

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ФОРМОВКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕСТКОСТИ ТОЛСТОЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК**А. А. Черныш**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: chernysh72@mail.ru

Рассмотрен процесс формовки-вытяжки элементов рельефа плоских крупногабаритных деталей с применением технологических элементов управления напряженно-деформированным состоянием заготовки. Проведены компьютерные исследования с помощью методов конечных элементов, которые показали практически полное совпадение экспериментальных и расчетных данных. Приведены результаты компьютерного моделирования процесса формовки и результаты расчетов кинематических и силовых параметров при формовке и обтяжке укороченным пуансоном. Установлено, что при использовании укороченного пуансона напряжение в зоне сопряжения рифта снижается на 18 %, а интенсивность деформации на 2-3 %, что позволяет устранить разрушение заготовки и образование гофр. Получены зависимости поэтапной деформации заготовки в зависимости от расстояния между соседними рифтами. Представлены поэтапные деформации элементов заготовки полученные из экспериментальных результатов и их сопоставления с расчетными.

Ключевые слова: формоизменение, листовая штамповка, рифт, гофры, свободный изгиб.

КИНЕМАТИЧНІ ТА СИЛОВІ ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЖОРСТКОСТІ ТОВСТОЛИСТОВИХ ЗАГОТОВОК**А. А. Черныш**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна, E-mail: chiernysh72@mail.ru

Розглянуто процес формування-втягування елементів рельєфу пологих товстолистових великогабаритних деталей з використанням технологічних елементів керування напружено-деформованого стану матеріалу заготовки. Проведені дослідження показали, що максимальні напруження здвигу сконцентровані в зоні законцовці рифту, а максимальні радіальні напруження – в середині стінки рифту. Максимальні окружні напруження сконцентровані в центральній зоні рифту. Встановлено, що відсутність ознак браку на відштампованій заготовці досягалася за тиску притискання 32-36 % від деформувального зусилля із застосуванням пуансонів, довжина яких відповідала довжині прямолінійного рифту без закінцівки. Проведені комп'ютерні дослідження за допомогою методів кінцевих елементів, які реалізовані в розробленій програмі та програмному комплексі ANSYS. При розробці програми координати вузлів діляльної сітки були пов'язані з кінцево-елементною сіткою, та корегувались коефіцієнтами мультиплекс-елементів. При моделюванні в стандартному пакеті вузли координатної сітки розглядалися як опорні точки для кінцево-елементної сітки. Приведені результати комп'ютерних досліджень процесу формування, формування укороченим пуансоном та обтягуванням укороченим пуансоном. Представлені графіки переміщень. Встановлено, що формування укороченим пуансоном дозволяє зменшити напруження в зоні сполучення рифту на 18 %, а інтенсивність деформації на 2-3 %, що дозволяє усунути руйнування на цій ділянці заготовки. При обтягуванні по пуансону рівень інтенсивності напружень у вершині рифта зменшуємо на 20-24 %. Одночасно зменшується величина стискаючих напружень на 15-20 % та виключається утворення гофрів на пологих ділянках заготовки. Отримано залежності поэтапної деформації в залежності від відстані між сусідніми рифтами. Представлені поэтапні деформації для окремої ділянки заготовки. Отримані дані використовуємо для формування інтерполюючої функції у методі кінцевих елементів.

Ключові слова формо зміння, листове штампування, рифт, гофри, вільний вигін.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Современное машиностроение характеризуется непрерывным усложнением изделий, постоянно возрастающими требованиями к их надежности, качеству и технико-экономическим показателям.

В номенклатуре листовых деталей, выпускаемых вагоностроительными и автомобильными предприятиями, в связи с производством бронетехники возникла большая потребность в толстолистовых деталях, изготавливаемых из конструкционных и специальных сталей. Значительная часть этих деталей содержит элементы жесткости. В процессе освоения производства этих деталей столкнулись с определенными трудностями, связанными с неустойчивостью процесса формообразования, недостаточностью имеющегося оборудования усилия штамповки, возникновением гофр и нарушением целостности материала заготовки при деформации [1-3].

Поэтому для освоения производства новой номенклатуры деталей в кратчайшие сроки необходимо создание научно обоснованных рекомендаций для проектирования технологических процессов, штампов, оснастки и инструмента. Не менее важным является разработка, совершенствование методов расчета и моделирования процессов формоизменения крупногабаритных толстолистовых деталей с элементами жесткости.

В листоштамповочном производстве при технологической подготовке производства новых изделий, расширения их сортамента в области неосвоенных форм большое внимание уделяется поиску путей использования имеющегося оборудования, разработке новых и перспективных технологических процессов на производстве, обеспечению необходимой производительности и энергоемкости процессов [4, 5].

Поэтому актуальными являются вопросы, связанные с внедрением новых способов формоизменения и технологических процессов, позволяющих расширить технологические возможности оборудования и обеспечить его высокую экономическую эффективность.

