

## СЕКЦІЯ 2

### Ресурсозберігаючі процеси пластичної обробки матеріалів

УДК 629.12

Маслей В.Н., Кулик А.С., Хорошилов В.С., д.т.н., проф., Погель В.М.

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», г. Днепр

#### ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ТЕРМОРАЗМЕРОСТАБИЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Создание размеростабильных конструкций космического назначения, соответствующих современному уровню развития ракетно-космической техники, практически невозможно без применения композиционных материалов [1]. Одним из основных требований к специальному классу конструкций космических аппаратов, предопределяющих их работоспособность и эксплуатационную эффективность, является сохранение заданных размеров при изменении температуры окружающей среды и других факторов космического пространства [2].

Процесс создания конструкций из композиционных материалов включает в себя несколько этапов, одним из которых является выбор конструктивно-силовой схемы конструкции и материала, расчет схем армирования по известным физико-механическим характеристикам монолоя, расчет физико-механических характеристик конструкции, а также подтверждение расчетных значений свойств конструкции, т.е. проведение испытаний на прочность, жесткость и терморазмеростабильность [3].

Из-за ярко выраженной анизотропии физико-механических свойств композиционных материалов, при проектировании терморазмеростабильных конструкций необходимо тщательно анализировать действие температурных нагрузок на конструкцию и рассчитывать такие схемы армирования, исходя из требований к каждой конкретной детали. Можно подобрать схему армирования, при которых коэффициент температурного расширения будет отрицательным в заданном направлении, но при этом следует учитывать, что в остальных направлениях он будет значительно больше, как в случае с разработкой терморазмеростабильной конструкции тубуса оптического прибора [4].

В соответствии с таким подходом задачи проектирования терморазмеростабильных конструкций космических аппаратов из полимерных композиционных материалов включают в себя три основных типа [5, 6, 7]:

- одноосные задачи размеростабильности;
- двухосные задачи размеростабильности;
- особые концепции размеростабильности.

Оптимизация схемы армирования и подбор материалов позволяют получать близкий к нулю коэффициент температурного расширения всей конструкции.

Как было сказано выше, при создании терморазмеростабильной конструкции, следует проводить еще и испытания на терморазмеростабильность. Это один из важнейших этапов создания конструкций, поскольку часто даже при правильном выборе проектных параметров и конфигурации конструкции сложно доказать экспериментально ее физико-механические свойства в части температурных деформаций в определенных узких диапазонах рабочих температур [3]. На данный момент разработан метод испытаний, который поз-

воляет определять температурные деформации и поведение конструкции при температурном воздействии с точностью 0,5 мкм для линейных перемещения объектов контроля и 0,5 угл. сек – для их поворотов. Разработанный метод определения терморазмеростабильности конструкций основан на использовании лазерно-оптических устройств.

Таким образом, на данный момент в ГП «КБ «Южное» существует полный цикл по созданию терморазмеростабильных конструкций, к которым предъявлены жесткие требования в части сохранения прочности и жесткости при воздействии температур.

#### Список литературы

1. Кулик А.С. Проектирование размеростабильных оболочечных конструкций из композиционных материалов / А.С. Кулик, В.В. Кавун, С.И. Москалев, А.Ф. Санин, А.П. Щудро // «Юдина і космос»: зб. тез ХVIII Міжнар. молодіжної наук.-практ. конф., 6-8 квітня 2016 р. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 392.
2. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов [Текст] / Г.А. Молодцов, В.Е. Биткин, В.Ф. Симонов и др. – М.: Машиностроение, 2000. – 357 с.
3. Кулик А.С. Исследование коэффициента температурного расширения оболочечной конструкции из углепластика / А.С. Кулик, В.В. Кавун, С.И. Москалев, А.Ф. Санин, Ю.В. Сохан, А.П. Щудро // Сборник тезисов 16 Украинской конференции по космическим исследованиям – Одесса, 2016. – С.112.
4. Кулик А.С. Проектирование размеростабильных оболочечных конструкций из композиционных материалов / А.С. Кулик, М.Т. Добрушина, В.В. Кавун та ін. // Механіка гіроскопічних систем. – 2016. – №31. – С. 115–120.
5. Зиновьев, П.А. Предельные возможности многослойных композитных структур [Текст] / П.А. Зиновьев, А.А. Смердов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1994. – № 1. – С. 7–17.
6. Зиновьев, П.А. Предельные возможности композитных структур [Текст] / П.А. Зиновьев, А.А. Смердов // Вестник МВТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. – 2005. – Спец. выпуск. – С. 106–128.
7. Проектирование формостабильных структур из полимерных композиционных материалов для конструкций космического назначения / А.В. Кондратьев, В.В. Кириченко, канд. техн. наук, М.Е. Харченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – 2014. – Вып. 1. – С. 7-14. – Режим доступа: [http://nbnv.gov.ua/UJRN/Prvk\\_2014\\_1\\_3](http://nbnv.gov.ua/UJRN/Prvk_2014_1_3)

УДК 621.98.044

Тітов В.А., д.т.н., проф., Гараненко Т.Р., ас., Злочевська Н.К., к.т.н., ас., Кліско А.В., ас.  
«КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

### РОЗРОБКА ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ЛОПАТОК ГТД З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

Існує багато різних способів завдяки яким визначаються якісні характеристики металу. Пластичність металу можна визначити по найбільшій деформації при випробуваннях на розтяг. В першу чергу, напружений стан впливає на поведінку металу в процесі штампування. Проте, ствердження, що пластичність металу при двохсторонньому розтязі менша, ніж при односторонньому розтязі, являється помилковим. При двохсторонньому розтязі можлива найбільша критична деформація значно більша, ніж при простому розтязі [1, 2, 3, 4].

Рівномірний двохсторонній розтяг можливо спостерігати при формоутворенні мембрани газозовим середовищем, край якої затиснутий по периферії.

Випробування на двохсторонній розтяг проводиться на експериментальній установці, яка призначена для газотермічної формовки зразків 126мм, діаметр видування -  $d = 90\text{ мм}$ , радіуси на матриці -  $r = 2,5\text{ мм}$ .

Пристрій для формоутворення (рис. 1.) складається з матриці 1 і прижимів 2. Заготовка 3 зафіксована прижимом 2 в матриці 1. Порожнина 4 прижимом 2 з'єднана з трубопроводом 5. В центрі матриці 1 знаходиться шток 6. Один кінець штока 6 спрямований до заготовки 3, а інший до штоку 8.

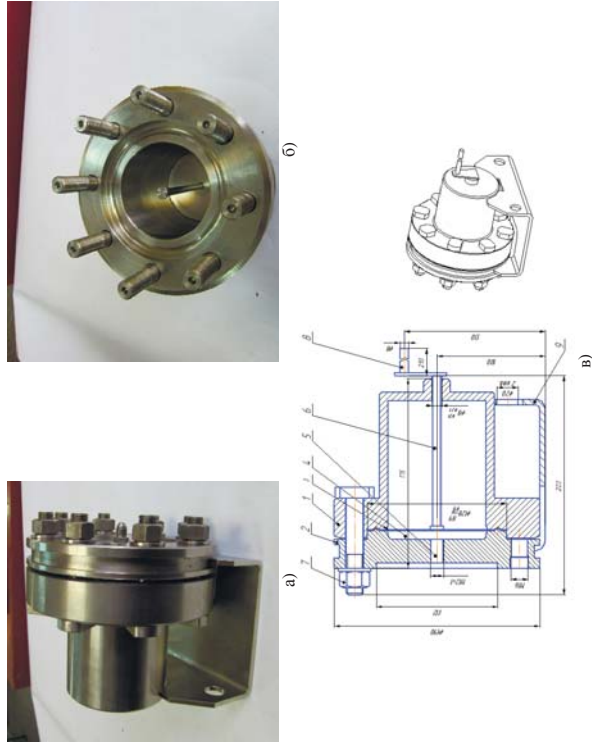


Рис. 1. Установка деформування мембрани з титанових сплавів:  
а – загальний вид; б – формуюча порожнина; в – креслення пристрою.

Заготовку 3 фіксують в матриці 1 прижимом 2 та болтовими з'єднаннями 7, забезпечуючи герметичність порожнини 4. Шток 6 і шток 8 фіксують етап формовки. Пристрій на підставці 9 встановлюємо у ліч. Після нагріву пристрою до ізотермічних умов в порожнину 4 прижимом 2 подається надмірний тиск газу (аргону), який забезпечує деформацію зразка.

Експериментальна установка включає нагрівальну систему, систему подачі тиску, пристрій для формоутворення, та набір трубок, які з'єднують елементи.

Використовуємо високотемпературне змащення нітрид бора, яке має високу температуру плавлення, високу стійкість до окислення та до впливу різних агресивних середовищ, легко дисоціює.

Протягом всіх експериментів, через кожну хвилину фіксується переміщення штоку. Завдяки цьому можна побудувати залежність формоутворення мембрани від часу та тиску, виявити динаміку зміни форми поверхні мембрани в залежності від глибини.

Використовуючи оптичний 3D-сканер Amos можна отримати повний аналіз всіх розмірів оболонки: розподіл товщин та радіусів (рис. 2.).

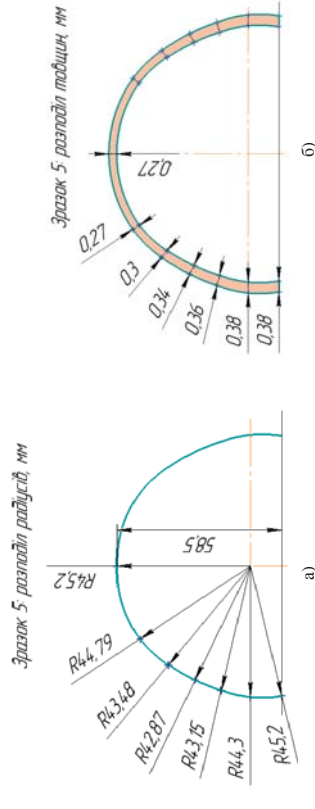


Рис. 2. Результати дослідження:  
а – розподіл товщин; б – розподіл радіусів.

Розроблена комплексна методика для експериментальних випробувань формоутворення в умовах надпластичності, яка дозволяє визначити технологічні режими та параметри процесу виготовлення тонкостінних виробів. На основі результатів експериментальних випробувань встановлено, що нерівномірне потоншення мембрани при формоутворенні приводить до різновисхідності стінок купола оболонки. Підвищення граничного значення накопиченого ступеня деформації супроводжується розривом матеріалу в верхній купола. Для отримання високого купола необхідно регулювати тиск подачі газу, забезпечувати швидкість деформації в інтервалі надпластичного формоутворення, що зменшує різновисхідність стінок та збільшує округлість отриманої оболонки.

### Список літератури

1. Томленов А.Д. Исследования в области обработки металлов давлением / А.Д.Томленов. – М.: изд-во академии наук СССР, – 1960. – с. 67.
2. Щеглов Б.А. Расчеты динамических осесимметричных процессов формообразования тонкостенных деталей / Б.А. Щеглов // Расчеты пластического деформирования металлов. – М.: Наука. – 1975. - с. 136.
3. Смирнов-Аляев Г.А. Экспериментальное исследование в обработке металлов давлением / Г.А. Смирнов-Аляев, В.П. Чикидовский – Л.: Машиностроение, 1972. – 360 с.
4. Исаченков Е.И. Штамповка резиной и жидкостью/ Е.И. Исаченков – М.:Машиностроение, 1967.–367 с.

UDC 621.7.044

**Knyazyev M. K., PhD, Associate Professor, Samantha Joseph, Student**  
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" – KhAI, Kharkiv, Ukraine

### EXPERIMENTAL RESEARCH OF ELECTROHYDRAULIC IMPULSE FORMING OF LARGE SHEET FITTING HALF-PIPES

Electrohydraulic impulse forming (EHF) method proved its high efficiency for manufacture of sheet parts under individual and small-batch production conditions [1]. EHF Laboratory in KhAI University possesses experimental and serial electrohydraulic presses. Fairly often the Laboratory is contracted to produce batches of sheet parts of sophisticated shapes inconvenient for manufacture by traditional "punch-and-die" method, because of big cost of "hard" tools.

Fitting sheet half-pipes are widely used in various branches of industry including aircraft engines manufacture. The half-pipe limit ratio  $h/d \leq 0.55$  (where  $d$  is diameter of half-pipe, is  $h$  depth of a formed final shape) is applied for single-step electrohydraulic deep-drawing process. According to the recommendations [2] form and sizes of initial sheet blank for EHF depend on angle and diameter of half-pipe. For  $90^\circ$  turn angle  $\alpha$  deep-drawing ratio  $K = D_{max}/d = 3.5$ , where  $D_{max}$  is maximum width of initial flat blank. Thus, for three needed  $d$  diameters 200, 250 and 300 mm the calculated parameter  $D_{max}$  is 700, 875 and 1050 mm, respectively.

