

УДК 621.77.014

**В. Л. Хорольський, асист., С. В. Шлик, доц., канд. техн. наук**

*Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского,  
г. Кременчуг, Україна, [vova\\_men25.ru@inbox.ru](mailto:vova_men25.ru@inbox.ru)*

## Процесс снятия фаски резкой в штампах для усиления сварных соединений в сельском машиностроении

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.

**резка, штамп, напряженно-деформированное состояние, скользящий пуансон, метод конечных элементов**

**В.Л. Хорольський, асист., С.В. Шлик, доц., канд. техн. наук**

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна*

**Процес зняття фаски різанням у штампах для посилення зварювальних з'єднань у сільському машинобудуванні**

Розглянуто основні прогресивні методи утворення скосів і зняття фасок на листових заготовках перед зварюванням. Визначено напружено-деформований стан системи «ніж-заготовка» в штампах з симетричним навантаженням і штампах з ковзаючим пуансоном. Здійснено вибір більш раціональної схеми різання по найменшим навантаженням, що діють на інструмент.

**різання, штамп, напружено-деформований стан, ковзаючий пуансон, метод скінченних елементів**

**Постановка задач исследований.** Широкое применение сварки в сельском 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 производятся 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 предыдущих исследований.** 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.

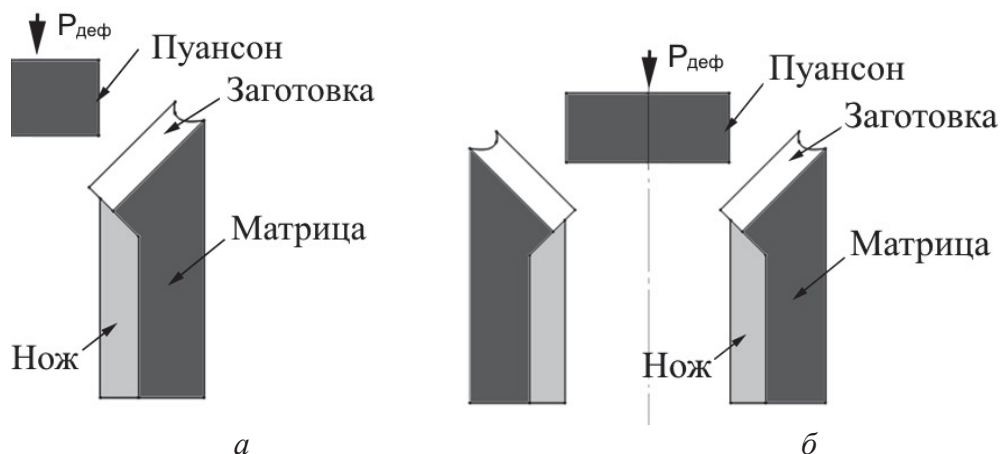


Рисунок 1 – Кромкообразование по схеме с несимметричным (а) и симметричным (б) нагружением

Источник: разработано авторами

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.

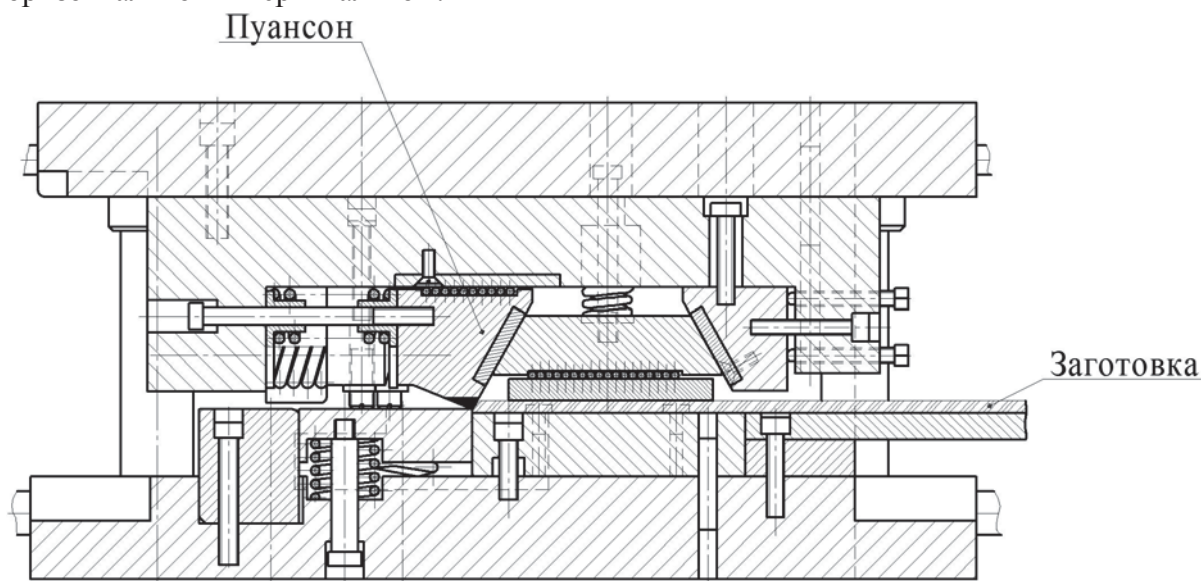


Рисунок 2 – Конструкция штампа со скользящим пуансоном.