Особенно перспективным оказывается использование новых способов штамповки и процессов, где широкое применение получили новые формы изделий и получения которых на имеющемся оборудовании не позволяет выполнить программу выпуска или требуют значительных материальных затрат [6, 7].

В первом случае возникает необходимость приобретения дополнительного оборудования, модернизации имеющегося оборудования или использования методов штамповки, обладающих высокой мобильностью и не требуют специального оснащения, путем ограничения очага деформации и, как результат, снижение деформируемых усилий и повышения устойчивости процесса деформирования. Последнее направление связано с использованием импульсных источников энергии, которые значительно расширяют возможности производства нового сортамента изделий, обеспечивают его высокую экономическую эффективность и сроки производства [8, 9].

На основании изложенного следует отметить, что задача совершенствования технологии формоизменения толстолистовых крупногабаритных деталей с элементами жесткости путем ограничения очага деформации и разработки способов снижения деформируемых усилий является актуальным.

Цель работы – разработка методики эксперимента для оценки достоверности расчетной модели упруго-пластического деформирования толстолистовых деталей с элементами жесткости, определение предельных параметров технологического процесса, соответствующих напряженно-деформируемого состояния материала заготовки, которое гарантирует отсутствие признаков брака на готовом изделии.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В Украине существует большая потребность в вагонах для перевозки сыпучих материалов. Ряд частных предприятий, а именно КрВЗ, являлись производителями этих вагонов, а Карловский машиностроительный завод и КрАЗ занялись изготовлением наиболее массовой детали вагонов – «Крышка люка».

До настоящего исследования процесс формоизменения детали «Крышка люка» для вагонов, перевозящих сыпучие материалы, не был освоен. Даже на Крюковском вагоностроительном заводе при холодной формовке на гидравлическом прессе усилием 5000 т (50 МН) процесс формовки вызывает значительные трудности. Причина – запредельные деформации в вершине рифта [10].

Для устранения этого дефекта было предложено выполнять сварную вставку (рис. 1) или разрез по гофру.

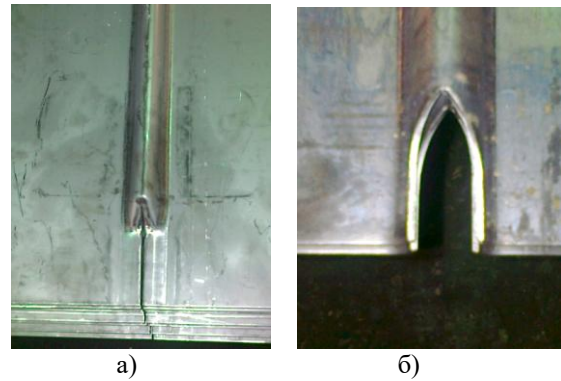


Рисунок 1 – Методы устранения дефектов при штамповке:
а) разрез по гофру; б) сварная вставка

Это существенно увеличило трудоемкость изготовления детали и снизило производительность. На ряде предприятий делались попытки взамен процесса формовки использовать процесс обтяжки по пуансону элемента жесткости. Процесс оказался чрезвычайно неустойчивым. Происходило образование гофр на плоских элементах заготовки.

Таким образом, основной проблемой при рельефной формовке прямолинейных рифтов является потеря устойчивости (гофрообразование) при малых упругопластических деформациях [3].

Поэтому задачей исследования является изыскание путей повышения устойчивости процесса и снижения деформирующих усилий.

Для решения этой задачи были проведены экспериментальные исследования по определению технологических возможностей процесса формовки – вытяжки элементов рельефа пологих крупногабаритных деталей с применением технологических элементов управления напряженно-деформированным состоянием заготовки [3].

Проведенные исследования показали, что максимальные сдвиговые напряжения сосредотачиваются в зоне законцовки рифта, а максимальные радиальные напряжения – у середины рифта стенки в зоне нижнего торца фланца. Зона максимальных радиальных напряжений сосредотачивается по периметру рифта.

Максимальные окружные напряжения сосредотачиваются в центральной зоне рифта.

Отсутствие признаков брака на отштампованной заготовке достигалось при давлении прижима составляющем 32–36 % от деформирующего усилия при применении пуансонов, длина которых соответствовала длине прямолинейного рифта без законцовки. Свободно деформированный участок законцовки прямолинейного рифта при штамповке укороченным пуансоном по своей геометрии соответствовал чертежу детали в пределах допусков [3].

Параллельно с экспериментальными работами проведены компьютерные исследования с помощью метода конечных элементов, реализованного в разработанной программе и программном комплексе ANSYS. При разработке программы имелась возможность связать координаты узлов делительной сетки с конечно элементной и корректировать коэффициенты мультиплекс элементов по результатам

експериментальних даних. В програмному пакеті ANSYS використання квадратної сітки неможливо, т. к. в стандартному пакеті використані двумірні симплекс-елементи. Для того, чтобы границы элементов были параллельны координатным осям, необходимо применять мультиплекс-элементы, использующие полиномы с членами более высокого порядка. При моделировании в стандартном пакете узлы делительной сетки рассматри-

ваються как опорные точки для конечно элементной сетки.

