

УДК 621.77.0141

**В. Л. ХОРОЛЬСКИЙ**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ СНЯТИЯ ФАСКИ РЕЗКОЙ В ШТАМПАХ НА ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ ПЕРЕД СВАРКОЙ

Рассмотрены основные прогрессивные методы разделки скосов и снятия фасок на листовых заготовках перед сваркой. Определено напряженно-деформированное состояние системы «нож-заготовка» в штампах с симметричным нагружением и штампах со скользящим пуансоном. Осуществлен выбор более рациональной схемы резки по наименьшим нагрузкам, действующим на инструмент. Проведен расчет бандажирования при использовании твердосплавных вырубных матриц.

**Ключевые слова:** резка, штамп, напряженно-деформированное состояние, скользящий пуансон, метод конечных элементов.

**Введение.** Широкое применение сварки в машиностроении обусловлено ее технико-экономическими преимуществами по сравнению с другими способами соединения металлических заготовок и деталей. Разделка скосов и снятие фасок перед сваркой делается для того, чтобы получить шов, имеющий не менее 80 % прочности целой детали. Обработка и скос кромок под сварку сегодня в основном производится механическим путем на кромкострогальных, продольно-строгальных и фрезерных станках или газокислородным пламенем [1]. Прогрессивным способом обработки кромки является холодный способ обработки при помощи кромкообрабатывающего оборудования. Подготовка кромки под сварку с помощью механической обработки обеспечивает более высокое качество сварного шва при более низких затратах по сравнению с другими способами подготовки.

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** Одним из путей повышения производительности труда является применение разделительных операций листовой штамповки для обработки кромки в специальных штампах на прессовом оборудовании. Высокая производительность и отработанные технологии позволяют получать высокое качество при невысокой квалификации персонала [2].

Для правильного проектирования штамповой оснастки необходимо иметь ясное представление о механике процесса отрезки и нагрузках, действующих на рабочий инструмент, а также о напряжениях, возникающих в нем при отрезке.

При кромкообразовании (отрезке) в штампах возможно использовать схемы с несимметричным (рис. 1, а) и симметричным (рис. 1, б) нагружением

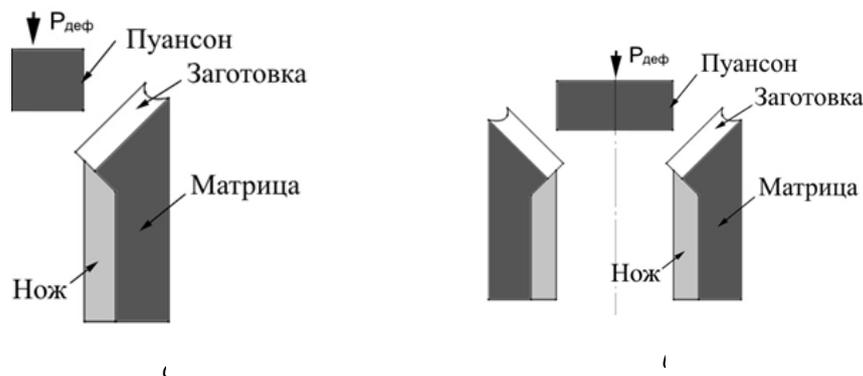


Рис. 1 – Кромкообразование по схеме: а – с несимметричным и б – симметричным нагружением

Из двух представленных схем кромкообразования листовых заготовок предпочтение следует отдавать второй схеме, т.к., несмотря на более высокие силовые параметры штамповки, с точки зрения стойкости штамповой оснастки и качества получаемых деталей эта схема является более рациональной [3, 4].

Другим способом кромкообразования может быть применение штампов (рис. 2), разработанных в Кременчугском национальном университете имени М. Остроградского конструктором Р. С. Ревивили. Эти штампы оснащены скользящим пуансоном,

совершающим поступательное движение одновременно в двух направлениях – горизонтальном и вертикальном.

Численное моделирование быстро протекающих процессов резки позволяет получить дополнительную информацию о сложных физических явлениях, которая недоступна при экспериментальных методах исследований. При решении таких задач широкое распространение получили программные комплексы, использующие явный метод решения уравнений механики сплошной среды [5].