Electrohydraulic deep-drawing process is greatly influenced by widths of external  $a$  and internal  $b$  flanges of initial blank. It is recommended to calculate their values from the formula

$$D_{max} = a + d + b. \quad (1)$$

Here the condition  $a/b = 0.42$  with numerical value determined from the graph [2] for the  $90^\circ$  turn angle is used. The calculation results are:  $a = 148, 185, 221$  mm and  $b = 352, 440, 528$  mm, respectively.

Experimental investigations were planned with aim to check feasibility of recommendations [2]. Tests were carried out in semi-industrial installation UEHF-2 equipped with multi-electrode discharge unit. It is worth to note that space between columns of technological unit for accommodation of tooling equals 645 mm and this value is smaller than the maximum width of initial blank even for the smallest diameter part (700 mm).

Maximum width of initial flat blank  $D_{exp}$  for tests was calculated with respect to the length of generating line of half-torus geometric body  $D_{exp} = \pi d/2 + a_f + b_f$ , where  $a_f$  and  $b_f$  are widths of external and internal flanges of the formed final shape, respectively. For three diameters selected for analysis  $D_{exp} = 485, 580, 625$  mm, respectively, which are smaller than the recommended values calculated above and gives the opportunity to conduct tests in UEHF-2 installation. The configuration and exact dimensions of sheet blanks including  $a_f$  and  $b_f$  were determined during tests performance. For example, for half-pipe of diameter 200 mm  $a_f = 50-55$  mm and  $b_f = 105-110$  mm. Tests were conducted with plain carbon steel 08kp of sheet thickness 1.2 mm.

Tests results showed that position of initial blank relative to the die cavity greatly influences success of deep-drawing process and final shape quality. Position of sheet blank before the forming is mainly determined by  $a$  and  $b$  values. Thus, for 200-mm half-pipe  $a = 110$  mm,  $b = 175$  mm and ratio  $a/b \approx 0.63$ , the latter being much larger (1.5 times) than the recommended value. Similar values were obtained for half-pipes of diameters 250 and 300 mm with ratio  $a/b \approx 0.5$  for both cases. For these dimensions small folders were observed along the half-torus quarter adjoined to internal flange in several formed parts.

Excessive width of internal flange  $b$  (with ratios  $a/b \leq 0.5$ ) can result in folding along the internal quarter of half-torus and pulling out the external flange from under hold-down plate. Therefore the authors would recommend to use the larger ratio  $a/b = (0.55-0.60)$ .

Also smaller blank widths  $D_{exp}$  were tested in comparison with the recommended values  $D_{max}$ . Tests results give reason to recommend deep-drawing ratio  $K = (2.1-2.4)$  for the turn angle  $\alpha = 90^\circ$

with smaller values  $K$  for larger diameter  $d$ .



Fig. – General view of semi-product of half-pipe with diameter 200 mm made of carbon steel 08kp of sheet thickness 1.2 mm

The materials [2] contain recommended design for the end elements of half-pipes needed for proper realisation of deep-drawing process. The authors of this paper have proposed another design with shorter length (Fig.) in order to save material of sheet blanks and material for the tooling. Thus, the recommended length [2] is determined by diameter  $d$ , and the proposed design length is  $(0.25-0.3)d$ .

Results of conducted experimental investigations allows to propose improvements for the recommended method for determination of sizes of initial sheet blank for EHF of half-pipe shapes with turn angle  $\alpha = 90^\circ$ . First of all, maximum width of blank can be reduced 1.44–1.68 times with respective decrease of deep-drawing ratio  $K$  to  $(2.1-2.4)$  to be included into the calculation method. Here also the ratio of flanges widths  $a/b = (0.55-0.60)$  is recommended for better quality. The length of initial blank may be reduced by value of  $(1.4-1.5)d$  along middle line taking into account the proposed design of the end elements. All these improvements give opportunity for significant reduction of material consumption for producing tooling and sheet blanks, saving the production costs and shortening preproduction period.

Further investigations for larger turn angles  $\alpha$  are planned with model tooling of scaled sizes.

### References

1. Чащин В.Н. Электрогидравлическая обработка машиностроительных материалов. – Минск: Наука и техника, 1978. – 184 с.
2. РТМ-1.4.449–78. Электрогидравлическая штамповка листовых деталей сложных форм. – Москва: НИИТ, 1978. – 109 с.



УДК 621.7.044 :624.941.01:658.512.011.56

Третяк В.В., к.т.н., доц.

Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна

### ВИКОРИСТАННЯ НАВЧАЛЬНИХ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ІМПУЛЬСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ СКЛАДНИХ ЛИСТОВИХ ДЕТАЛЕЙ

У конструкціях сучасних літальних апаратів складні листові деталі становлять найбільш численну групу в загальній номенклатурі виробу.

Наприклад, в авіаційних двигунах такі деталі використовуються у вузлах компресора, камері згоряння і сопловому апараті.

Технологічні процеси виготовлення зазначеної групи деталей належать до одних з найскладніших і трудомістких процесів.

Різноманітність джерел енергії, технологічних процесів і схем для імпульсної деформації заготовок дозволяє успішно реалізувати їх у різних галузях техніки.

У Національному аерокосмічному університеті ім. М.С. Жуковського «ХАІ» накопичено теоретичний і практичний потенціал для розроблення перспективних технологій імпульсного штампування.

Для виготовлення таких деталей на виробництві використовуються вибухове штампування, електрогидравлічне штампування, штампування на прес-гарматах та ін.

Зазвичай при застосуванні нових технологічних процесів необхідно виконувати велику кількість експериментів, що потребує досить значних витрат часу і ресурсів.

Традиційні методи опису в САПР конструкторсько-технологічних ознак деталей, які одержують імпульсним штампуванням, абсолютно не прийнятні для даного засобу виготовлення.

Автором розроблено метод опису складних деталей, призначений саме для розроблення процесів імпульсного листового штампування [1], який можна автономно або за допомогою сучасних САПР з доробками авторів використовувати в навчальному процесі, або при проектуванні технологічних процесів перспективних деталей [2].

Цей метод знайшов своє застосування в декількох програмних комплексах, які можуть бути використані як в навчальному процесі, так і в промислових умовах [3-10].

Програмні комплекси також можуть бути своєрідним довідником для технологів, за допомогою якого можна розробляти перспективні технології, оснащення і устаткування для імпульсних процесів.

Проектування технологічних процесів можна здійснювати методами адресації і синтезу (рис. 1).

У програмних комплексах використовується нова математична модель подання конструкторсько-технологічних ознак листових деталей, яка використовується в класифікаторі листових деталей.

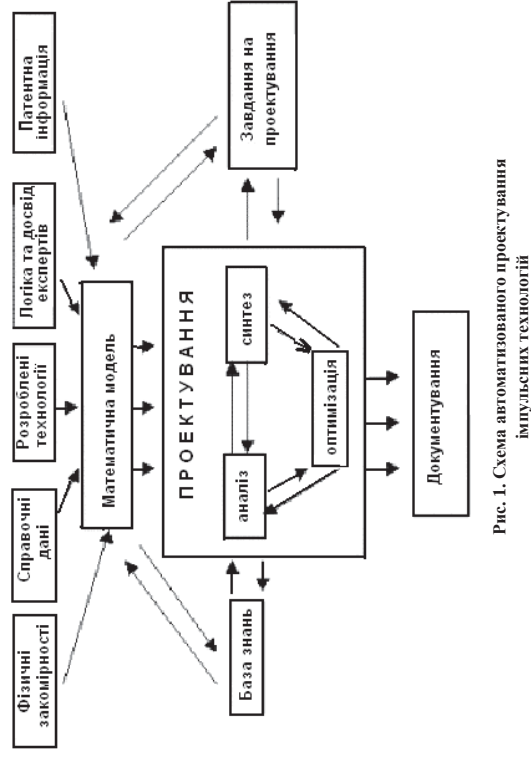


Рис. 1. Схеми автоматизованого проектування імпульсних технологій

Для розроблення технологічних процесів використовується структурно-аналітичний метод розпізнавання подоби (рис.3), реалізований у програмних комплексах КОД-Т [3] та «Класифікатор» [4].

Для роботи з різноманітними даними використовуються сучасні бази знань, реалізовані в САПР СПРУТ ПП. Для роботи з патентною інформацією використовуються програмні комплекси, що застосовують методи автоматизованого вирішення винахідницьких задач, та методи проектування без прототипів[5-8].



Рис. 2. Фрагмент опису складної листової деталі її 3-D вид в сучасній САД системі

УДК 519.688.531.3.539.4, 539.3/6, 539/4

Розов Ю.Г., д.т.н., проф.  
Херсонський національний технічний університет, г. Херсон

### МЕТОДИКА ІСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА В РАСЧЁТАХ НА ПРОЧНОСТЬ С УЧЁТОМ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ

**Введение.** Альтернативой аналитическим и экспериментальным методам расчётов на прочность являются методы компьютерного моделирования. Из многообразных методов компьютерного моделирования [1] на сегодня наиболее широкое применение получили модели на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Однако вполне обоснованно встаёт вопрос о достоверности полученных с использованием МКЭ результатов.

**Цель работы** – разработать методику использования и алгоритм проведения численного анализа, основанного на компьютерном моделировании с использованием МКЭ, в расчётах на прочность конструкций (деталей) с учётом концентраторов напряжений.

Расчёт на прочность с учётом концентраторов напряжений может производиться аналитическими, численными методами (например, МКЭ) и экспериментально. Использование МКЭ-анализа особенно эффективно в случаях, когда традиционные методы расчётов затруднительны или, более того, невозможны. В современных конечно-элементных комплексах (в том числе ANSYS [2]) исследование концентраторов напряжений может быть произведено путём построения модели с помощью конечно-элементной сетки и нередко с применением её локального сгущения (рис. 1).

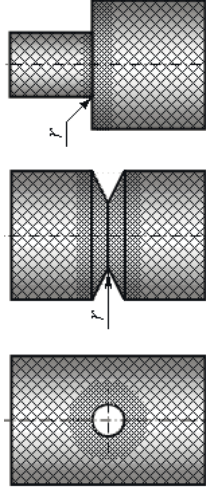


Рис. 1. Конечно-элементная модель с локальным сгущением КЭ-сетки

Для создания корректной КЭ-модели с гарантированным адекватным результатом, необходимо определиться с критериями выбора формы и значения характерного размера конечного элемента для будущих расчётов. Предлагается использовать следующие критерии:

- 1) максимальный размер конечного элемента не может превышать характерный минимальный геометрический размер исследуемого тела (например, радиус скругления поверхности в вершине концентратора напряжений; на рис. 1 – радиус  $r$ );
- 2) правильность воспроизведения математической моделью задачи величины расчётного напряжения, возникающего в сечении нагруженного тела без наличия концентраторов напряжений.

Поддерживаясь разработанной методикой анализа, решена задача о прочности ствола калибра 9,0 мм пистолета-пулемёта под действием внутреннего давления пороховых газов, в канале для нарезного (с прямоугольными нарезами) и поперечного профиля (рис. 2) [3]. Данный расчёт был проведен с использованием компьютерной программы ANSYS.