На рис. 2, 4, 6 представлены векторы направления перемещений конечно элементных узлов заготовки, схема нумерации точек проб перемещений, поле деформаций и положение точек проб после деформации. Графики перемещений показаны на рис. 3, 5, 7.

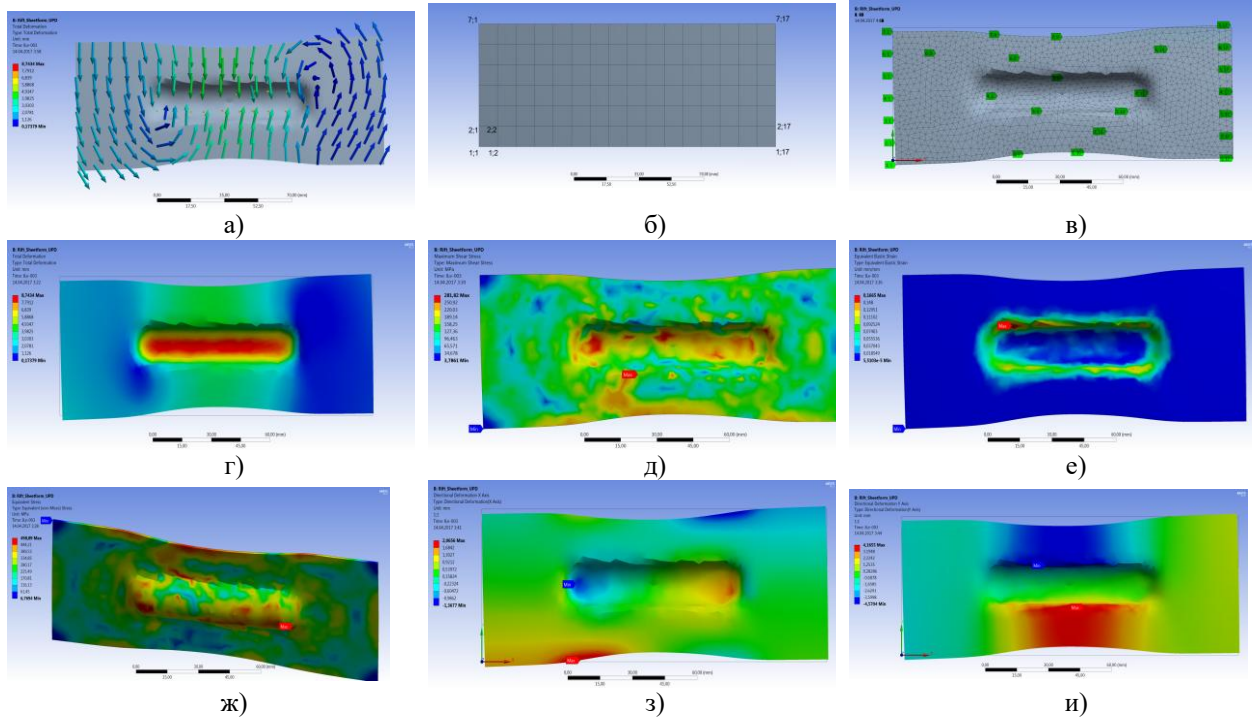


Рисунок 2 – Результаты компьютерных исследований процесса формовки:

- а) векторы направления перемещений узлов заготовки; б) схема нумерации точек проб перемещений узлов заготовки; в) положение некоторых точек проб после деформации; г) общие деформации отштампованной заготовки, мм; д) эпюры эквивалентных напряжений, МПа; е) эпюра напряжений сдвига, МПа; ж) эпюра упругих деформаций; з) эпюра скорости перемещений узлов сетки вдоль оси X, мм/с; и) эпюра перемещений вдоль оси X, мм

