

УДК 621.73.06-52

Яворовский В. Н.  
Бень И. В.  
Кальченко И. Н.  
Буглеева И. А.

## ОСОБЕННОСТИ ВЫРУБКИ ТОНКОЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА И ФОЛЬГИ

В последние годы вновь проявляется интерес к традиционным разделительным операциям листовой штамповки, в частности, к процессам вырубки-пробивки [1, 2, 3]. Хотя теория этих операций проработана наиболее последовательно, все же вырубка тонколистовых материалов и фольги требует большого объема жестяных работ: удаление допустимых заусенцев галтовкой или опиливанием, устранение кривизны деталей калибровкой и т. д., особенно если детали собираются в пакеты, например, трансформаторное, статорное и роторное железо. Сокращение этих дополнительных ручных работ всегда дает существенную экономию в производстве, и любые рекомендации по усовершенствованию этих процессов всегда актуальны.

Известные положения теории разделительных операций, изложенные, например, в [4, 5] для толстолиствого материала, пересматриваются с позиций, связанных с разработкой математических моделей рабочих деталей разделительных штампов и последующего их исследования. На основе этих исследований делаются выводы, противоречащие распространенной теории, которая дает четкие результаты для вырубки жестких деталей, имеющих толщину одного и того же порядка, что и размеры детали в плане.

Именно на предположении, что процесс вырубки проходит в 3 стадии, строятся все формулы теоретических расчетов и практические рекомендации. Деталь по теории отделяется от заготовки (листа, полосы, ленты) напряжениями среза, которые после некоторой величины пластической деформации вдавливания пуансона в заготовку, а заготовки в матрицу достигают величины временного сопротивления срезу. На первой же стадии по мере нагружения деталь претерпевает упругий изгиб, который фиксируется сопутствующей пластической деформацией. Деталь приобретает кривизну и косину среза.

Если проследить процесс вырубки в штампе круглой стальной детали толщиной 4,8 мм (3/16"), то можно заметить стадии внедрения пуансона в деталь на 0,25; 0,625; 0,875; 1,25 и 1,5 мм.

Вначале зерна, находившиеся в контакте с пуансоном, удлиняются (рис. 1, а), и это удлинение нарастает по ходу внедрения (рис. 1, б, в), что свидетельствует о развитии растягивающих напряжений со стороны пуансона и матрицы. Таким образом, становится очевидным, что при действии срезающих усилий разделение материала происходит под действием растягивающих напряжений.

Пластическое внедрение пуансона в заготовку начинается по достижении предела текучести  $\sigma_T$  у зерен на кромке пуансона, другие же зерна на некотором удалении деформируются упруго. В течение процесса внедрения напряжения в заготовке  $\sigma$  связаны неравенствами  $\sigma_T < \sigma < \sigma_{вр}$ . На рис. 1, а, б, в видно, что деформации растяжения и сжатия усугубляются выглаживанием поверхностей, прилегающих к пуансону и матрице, что увеличивает их интенсивность.

Когда пуансон внедряется на 1,25 мм (рис. 1, г), то деформация достигает величины, соответствующей пределу прочности  $\sigma_{вр}$ , что видно по небольшой трещине  $a$  (рис. 1, г), расположенной выше кромки пуансона. Аналогичные напряжения возникают на кромке матрицы. Если продолжать вдавливание пуансона на глубину 1,5 мм, то трещина появляется на кромке пуансона, уходит от его режущей кромки в тело заготовки на большую глубину (рис. 1, д), пока не встретит трещину со стороны матрицы.