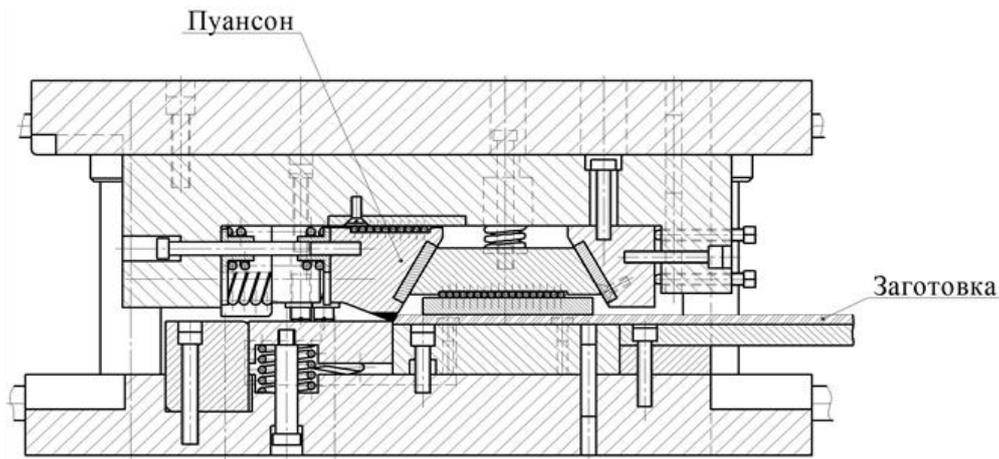


Рис. 2 – Конструкция штампа со скользящим пуансоном

В настоящее время наиболее перспективным методом расчета таких задач является метод конечных элементов (МКЭ). Среди пакетов, позволяющих решать существенно нелинейные задачи МКЭ с реалистичными математическими моделями материалов лидером является LS-DYNA. Возможности этого пакета позволяют решать задачи как в квазистатической, так и в динамической постановке. LS-DYNA является, по существу, лишь решателем, данные для которого готовятся в других программных пакетах. То же самое можно сказать и об анализе результатов расчета (постпроцессинге). Наиболее удачным в настоящий момент препроцессором является ANSYS/LS-DYNA, который по геометрической модели делает сетку конечных элементов необходимого для упруго-пластических задач качества [6]. К достоинствам данного пакета относится также и возможность выполнения постпроцессорной обработки, позволяющей обратиться к результатам решения и интерпретировать их нужным образом, используя набор команд и возможностей интерфейса.

Существенно нелинейные задачи решают явным методом, который реализован в решателе LS-DYNA. Недостатком явного метода является его условная устойчивость, то есть решение задачи не будет зависеть от шага по времени, только если он меньше определенного значения. Это значение определяется из критерия Куранта:

$$\Delta t_{\max} = a\sqrt{\rho/E}, \quad (1)$$

где  $a$  – характерный размер конечного элемента;  
 $\rho$  – плотность материала;  
 $E$  – модуль упругости материала.

Поэтому пакет LS-DYNA сам определяет размер шага по времени, так, чтобы критерий Куранта не нарушался [7].

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящего исследования является проведение расчета напряженно-деформированного состояния

(НДС) системы «нож-заготовка» в процессе отрезки с применением двух приведенных схем, и выбрать более рациональную схему.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- определение оптимальных параметров частей моделей конечно-элементного анализа;
- выбор рациональной схемы кромкообразования по принципу наименьших нагрузок, действующих на инструмент;
- установить влияние геометрии и направления перемещения режущих частей приведенных схем на качество получаемой фаски.

**Материалы и методы исследования.** При подготовке исходных данных для составления исходного k-файла в данном исследовании руководствовались рекомендациями, изложенными в [8, 9]. Геометрические параметры использованных моделей и направление перемещений их частей в вертикальной секущей плоскости представлены на рис. 3, 4.

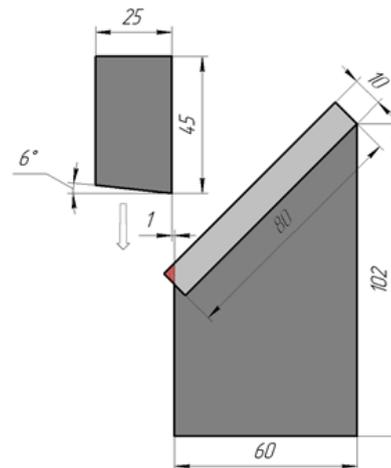


Рис. 3 – Геометрические параметры схемы отрезки в штампе с несимметричным нагружением

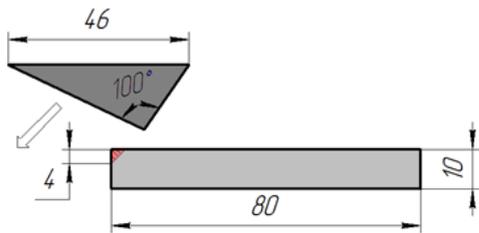


Рис. 4 – Геометрические параметры схемы отрезки в штампе со скользящим пуансоном

В обеих схемах моделировалось снятие фаски с уклоном  $45^\circ$  и высотой катета 4 мм на заготовке размером  $80 \times 10$  мм. В качестве материала заготовки принималась сталь 45, инструмента – сталь У8. Для заготовки принималась билинейная изотропная модель материала (Bilinear Kinematic). Данная модель используется для описания упругопластических деформаций, ее кривая состоит

из двух элементов – упругой и пластической составляющих. Поскольку деформациями инструмента можно пренебречь (они обрабатываются до высокой твердости), они считались абсолютно твердыми (Rigid). Так как инструмент считается недеформируемым, при создании моделей ножа и матрицы схемы с несимметричным нагружением они выполнялись в виде одной цельной модели. Все части модели вытягивались на 30 мм вдоль оси z. Свойства используемых в моделях материалов приведены в табл. 1. При выборе данных свойств материалов использовались данные ресурса [10] и работ [11, 12]. Следует отметить, в данном случае использовались единицы измерения, отличные от применяемых в системе СИ и их производных. Сравнение этих единиц измерения приведено в табл. 2.