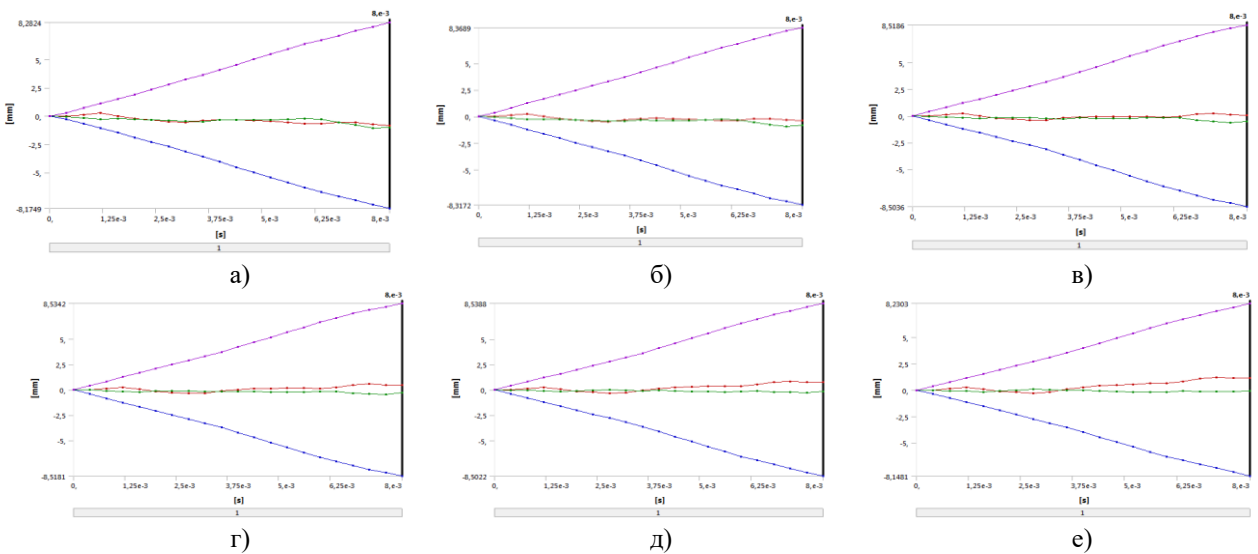


Рисунок 3 – Графики перемещений: а) точка 4, 6; б) точка 4, 7; в) точка 4, 8; г) точка 4, 9; д) точка 4, 10; е) точка 4, 11

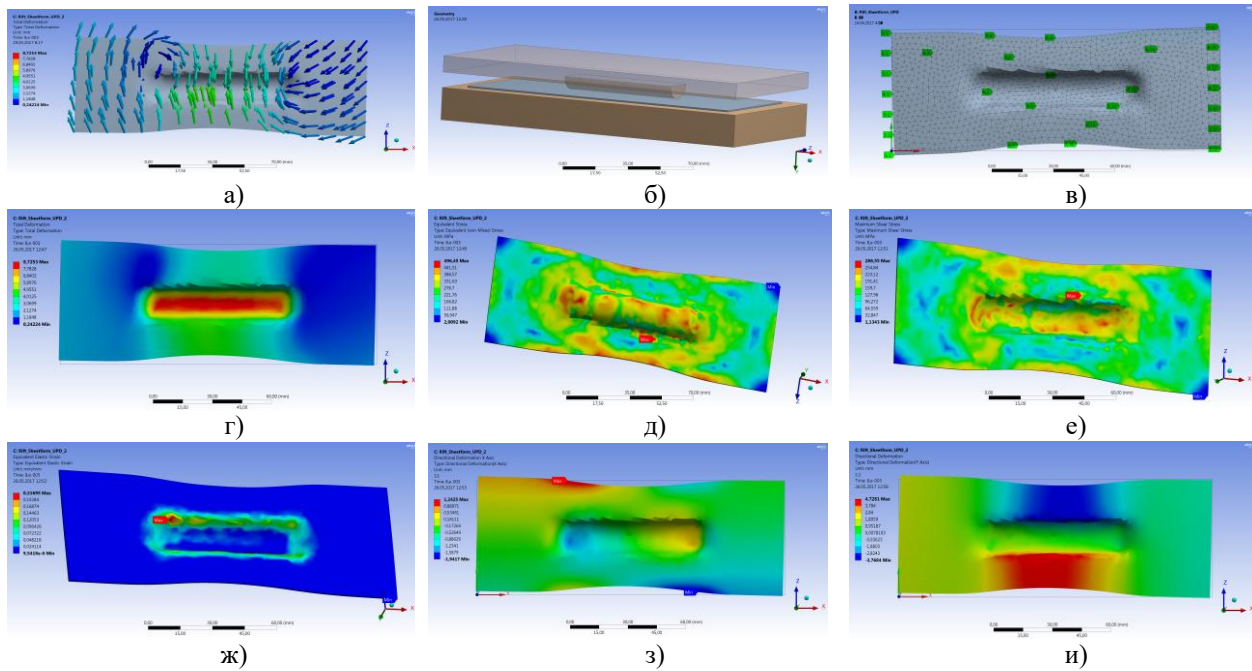


Рисунок 4 – Результаты компьютерных исследований укороченным пуансоном при формовке: а) векторы направления перемещений узлов заготовки; б) объемная модель; в) положение некоторых точек проб после деформации; г) общие деформации отштампованной заготовки, мм; д) эпюры эквивалентных напряжений, МПа; е) эпюра напряжений сдвига, МПа; ж) эпюра упругих деформаций; з) эпюра скорости перемещений узлов сетки вдоль оси X, мм/с; и) эпюра перемещений вдоль оси X