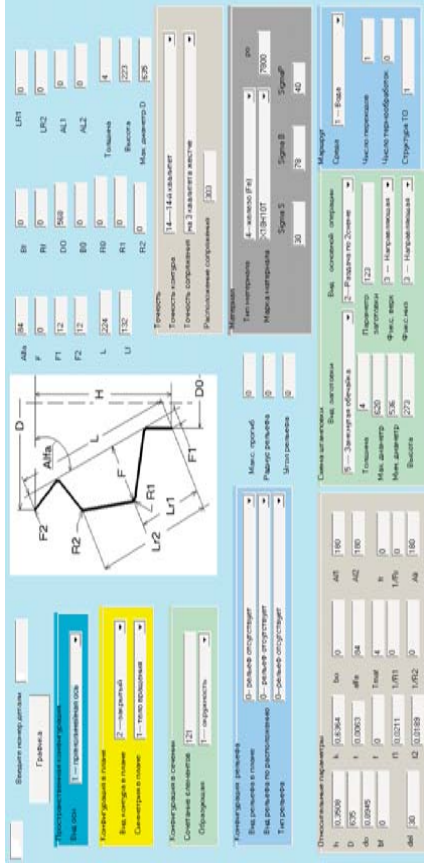


Рис. 3. Об'єктивний опис конструкторсько-технологічних ознак

### Список літератури

1. Третяк В.В. *Объективный подход к проектированию ресурсосберегающих импульсных технологий в производстве* [Текст] / В.В. Третяк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 11(47). – С. 245-254.
2. Гринин В.Ю. *Особенности использования Спрут технологии для разработки перспективных конструкций и авиационного проектирования*. – 2015. – № 2. – С. 149-153.
3. Свідозтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму № 48825. *Інтерактивний програмний комплекс автоматизованого аналізу даних та створення правил класифікації виробничих ситуацій КОД-Т / Філіппівська Л.О., Варталян В.М., Третяк В.В., Матвієнко О.О., Грищенко М.А.*; Реєстрац. 18.04.2013 р.
4. Свідозтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму № 50070. *Інтерактивний програмний комплекс класифікації листових деталей для виготовлення імпульсними технологіями / Третяк В.В., Долматов А.І., Невешкін Ю.О., Онопченко А.В.*; Реєстрац. 08.07.2013 р.
5. Свідозтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму № 55676. *Інтерактивний програмний комплекс «База знань для проектування розрахунку матриць при імпульсній обробці» / Третяк В.В., Долматов А.І., Лоза Т.В., Онопченко А.В., Скорченко І.В.*; Реєстрац. 21.07.2014 р.
6. Свідозтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму №58590. *Інтерактивний навчальний програмний комплекс для беспротокольного проектування об'єктів імпульсних технологій / Третяк В.В., Долматов А.І., Павленко В.М., Онопченко А.В., Федорова А.С., Блоха Е.В.*; Реєстрац. 11.02.2015.
7. Свідозтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму № 57712. *Інтерактивний програмний комплекс для розрахунку авторського права на комп'ютерну програму №5107. *Учебный интерактивный программный комплекс для решения изобретательских задач с помощью приемов устранения типичных противоречий и алгоритмов АРИЗ в бреле баз знаний объектов импульсных технологий / Третяк В.В., Долматов А.И., Воробьев Ю.А., Зейнлев Т.Г., Онопченко А.В., Федорова А.С.*; Реєстрац. 11.02.2015.*
8. Свідозтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму №63543. *Інтерактивний програмний комплекс для виконання розрахунку напружено-деформованого стану листових деталей для циліндричних і конічних заготовок під тиском імпульсного навантаження з урахуванням кавітаційних явищ / Третяк В.В., Зайцев В.С., Онопченко А.В.*; Реєстрац. 11.02.2015.
9. Свідозтво про реєстрацію авторського права на комп'ютерну програму №60108. *Інтерактивний програмний комплекс для виконання розрахунку напружено-деформованого стану листових деталей типу диске під тиском імпульсного навантаження з урахуванням кавітаційних явищ / Третяк В.В., Зайцев В.С., Онопченко А.В.*; Реєстрац. 11.02.2016.

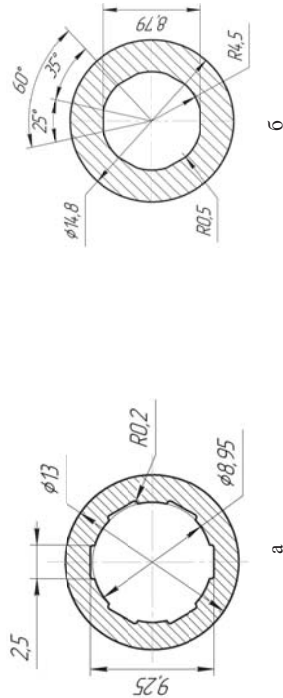


Рис. 2. Поперечное сечение ствола с прямоугольной нарезкой (а) и полигональным профилем (б)

С целью определения максимальной величины характерного размера конечного элемента (был использован плоский 4-х узловой конечный элемент PLANE 182), необходимого для построения КЭ-модели, выполнено численное решение задачи нагружения толстостенного цилиндра внутренним давлением (задача Ламе) на конечно-элементной сетке различной разрешающей способности.

В качестве объекта исследований был выбран сплошной стальной цилиндр с внутренним диаметром равным 9,0 и наружным – 14,8 мм. Данная геометрия является упрощённым аналогом поперечного сечения ствола пистолета-пулемёта калибра 9,0 мм.

Согласно решению задачи Ламе [4] получены величины радиальных  $\sigma_r$  и окружных  $\sigma_\theta$  напряжений на внутренней и наружной поверхности цилиндра при максимальном значении давления пороховых газов в канале ствола пистолета-пулемёта, равно  $P_{max} = 400$  МПа:

- на внутренней поверхности:  $\sigma_r = -p = -400$  МПа,  $\sigma_\theta = 869,4$  МПа,
  - на наружной поверхности:  $\sigma_r = 0$  МПа,  $\sigma_\theta = 469,4$  МПа.
- В дальнейшем проводился численный расчёт процесса нагружения цилиндра внутренним давлением с использованием конечных элементов разного размера (1мм, 0,5мм, 0,25мм, 0,1мм, 0,05мм, 0,025мм, 0,01мм).

Проанализировав полученные данные, была принята приемлемая величина ошибки численного расчёта на уровне не более 2%, при которой характерный размер конечного элемента должен быть не более 0,025 мм (при этом выполняется критерий 1, т.к. характерный минимальный геометрический размер ствола, а именно – радиус скругления поверхности вершины концентратора напряжений прямоугольного нареза, составляет 0,2 мм; рис. 2, а). Тогда, учитывая данное ограничение, количество конечных элементов, необходимых для задания двух конечно-элементных моделей стволов пистолета-пулемёта, как с нарезным каналом, так и с полигональным профилем внутренней поверхности, составило более 700 тыс. шт. для каждого.

С целью проверки разработанной методики, был проведен численный анализ [3], целью которого был поиск предельного значения внутреннего давления пороховых газов [р], при котором значения эквивалентных внутренних напряжений в стволах разного профиля не превышали бы величины граничной текучести  $\sigma_{0,2}$ .

Данный подход может быть использован в прочностных расчётах различных деталей (стержней (брусев), пластин (дисков), оболочек) при разных видах нагружений. При этом необходимо придерживаться следующего алгоритма:

1. Проводится аналитический прочностной расчёт исследуемого тела при действии на него заданных нагрузок без учёта концентраторов напряжений (например, для стержней на рис. 1, в качестве объекта исследований, рассматривается брус постоянного сечения с, так называемой, площадью-брутто).

2. Проводится численный расчёт процесса нагружения исследуемого тела (без концентраторов напряжений) с использованием конечных элементов разных формы, размера.
3. С учётом приемлемой величины ошибки численного расчёта (например, на уровне не более 2%), определяется характерный размер конечного элемента.
4. Проводится проверка выполнения критерия 1 (не превышение максимального размера конечного элемента характерного минимального геометрического размера исследуемого тела).
5. Проводится численный анализ исследуемой детали с учётом концентраторов напряжений.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны методика и алгоритм проведения численного анализа, основанного на компьютерном моделировании с использованием МКЭ, в расчётах на прочность конструкций (деталей) с учётом концентраторов напряжений.
2. Разработанная методика основана на выполнении двух критериев:
  - о не превышении максимального размера конечного элемента характерного минимального геометрического размера исследуемого тела;
  - о правильности воспроизведения математической моделью задачи величины расчётного напряжения, возникающего в сечении нагруженного тела без наличия концентраторов напряжений.
3. Используя разработанную методику, проведен расчёт на прочность стволов стрелкового оружия с нарезной внутренней поверхностью различной формы, находящаяся под действием внутреннего давления пороховых газов, который подтвердил адекватность принятого подхода.

## Список литературы

1. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1968. – 368 с.
2. Басов К. А. ANSYS : руководство пользователя / К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
3. Розов Ю. Г. Оценка влияния профиля канала ствола на прочность стрелкового оружия / Ю. Г. Розов, В. И. Стеблюк, Ю. М. Сидоренко, Д. Б. Шкарлуга // Артиллерийское и стрелковое вооружение. Международный научно-технический журнал. – 2012. – № 1. – С. 35–39.
4. Сопротивление материалов: Учебник для вузов / Под общ. ред. акад. АН УССР Г. С. Писаренко. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1979. – 696 с.



УДК 621.98

Кухарь В.В., д.т.н., проф., Нагібеда М.М., магістрант  
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна

**ТЕОРІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА РОЗРАХУНОК ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ГНУТТІ ПРОФІЛІВ ВІДКРИТОГО ПЕРЕРІЗУ**

Сталеві армуючі холодногнуті профілі є поширеною продукцією, що випускається підприємствами, які спеціалізуються на обробці металів тиском. Питаннями розробки сорту-менту спеціальних гнутих профілів і освоєння виробництва постійно приділяється значна увага з причини ефективності їх застосування.

До теперішнього часу немає достовірних відомостей, які б описували напружений стан матеріалу та залишкових напружень при гнутті профілів. Дослідження розрахунку кінцевої формозміни повинні бути науково обґрунтованими і базуватись на результатах теоретичних розрахунків.

Неврахування таких важливих факторів, як пружинення приводить до невідповідності кінцевих розмірів профілів потрібної конфігурації і дефектування у міжвалковому просторі профлезнавальних станів.

Тому тема роботи, що спрямована на теоретичне дослідження напруженого стану і розрахунок залишкових напружень при гнутті профілів відкритого перерізу є актуальною.

Мета роботи - розробка математичної моделі напружено-деформованого стану листової заготовки при згинних операціях і розрахунок залишкових напружень у матеріалі при гнутті профілів з відкритим поперечним перерізом.

При дослідженні напружено-деформованого стану металу скористались рівняннями методу механіки суцільних середовищ з використанням полів швидкостей переміщення. При пружиненні переміщення точок в місці вигину є протилежними до переміщень при пластичній формозміні.

Застосовувався метод механіки суцільних середовищ з використанням полів швидко-стей переміщень і методики розрахунку, що викладено у роботі [1].

Компоненти напруження для зовнішнього шару (пластична деформація)

$$R_H = r \geq \rho \quad (r - \text{поточний радіус});$$

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_H}{r} = 0,867 \sigma_s \ln \frac{R_H}{r};$$

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 1 \right) = 0,578 \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 2 \right);$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 1 \right) = 0,578 \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 1 \right);$$

Компоненти напруження для внутрішнього шару (пластична деформація):

$$R_H = r \leq \rho;$$

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_B}{r} = 0,867 \sigma_s \ln \frac{R_B}{r};$$

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 2 \right) = 0,578 \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 1 \right);$$

$$\sigma_z = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 1 \right) = 0,578 \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 1 \right);$$

Компоненти тензора напруження при пружному чистому циліндричному вигині:

$$\sigma_r = -\frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 4 + \frac{3}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} + \frac{5}{3\rho^2} \right) \right]; \quad \sigma_\phi = -\frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} + \frac{5}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) \right];$$

$$\sigma_z = -\frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 2 + \frac{1}{2} R_H R_B \left( 5 \frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{r^2} \right) \right];$$

$$K = -3 \left( \frac{R^2 - R_B^2}{2} \right) \left( \ln \frac{R_H}{R_B} - \frac{1}{2} \right) + \frac{5}{2} R_H R_B \left[ \ln \frac{R_H}{R_B} - \frac{1}{2} \left( \frac{R_H^2 - R_B^2}{\rho^2} \right) \right].$$

Склали компоненти напруження для пластичних і пружних деформацій, отримано вирази для залишкового напруження.

При  $R_H = r \geq \rho$ :

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_H}{r} + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 4 + \frac{3}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} + \frac{5}{3\rho^2} \right) \right];$$

$$\sigma_\phi = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 2 \right) + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} + \frac{5}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) \right];$$

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_H}{r} - 1 \right) + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 2 + \frac{1}{2} R_H R_B \left( 5 \frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{r^2} \right) \right];$$

При  $R_B = r \leq \rho$ :

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_s \ln \frac{R_B}{r} + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 4 + \frac{3}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} + \frac{5}{3\rho^2} \right) \right];$$

$$\sigma_\phi = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 2 \right) + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} + \frac{5}{2} R_H R_B \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{\rho^2} \right) \right];$$

$$\sigma_z = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_s \left( \frac{3}{2} \ln \frac{R_B}{r} - 1 \right) + \frac{M}{K} \left[ 3 \ln \frac{r}{\rho} - 2 + \frac{1}{2} R_H R_B \left( 5 \frac{1}{\rho^2} - \frac{1}{r^2} \right) \right];$$

Таким чином, у результаті проведених досліджень процесу гнуття профілів у багатова-кових станах були встановлені характеристики полів деформації та напружень, які залежать від матеріалу заготовок, конфігурації інструмента та кількості проходів. Отриманий аналітичний апарат для розрахунку залишкових напружень дозволяє прогнозувати пружинення, деформації та переміщення у заготовці на стадії проектування технологічної докумен-тації.

**Список літератури**

1. Алексеев Ю. Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием / Ю. Н. Алексеев. - Харьков, изд-во ХГУ, 1958. - 188с.