Таблица 1 – Параметры частей моделей конечно-элементного анализа

Схема	Часть	Материал	Параметр	Название	Обозначение	Величина	Количество узлов
Несимметричное нагружение	нож	сталь У8	DENS	плотность	$\rho$	$7,83e-9$	1000
			EX	модуль Юнга	E	$2,05e5$	
			NUXY	коэффициент Пуассона	$\mu$	0,28	
	матрица	сталь У8	DENS	плотность	$\rho$	$7,83e-9$	1040
			EX	модуль Юнга	E	$2,05e5$	
			NUXY	коэффициент Пуассона	$\mu$	0,28	
	заготовка	сталь 45	DENS	плотность	$\rho$	$7,85e-9$	3000
			EX	модуль Юнга	E	$2,05e5$	
			NUXY	коэффициент Пуассона	$\mu$	0,29	
			Yield Stress	предел текучести	$\sigma_s$	310	
			Tangent Modulus	модуль пластичности	G	550	
	Штамп со скользящим пуансоном	нож	сталь У8	DENS	плотность	$\rho$	$7,83e-9$
EX				модуль Юнга	E	$2,05e5$	
NUXY				коэффициент Пуассона	$\mu$	0,28	
заготовка		сталь 45	DENS	плотность	$\rho$	$7,85e-9$	3000
			EX	модуль Юнга	E	$2,05e5$	
			NUXY	коэффициент Пуассона	$\mu$	0,29	
			Yield Stress	предел текучести	$\sigma_s$	310	
			Tangent Modulus	модуль пластичности	G	550	

Таблица 2 – Примеры согласованных единиц измерений

№	Масса	Длина	Время	Усилие	Напряжение	Плотность	Модуль Юнга	Ускорение свободного падения
1	кг	м	с	Н	Па	$7,83e+3$	$2,1e11$	9,8
2	тонна	мм	с	Н	МПа	$7,83e-9$	$2,1e5$	$9,8e3$

Верхняя строка приведенной таблицы соответствует системе СИ. Система единиц измерений во второй строке принята в выполненных расчетах и является наиболее удобной в процессах пластического деформирования.

В случае схемы с несимметричным нагружением кромка ножа (рис. 5, а) имеет уклон  $6^\circ$ , ножу задавалось перемещение вдоль оси Y со скоростью 1 м/с и запрещались перемещения во всех

остальных направлениях. К матрице также прикладывались ограничения на перемещения вдоль оси, перпендикулярной плоскости основания (предполагалось, что матрица находится на жестком основании). Для моделирования работы штампа со скользящим пуансоном (рис. 5, б) задавалось поступательное перемещение ножа вдоль биссектрисы прямого угла, образуемого осями X и Y, со скоростью 1 м/с. К заготовке прикладывались

ограничения на перемещения вдоль оси, проходящей перпендикулярно нижней горизонтальной плоскости заготовки (заготовка лежит на жестком основании). В обеих схемах был определен тип контакта «поверхность – поверхность» между инструментом и заготовкой (Surface to surface – Automatic contact). Данный тип контакта применяется для произвольно расположенных тел, которые могут иметь большие области контакта, и эффективен для тел, которые подвержены большому относительному скольжению относительно друг друга [12–14]. Полученные модели с сеточным разбиением показаны на рис. 5.

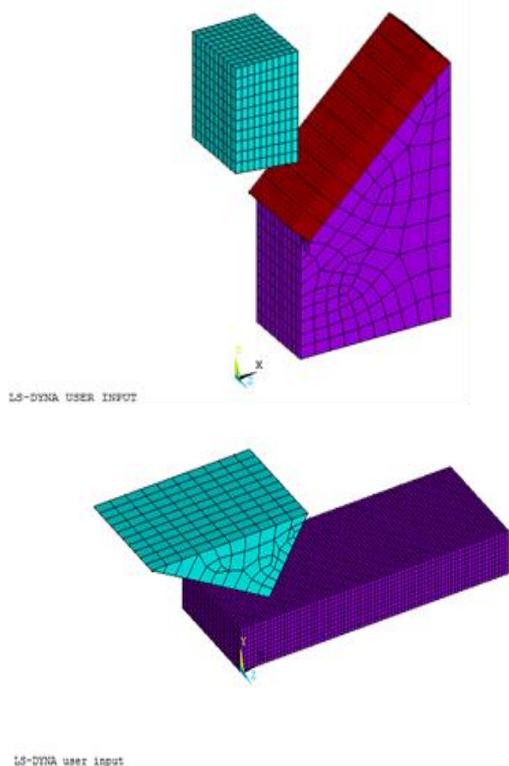


Рис. 5 – Полное сеточное разбиение моделей при кромкообразовании: а – несимметричным методом и б – скользящим пуансоном

Из практики решения подобных задач известно, что приблизительно 1000 шагов интегрирования на один миллиметр продвижения инструмента достаточно для получения адекватного решения. Для решения указанных задач использовался персональный компьютер с центральным процессором Intel Core i5 с тактовой частотой 2,60 ГГц, а объем оперативной памяти машины составлял 4 Гб. При указанных параметрах расчетных моделей решение одной задачи занимало около двух часов непрерывной работы, а общее количество занимаемого дискового пространства составляет около 500 МБ.

**Результаты исследований.** На рис. 6 (а–в) и 7 (а – в) приведены картины распределения напряжений на последних этапах активного нагружения (непосредственное отделение части заготовки пуансоном) с указанными зонами

максимальных (MX) и минимальных (MN) напряжений в массиве пуансона.