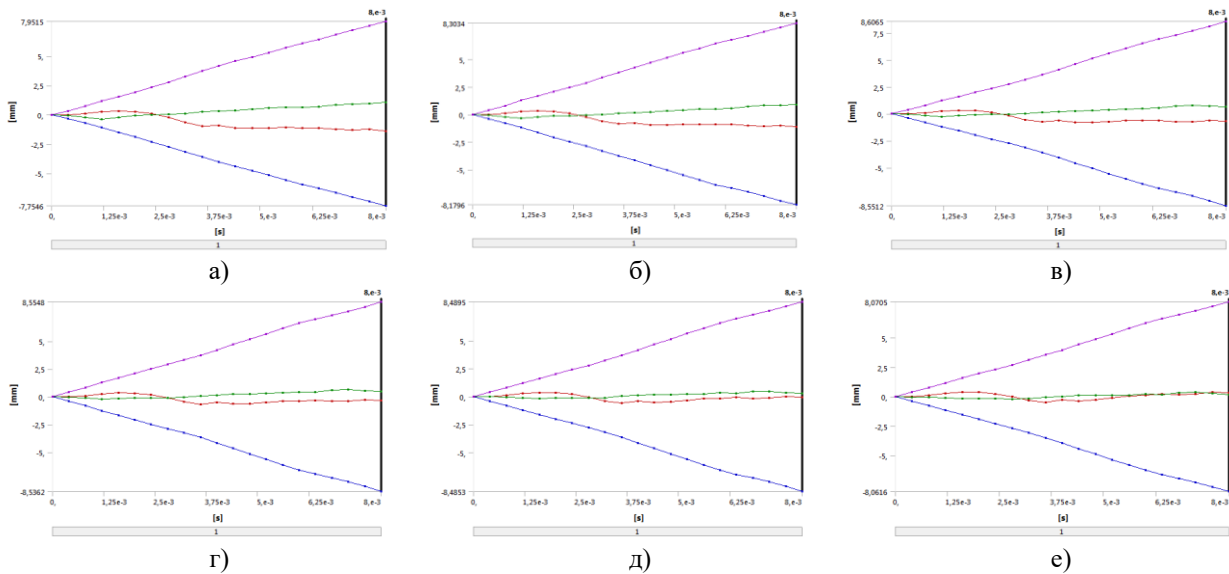


Рисунок 5 – Графики перемещений укороченным пуансоном при формовке: а) точка 4, 6; б) точка 4, 7; в) точка 4, 8; г) точка 4, 9; д) точка 4, 10; е) точка 4, 11

Сопоставление результатов моделирования показало практически полное совпадение экспериментальных и расчетных данных с точностью до знака после запятой. Формовка укороченным пуансоном позволяет снизить напряжения в зоне сопряжения рифта на 18 %, а интенсивность деформаций – на 2–3 %. Это позволяет устранить разрушение на этом участке заготовки, при этом форма поверхности законцовки рифта вне контакта с инструментом практически совпадает с поверхностью, полученной при формовке жестким инструментом. При обтяжке по

пуансону уровень интенсивности напряжений в вершине рифта снижается на 20–24 %. Зона возможного разрушения снижается на участок радиуса сопряжения плоского участка с цилиндрическим. При этом снижается величина сжимающих напряжений на 15–20 % и исключается образование гофр на плоских участках заготовки.

В более простой постановке, принимая, то, что два соседних элемента определяют изменение деформированного состояния, возможно использование аппроксимирующих полиномов n -ой степени.