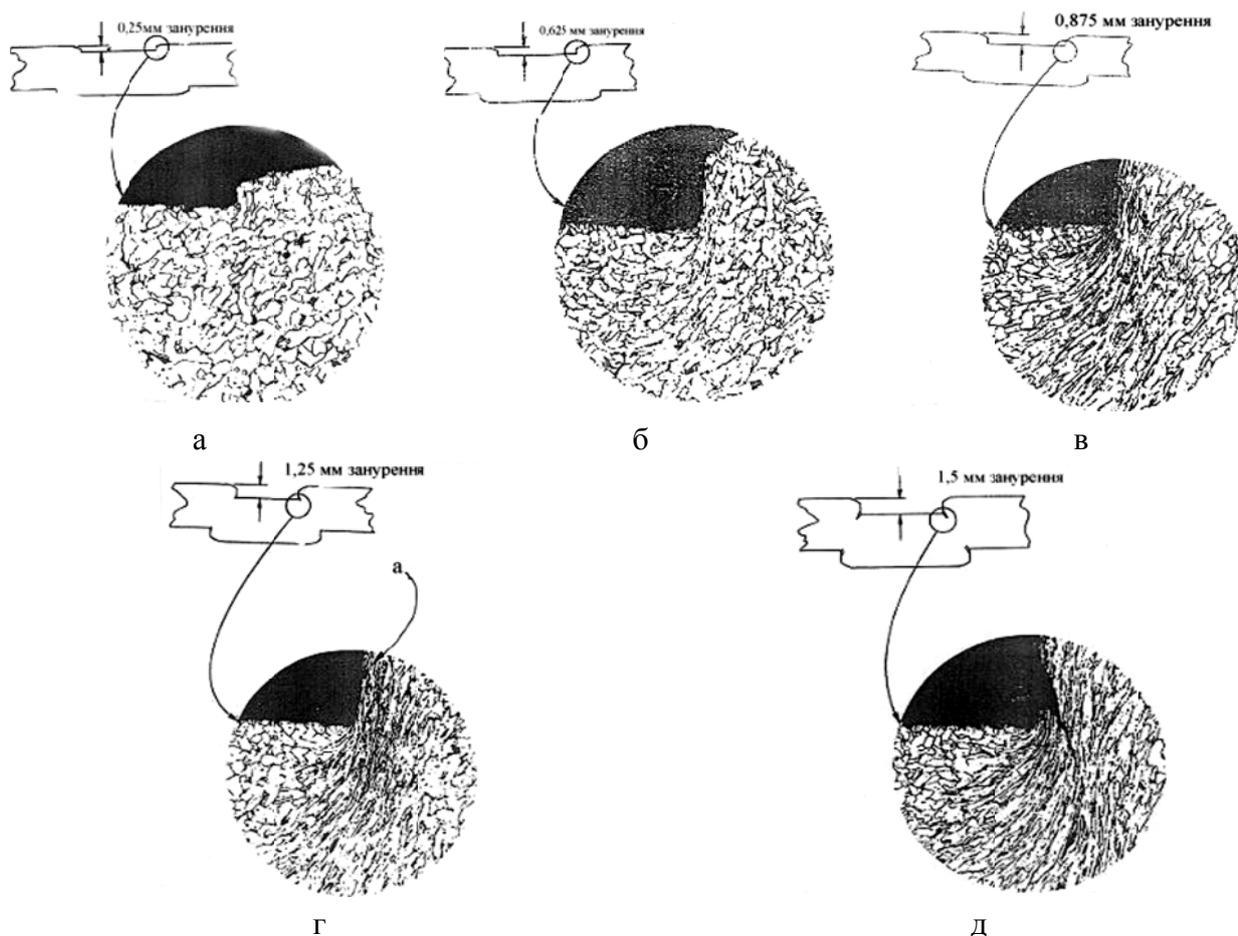


Рис. 1. Стадии процесса вырубki круглой детали диаметром 12,7 мм (1/2"), толщиной 4,8 мм (3/16") из углеродистой стали при различных величинах погружения пуансона в заготовку,  $\times 200$ :

а – 0,25 мм; б – 0,625 мм; в – 0,875 мм; г – 1,25 мм; д – 1,5 мм

Однако этот четкий механизм отделения детали от заготовки имеет значительные отличия, если производится вырубка тонколистового материала, у которого размеры в плане в несколько десятков раз больше толщины полосы [6]. Тогда к уже указанным видам пластической деформации добавляются деформации смятия и утяжины полосы, а рассмотренный ранее механизм приобретает качественно иное содержание. Это, главным образом, увеличивает роль растягивающих напряжений в очаге деформации – источнике утяжин, упругом изгибе заготовки, во много раз превышающем толщину применяемого материала и прочее. В случае тонколистового материала уменьшается, а для фольги вовсе исчезает концентрация напряжений в окрестности режущих кромок пуансона и матрицы, и задача вырубki превращается в контактную, что и ведет к смятию как детали, так и заготовки, перераспределению деформаций в очаге деформации. К сожалению, многие эксперименты [6] поставлены некорректно, с рабочими зазорами до 106,1 % от толщины материала и перемычками между деталями, которые никогда не встречаются в производстве. Это описание вырубki тонколистового материала напоминает поведение мембраны из теории гибких пластин и оболочек при нагружении ее вдоль контура наружных размеров.