Источник: разработано Р. С. Ревивили

Численное моделирование быстропротекающих 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].

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:

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

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].

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.

**Результаты исследований.** 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.

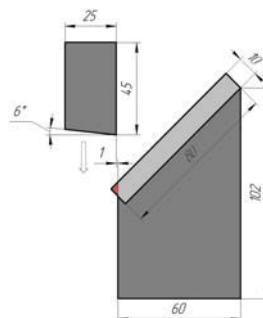


Рисунок 3 – Геометрические параметры схемы отрезки в штампе с несимметричным нагружением  
Источник: разработано авторами

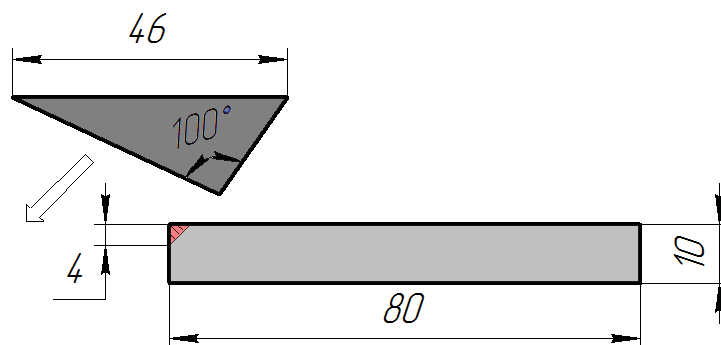


Рисунок 4 – Геометрические параметры схемы отрезки в штампе со скользящим пуансоном

Источник: разработано авторами

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	К-во 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	

Продовження таблиці 1

Штамп со скользящим пуансоном	нож	сталь У8	DENS	плотность	$\rho$	7,83e-9	390
			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	

Источник: данные ресурсов [10, 11, 12]

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

Источник: данные ресурса [7, 8]

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 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 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.

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.

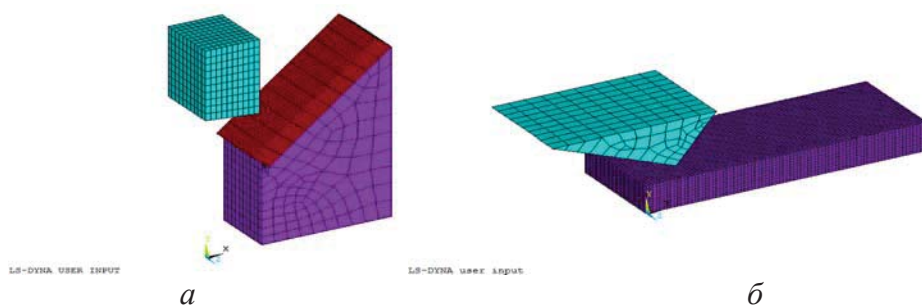


Рисунок 5 – Полное сеточное разбиение моделей при кромкообразовании несимметричным методом (а) и скользящим пуансоном (б).

Источник. Разработано авторами

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.