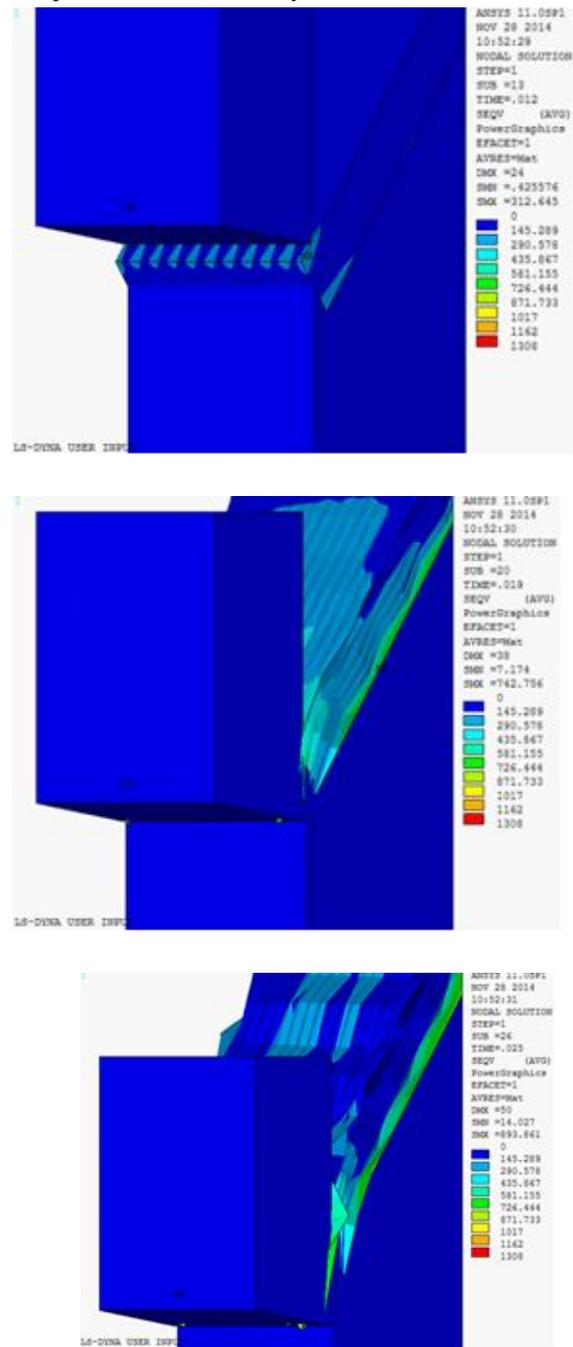


Рис. 6 – Картина распределения эквивалентных (по Мизесу) напряжений при кромкообразовании несимметричным методом в момент времени: а – 0,012 с (касание инструмента); б – 0,019 с; в – 0,025 с

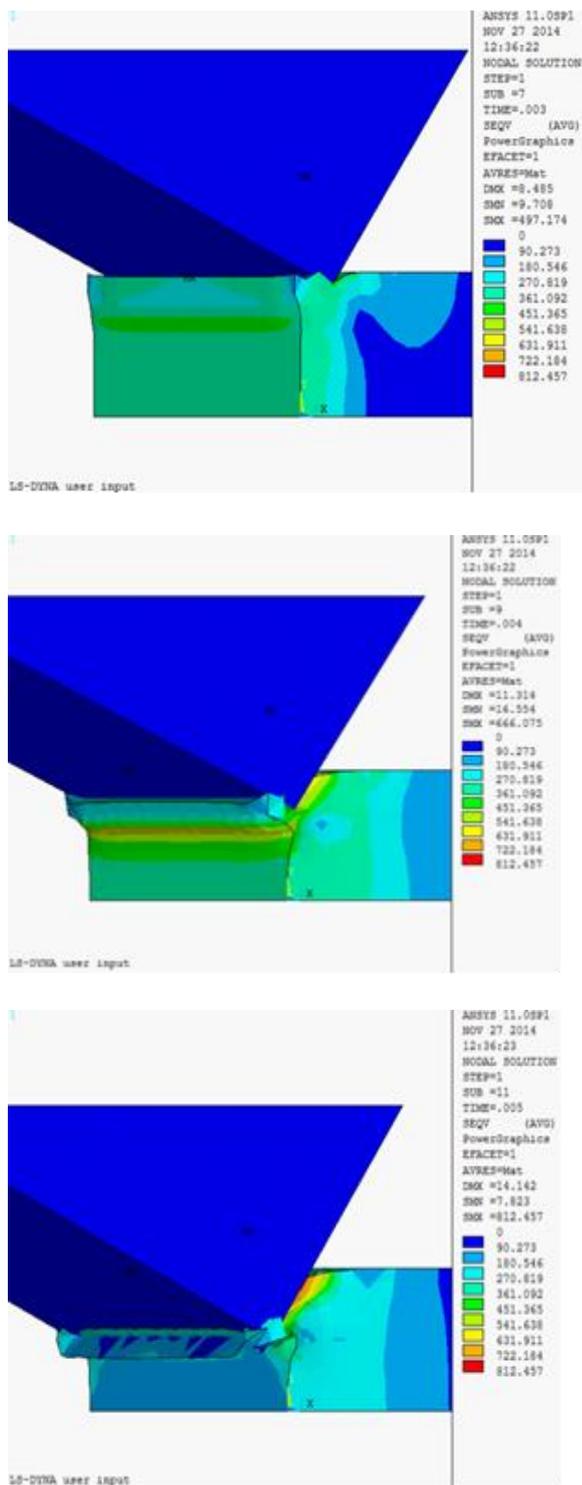


Рис. 7 – Картина распределения эквивалентных (по Мизесу) напряжений при кромкообразовании скользящим пуансоном в момент времени: а – 0,003 с (касание инструмента); б – 0,004 с; в – 0,005 с

На рис. 8, а, б показан график изменения эквивалентных напряжений на кромке пуансона.