УДК 621.777.4

Жбанков Я. Г., д-т.н, доц., Алиева Л. И., к.т.н, доц.  
Донецкая государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина.

### ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЗАГОТОВОК СПОСОБОМ РАДИАЛЬНО-ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ С ОБЖАТИЕМ

Комбинирование схем продольного и поперечного выдавливания может быть методом создания более сложных способов деформирования, которые могут позволить изготовить за одну операцию полые и сплошные детали с фланцами или отрезками, с глубокими полостями или более сложных пространственных конфигураций [1 - 3]. Способы комбинированного радиально-продольного выдавливания можно разделить на 3 группы: совмещенного, поэтапного и последовательного выдавливания [4]. При этом для схем 1-й группы характерным является одновременное выдавливание металла по нескольким направлениям из одного совмещенного очага деформации, а во 2-й группы выдавливание по разным направлениям выполняется на отдельных этапах деформирования [4].

Схемы выдавливания, включенные в 3-ю группу, отличаются последовательным (строго говоря последовательно-параллельным) по пути деформирования выполнением приемов радиального и продольного выдавливания [4]. При этом радиальное выдавливание металла может осуществляться как с раздвигом [4 - 7], т.е. с течением от центра заготовки к периферии, так и с обжатием и течением металла к центру заготовки (рис. 1) [4, 8, 9].

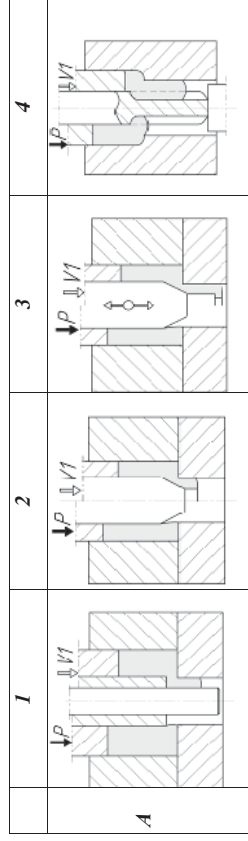


Рис. 1 – Способы последовательного радиально-прямого выдавливания с обжатием

Способы радиально-прямого выдавливания отличаются тем, что в них радиальное выдавливание металла производится в направлении к центру - к оси заготовки с уменьшением диаметральных размеров. Поэтому их можно назвать способами последовательного радиально-прямого выдавливания с обжатием [4, 8]. В зависимости от используемого инструмента, способа направления металла на этапе прямого течения и, соответственно степени свободы истечения различают несколько схем выдавливания (схемы В1 и В2). Для схем В3 характерно использование конической оправки, способной к возвратно-поступательному перемещению, что необходимо для получения деталей с переменной толщиной стенки. При профилировании оправки (схема В4) можно изготавливать детали с оребренной внутренней поверхностью.

Процесс комбинированного выдавливания на конической оправке в зависимости от относительного расположения оправки и переходной кромки матрицы можно разделить на схемы с нулевым, положительным и отрицательным зазорами (рис.2).

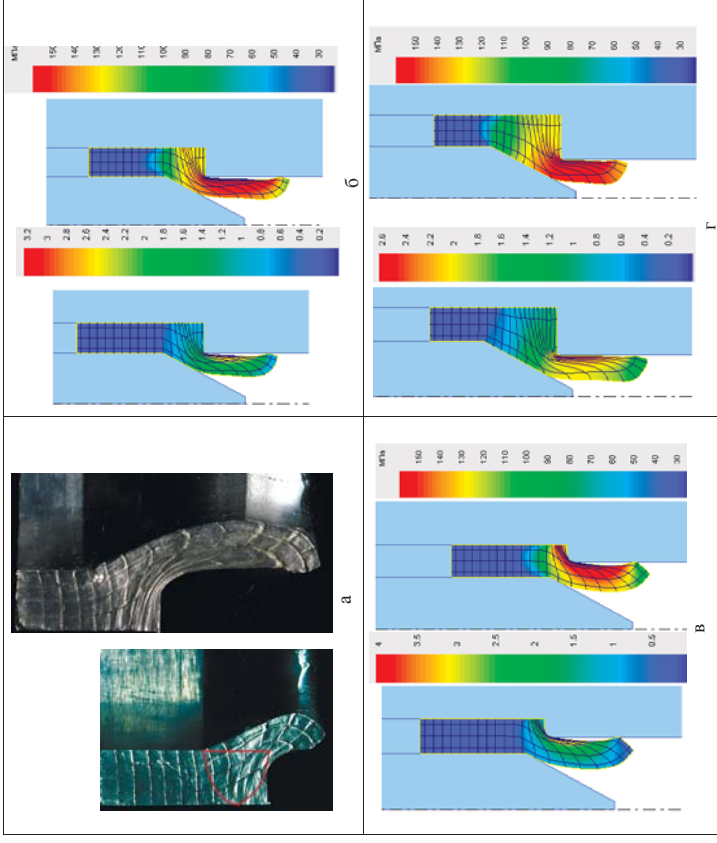


Рис. 2 - Распределение интенсивности деформаций и сопротивления деформирования для схем с нулевым (а) и отрицательным зазором (б, в, г)

Исследование напряженно-деформированного состояния заготовок, проведенное экспериментальным путем и при помощи МКЭ с использованием программного комплекса QForm-2D позволили определить закономерности формообразования при выдавливании. Изучение искаженной координатной сетки на различных стадиях процесса выдавливания показало, что характер течения металла отличается заметной неравномерностью (см. рис.2а). Очаг деформации сосредотачивается в зоне разворота металла и по своей высоте несколько выше приемной полости, образовавшейся между оправкой и матрицей. Остальная часть заготовки находится выше очага деформации практически не деформируется.

Установлено, что при выдавливании по схеме с нулевым зазором высота очага деформации ограничивается высотой приемной полостью образованной между оправкой и матрицей, а максимальная степень деформации сосредотачивается в нижней части заготовки, где металл заготовки сопрягается с инструментом, причем по ходу процесса происходит снижение по высоте области больших деформаций, что свидетельствует о перемещении очага деформации вниз (см. рис. 2 б). При рассмотрении распределения сопротивления деформаций на меридиональной поверхности детали видно, что максимальная ее величина сосредотачивается в районе переходной кромки матрицы, где металл заготовки при истечении разворачивается. Также можно заметить, что менее упругим участком по сечению заготовки является участок в нижнем наружном углу исходной заготовки, где образуется небольшая застойная зона.



Аналітична картина розподілення деформацій при видавлюванні по схемі з пологітальним зором между оправкой и матрицей; максимальная степень деформации сосредотачивается в нижней части заготовки, причем по ходу процесса происходит уменьшение по высоте области больших деформаций, что также свидетельствует о движении очага деформации вниз (см. рис. 2 в). Показатели сопоставления деформации распределены идентично самой деформации, и их изменение в очаге деформации по ходу деформирования также соответственно. Наибольшее упрочнение получают наружные слои выдавленной трубчатой части детали.

При сравнении распределения деформаций по меридиональному сечению заготовки в схемах радиально-прямого выдавливания на конусной оправке с пологітальным, отрицательным и нулевым зором можно сделать вывод о том, что наибольший градиент неравномерности распределения деформаций по толщине выдавливаемой стенки наблюдается при выдавливании по схеме с пологітальным зором между оправкой и матрицей. При выдавливании по этой схеме разность между наибольшей степенью деформации, которая сосредоточена на внешней стороне выдавливаемой стенки, и наименьшей на внутренней стороне достигает 2,0. При выдавливании по схеме с отрицательным зором разность между наибольшей и наименьшей степенью деформации по толщине стенки достигает 0,5-0,6 (см. рис. 2 г). Таким образом, при изготовлении трубчатой детали с одной и той же толщиной стенки по различным схемам процесса неравномерность распределения механических свойств будет меньше при комбинированном выдавливании по схеме с отрицательным зором между оправкой и матрицей.

#### Список литературы

1. Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. - 144 с.
2. Алиева Л.И. Перспективы развития процессов точной объемной штамповки выдавливанием / Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: 36. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, №1(11), 2008 – С. 13–19.
3. Аллев И.С. Технологические возможности новых способов комбинированного выдавливания. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990.-№2. –С. 7-9.
4. Алиева Л. И. Процессы комбинированного деформирования и выдавливания // Обработка материалов давлением. Краматорськ: ДГМА, – 2016. – № 1 (42). – С. 100-108.
5. Osen W. Kombiniertes Quer-Hohl-Werkarts-Fierpressen / W. Osen // Draht. – 1986. – №3. – S. 133-137.
6. Данилин Г.А. Теория и расчеты процессов комбинированного пластического формоизменения / Г.А. Данилин, В.П. Огородников. СПб.: БГТУ, 2004. 304 с.
7. Алиева Л. И. Формоизменение в процессе комбинированного выдавливания полых деталей типа стакана / Л. И. Алиева, О. В. Чучин, Д. А. Каргамышев // Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта. Матеріали ХVIII Міжнародної науково-технічної конференції – 21–24 червня 2016 – Одеса-Київ : Національний технічний університет України «КПІ», 2016. – С. 97–100.
8. Alieva L. Radial-direct extrusion with a movable mandrel / L. Alieva, Y. Zhbakov // Metallurgical and Mining Industry. – Dnipropetrovsk, 2015. – № 11. – P. 175–183.
9. Аллев И.С. Формоизменение заготовки при радиально-прямом выдавливании на оправке / И.С. Аллев, Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков / Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» - № 10 (141), 2008 – С. 201-205.

УДК 621.7.044

Скрипник О.В. к.т.н., доц., Свяцький В.В. к.т.н., доц.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький

### ЗАСТОСУВАННЯ У ШТАМПУВАННІ ГАЗОДРАТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

На практиці широко використовуються високоенергетичні імпульсні способи формування елементів конструкцій тиском ударної хвилі (вибухове штампування), які застосовуються в найрізноманітніших процесах обробки тиском: витяжці, листовому формуванні, формозміні трубчастих заготовок, вирубці і пробиванні отворів, різанні труб і прокату, об'ємному штампуванні, калібруванні і поверхневому зміцненні металу, пресуванні, зварюванні різновидних металів, запресовуванні і розвальцюванню труб, різних складальних операціях тощо. У суднобудуванні, де випускаються вироби із силовими установками на базі газотурбінних двигунів, імпульсна технологія при виготовленні листових деталей газового тракту і елементів з'єднання трубопроводів різних систем є безальтернативною.

Для цього матриця із заготовкою укладається в резервуар з передавальним середовищем із невисокою акустичною твердістю (повітря, гума, вода, парафін, пісок тощо). Заряд з детонатором підвищує у передавальному середовищі, наприклад у воді, або над передавальним середовищем, наприклад над гумою, а також безпосередньо над заготовкою; при вибуху заряду енергія ударної хвилі передається через нестисливе середовище і, діючи на заготовку, деформує її, надаючи форму матриці.

Широке поширення одержані витяжка і формування матеріалів тиском повітря або рідини і вакуумом. При виробництві деталей таким методом матеріали, які герметично закріплені на формі, при необхідності нагріті до високоеластичного стану, під дією тиску повітря або рідини приймають форму готового виробу. При формуванні деталей з тонкостінних матеріалів тиск рідини може бути замінений тиском стисненого повітря або атмосферним тиском за рахунок створення вакууму між формою і матеріалом.

Перевагами зазначених способів штампування є:

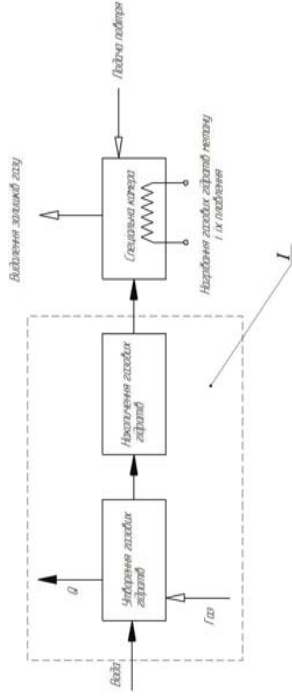
- 1) висока економічна ефективність у результаті зниження капітальних витрат та скорочення термінів і вартості підготовки виробництва;
- 2) можливість штампування деталей з високоміцних і жароміцних сплавів;
- 3) отримання великогабаритних деталей малими серіями, для виготовлення яких використання пресів і штампу стас технічно неможливим і економічно недоцільним.

Незважаючи на переваги вибухового штампування такому способу отримання деталей притаманні і недоліки:

- 1) підвищена небезпека використання бризантних вибухових пристроїв; вибухові речовини підвищеної потужності (гексоген, тротил, пластид та інші) через їхню високу чутливість до зовнішніх впливів необхідно змішувати із флегматизаторами;
- 2) форма заряду визначається конфігурацією деталі, яка штампується, а також типом передавального середовища; при цьому для отримання якісних великогабаритних виробів необхідно в резервуарі розмішувати одночасно декілька вибухових зарядів.

