детали, и расчеты деформаций и напряжений дают повышенные и неодинаковые прогибы вдоль длинной и короткой режущих кромок пуансона и матрицы. Найдено при этом, что процесс вырубки начинается с углов контура и затем распространяется к середине коротких и длинных сторон, то есть вырубка происходит последовательным срезом контура.

В случае вырубки тонколистовых заготовок прямоугольной формы всегда интенсивнее нагружена короткая режущая кромка и логично предположить, что ее износ сильнее, чем для длинной стороны, что подтверждают многочисленные эксперименты по износу инструмента [4].

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Залесский 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. Попов Е. А. *Основы теории листовой штамповки* / Е. А. Попов. – М. : Машиностроение, 1977. – 278 с.
3. Donald F. Eary *Techniques of Pressworking Sheet Metal (An engineering approach to die design)* / Donald F. Eary & Edward A. Reed // RAL Motors Institute Industrial Engineering Department. – Gene. – 1976. – P. 1–19.
4. 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.
5. Яворовський В. М. *Залучення теорії гнучких пластин і оболонок до аналізу пружної деформації на першій стадії вирубування деталей прямокутної форми* / В. М. Яворовський, М. М. Татарчук, І. А. Рощина // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2012. – № 60. – С. 71–76. – (Серія «Машинобудування»).
6. Яворовський В. М. *Теоретичний аналіз вырубки прямокутної пластины из тонколистової стали* / В. М. Яворовський, І. А. Рощина, П. А. Корнійченко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2012. – № 65. – С. 26–32. – (Серія «Машинобудування»).
6. Особенности вырубки тонколистового материала и фольги / Яворовский В. Н., Бень И. В., Кальченко И. Н., Буглеева И. А. // Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 3 (36). – С. 33–38.

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

Кальченко И. Н. – аспирант НТУУ «КПИ».

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

E-mail: k\_omd@ukr.net; kenua@ukr.net

Статья поступила в редакцию 28.11.2013 г.