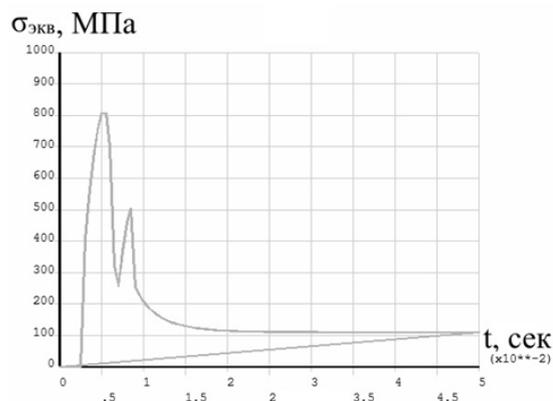


Рис. 8 – График изменения эквивалентных (по Мизесу) напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  по времени t на режущей кромке пуансона: а – при несимметричной схеме отрезки; б – при отрезке со скользящим пуансоном

Приведенные графики были получены с использованием внутреннего интерпретатора результатов расчета пакета LS-DYNA выполнением команд просмотрщика «Время – переменная», где в качестве последней задавались суммарные эквивалентные напряжения, а в качестве точек анализа указывались точки, принадлежащие режущей кромке инструмента.

Как видно из полученных эюр и графиков нагружения, при кромкообразовании по схеме со скользящим пуансоном, напряжения, возникающие на режущей кромке пуансона, ниже таковых при использовании несимметричной схемы отрезки примерно на 400 МПа, а также исключается образование заусенца. Кроме того, в случае кромкообразования по несимметричной схеме, усилие отрезки приводит к возникновению в массиве заготовки напряжений, вызывающих образование поперечных гофр на заготовке и ее изгибу, что делает обязательным применение прижимов.

Полученные результаты говорят о повышении стойкости режущей кромки инструмента и более высоком качестве получаемых фасок при использовании при кромкообразовании штампов со скользящим пуансоном, однако остаются актуальными вопросы повышения и самого штампового оборудования. Одним из методов повышения стойкости штампов является

изготовление их из твердосплавных материалов. Поскольку при отрезке на матрицу действует система сил, вызывающая в ней тангенциальные растягивающие и радиальные сжимающие напряжения. Появление растягивающих напряжений особенно опасно для твердосплавных матриц, так как твердые сплавы плохо работают на растяжение.

Для предупреждения появления растягивающих напряжений твердосплавные матрицы запрессовывают в стальные обоймы. Метод предварительно напряженных цилиндрических конструкций теоретически хорошо разработан и применяется для повышения прочности и уменьшения веса труб, орудийных стволов, сосудов высокого давления, контейнеров для прессования и т.п. Применительно к матрицам штампов для объёмной штамповки расчётная методика разработана в работе [15] и др.

Исходным параметром в этих расчётах является величина рабочего давления на внутреннюю стенку матрицы. По аналогии при расчёте величины натяга при бандажировании вырубных матриц последняя принимается как толстостенная обечайка, находящаяся под действием равномерно распределенного внутреннего давления, состоящего из двух слагаемых: распирающего усилия при отрезке и давления застрявшего в матрице отрезанного металла на её стенки.

Силы, действующие на торцовых поверхностях матрицы, в расчёт не принимаются.

По данным технологических рекомендаций, в т.ч. [16], величина натяга при бандажировании твердосплавных отрезных матриц рекомендуется настолько большой, что запрессовка может производиться только после предварительного нагрева обоймы до температуры 370°...400°С. Это вызывает большие затруднения.

В действительности на отрезную матрицу действует система сил, представленная на рис. 9, а.

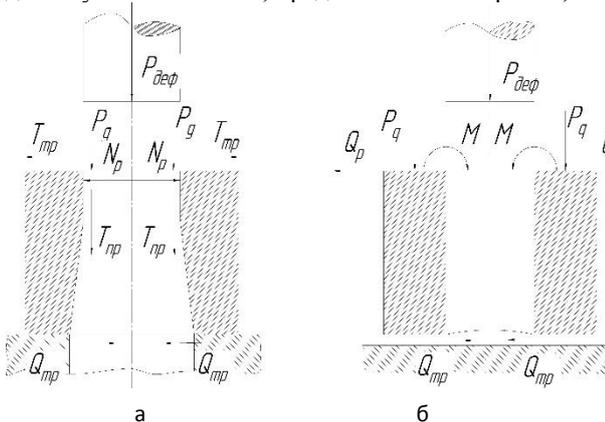


Рис. 9 – Схемы нагрузок, действующих на твердосплавную матрицу при отрезке: а – действительная система сил; б – расчётная схема

Сжимающие тангенциальные напряжения, вызванные запрессовкой, должны быть равны или больше растягивающих напряжений, вызванных системой сил при отрезке, т.е. внутренняя поверхность матрицы не должна получать

положительных радиальных перемещений – положительному значению  $U$  соответствует перемещение точек на большее расстояние от центра матрицы.