Запропоновано спосіб [1, 2] вибухового штампування з метою підвищення безпеки та збільшення економічності технологічного процесу за рахунок використання замість чутливих до зовнішніх впливів бризантних вибухових речовин стабільних газових компонентів, застосування більш простого технологічного обладнання.

Пропонований нами спосіб виготовлення деталей шляхом вибухового штампування виробів здійснюється таким чином (рис. 1). Виготовляється матриця за формою виробу, на неї накладається заготовка і укладається в спеціальну камеру; над матрицею і заготовкою розміщують детонатор. Спеціальну камеру герметизують і вакуумують. Перед початком процесу вибухового штампування метан в реакторі переводиться в газодрат при контакті з водою в замкненому об'ємі при температурі, яка не перевищує рівноважної температури і тиску гідратутворення відповідного газу.



І – процеси утворення, накопичення газових гідратів метану відбуваються в одному пристрої – реакторі  
 Рис. 1 – Схема способу виготовлення деталей тиском ударної хвилі

В реакторі приводять в контакт метан і воду (1 м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O у співвідношенні до 141,5 м<sup>3</sup> СН<sub>4</sub>) під тиском р від 0,1 МПа до 65,4 МПа і температурі Т від 273,1 К до 301,6 К, утворюють газогідрати із відведенням теплоти гідратування Q.

Утворені газові гідрати накопичують в реакторі до наперед визначеної кількості, після чого суміш, яка складається із гідратів метану і води (СН<sub>4</sub>×nH<sub>2</sub>O – від 40 % до 60 % і H<sub>2</sub>O – від 60 % до 40 %) направляють в спеціальну камеру, в якій відбувається їх підігрів та плавлення при температурі Т від 278 К до 303 К з вивільненням води та газоподобного метану. Утворенні газоподобний метан змишується з повітрям, яке подається у спеціальну камеру у оптимальній пропорції (СН<sub>4</sub> – 10 %, повітря – 90 %) з утворенням вибухової суміші. Під дією детонатора утворена суміш вибухає. Енергія ударної хвилі рівномірно передається через передавальне середовище і, діючи на заготовку, деформує її, надаючи форму матриці.

Залишки газової суміші видаляють з камери або в атмосферу, після чого виймають готовий виріб із спеціальної камери. Цикл повторюють.

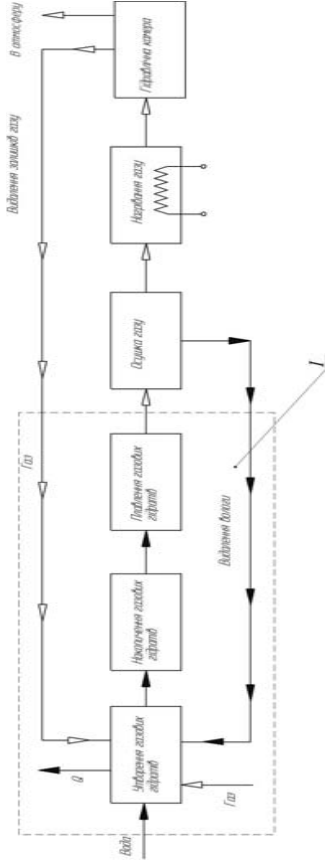
Таким чином, при здійсненні запропонованого способу вибухового штампування виробів значно підвищується безпека технологічного процесу, зменшується собівартість виробів за рахунок скорочення капітальних витрат на установку.

Пропонований нами спосіб виготовлення деталей шляхом гідралічного формування листових матеріалів [3, 4] із використанням дешевого вуглекислого газу СО<sub>2</sub> здійснюється таким чином (рис. 2). Листову заготовку закорковують у гідралічній камері.

Приводячи в контакт газ, наприклад двооксид вуглецю, і воду (у співвідношенні на 1 м<sup>3</sup> Н<sub>2</sub>O приймають 176,1 м<sup>3</sup> СО<sub>2</sub>) під тиском р від 2 МПа до 4 МПа і температурі Т від 275 К до 281 К, утворюють газогідрати із відведенням теплоти гідратування Q. Утворені газові гідрати накопичують до наперед визначеної кількості в замкнутому об'ємі, після чого проведуть їхній підігрів та плавлення в цьому об'ємі при температурі Т від 323 К до 363 К з вивільненням води та газоподобного двооксиду вуглецю при підвищенні його тиску р до робочого: від 40 МПа до 80 МПа.

Утворенні газоподобний СО<sub>2</sub> фільтрують і осушують. Далі двооксид вуглецю в спеціальній камері з наперед визначеним об'ємом нагрівають до температури Т від 1473 К до 1673 К, при цьому його тиск р підвищується до 420 МПа.

Газ під високим тиском направляють на здійснення формування листового матеріалу в гідралічній камері, де через рідину тиск СО<sub>2</sub> рівномірно передається на заготовку, завдяки чому проводиться процес пластичного формування листової заготовки на протязі технологічно обгрунтованого часу.



І – процеси утворення, накопичення газових гідратів відбуваються в одному пристрої  
 Рис. 2 – Спосіб виготовлення деталей гідралічним формуванням

Після завершення пластичного формування тиск у гідралічній камері шляхом направлення більшої частини СО<sub>2</sub> на повторне утворення гідратів (біля 95 % від об'єму газу, використаного на утворення гідратів). Залишки газу видаляють з камери в окремий резервуар (або в атмосферу), після чого виймають готовий виріб або напівфабрикат із камери. Перед проведенням нового циклу гідралічного формування деталей витрати газу та води компенсують із зовнішніх джерел.

Таким чином, при здійсненні запропонованого способу гідралічного формування значно зменшується собівартість готової деталі або напівфабрикату через використання дешевого вуглекислого газу СО<sub>2</sub>, зменшуються капітальні витрати на установку для здійснення способу внаслідок використання більш простого технологічного обладнання в порівнянні з компресорним.

**Список літератури**

1. Скрипник О. В. Штампування деталей тиском вибухової хвилі / О. В. Скрипник, В. В. Сваський // Trends of Modern Science – 2016. Materials of the XII International scientific and practical conference. May 30 - June 7, 2016. – Sheffield : Science and education LTD, 2016. – Vol. 22. Technical Science. – P. 30-33.
2. Патент 107842, Україна, МПК В21D 22/18 (2006.01), В21D 26/06 (2006.01), В21D 26/08 (2006.01). Спосіб штампування деталей тиском вибухової хвилі / О. В. Скрипник, В. В. Сваський. – № u201512320; заявл. 14.12.2015; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12/2016.
3. Скрипник О. В. Виготовлення безпритискових деталей з використанням газодинамічних технологій / О. В. Скрипник, В. В. Сваський, А. А. Віхолоденко // Scientific Horizons – 2015. Materials of the XI International scientific and practical conference. September 30 - October 7, 2015. – Sheffield : Science and education LTD, 2015. – Vol. 11. Technical sciences, Construction and architecture. – P. 27-29.
4. Патент 106106, Україна, МПК В21D 26/02 (2011.01), В21D 22/18 (2006.01). Спосіб виготовлення деталей гідралічним формуванням / О. В. Скрипник, В. В. Сваський. – № u201511588; заявл. 23.11.2015; опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7/2016.

УДК 621.735

Клемшов Є.С., Чухліб В.Л., к.т.н., доц.

Національна металургійна академія України, м. Дніпро, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМОЗМІНИ ЗАГОТОВКИ ПРИБІВЛЮВАННІ ВУЗЬКОГО БОЙКА

На підприємствах при виробництві поковок на сьогоднішній день спостерігається тенденція до розвитку і впровадження ресурсозберігаючих технологій, внаслідок великого попиту на поковки і спеціальних сталей. Такі поковки вимагають спеціального режиму деформації для отримання високих механічних властивостей, внаслідок чого вартість виробництва таких поковок збільшується. Крім цього, процес кування поковок характеризується високими показниками витрат металу, що позначається на вартості виробу. У свою чергу, зосередившись на розробці ресурсозберігаючої технології кування, можна виділити один виріб, отримання якого має дуже велику трудомісткість. Таким виробом є колінчастий вал, а маса металу, що використовується при його виготовленні, вимірюється в тоннах, причому найчастіше, це леговані марки сталі. Удосконалення такої технології має особливий інтерес, так як при отриманні поковки, велика частина виробу закривається не тільки припуском, але і напуском в частині коліна вала, який при механічній обробці йде у відхід.

В [1] наводиться класифікація трудомісткості виконання форми поковки і колінчасті вали відносяться до найбільш складних поковок. Для більшості колінчастих валів стаціонарних, суднових і тепловозних дизелів частіше застосовують сталі 35, 40, 50, 35Г, 40Г, 45Г, 50Г та ін. Вали швидкохідних двигунів виготовляють також з 40Х, 40ХН, 35ХМ, 30ХН2МА, 18Х2Н4МА та ін. Сталі, леговані ванадієм, хромом, молібденом, нікелем мають підвищену твердість та зносостійкість (30ХМА, 20ХН3А, 38Х2МЮА, 40Х2Н4МА, 25Х2Н4МА, 38Х2МЮА та ін) і використовуються для виготовлення колінчастих валів дизельних двигунів підвищеної потужності [2].

Важливим етапом в процесі кування колінчастих валів є етап підготовки заготовки. Цей етап включає в себе білетування злитка, осаджування і протягування до розмірів заготовки для подальшого кування [3]. Авторами [4] були проведені експерименти за допомогою комп'ютерного моделювання і його результати дозволяють визначити вплив параметрів заготовки на нерівномірність розподілу деформації в металі при виконанні операції осаджування злитка з подальшим протягуванням на круглий перетин. Схема кантовок при протягуванні злитка обгрунтована в дослідженні [5].

В даній роботі, на основі аналізу технологічних схем виробництва поковок колінчастих валів, а також готових креслень деталей, була обрана заготовка під подальше кування, яка в реальному технологічному процесі є гладким валом з круглим перетином. Довжина циліндра була обрана з розрахунку виготовлення однієї поковки, а так само з урахуванням масштабового коефіцієнта. Тому заготовкою для натурного експерименту був циліндр з діаметром 40 мм і довжиною 50 мм. В якості матеріалу заготовки для натурного експерименту використовувався свинець марки С1.

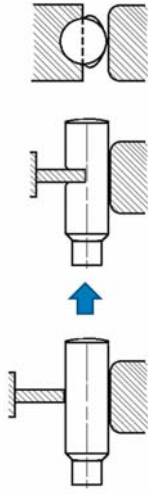


Рис. 1. Схема процесу вдавлювання вузького бойка в заготовку

За розробленою авторами технологічною схемою (досліджувана частина якої представлена на рис. 1) для деформації заготовки був використаний вузький боек різної товщини.

Виходячи з аналізу креслень готових деталей, були обрані три основні величини товщини бойка, що відповідають відстані між шочками коліна з урахуванням припусків. Для натур-

ного експерименту дані величини товщини бойка становили 4 мм, 8 мм і 12 мм. Нижнім деформуючим інструментом у даному випадку була осаджувальна плита. Крім цього, так само виходячи з аналізу креслень деталей, була визначена оптимальна глибина вдавлювання вузького бойка, яка становила 50% від початкового діаметру заготовки.

При дослідженнях процесів вільного кування все частіше використовуються прикладні програми на основі методу кінцевих елементів. Одною з таких програм є QForm, яка дозволяє розраховувати формозміну заготовки та показники напружено-деформованого стану металу.

Формозміна заготовки при вдавлюванні вузького бойка дуже складна і тому для опису форми заготовки після закінчення деформації були розглянуті наступні величини:  $D1$  – максимальне поширення заготовки після деформації;  $D'$  – довжина контакту заготовки і вдавлюючого вузького бойка;  $D''$  – довжина контакту заготовки і нижнього бойка;  $h'$  і  $h''$  – висота напіву металу від зони контакту заготовки з бойком до точки з максимальним діаметром ( $h'$ ) і від неї до зони контакту заготовки з нижнім бойком ( $h''$ );  $H$  – значення мінімальної висоти заготовки. Також була використана величина  $\Delta D$ , що є різницею між початковим діаметром і максимальною величиною поширення заготовки.

Проаналізувавши перераховані вище значення і зіставивши частину з них з початковим діаметром, були отримані графічні залежності, які показують, що із збільшенням глибини вдавлювання бойка збільшуються і величини довжини зон контакту заготовки з верхнім і нижнім бойком, а також величина максимального поширення. Графічні залежності є нелінійними, через що можна виділити певну зону глибини вдавлювання бойка з відповідними їм раціональними величинами поширення металу і протяжністю зон контакту. Застосування даних залежностей величезно і для отримання поковок колінчастих валів інших розмірів з різними відстанями між шк валу і товщинами шатунної шийки.