Отличие в поведении тонколистового материала при вырубке косвенно подтверждается и неравномерностью износа рабочих деталей штампа при вырубке деталей прямоугольной конфигурации «Пластина» (рис. 2) сердечника трансформатора. Материалы и размеры заготовок (полос) приведены в табл. 1 [7].

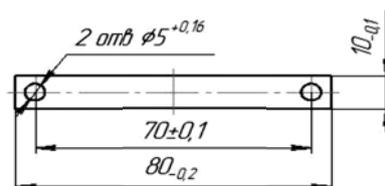


Рис. 2. Деталь – пластинка магнитопровода

Таблица 1

Материалы и размеры заготовок (полос)

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 рис. 2 и табл. 1 видно, что все размеры отличаются друг от друга на порядок.

Вырубка-пробивка осуществляется в производственном штампе совмещенного действия на двухстоечном эксцентриковом прессе усилием 160 кН с С-образной станиной, т. е. условия экспериментов в точности соответствовали заводским условиям. Сопряженные рабочие детали изготовлены из легированной инструментальной стали Х12М. Точность изготовления штампа, его жесткая конструкция, высокое качество применяемого инструментального материала и его термической обработки, большое количество экспериментов (около 200 тыс.) позволяют исключить влияние случайных факторов на износ и фиксировать лишь влияние толщины и материала заготовки. В этих условиях вырубка заготовки из электротехнической стали 3413 толщиной 0,35 мм приводит к преобладающему износу вдоль короткой грани пуансона по сравнению с длинной стороной. При этом, как всегда для электротехнической стали, износ интенсивен вплоть до прогрессирующего, но только по боковым, а не торцевым граням пуансона и матрицы, так что режущие кромки остаются острыми.

При вырубке детали из стали 20 толщиной 1 мм рабочие детали изнашиваются, прежде всего, по лицевым или торцевым граням, но по мере увеличения отштампованных деталей потом развивается износ боковых длинных граней пуансона в большей степени, чем коротких граней, наибольший износ наблюдается вдоль длинной грани, обращенной к подаваемой полосе, по сравнению с гранью со стороны отхода.

Эта неравномерность износа, как было предположено, является следствием неравномерности приложенной нагрузки – износ интенсивнее в местах больших нагрузок и развиваемых в вырубке детали напряжений. Также предполагается, что из-за своей незначительной жесткости наблюдается значительный прогиб заготовки на этапе упругого нагружения. Неравномерность деформации ведет к ее перераспределению на 1 стадии процесса вырубки, что также ведет к перераспределению напряжений по контуру вырубленной детали, они увеличиваются в местах большей жесткости детали, например, вдоль сторон меньшей длины, прямых углах и пр.

Целью представленной работы является теоретическое исследование вырубки путем моделирования процесса с использованием программной среды Deform 3D для детали, изображенной на рис. 2, имеющей толщину 3, 0,5 и 0,25 мм со свойствами, соответствующими

свойствам стали 20. Указанные толщины не полностью соответствуют [7], но верхняя и нижняя граница толщины должны давать более весомые результаты по сравнению с найденными экспериментально.

Условия, поставленные в решаемой задаче:

1. Рассматривается упруго-пластическая схема деформирования.

2. Механические свойства стали 20 соответствуют справочным данным.

3. Перемычки от края полосы и между соседними деталями назначены по РТМ 34-65. Таким образом, на длинной полосе деталям с одной стороны соответствует тонкая перемычка (2,5 мм), с другой – нештампованная жесткая полоса.

4. Исходя из объема оперативной памяти ЭВМ, создается сетка конечных элементов с размером зерна 0,2 мм, что соответствует массиву 200 тыс. элементов. Из-за узкого очага деформации при вырубке в непосредственной близости от режущих кромок размер уменьшается до 0,02 мм, и сетка сгущается.

5. Критерием разрушения выбран критерий Коккрофта-Лехема  $\int \frac{\sigma^*}{\sigma} d\varepsilon$  и задано критическое значение 0,4. Количество разрушающихся элементов  $n = 4$ .

6. Рассматриваются абсолютно жесткие пуансон и матрица, при этом радиусами затупления их режущих кромок пренебрегают.

7. Рассматривается жесткий прижим полосы, который существовал в заводском штампе.

8. Скорость перемещения пуансона соответствует средней скорости эксцентрикового прессы 0,5 мм/сек, коэффициент контактного трения принят 0,08, как для обильной принудительной смазки хорошо приработанного штампа, что и соответствовало условиям эксперимента.