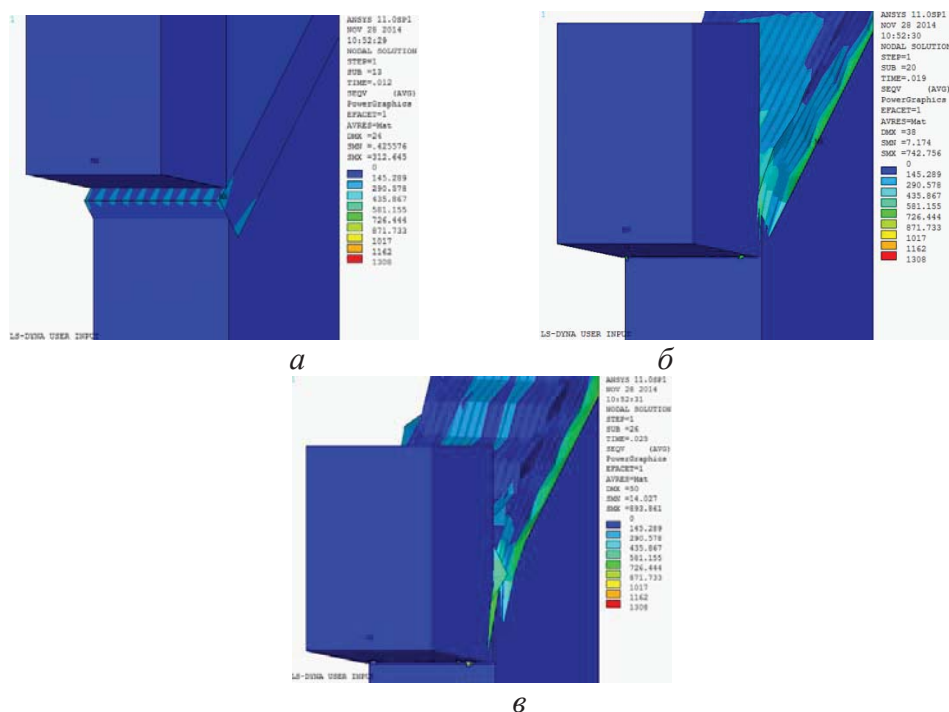
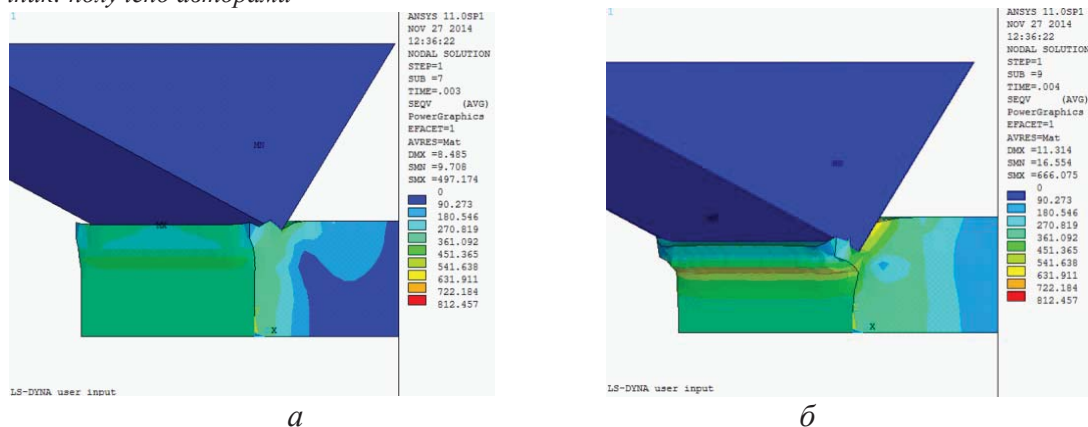
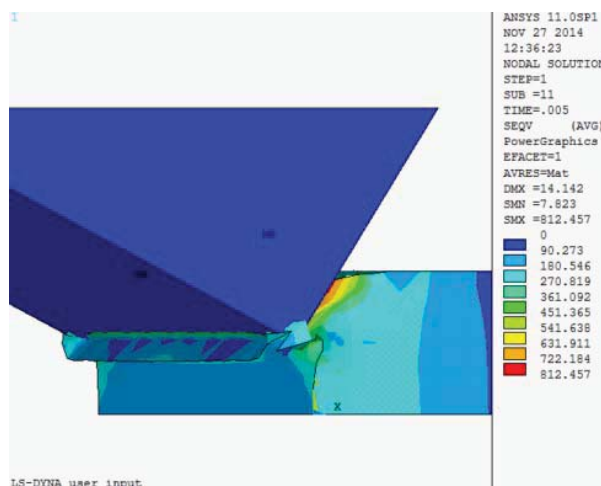


Рисунок 6 – Картина распределения эквивалентных (по Мизесу) напряжений при кромкообразовании несимметричным методом в момент времени: а – 0,012 с (касание инструмента); б – 0,019 с; в – 0,025 с