Для возможности использования основных случаев расчёта коротких цилиндрических оболочек реальную систему сил, действующую на матрицу при отрезке, можно, без большой погрешности, заменить условной расчётной схемой, представленной на рис. 9, б.

Распирающую силу  $N_p$  и силу  $T_{tr}$  заменим нагрузкой  $Q_p$ , равномерно распределенной по периметру срединной окружности на верхнем торце матрицы. Приложенные по режущей кромке матрицы усилие деформации  $P_q$  и усилие проталкивания застрявшего отрезанного металла  $T_{tr}$  заменим изгибающим моментом  $M$  и нагрузкой  $P_q$  равномерно распределенными по периметру срединной окружности. На нижнем торце матрицы действует равномерно распределенная сила трения  $Q_{mp}$ .

К условиям работы твердосплавной отрезной матрицы наиболее подходит схема, при которой нижний торец оболочки закреплен по скользящей заделке, а верхний – свободный.

Зависимость для определения радиального перемещения внутренней поверхности матрицы по известному перемещению её срединной поверхности будет иметь вид:

$$U_b = 2U_{cp} \frac{1 + K_1^2}{K_1} \frac{(1 - K_1^2) \left( \frac{1 + K_1^2}{1 - K_1^2} + \mu_1 \right)}{(1 - \mu_1)(1 + K_1)^2 + 4(1 + \mu_1)}, \quad (1)$$

где  $U_{cp}$  – тангенциальное перемещение точек матрицы в процессе отрезки;

$K_1$  – функция Крылова [17];

$\mu_1$  – коэффициент Пуассона матрицы.

Выражение для определения необходимой величины натяга при бандажировании отрезных матриц:

$$\delta = 2U_{cp} \left( \frac{1 - K_1^2}{K_1} \right)^2 \frac{(1 + K_1^2) \left( \frac{1 + K_1^2}{1 - K_1^2} + \mu_1 \right)}{(1 - \mu_1)(1 + K_1)^2 + 4(1 + \mu_1)} \times \left[ \left( \frac{1 + K_1^2}{1 - K_1^2} - \mu_1 \right) + \frac{E_1}{E_2} \left( \frac{1 + K_1^2}{1 - K_1^2} + \mu_1 \right) \right], \quad (2)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – модули упругости материалов матрицы и обоймы.

Но вышеизложенной методике были определены необходимые величины натягов при запрессовке твердосплавных вырубных матриц в стальные обоймы. Размеры матриц и обойм принимались по рекомендациям [16] в зависимости от толщины вырезаемого металла. Результаты расчётов приведены в таблице 3.

При расчётах принимались: материал матрицы – ВК-20; модуль упругости –  $E = 5 \cdot 10^6$  МПа, коэффициент Пуассона –  $\mu_1 = 0,22$ .

Таблиця 3 – Величини натягов при запресовке твердосплавних вырубных матриц в стальные обоймы

№	Толщина металла, мм	Усилие деформации, кН	Размеры матрицы, мм			$K_1$	$K_2$	$U_{cp}$ , мк	Расчетная величина натяга $\delta$ , мк	Величина натяга по РТМ, мк
			$d_1$	$d_2$	$l$					
1	3	280	38,5	65	18	0,6	0,425	6,97	52	130...160
2	5	470	38,5	70	20	0,65	0,375	9,5	58	130...160

Сопротивление отрезаемого металла срезу  $\sigma_{cp} = 600$  МПа.

Результаты подсчетов увеличены на поправочный коэффициент  $m = 1,3$ , величина которого найдена экспериментально.

Анализ полученных выражений показывает, что для уменьшения касательных напряжений необходима смазка поверхности отрезаемого металла и рабочего твердосплавного инструмента. Если для стального режущего инструмента рекомендуется исключить течение отрезаемого металла по пояску смятия, чтобы уменьшить износ, то для твердосплавного инструмента, благодаря большой его износостойкости, этого делать не нужно, так как увеличение касательных напряжений может вызвать появление главных растягивающих напряжений, что нежелательно для твердых сплавов.

Таким образом, полученные результаты показали, что необходимая для безопасной работы твердосплавных отрезных матриц величина натяга при запресовке их в стальные обоймы меньше рекомендуемой РТМ 112-63 [16]. Можно применять посадки с небольшим натягом. Запресовку можно производить без предварительного подогрева обоймы.

Так как при запресовке твердосплавных матриц по цилиндрической контактной поверхности происходит срезание неровностей и гребешков или даже снятие стружки, рекомендуется посадочную (контактную) поверхность делать конусной с односторонним углом  $1^\circ \dots 1^\circ 30'$ . Преимущества матриц с конической посадочной поверхностью подтверждаются опытом применения таких штампов на машиностроительных предприятиях.

Сделанные выводы и рекомендации относятся только к отрезным твердосплавным матрицам при толщине отрезаемого материала до 25 мм. В процессе одновременной отрезки матрица испытывает только напряжения сжатия. Поэтому применение твердых сплавов для матриц в этом случае не имеет практических ограничений. После подъема ползуна прессы в матрице остаются застрявший отрезанный металл, который создает давление на внутреннюю поверхность. Это давление вызывает растягивающие напряжения в матрице, которые и ограничивают возможность применения твердых сплавов для матриц с малой толщиной стенки.