В зависимости от толщины материала выбирается величина шага решения задачи и определения напряжений в каждой точке контура по цветовой палитре, сопровождающей эти решения. Исходя из указанных выше толщин материала, принималось от 50 до 100 шагов с величиной шага от 0,005 мм до 0,03 мм (рис. 3).

На рис. 3 видно, что деформации (а, следовательно, и напряжения) в прямых углах заготовки принимают наибольшие значения, тогда как ближе к серединам ребер они значительно уменьшаются. На определенном шаге, например, шаге 16 для толщины 3 мм наблюдается образование трещины на пересечении длинных и коротких сторон детали, что свидетельствует о достижении напряжения текучести, соответствующем временному сопротивлению материала. Его абсолютные величины свидетельствуют о значительном упрочнении материала в процессе пластической деформации, причем для более тонкого материала эти характеристики выше [8].

После пошаговой обработки расчетов найдено распределение напряжений на контуре вырубаемой детали и построены их эпюры вдоль длинных и коротких сторон соответственно предпоследнему шагу, когда наступает разрушение и напряжение в углу падает до 0. Эти эпюры, наложенные на один и тот же контур детали, представлены на рис. 4.

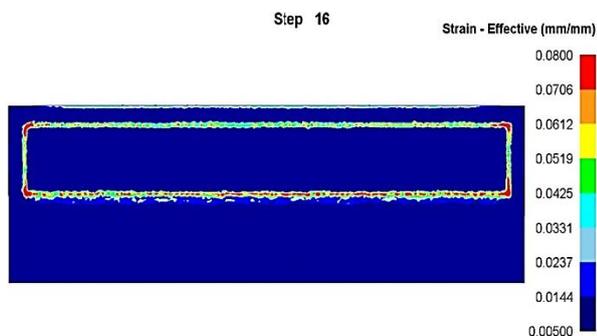


Рис. 3. Поле деформаций в очаге вырубки с цветовой палитрой справа (шаг 16, толщина материала  $S = 3$ )

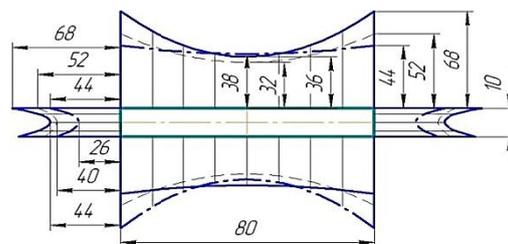


Рис. 4. Эпюры напряжений вырубке в кг/мм<sup>2</sup> для разных толщин материала, наложенные на контур вырубаемой детали:

— — — — — 0,25 мм; - - - - - 0,5 мм;  
- · - · - · - 3 мм

По распределению напряжений находилось их эффективное значение – интенсивность нагружения кромок, представленная в табл. 2.

Из эпюр и подытоженных в табл. 2 цифр видно, что характер изменения нагружения в процессе вырубki соответствует кривым параболического типа, очевидно, привязанных к кривизне, которую принимает тонколистовая заготовка под действием перераспределения нагрузки еще на стадии упругого нагружения.

Таблица 2

Интенсивность нагружения кромок

Толщина, мм	Интенсивность напряжений, кг/мм <sup>2</sup>		
	С короткой стороны	С длинных сторон	
		Со стороны исходной полосы	Со стороны отхода
0,25	51,2	45,3	41,3
0,5	43,2	38,7	33,3
3	31,2	40	36

Приведенный теоретический анализ однозначно показывает, что чем тоньше обрабатываемый лист, тем более нагружена кромка короткой стороны по сравнению с длинной, и это объясняет преимущественный износ кромок пуансона [7]. Интенсивность нагружения по коротким граням на 20 % выше, чем по длинным для толщины листа 0,25 мм и 12...15 % для 0,5 мм, но с увеличением толщины, когда прогибы существенно уменьшаются, интенсивность напряжений по длинной кромке пуансона становится больше, чем по короткой.