Крім цього, одним із завдань дослідження було підтвердження адекватності обраних параметрів процесу за допомогою проведення натурного експерименту та комп'ютерного моделювання в програмі QForm. Отримані графічні залежності мають дуже схожий характер, а в деяких випадках і повністю збігаються як по експериментальним даним, так і при комп'ютерному моделюванні в програмі QForm. При порівнянні експериментальних даних з підтверджує те, що задана при моделюванні поставлена правильно.

**Висновки.** 1) В результаті аналізу літературних джерел і технологічних схем виробництва поковок колінчастих валів була створена узагальнена схема отримання поковки колінчастого вала із злитка, а також на основі аналізу недоліків цієї схеми була розроблена удосконалена технологія отримання поковок колінчастого вала з отриманням шатунної шийки, яка у стандартній схемі кування закривається напуском. 2) В результаті проведеного теоретичного й експериментального дослідження впливу товщини вузького бойка в заготовку були отримані графічні залежності впливу товщини верхнього бойка і глибини його вдавлювання на зміну геометричних розмірів заготовки. За даними залежностями можливе визначення раціональної товщини бойка і глибини вдавлювання для найбільшої технологічності даної операції. Зіставлення результатів експериментального дослідження та комп'ютерного моделювання в програмі QForm показали хороші результати збіжності даних.

#### Список літератури

1. Охрименко Я.М. Технологія кузнично-штамповочного виробництва. - М: Машностроение, 1976. - 560 с.
2. Беспалов Б.Л. Технологія машиностроєння / Б.Л. Беспалов, Л.А. Глейзер, І.М. Колесов, Н.Г. Дашкевич, С.Н. Соловьев, В.А. Тимирязев, Д.В. Чарко – М, Машностроєння, 1973. - 448 с.
3. Гринкевич В.А. Теоретичське дослідження кузничної операції протяжки при використанні схеми деформації «проходами» / В.А. Гринкевич, В.Л. Чухліб, Г. Банашек, А.В. Ашкелянец // Вестник НТУ «ХПІ», №44, 2014. - С. 28-34.
4. Чухліб В.Л. Аналіз впливу параметрів попередньої осадки та її відсутності на нерівномірність деформації при протяжці поковок з титанових сплавів / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемшов, В.О. Гринкевич, Х. Дія // Вестник НТУ «ХПІ», №47, 2015. - С. 82 - 85.
5. Чухліб В.Л. Дослідження напружено-деформованого стану при протяжці титанового сплаву з метою оптимізації параметрів кування / В.Л. Чухліб, Є.С. Клемшов, В.О. Гринкевич, Х. Дія // Вестник НТУ «ХПІ», №24, 2015. - С. 159-166.



УДК 621 777.4

Алиева Л. И.1, к. т. н. доц., Сивак Р. И.2, к. т. н., доц., Конюбская Е. И.3, к. т. н. доц., Сухорук С. И.2, к. т. н., доц.

1 – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск,  
2 – Винницкий национальный технический университет, г. Винница  
3 – Киевский национальный университет культуры и искусств, г. Киев,

**ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ВЫДАВЛИВАНИИ**

Для повышения предельной степени формоизменения и устранения искажения формы фланца перспективными являются схемы поперечного выдавливания с противодавлением, которое может быть создано путем приложения к свободной поверхности фланца гидростатического давления или выдавливания в клиновидную или ступенчатую полость твердой рабочей противодавляющей среды [1, 2].

Для оценки использованного ресурса пластичности по расчетам, выполненным при поперечном выдавливании и выдавливании с противодавлением [3, 4].

Напряжённо-деформированное состояние и закон его изменения в течение всего процесса формоизменения рассчитывали методом конечных элементов в характерных точках заготовки, показанных на рис 1. В данной работе получены результаты использования для построения траекторий нагружения этих точек в координатах  $\eta, \mu\sigma, \epsilon$  или  $\eta, \chi, \epsilon$ . Значения показателя жёсткости напряжённого состояния  $\eta$ , параметра Лодэ – Надаи  $\mu\sigma$  и показателя В.А.Огородникова  $\chi$  [5] рассчитывали по формулам

$$\eta = \frac{3\sigma}{\sigma_u}, \mu\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \chi = \sqrt[3]{\frac{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}{\sigma_u^3}} \tag{1}$$

Пример полученных траекторий в координатах  $\eta, \chi, \epsilon$  (для точек 1-30 приведен на рис. 2.

2. Величину использованного ресурса пластичности рассчитывали по критерию, позволяющему учитывать нелинейность закона накопления повреждений в условиях объёмного напряжённого состояния.

Для оценки влияния истории нагружения на пластичность при объёмном напряжённом состоянии использовано пространство с координатами  $\eta, \mu\sigma, \epsilon$ , в котором этот критерий принимает вид [6]

$$\psi = \sqrt{\psi_{ij}\psi_{ij}}, \tag{2}$$

$$\psi_{ij} = \int_0^{\epsilon_u} \left( 1 - a + 2a \frac{\epsilon_u^*}{e_p(\eta, \mu\sigma)} \right) \beta_{ij} \frac{d\epsilon_u^*}{e_p(\eta, \mu\sigma)}, \tag{3}$$

или пространство с координатами  $\eta, \chi, \epsilon$ ,

$$\psi_{ij} = \int_0^{\epsilon_u} \left( 1 - a + 2a \frac{\epsilon_u^*}{e_p(\eta, \chi)} \right) \beta_{ij} \frac{d\epsilon_u^*}{e_p(\eta, \chi)}, \tag{4}$$

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\epsilon_{ij}}{d\epsilon_u}$$

$\epsilon_u^*$  – степень деформации при соответствующих значениях  $\eta$  и  $\mu\sigma$ ,

$$e_p = \int_0^{\epsilon_u} \dot{\epsilon}_p d\tau$$

- предельная деформация,  $\tau$  – время деформирования до разрушения, константу  $a$  принимали равной  $a = 0,2$ .

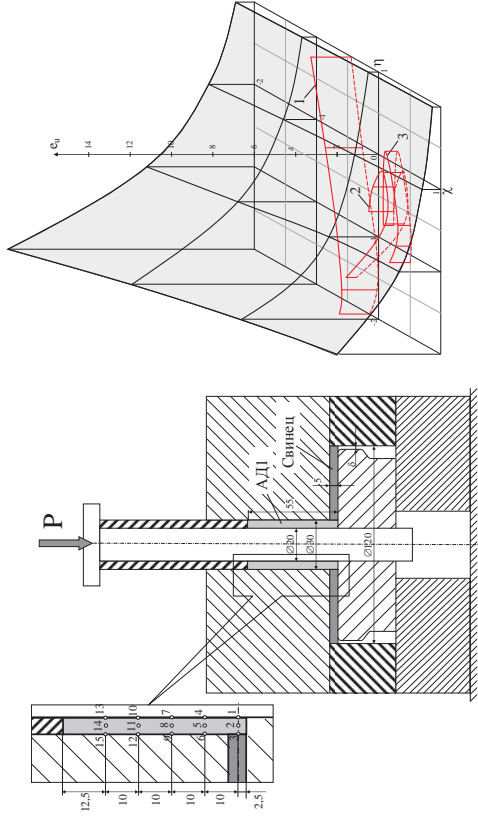


Рис. 1 - Схема радиального выдавливания осесимметричных деталей с относительно тонким фланцем

Рис. 2 - Поверхность предельных деформаций АДП и траектории нагружения при выдавливании в координатах  $\eta, \chi, \epsilon$ .

Анализ характера траекторий нагружения показал, что для точек 5, 6, 9, 12, 15 характерно немонотонное нагружение, в остальных точках имеет место сложное нагружение в условиях объёмного напряжённого состояния. Поэтому величину использованного ресурса пластичности  $\psi$  рассчитывали по критерию (2) для всего интервала значений  $\eta, \chi, \mu\sigma$  и  $\epsilon$ . Результаты расчётов  $\psi$  по формуле (2) с использованием компонент тензора повреждений (3) и  $\psi\chi$  - по (2) с использованием компонент тензора повреждений (4) приведены в табл. 2.

Поверхности предельных деформаций аппроксимировали зависимостями

$$e_p(\eta, \mu\sigma) = 1,20 \exp(0,5246\mu\sigma - 0,32540\eta) - \text{поверхность предельных деформаций алюминия АДП в координатах } \eta, \mu\sigma, \epsilon \text{ [3, 6],}$$

$$e_p(\eta, \chi) = 1,2 \exp(-0,857\eta - 0,3\chi) - \text{поверхность предельных деформаций алюминия АДП в координатах } \eta, \chi, \epsilon \text{ [5],}$$

Таблица 2  
Результаты расчётов  $\psi$  по (5) с использованием (6) и  $\psi\chi$  - по (5) с использованием (7)

Точки	1	2	3	4	5	6	7	
$\psi_{\eta}$	0,60	0,48	0,52	0,30	0,47	0,43	0,28	
$\psi_{\chi}$	0,53	0,41	0,44	0,24	0,40	0,35	0,24	
Точки	8	9	10	11	12	13	14	15
$\psi_{\eta}$	0,36	0,51	0,08	0,28	0,46	0,06	0,08	0,08
$\psi_{\chi}$	0,30	0,43	0,05	0,23	0,40	0,05	0,06	0,07

Как видно из табл. 2, при выбранной модели процесса накопления повреждений, описываемой критерием (2), результаты расчётов значений  $\psi$  с использованием координат  $\eta$ ,  $\mu$ ,  $\epsilon$  или  $\eta$ ,  $\chi$ ,  $\epsilon$  отличаются незначительно.

Незначительное уменьшение расчётных значений  $\psi$ , по сравнению с  $\psi_{\eta}$  обусловлено тем, что предельная деформация  $\epsilon_r$  в области отрицательных значений  $\eta$  и  $\chi$  увеличивается быстрее, чем в области где  $\eta < 0$ , а  $\mu > 0$ . Необходимо отметить, что в работе Огородникова В.А. [5] показано, что использование при исследовании пластичности металлов в условиях объёмного напряжённого состояния показателя  $\chi$  вместо  $\mu$  при оценке использованного ресурса пластичности  $\psi$  позволяет получить расчётные значения  $\psi$  более близкие к экспериментальным.

Кроме того, при пересечении плоскости  $\chi=0$  (плоское напряжённое состояние) с поверхностью предельных деформаций  $\epsilon_r(\eta, \chi)$ , получается предельная кривая  $\epsilon_r(\eta, 0)$ , которая полностью совпадает с диаграммой пластичности  $\epsilon_r(\eta)$ .

Использование координат  $\eta$ ,  $\chi$ ,  $\epsilon$  вместо  $\eta$ ,  $\mu$ ,  $\epsilon$ ,  $\epsilon$  для оценки  $\psi$  упрощает расчёты  $\psi$ , так как плоское напряжённое состояние в этом случае описывается известной диаграммой пластичности  $\epsilon_r(\eta)$ , кроме того, расхождение между расчётными и экспериментальными значениями  $\psi$  уменьшается.

#### Список литературы

1. Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечное штамповочное производство. – 1988. – №6. – С. 1–4.
2. Коган Р.М. Штамповка с противодавлением / Р.М Коган // Конструирование и технология машиностроения. Сер В, 1965. №2. - С. 1-7.
3. Оценка деформируемости заготовок при радиальном выдавливании с противодавлением / Е. И. Кошобовская, И. О. Сивак, Л. И. Алиева, С. В. Кунченко // Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 29–33.
4. Алиева Л.И. Деформируемость заготовок при радиальном выдавливании с противодавлением / Л.И. Алиева, Е.И. Кошобовская. // Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта. Матеріали ХVIII Міжнародної науково-технічної конференції – 21–24 червня 2016 – Одеса–Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – С. 61–64.
5. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с.
6. Сивак Р. І. Залежність пластичності металів від історії навантаження при об'ємному напруженому стані / Р. І. Сивак, О. В. Нахайчук, В. А. Огородніков // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки. - Вінниця: ВДАУ. – 2009. – С. 79-83.

УДК 621.96:621.774

**Каришук С.Г., к.т.н., доц.**  
Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ ТРУБ СПОСОБОМ ВІДРІЗКИ ЕКСЦЕНТРИЧНИМ ЗАКРУЧУВАННЯМ

Одним з напрямів підвищення конкурентоспроможності продукції машинобудування є зниження металоемності, скорочення відходів і витрат металу за рахунок раціонального застосування заготовок, економічних методів формоутворення і механічної обробки. Важливе значення при цьому має вибір способу отримання заготовок, які відповідають виробничим умовам конкретного машинобудівного підприємства. Операція розділення сортового прокату (труб) на мірні заготовки є однією з наймасовіших в машинобудівному виробництві. Тому вдосконалення способів розділення сортового прокату (труб) дозволяє істотно знизити собівартість готової продукції і є завданням актуальним [1, 2].