Величина давления, оказываемого застрявшим отрезанным металлом на внутреннюю стенку матрицы зависит от величины радиальных перемещений режущей кромки в процессе отрезки. Для снижения действия распирающих сил,

создаваемых застрявшим отрезанным металлом, провал матрицы необходимо делать коническим. Уклон должен быть в пределах  $5' + 30'$ .

Результаты проведенного численного моделирования позволили выбрать предпочтительную схему процесса получения фасок в штампах. Разработанная конструкция штампа внедрена и успешно работает на ПАО «Крюковский вагоностроительный завод». Стойкость этого штампа, вероятнее всего, в сотни раз превышает стойкость ранее используемых штампов. В последних использовалась традиционная схема резки с вертикальным движением пуансона и наклонной заготовкой. В этом случае смена пуансона обычно проводилась раз в 3 – 4 смены.

**Выводы.** Проведено исследование напряженно-деформированного состояния заготовок по методу конечных элементов при кромкообразовании с применением схемы с несимметричным нагружением и схемы, реализуемой конструкцией штампа со скользящим пуансоном. Расчеты проводились с применением программного комплекса ANSYS/LS-DYNA. Для этого были составлены расчетные схемы моделей, определены оптимальные параметры частей моделей и типы их контактного взаимодействия.

На основании полученных с помощью возможностей постпроцессора ANSYS эпюр эквивалентных напряжений и графиков напряжений в точках режущих кромок сделан вывод о более высоких нагрузках, действующих на режущую кромку в случае схемы с несимметричным нагружением.

Также было установлено, что применение штампов со скользящим пуансоном позволяет избежать образование заусенцев и гофр на заготовке, характерных для схемы с несимметричным нагружением.

Полученные результаты говорят о повышении стойкости режущей кромки инструмента и более высоком качестве получаемых фасок при использовании при кромкообразовании штампов со скользящим пуансоном.

Схема кромкообразования со скользящим пуансоном реализована в конструкции штампа, успешно применяемого в заготовительном производстве на ПАО «Крюковский вагоностроительный завод».

**Список литературы:** 1. Гырдымов Г. П. Автоматизация технологической подготовки заготовительного производства / Г. П. Гырдымов, Л. И. Зильбург, И. Д. Савченко, В. Н. Шальшин. – Л.: Машиностроение, 1990. – 350 с. 2. Драгобецкий В. В. Сопоставление энергетических параметров, процессов термической и механической резки листовых заготовок /