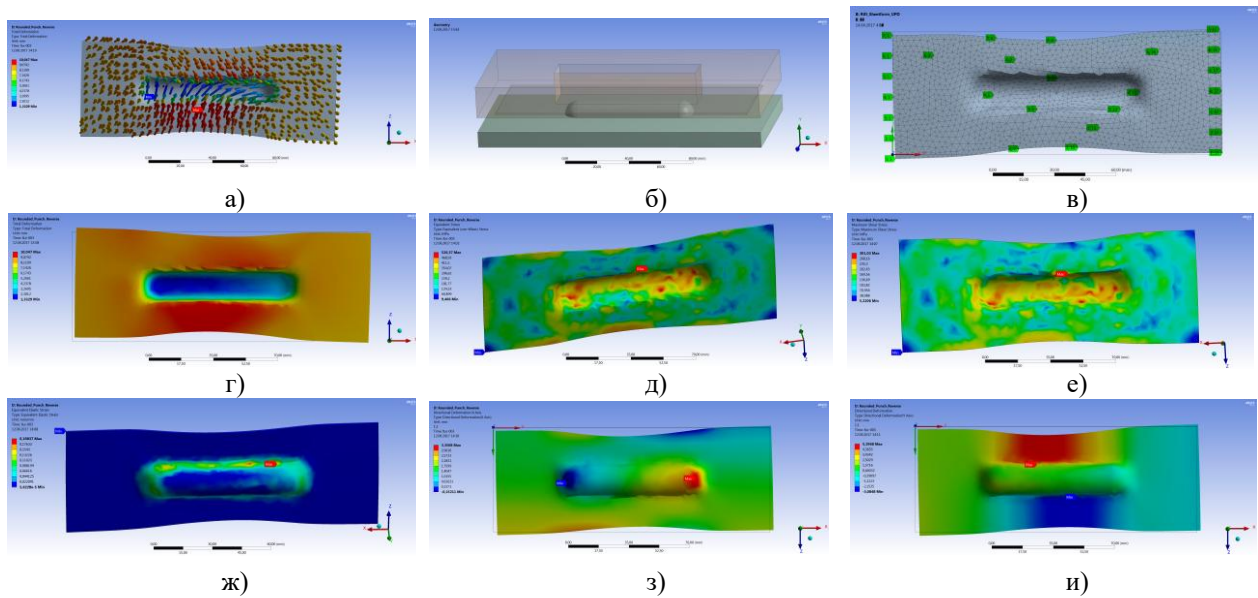


Рисунок 6 – Результати комп'ютерних досліджень укороченим пуансоном при обтяжці:
 а) векторы направлений перемещений узлов заготовки; б) объемная модель; в) положение некоторых точек проб после деформации; г) общие деформации отштампованной заготовки, мм; д) эпюры эквивалентных напряжений, МПа; е) эпюра напряжений сдвига, МПа; ж) эпюра упругих деформаций;
 з) эпюра скорости перемещений узлов сетки вдоль оси X, мм/с; и) эпюра перемещений вдоль оси X

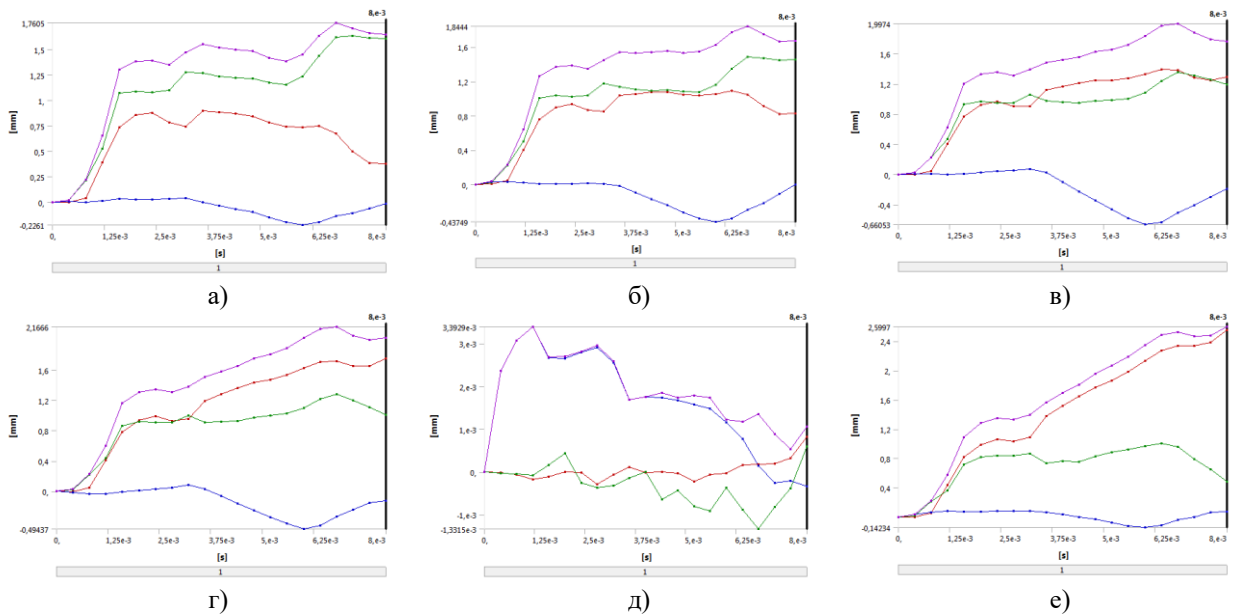


Рисунок 7 – Графики перемещений укороченим пуансоном при обтяжці: а) точка 4, 6; б) точка 4, 7; в) точка 4, 8; г) точка 4, 9; д) точка 4, 10; е) точка 4, 11

Протяженність участка, на котором расположены деформированные элементы, принимаем равным B – половине расстояния между рифтами. Измеряемые деформации определяются выражениями:

$$\varepsilon_{11} = \ln \frac{\Delta x^0}{\Delta x_{11}}; \quad \varepsilon_{22} = \ln \frac{\Delta x^0}{\Delta x_{22}}; \quad \varepsilon_{12} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где Δx^0 – размеры элемента координатной сетки в направлении оси x_{11} и x_{22} до деформации; Δx_{11} , Δx_{22} – размеры элементов координатной сетки в

направлении x_{11} и x_{22} на данном этапе деформации; α – угол искажения первоначально прямого угла элемента.