До найбільш перспективних способів отримання мірних заготовок із сортового прокату (труб) є відрізка зсувом. Однією з перспективних комбінованих механічних схем деформування при розділенні сортового прокату (труб) зсувом є схема відрізки ексцентричним закручуванням у втулкових ножах (різновид неповністю закритої відрізки зсувом) [3]. При відрізці ексцентричним закручуванням частина прокату, яка відрізається, здійснює круговий рух навколо осі, зміщеної по відношенню до осі сортового прокату на певну відстань, яка називається ексцентриситетом і не перевищує величини радіуса прокату. Проте встановлені раціональні технологічні параметри процесу відрізки ексцентричним закручуванням стосуються розділення прокату суцільного перетину. Питання розділення труб при реалізації способу відрізки ексцентричним закручуванням вивчені недостатньо.

Для забезпечення потрібної кінематики руху ножів при відрізці ексцентричним закручуванням проаналізовані можливі конструктивні схеми механізмів. Найбільш перспективною визнана схема відрізки труб ексцентричним закручуванням з використанням кривошипно-кругового механізму [4]. Розвинена площа опори рухомого ножа-втулки, кругової шайби і достатня довжина напрямних дозволяє значно зменшити величину контактних напружень і підвищити надійність роботи устаткування.

На основі обраного виконавчого механізму розроблено конструкцію установки для розділення труб на мірні заготовки (рис. 1). Установка складається із станини, рухомої по втушці 1, в якій розміщено кругову шайбу 2, з ексцентрично вставленими ножами-втулками 3, 4. Рухомий ніж-втулка 3 встановлений ексцентрично щодо своєї осі обертання. Величина ексцентриситету відповідає радіусу кривошипа. У свою чергу труба також розміщується в порожнині ножів 3, 4 з ексцентриситетом  $\epsilon$ . Рухомий ніж-втулка 3 здійснює складний рух відносно нерухомої частини заготовки, поступово здійснюючи надріз труби на дузі охоплення близько 180°. При цьому знижуються енергосилові параметри процесу поділу. Зменшення сили відрізки в момент поділу знижує наслідки явища миттєвого розвантаження обладнання, яке супроводжується руйнуванням фундаменту, розслабленням з'єднань кавітацією. Процес відрізки здійснюється плавним і безшумно, що підвищує культуру виробництва. При цьому підвищується геометрична точність заготовок, розширюється діапазон розмірів поперечного перетину прокату і марок матеріалу, що розділяються [5].

Для оцінки величини енергосилових параметрів процесу розділення труб ексцентричним закручуванням проведено моделювання технологічного процесу з використанням програмного комплексу DEFORM-3D [6].

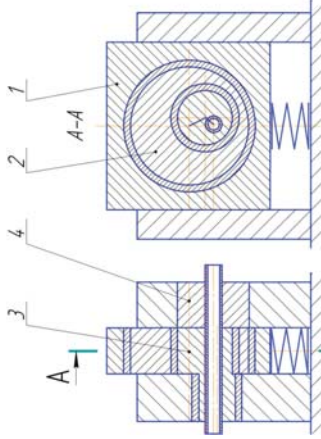


Рис 1. Конструкція установки для розділення труб

Матеріал трубчастої заготовки – Сталь 20. Параметри заготовки: зовнішній діаметр – 16 мм, внутрішній діаметр – 12 мм, довжина – 200 мм. Величина ексцентриситету  $e = 3 \text{ мм}$ . Результати розрахунків представлені на рис. 2, 3.

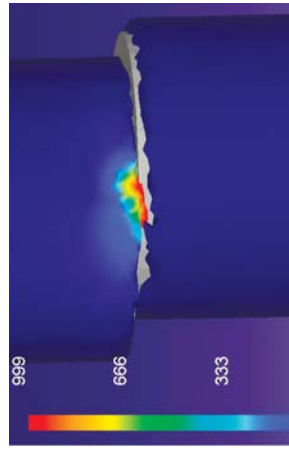


Рис 2. Розподіл напружень по перетину трубчастої заготовки із сталі 20

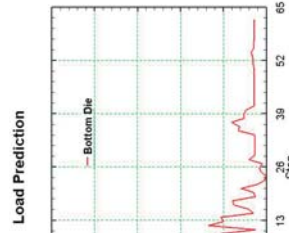


Рис 3. Зміна сили відрізки трубчастої заготовки із сталі 20

Для перевірки результатів теоретичних розрахунків проведені експериментальні дослідження процесу розділення труб способом ексцентричного закручування. Для цього зроблена оригінальна експериментальна установка на базі одноступінчатого косозубого циліндричного редуктора (рис. 4, 5). Труба 1 подається в отвір ножів 2, 3 до упору. Нерухомий ніж 2 закріплено на корпусі редуктора 4, а рухомий ніж 3 закріплено до порожнистого вихідного вала 5 редуктора, який обертається в опорі 6. При цьому вісь обертаючого валу зміщена щодо осей обертаючих ножів 2, 3 на величину ексцентриситету  $e$ . При включенні приводу рухомий ніж 3 здійснює обертальний рух щодо своєї осі. При цьому на початковому етапі відрізки труба 1 заклинюється між ножами 2, 3. Потім відбувається переміщення ріжучих кромок ножів 2, 3 в трубчасту заготовку 1, з одночасним крученням частини заготовки в площині розділення до руйнування.

Передаточне число редуктора  $U = 4,3$ . В експерименті використовувалися трубчасті зразки із сталі 20 з геометричними розмірами, такими ж, як і у теоретичних розрахунках. Силі параметри процесу розділення вимірювали за допомогою одноручного динамометра з індикаторною голівкою, який заздалегідь тарувався.

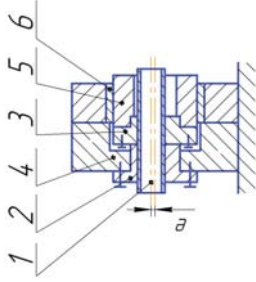


Рис 4. Конструктивна схема установки

Залежність моменту на рухомому ножі-втулці від кута повороту ножа для заготовок із сталі 20 представлена на рис. 6. Відрізани трубочасті заготовки мають задовільні показники геометричної точності. Фотографія відрізаної заготовки представлена на рис. 7.

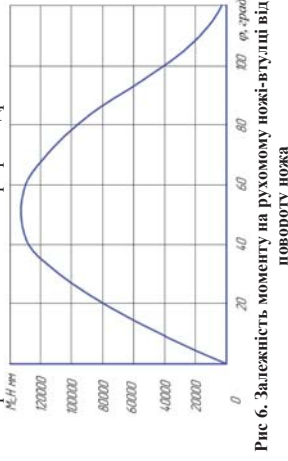


Рис 6. Залежність моменту на рухомому ножі-втулці від кута повороту ножа



Рис 7. Фотографія відрізаної заготовки із сталі 20

Отримані результати експериментальних досліджень добре узгоджуються з теоретичними даними, які розраховані за допомогою спеціалізованої програми DEFORM-3D. Погрішність розрахунків не перевищує 10...15%.

#### Список літератури

1. Соловцов С. С. Безотходная разрезка сортового проката в штампах / С. С. Соловцов. – М. : Машиностроение, 1985. – 176 с.
2. Карнаух С. Г. Совершенствование безотходных способов разделения сортового проката и оборудования для получения заготовок высокого качества : монография / С. Г. Карнаух. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 196 с.
3. Ломсаде З. Д. Определение энергетических параметров процесса резки круглого проката эксцентричным закручиванием / З. Д. Ломсаде, В. Н. Чейшвили, Т. М. Сулухия // Труды ГГУ. – 1990. - № 9. – С. 15-18.
4. Кривошипные кулачково-прессовые машины / В. И. Власов, А. Я. Борзыкин, И. К. Буккин-Батырев и др. ; под ред. В. И. Власова. – М. : Машиностроение, 1982. – 424 с.
5. Владимирцов Э. А. Комплексный расчет исполнительного механизма прессы с грунтовыми Ассуром произвольной структуры / Э. А. Владимирцов, В. Е. Шоленинов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДГМА, 2007. – С. 316-321.
6. Роганов Л. Л., Карнаух С. Г., Карнаух Д. С. Исследование процесса разделения труб способом отрезки эксцентричным закручиванием / Л. Л. Роганов, С. Г. Карнаух, Д. С. Карнаух // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 233-238.



УДК 621.97-231.32:621.96

Чоста Н.В., к.т.н., доц.

Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина

### РАЗРАБОТКА НОВОГО ТИПА КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ОСНОВЕ КЛИНОШАРНИРНОГО МЕХАНИЗМА С ВОГНУТЫМ КЛИНОМ

Рациональное использование металла, экономия энергоресурсов, снижение трудоемкости и улучшение качества продукции – важные задачи, которые следует решать на всех технологических этапах металлообрабатывающего производства, включая процессы обработки материалов давлением и составляющую часть этих процессов – разделение проката на мерные заготовки. В области раздельных операций используются традиционные технологии, реализуемые на известном серийном оборудовании – прессах и ножницах, поэтому прессе возможен при условии применения новых приемов в технологиях с использованием нестандартных механизмов в машинах.

Разделительные операции являются одними из самых распространенных в обработке материалов давлением. Они выполняются как на специализированном кузнечно-прессовом оборудовании: ножницах, хладноломах и др., так и на универсальном: гидравлических и механических прессах, молотах, пресс-молотах, в которых, в качестве исполнительных механизмов, применяются: гидроцилиндры, кривошипно-шатунные, коленно-рычажные, винтовые механизмы, являющиеся, как правило, многосвязными и имеющими сравнительно невысокую жесткость.

Разделительные операции отличаются от других операций обработки материалов давлением тем, что для их проведения необходимо обеспечить максимальную силу разделения в начале рабочего хода. Это требует от исполнительных механизмов кузнечно-прессового оборудования учета такого характера силовой нагрузки. Кроме того, необходимо учитывать высокие требования к качеству поверхности разделения, максимальному снижению затрат энергии, повышению коэффициента полезного действия (КПД) механизмов в оборудовании для раздельных операций. Существующие традиционные исполнительные механизмы машин для раздельных операций не удовлетворяют в полной мере этим требованиям.

Более эффективными, в этом смысле, являются клиновые, в том числе, разработываемые в Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА), клиношарнирные механизмы, имеющие большие опорные поверхности, небольшую высоту звеньев по направлению действия рабочей силы, переменно соотношения между приводной и рабочей силами [1].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что совершенствование клиношарнирного механизма и создание на его основе нового типа кузнечно-прессового оборудования, предназначенного для повышения уровня заготовительного производства, являются задачами актуальными и имеющими важное научное и практическое значение.

Дальнейшее развитие кузнечно-прессового оборудования для реализации раздельных операций неразрывно связано с проведением широкого круга комплексных научных исследований исполнительных механизмов машин, которые по графику изменения силы деформирования максимально приближаются к типовому графику сил, характерного для раздельных процессов. Такое силовое воздействие возможно обеспечить от предложенного исполнительного клиношарнирного механизма с вогнутым клином [2, 3].

Клиношарнирный механизм пресса (рис. 1) состоит из вогнутого клина 1, шарнира 2 и полузна 3. Клин 1 имеет две рабочие поверхности, одна из которых выполнена плоской и опирается на упорную деталь – верхнюю поперечину пресса. Вторая рабочая поверхность клина выполнена по радиусу вогнутой цилиндрической и сопрягается с выпуклой цилиндрической поверхностью шарнира 2. Шарнир 2 имеет вторую рабочую поверхность, которая также выполнена по радиусу и сопрягается с цилиндрической поверхностью полузна 3. Кли-

ношарнирный механизм работает следующим образом. Под действием силы привода, вогнутый клин 1 перемещается горизонтально, воздействует на шарнир 2, который, поворачиваясь вокруг своей оси, перемещает полузна 3. Полузна 3 совершает рабочий ход и, доходя до крайней нижней точки, возвращается в исходное положение под действием усилия буфера.

Характер движения звеньев клиношарнирного механизма аналогичен характеру движения звеньев двухползуноного рычажного механизма, а, следовательно, структурные схемы этих механизмов идентичны (рис. 2) [3].

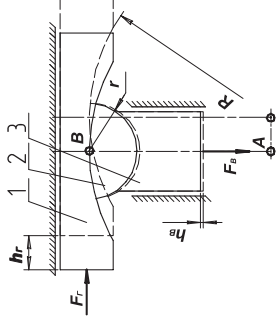


Рис. 1. Схема клиношарнирного механизма

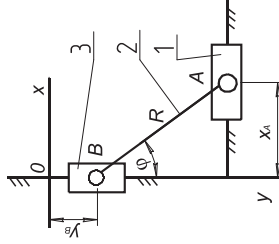


Рис. 2. Структурная схема

Однако имеются и принципиальные отличия этих механизмов. Клиношарнирный механизм имеет короткие звенья, а поэтому – большую жесткость, его шарниры отличаются большими опорными площадями, способными передавать большие силы. Эти отличия обеспечивают преимущество клиношарнирного механизма перед рычажными механизмами при применении их в кузнечно-прессовом оборудовании.