*В. В. Драгобецький, О. Б. Марцинюк* // Вісник КДПУ. – 2005. – Вип. 1 (30). – С. 64–66. **3. Драгобецький В. В.** Количественный анализ процесса резки листового металла в штампах / *В. В. Драгобецький, О. Б. Марцинюк, Е. А. Наумова, Д. Л. Пирогов* // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2008. – № 6 (124), Ч. 1. – С. 85–88. **4. Драгобецький В. В.** Новые методы снижения работы пластической деформации в операциях пробивки и вырубки / *В. В. Драгобецький, О. Б. Марцинюк* // Вісник КДПУ. – 2005. – Вип. 1 (30). – С. 67–69. **5. Cleary P. W.** Modelling of Metal Forging Using SPH / *P. W. Cleary, M. Prakash, R. Das, J. Ha* // Applied Mathematical Modelling. – 2012. – Vol. 36, Issue 8. – P. 3836–3855. doi: 10.1016/j.apm.2011.11.019 **6. Gerber B.** Making an impact / *B. Gerber, T. C. Yang* // ANSYS Advantage. – 2008. – Vol. 2, Issue 4. – P. 40–42. **7. Тыняний А. Ф.** Численное моделирование контактной задачи в рамках квазистатического упругопластического деформирования в пакете ANSYS/LS-DYNA / *А. Ф. Тыняний* // Журнал «Нефтегазовое дело». – 2004. – Вып. 1. **8. Илюшкин М. В.** Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA. Учебно-методическое пособие / *М. В. Илюшкин*. – Ульяновск: УлГУ, 2012. – 91 с. **9. Криворучко Д. В.** Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінченних елементів: навчальний посібник / *Д. В. Криворучко, В. О. Залоза, В. Г. Корбач*. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 208 с. **10. MatWeb, Your Source for Materials Information** [Electronic resource] / Available at: <http://www.matweb.com/> **11. Jones N.** An Experimental Study Into the Dynamic Plastic Behaviour of Wide Beams and Rectangular Plates / *N. Jones, R. N. Griffin, R. E. Van Duzer* // International Journal of Mechanical Sciences. – 1971. – Vol. 13, Issue 8. – P. 721–735. doi: 10.1016/0020-7403(71)90072-5. **12. Jones N.** Higher Modal Dynamic Plastic Behaviour of Beams Loaded Impulsively / *N. Jones, C. G. Soares* // International Journal of Mechanical Sciences. – 1978. – Vol. 20, Issue 3. – P. 35–147. doi: 10.1016/0020-7403(78)90001-2. **13. Sturgess C. E. N.** Estimation of Dynamic Forces In High-Speed Compression Using a Free-Flight Impact Forging Device / *C. E. N. Sturgess, M. G. Jones* // International Journal of Mechanical Sciences. – 1971. – Vol. 13, Issue 4. – P. 309–322. doi: 10.1016/0020-7403(71)90056-7. **14. Jones N.** Post-Failure Behaviour of Impulsively Loaded Circular Plates / *N. Jones, M. Alves* // International Journal of Mechanical Sciences. – 2010. – Vol. 52, Issue 5. – P. 706–715. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.014. **15. Трахтенберг Б. Ф.** Стойкость штампов и пути ее повышения / *Б. Ф. Трахтенберг*. – Куйбышев: Кн. изд-во, 1964. – 280 с. **16. ТМ 112-63.** Штампы для холодной штамповки, оснащенные твердыми сплавами. Расчеты и конструирование. – Изд-во стандартов, 1964. **17. Биргер И. А.** Расчет на прочность деталей машин. Справочное пособие. 2-е изд. / *И. А. Биргер, Б. Ф. Шорп, Р. М. Шнейдерович*. – М.: Машиностроение, 1966. – 616 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Gyrdymov, G. P., Zilburg, L. I., Savcenko, I. D., Shalyshyn, V. D.. *Avtomatizatsiya tehnologicheskoy podgotovki zagotovitel'nogo proizvodstva*. Lviv: Mashinostroyeniye, 1990. Print. **2.** Dragobetskiy, V. V., Martsynyuk, O. B. “Sopostavleniye energeticheskikh parametrov, protsessov termicheskoy i mekhanicheskoy rezki listovykh zagotovok” *Visnyk KDPU*. 30. 64–66(2005). Print. **3.** Dragobetskiy V. V., Martsynyuk O. B. Naumove Ye. A. Pirogov D. L. “Kolichestvennyy analiz protsessa rezki listovogo metalla v shtampah”. *Visnyk Skhidnoukrayinskogo natsionalnogo universytetu imeni Volodymyra Dallya*, 124,1, 85 – 88(2008). Print. **4.** Dragobetskiy, V. V., Martsynyuk, O. B. “Novyye metody snizheniya raboty plasticheskoy deformatsii v operatsiyakh probivki i vyrubki”. *Visnyk KDPU*, 30, 67–69. (2005). Print. **5.** Cleary, P. W., Prakash, M., Das, R., Ha, J. “Modelling of metal forging using SPH”. *Applied Mathematical Modelling*, 36 (8), 3836–3855. doi: 10.1016/j.apm.2011.11.019(2012). Print. **6.** Gerber, B., Yang, T. C. Making an impact. *ANSYS Advantage*, 2 (4), 40–42. (2008). Print. **7.** Tyunyanyi, A. F. “Chislennoye modelirovaniye kontaktnoy zadachi v ramkakh kvazistaticheskogo uprugoplasticheskogo deformirovaniya v pakete ANSYS/LS-DYNA”. *Neftegazovoye delo*, 1. (2004). Print. **8.** Ilyushkin, M. V. *Modelirovaniye protsessov obrabotki davleniyem v programme ANSYS/LS-DYNA: uchebno-metodicheskoye posobiye*. Ulyanovsk: UIGU, 1, 91. (2012). Print. **9.** Kryvoruchko, D. V., Zaloga, V. O., Korbach, V. G. *Osnovy 3D-modelyuvannya protsessiv mekhanichnoyi obrobky metodom skinchenykh elementiv: navchalnyy posibnyk*. Sumy: SumDU, 1, 208. (2009). Print. **10.** MatWeb, Your Source for Materials Information. Web Available at: <<http://www.matweb.com/>>. **11.** Jones, N., Griffin, R. N., Van Duzer, R. E. “An experimental study into the dynamic plastic behaviour of wide beams and rectangular plates”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 13 (8), 721–735. doi: 10.1016/0020-7403(71)90072-5(1971). Print. **12.** Jones, N., Soares, C. G. “Higher modal dynamic plastic behavior of beams loaded impulsively”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 20 (3), 135–147. doi: 10.1016/0020-7403(78)90001-2(1978). Print. **13.** Sturgess, C. E., Jones, M. “Estimation of dynamic forces in high-speed compression using a free-flight impact forging device”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 13 (4), 309–322. doi: 10.1016/0020-7403(71)90056-7(1971). Print. **14.** Jones, N., Marcilio, A. “Post-Failure Behaviour of Impulsively Loaded Circular Plates. *International Journal of Mechanical Sciences*”, 52 (5), 706–715. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.014(2010). Print. **15.** Trahtenberg B. F. *Stoykost shtampov i puti ee povyisheniya*. Kuybyishev. Kn. izd-vo.1964. 280. **16.** ТМ 112-63. *Shtampyi dlya holodnoy shtampovki, osnaschennyie tverdyimi splavami. Raschety i konstruirovaniye. Izd-vo standartov, 1964.* **17.** Birger I. A. *Raschet na prochnost detaley mashin. Spravochnoe posobie. 2-e izd.* Moscow. Mashinostroenie. 1966. 616.

Поступила (received) 07.11.2015

Сведения об авторах / About the Authors

**Хорольский Владимир Леонидович** – ассистент кафедры транспортных технологий, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского; тел.: (05366)3-63-92; e-mail: vova\_men25.ru@inbox.ru.

**Khorolskyi Vladimir Leonidovich** – assistant of the Department of Transport Technology; Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University; tel.: (05366)3-63-92; e-mail: vova\_men25.ru@inbox.ru.