Определив для каждого этапа деформации, получаем зависимости:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \varphi_{11}(B); \\ \varepsilon_{22} &= \varphi_{22}(B); \\ \varepsilon_{12} &= \varphi_{12}(B). \end{aligned} \quad (2)$$

Взяв производные постоянных зависимостей, получаем зависимость поэтапных деформаций в зависимости от B .

Для восьмого столбца распределение деформаций для $\varepsilon_{11} \approx 0$, для $\varepsilon_{12} \approx 0$; график зависимости $\varepsilon_{22} = \varphi_{22}(B)$ представлен на рис. 8. Его аппроксимация по методу наименьших квадратов квадратным трехчленом приводит к выражению:

$$\varepsilon_{22} = -0,0033x_u^2 + 0,049x_{11} - 0,1742. \quad (3)$$

Аппроксимация логарифмической функцией имеет вид:

$$\varepsilon_{22} = 0,0736\ln(x_{11}) - 0,1332. \quad (4)$$

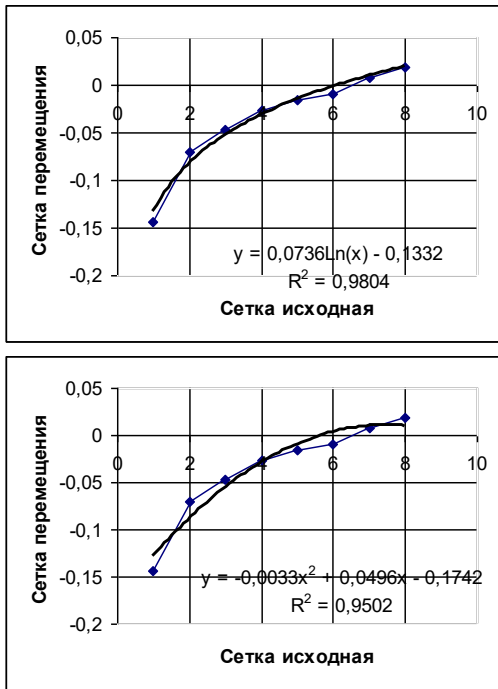


Рисунок 8 – Распределение поэтапных деформаций для точек восьмого столбца

В первом случае среднеквадратичная ошибка (выборочное среднеквадратичное отклонение) составляет $R^2 = 0,9502$. Во втором случае получается более точная аппроксимация – $R^2 = 0,9804$.

Полученные данные используем для формирования интерполирующих функций в методе конечных элементов.

ВЫВОДЫ. Анализ НДС показал, что картина распределения напряжений соответствует распределению деформаций.

Максимальные сдвиговые напряжения сосредотачиваются в зоне законцовки рифта, а максимальные радиальные напряжения у середины рифта стенки в зоне нижнего торца фланца. Зона макси-

мальных радиальных напряжений сосредотачивается по периметру рифта

Максимальные окружные напряжения сосредотачиваются в центральной зоне рифта.

Отсутствие признаков брака на отштампованной заготовке достигалось при давлении прижима составляющем 32-36% от деформирующего усилия при применении пуансонов, длина которых соответствовала длине прямолинейного рифта без законцовки. Свободно-деформированный участок законцовки прямолинейного рифта при штамповке укороченным пуансоном по своей геометрии соответствовал чертежу детали в пределах допусков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ильющин А.А. Механика сплошной среды. – 4-е изд., перераб. и доп. М.: Ленанд, 2014. 310 с.
2. Черныш А.А. Формовка прямолинейных рифтов укороченным пуансоном. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. Вип. 1/(90), частина 2. С. 70–74.
3. Черныш А.А., Прудников Г.В., Черкаченко В.Ю., Драгобецкий В.В. Применение конечно-элементных аппроксимаций в экспериментальных исследованиях процесса формовки прямолинейного рифта. *Обработка металлов давлением*. Краматорск: ДГМА, 2013. Вып. 2 (35). С. 19–24.
4. Ковалёв В.Г., Ковалёв С.В. Технология листового штамповки. Технологическое обеспечение точности и стойкости. М.: КНОРУС, 2010. 224 с.
5. Голенков В.А., Дмитриев А.М., Кухарь В.Д., Яковлев С.П. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением. М.: Машиностроение, 2004. 464 с.
6. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью. М.: Машиностроение, 1967. 368 с.
7. Астапов В.Ю., Джоздани М.С., Попов А.П. Экспериментальное определение формообразования профиля окантовок из листового материала воздействием импульсного магнитного поля. *Кузнечно-штамповое производство. Обработка металлов давлением*. Москва: МГТУ, 2011. № 8. С. 9–12.
8. Weidemann C. The blank holding action of draw beads. “Sheet metal Forming and Formability. Proc. IDDRG 10 Bienn. Congr., Warnick, 1978”, Red-hill, 1978, pp. 79–85.
9. Драгобецкий В.В. Пути повышения деформируемости слоистых металлических заготовок при обработке давлением. *Вісник Кременчуцького національного університету*, 2005. Вип. 1/(30). С. 53–56.
10. Осадчий В.Я. Боброва Т.А, Афанасьев Е.Ф. Технологические параметры предельной формовки листового металла. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1991. № 12. С. 16–17.