Источник: получено авторами





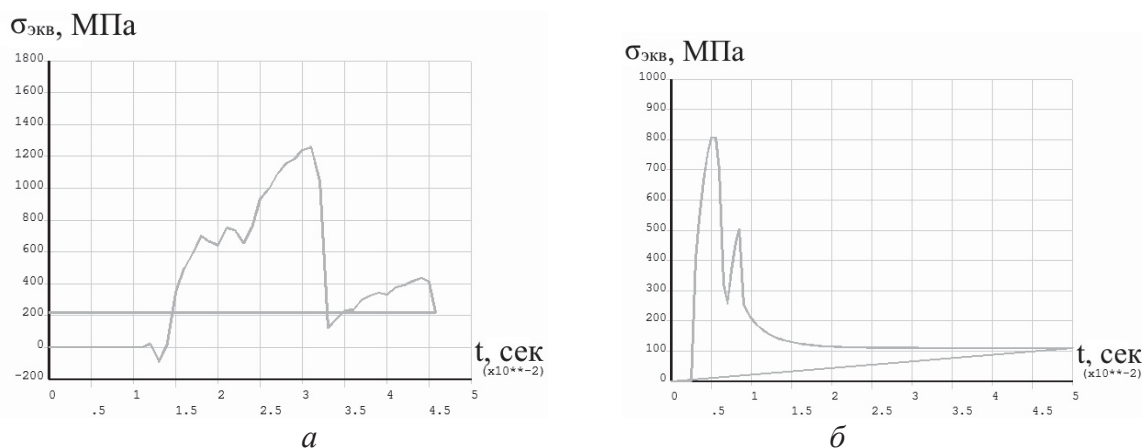
в

а – 0,003 с (касание инструмента); б – 0,004 с; в – 0,005 с.

Рисунок 7 – Картина распределения эквивалентных (по Мизесу) напряжений при кромкообразовании скользящим пуансоном в момент времени

Источник: получено авторами

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



а – при несимметричной схеме отрезки; б – при отрезке со скользящим пуансоном

Рисунок 8 – График изменения эквивалентных (по Мизесу) напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$  по времени  $t$  на режущей кромке пуансона

Источник: получено авторами

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 эпюр 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.

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 [Текст] / Г. П. Гырдымов, Л. И. Зильбург, И. Д. Савченко, В. Н. Шалышин. – Л.: Машиностроение, 1990. – 350 с.
2. Драгобецкий, В. В. Сопоставление энергетических параметров, процессов термической и механической резки листовых заготовок [Текст] / В. В. Драгобецкий, О. Б. Марцинюк // Вісник КДПУ. – 2005. – Вип. 1 (30). – С. 64–66.
3. Драгобецкий, В. В. Количественный анализ процесса резки листового металла в штампах [Текст] / В. В. Драгобецкий, 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. Драгобецкий, В. В. Новые методы снижения работы пластической деформации в операциях пробивки и вырубки [Текст] / В. В. Драгобецкий, О. Б. Марцинюк // Вісник КДПУ. – 2005. – Вип. 1 (30). – С. 67–69.
5. Cleary, P. W. Modelling of Metal Forging Using SPH [Text] / P. W. Cleary, M. Prakash, R. Das, J. Ha // Applied Mathematical Modeling. – 2012. – Vol. 36, Issue 8. – P. 3836–3855. doi: 10.1016/j.apm.2011.11.019
6. Gerber, B. Making an impact. [Text] / B. Gerber, T. C. Yang // ANSYS Advantage. – 2008. – Vol. 2, Issue 4. – P. 40–42.
7. Тыняный, А. Ф. Численное моделирование контактной задачи в рамках квазистатического упругопластического деформирования в пакете AnSYS/LS-DYNA [Текст] / А. Ф. Тыняный // Журнал «Нефтегазовое дело». – 2004. – Вып. 1.



8. Илюшкин, М. В. Моделирование процессов обработки металлов давлением в программе ANSYS/LS-DYNA. Учебно-методическое пособие [Текст] / М. В. Илюшкин. – Ульяновск: УлГУ, 2012 – 91 с.
9. Криворучко, Д. В. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів: навчальний посібник [Текст] / Д. В. Криворучко, В. О. Залога, 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 [Text] / 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 [Text] / 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 [Text] / 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 [Text] / 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

**Vladimir Khorolskyi, assist., Shlyk Sergii, Assos. Prof., PhD tech. sci.**

*Kremenchuk Mykhailo Ostrohradysi National University. Kremenchuk, Ukraine*

#### **The process of chamfering sharp in dies for strengthening the welded joints in the agricultural machinery**

The purpose of the work is to carry out the calculation of the stress-strain state of the "knife-bar" in the process segments using the above two schemes, and choose a more rational scheme.

In this work the optimal parameters of the models parts finite element analysis, rational scheme forming edge selected on the basis of the smallest loads acting on the tool, set the effect of the geometry and direction of movement of the cutting parts of the above schemes on the quality of the bevel. The calculations were performed using the software package ANSYS / LS-DYNA. For this calculation schemes were drawn up models to determine the optimum parameters of parts models and types of contact interaction.

Based on the equivalent stress diagrams and graphs of the voltage at the cutting edges concluded higher loads acting on the cutting edge in the case of circuits with unbalanced loading. It has been found that the use of stamps with the sliding punch avoids the formation of burrs on the workpiece and the corrugations characteristic circuit with an asymmetric loading.

**cutting stamp, stress-strain state, the sliding punch, finite element method**

Одержано 16.09.15