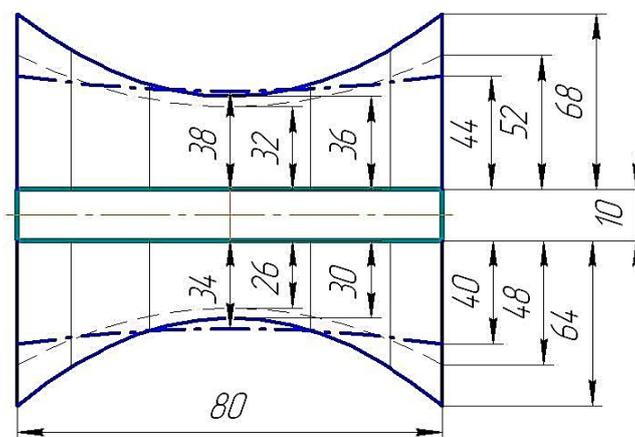


Рис. 5. Распределение напряжений вырубki в кг/мм<sup>2</sup> для разных толщин материала вдоль длинных кромок инструмента:

— 0,25 мм; - - - - - 0,5 мм; - · - · - 3 мм

Также подтверждены экспериментальные данные по износу режущих кромок длинных сторон (рис. 5) из-за разной жесткости подаваемой полосы и остатке полосы с перемычками. Большие цифры напряжений (рис. 5) соответствуют подаваемому более жесткому концу полосы.

Из найденной эпюры также видно, что для всех толщин из исследуемого списка имеет место перераспределение деформаций и напряжений, они увеличиваются в местах большей жесткости детали, например, по сторонам меньшей длины, у прямых углов и пр. Также моделированием показано, что из-за перераспределения напряжений пластическая деформация происходит неодновременно вдоль всего периметра, постепенно начинаясь в местах наибольших напряжений и затем распространяясь вдоль оставшегося контура. Такой процесс

уподобляется резке металла скошенными ножами, где скосы, отсутствующие на матрице и пуансоне, как бы компенсируются углами кривизны, которую принимает деталь на стадии упругого нагружения при вырубке.

## ВЫВОДЫ

Предпринятая попытка теоретического исследования процесса вырубки тонколистовых материалов путем моделирования процесса с использованием программной среды Deform 3D показала, что в этом случае вид напряженно-деформированного состояния в очаге деформации в очень большой степени определяется толщиной материала. Чем меньше толщина материала, тем в большей степени заготовка прогибается на стадии упругого нагружения из-за своей меньшей жесткости. Этот прогиб ведет к перераспределению напряжений с увеличением их в более жестких областях детали (в нашем случае короткие стороны, углы). Этим и объясняется неравномерный износ рабочих деталей штампа в [7]. Изменение в больших пределах кривизны исходной заготовки приводит к эффекту резки заготовки скошенными лезвиями пуансона и матрицы последовательно вдоль контура детали, что обычно сопровождается более чистым срезом. Нарастание численных значений интенсивности нагружения кромок с последующей сменой более нагруженных частей рабочего инструмента свидетельствуют о качественных изменениях во всей деформационной схеме вырубки, как это, например, присуще теории гибких пластин и оболочек для задач, представляющих разные прогибы пластин.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисевич В. К. Анализ разделительных процессов листовой штамповки / В. К. Борисевич, В. В. Драгобецкий // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2009. – № 12. – С. 9–12.
2. Демина Н. А. К вопросу исследования напряженно-деформированного состояния режущих элементов штампов в системе «пуансон – матрица – заготовка» / Н. А. Демина // *Науковий вісник ТДАТУ*. – 2011. – Випуск 1. – Том 3. – С. 153–159.
3. Мамутов В. С. Компьютерное моделирование разрушения при вырубке-пробивке особотонколистовых материалов / В. С. Мамутов // *Современное машиностроение. Наука и образование*. – 2012. – № 2. – Изд-во Санкт-Петербур. политех. универ. – С. 465–471.
4. 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.
5. Михаленко Ф. П. *Стойкость разделительных штампов* / Ф. П. Михаленко. – М. : Машиностроение, 1986 г. – 223 с.
6. Залесский В. И. *Механизм деформации при резке листового металла в штампах* / В. И. Залесский, В. В. Губарев // *Технологические процессы обработки стали и сплавов : сб. науч. трудов МИСиС*. – М. : Металлургия, 1955. – С. 409–452.
7. 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.
8. Зубцов М. Е. *Листовая штамповка* / М. Е. Зубцов. – Л. : Машиностроение, 1967. – 504 с. – С. 60.

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

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

Бень И. В. – аспирант НТУУ «КПИ»;

Буглеева И. А. – магистр НТУУ «КПИ».

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

E-mail: k\_omd@ukr.net; kenua@ukr.net; 0671253007@ukr.net

Статья поступила в редакцию 08.04.2013 г.