KINEMATIC AND POWER PARAMETERS OF THE PROCESS OF THE THICK PLATES STIFFENERS FORMING

A. Chernysh

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: chiernysh72@mail.ru

Purpose. To develop the experimental technique for evaluating the reliability of the calculation model of the elastic-plastic deformation of thick sheet parts with stiffening elements, determining the limiting parameters of the process corresponding to the stress-strained state of the blank material, which guarantees the absence of reject on the finished product. **Methodology.** Based on the methods of the variational calculus, as well as joint solution of the equations of equilibrium of the rift ending element and plasticity the possibility of forming the rift endings with a shortened punch in conditions when a part of the ending of the rift is freely deformed out of contact with the forming tool is scientifically substantiated. It allowed to avoid the formation of folds on the flat elements of the workpiece and material rupture of the rift ending. **Results.** It is determined that the signs of reject on the stamped blank are eliminated at the clamping pressure, which is 32–36 per cent of the deforming force. The formation of corrugations (loss of stability) on the flat elements of the workpiece occurs when the end of the relief is formed with a shortened punch. The analysis of the stress-strained state during the forming with a shortened punch and the punch, the length of which corresponds to the length of the longitudinal relief is presented. The zones of the maximum shear (tangential) and normal stresses are determined. **Originality.** In modeling the embossing in the standard ANSYS package complex the points of the dividing grid, marked on the experimental samples were connected with the reference points of the finite element model. A further development of the method of the numerical analytical calculation of the stress-strained state of elements of the rift using a single differential equation is possible. In this study during the processing of the experimental results the finite element approximation was used. This allowed to exclude the measurements of the numerical values of the mesh sizes directly on the sample and to analyze the digital picture of the area under study. The measurements of the coordinates of the grid nodes were implemented in the Autocad program after photographing the grid. **Practical value.** The quantitative evaluation of the experimental data from the forming with a shortened punch was carried out with the help of the methods of mathematical statistics.

Key words: forming, stamping, rift, flutes, free bending.

REFERENCES

1. Ilushkin, A.A. (2014), *Mehanika sploshnoy sredy* [Continuum mechanics], Lenand, Moscow, Russia.
2. Chernysh, A.A. (2015), "Forming straight rifts by a shortened punch", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenchug*: KRNU, vol.1 (90), pp. 70–74.
3. Chernysh, A.A., Prudnikov, G.V., Cherkashenko, V.Y., Dragobetskiy, V.V. (2013), "Application of finite element approximations in experimental researches of the rectilinear corrugation stamping" // *Materials working by pressure*, vol. 2 (35), pp. 19–24.
4. Kovalev, V.G., Kovalev, S.V. (2010), *Tehnologiya listovoy shtampovki. Tehnologicheskoe obespechenie tochnosti i stoykosti* [Technology of sheet metal forming. Technology of ensuring the precision and durability], KNORUS, Moscow, Russia.
5. Golenkov, V.A., Dmitriev, A.M., Kuhar, V.D., Yakovlev, S.P. (2004), *Spetsialnyie tehnologicheskie protsessyi i oborudovanie obrabotki davleniem* [Special technological processes and equipment of pressure processing], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
6. Isachenkov, E.I. (1967), *Shtampovka rezinoy i zhidkostyu* [Stamping rubber and liquid], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
7. Astapov, V.U., Dgozdani, M.S., Popov, A.P. (2011), "Experimental determination of the forming profile of the sheet of sheet material with a pulsed magnetic field", *Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo. Obrabotka metallov davleniem*, no. 8, pp. 9–12.
8. Weidemann, C. (1978), "The blank holding action of draw beads", *Sheet metal Forming and Formability, Proc. IDDRG 10 Bienn. Congr., Warnick, 1978*, Redhill, pp. 79–85.
9. Dragobetskiy, V.V. (2005), "Ways to improve the deformability of layered metal workpieces under pressure treatment", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Kremenchug*: KRNU, vol. 1 (30), pp. 53–56.
10. Osadchiy, V., Bobrova, T., Afanasev, E. (1991), "Technological parameters of the ultimate forming of sheet metal", *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*, no. 12, pp. 16–17.

Стаття надійшла 23.04.2018.