Проведены теоретические исследования клиношарнирного механизма с вогнутым клином аналитическим и графоаналитическим методами кинематического и динамического анализа [3-5].

Установлена зависимость между приводной горизонтальной силой на клине  $F_r$  и технологической вертикальной силой на полузне  $F_b$ :

$$F_b = F_r / \text{tg}(\varphi + \rho + \psi) = F_r / \text{tg}(\varphi + \arctg f + \arcsin(f \frac{R+r}{R})), \quad (1)$$

где  $\rho, \psi$  – углы трения в поступательных кинематических парах и на цилиндрических поверхностях клина, шарнира и полузна;

$f$  – коэффициент трения в кинематических парах;

$r$  – радиус шарнира.

На рис. 3 представлены графики изменения силы  $F_b$  в зависимости от угла поворота полузна (шарнира)  $\varphi$  для разных значений коэффициентов трения  $f$ , рассчитанные двумя методами. Параметры клиношарнирного механизма: радиус клина  $R = 300 \text{ мм}$ ; радиус шарнира  $r = 45 \text{ мм}$ ; сила на клине  $F_r = 49 \text{ кН}$ ; угол  $\rho$  изменяется от 0 до 15°.

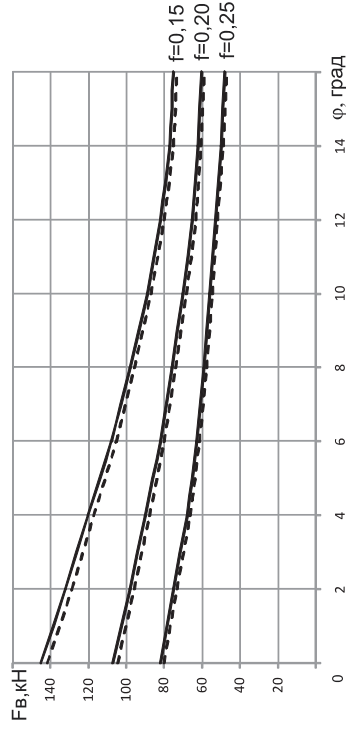


Рис. 3. Графік зміни сили пологого опору від кута повороту шарнира:

— — — — графоаналітичний метод;  
 ————— аналітичний метод

Аналіз отриманих даних показав, що розходження між результатами, отриманими двома методами, становить не більше 2,5%, що говорить про можливість їх застосування. Графоаналітичний метод більш простий і наглядний при використанні, однак він використовується тільки для шатунних механізмів, тоді як аналітичний, являється більш універсальним.

С використанням проведених вище математических моделей розроблена методика проектування пресов з клиношарнирним механізмом з вигнутим клином для реалізації розділювальних операцій. Результатом практичного застосування даної методики являється розробка спеціалізованого клиношарнирного преса з усиленням 4 МН [6].

#### Список літератури

1. Роганов Л. Л. Совершенствование клиношарнирных механизмов пресов для разделительных процес сов обработки давлением : монография / Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста. – Краматорск : ДГМА, 2016. – 134 с.
2. Чоста Н. В. Механические системы с переменной клиновидностью / Н. В. Чоста // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Вып. 4. – С. 393–395.
3. Владимирова Э. А. Комплексный расчет исполнительного механизма преса с группами Ассура произвольной структуры / Э. А. Владимирова, В. Е. Шоленинов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорск : ДДМА, 2007. – С. 316–321.
4. Чоста Н. В. Розробка універсальної методики кінематического расчета клиношарнирных механизмов / Н. В. Чоста, В. Е. Шоленинов // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2(27). – С. 195–200.
5. Роганов Л. Л. Определение КПД клиношарнирных механизмов / Л. Л. Роганов, Н. В. Чоста // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорск : ДДМА, 2003. – С. 487–489.
6. Роганов Л. Л. Розробка нового типу кузнечно-пресового оборудования для разделительных операций / Л. Л. Роганов, С. Г. Карпачук, Н. В. Чоста // Металлообработка. – Санкт-Петербург, 2010. – №6(60). – С.28–34.

УДК 621.771.01

Грибов Э. П.<sup>1</sup> д.т.н., доц.; Гаврильченко Е. Ю.<sup>2</sup>, Семиошко Я.А.<sup>1</sup><sup>1</sup> – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина<sup>2</sup> – ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод», г. Краматорск, Украина

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРАВКИ ВОЛНИСТОСТИ ЛИСТОВ НА ЛИСТОПРАВЯТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Правка листов является одним из важных этапов получения качественной металлопродукции. Повышение требований к геометрическим характеристикам листопроркатной продукции определяет развитие листопроркатных машин с точки зрения повышения эффективности процесса и расширения их возможностей для реализации правки не только продольной кривизны, но и волнистости, что возможно при использовании изгиба рабочих роликов [1]. Указанное делает актуальным развитие математических моделей процесса правки для определения необходимых настроек роликов.

Основная задача математического описания процесса правки листового металлопроката заключается в определении энергосиловых параметров, необходимых для проектирования оборудования и в определении остаточной кривизны листа, необходимой для определения технологических настроек машины. В качестве методов моделирования используются численные и конечно-элементные модели. Численные модели обладают высоким быстродействием, что позволяет их использовать в автоматической системе управления [2...5]. Конечно-элементные модели требуют больших затрат машинного времени на расчет, но позволяют получать более точные результаты с широким учетом влияния факторов на процесс [7...8]. Во всех работах, посвященных моделированию правки листов отмечается преимущественное влияние свойств материала на протекание процесса. В работах [9-10] показана важность учета не только механических свойств материала, но и проявление эффекта Баушингера.

Существующие модели процесса правки листового проката не учитывают влияние изгиба рабочих роликов на распределение деформации по ширине листа и, как следствие, исправление дефекта волнистости. Это делает актуальным дальнейшее развитие математических моделей с представлением деформируемого металла в трехмерном пространстве и позволяющим анализом влияния технологических настроек рабочих роликов на плоскостность выпрямляемого проката.

Целью данной работы является определение влияния величины изгиба и перекрытия рабочих роликов листопроркатной машины на исправление дефекта волнистости листов.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- создание трехмерной модели процесса правки листового проката на основе использования метода конечных элементов;
  - экспериментальное подтверждение разработанной модели;
  - на основе реализации разработанной конечно-элементной модели установить влияние технологических настроек роликов на исправление дефекта волнистости листов.
- В рамках анализа напряженно-деформированного состояния металла при правке продольной и поперечной кривизны листов был выполнен расчет с использованием метода конечных элементов в системе Abaqus.

Рассматриваемая применительно к анализу процесса правки листов на правильных машинах расчетная схема, которая представляла собой деформируемый лист 4, три рабочих 1-3 и два 5, 6 направляющих ролика, представлена на рисунке 1, а.

В соответствии с расчетной схемой (см. рис. 1, а) шаг машины  $t$  был принят 250 мм, диаметр рабочих роликов 1, 2, 3 равным 220 мм. Непосредственно моделирование процесса правки было выполнено для листа толщиной 10 мм. Для моделирования изгиба оси рабочих

роликів їх бочка була виконана випуклою. Для дослідження процесу правки крайової волнистості використовували модель листа, отриману в пакеті SolidWorks.

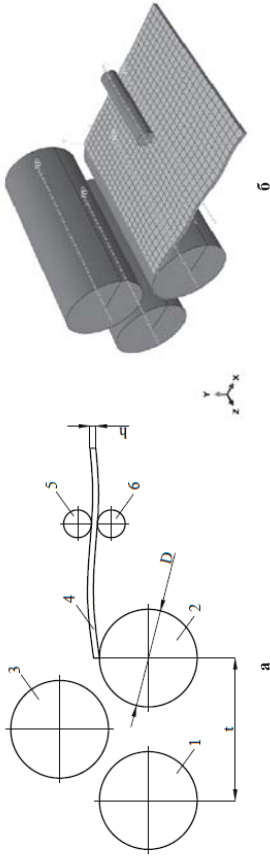


Рис. 1 – Рачётная (а) и конечно-элементная в глобальной системе координат (б) модель процесса правки листов на листопрямляющих машинах: 1-3 – рабочие ролики; 4 – лист; 5, 6 – направляющие ролики

Расчеты были произведены для различных перекрытий и различного изгиба бочки роликов. На рис. 2 представлены расчетные распределения крайовой волнистости листов в зависимости от величины изгиба роликов  $dW$ . Из анализа представленного на рис. 3 распределения видно, что с увеличением изгиба ролика крайовая волнистость уменьшается. В частности, при отсутствии изгиба высота волны уменьшилась с 4,0 мм до 3,65 мм, при изгибе 1 мм – до 2,8 мм, при изгибе 2 мм – до 1,04 мм, при изгибе 5 мм – до 0,52 мм (рис. 2). Данный факт подтверждает влияние величины изгиба ролика на исправление волнистости листов и возможность использования данного подхода для повышения качества правки листов.

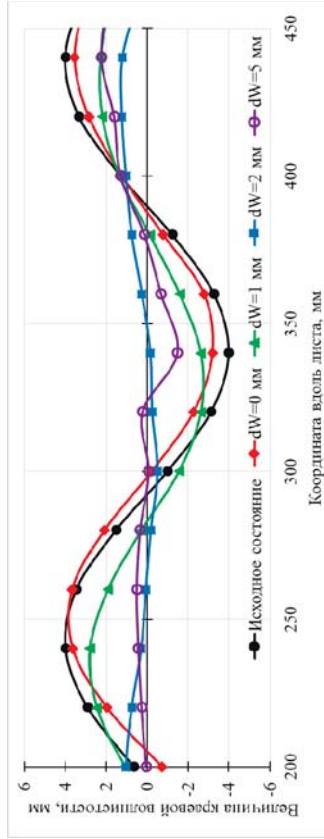


Рис. 2 – Распределение крайовой волнистости листов до и после правки при различных изгибах рабочих роликов

Экспериментальные исследования проведены с целью оценки степени достоверности конечно-элементной модели процесса правки на листопрямляющих машинах с дифференцируемым приложением силы правки по ширине полосы. Исследования проведены с использованием лабораторной экспериментальной установки правильной машины 7x100/105 [11]. Для упрощения схемы проведения эксперимента для имитации изгиба третий рабочий ролик был выполнен выпуклым с величиной  $dW$  равной 4 мм.

Правку листов проводили за три прохода без изменения настройки роликов. Типовое изменение амплитуды волнистости после каждого прохода представлено на рис. 3.



Рис. 3. Изменение амплитуды волнистости на краяхках полосы: а – исходная волнистость; б – после 3 прохода

Для сравнения результатов теоретического и экспериментального исследований была разработана на описанном выше принципе применительно к условиям опыта конечно-элементная модель правки листов. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований показало, что погрешность модели не превысила 11,8% по величине волнистости листов и 36% – по силе правки.

### Литература

- 1 Шинкин В. Н. Расчет технологических параметров правки стального листа на одиннадцатирولیковой листопрямляющей машине линии поперечной резки фирмы Fagor Argasate / В. Н. Шинкин // Производство проката. – 2014. – № 8. – С. 26–34.
- 2 Liu Zhiqiang. A new model for the plate leveling process based on curvature integration method / Zhifang Liu, Yongqin Wang, Xingchun Yan // International Journal of Mechanical Sciences. – 2012. – Vol. 54, Issue 1. – pp. 213–224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecs.2011.10.011>.
- 3 Статюни А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла и основных показателей качества при реализации процесса правки на многорولیковых правильных машинах / А. В. Статюни, Э. П. Грибков, О. А. Гаврильченко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – № 1 (18). – С. 268–273.
- 4 Улучшенный метод расчета параметров процесса правки на многорولیковых машинах / В. В. Тимченко, А. Б. Егоров, С. Ю. Саплин, О. А. Титаренко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металурії і машинобудуванні. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 495–499.
- 5 Математическая модель технологических настроек ЛПМ ТЛС 2850 Алтинского металлургического завода для горячей и холодной правки листов / В. А. Федорин, А. В. Барабаш, Е. Ю. Гаврильченко, Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – № 1 (38). – С. 48–53.
- 6 Silvestre E. Testing and Modeling of Roll Levelling Process / E. Silvestre, E. S. de Argandoña, L. Galdos, J. Mendiguren // Key Engineering Materials. 2014. – Vols. 611-612. – pp. 1753-1762. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1753>.
- 7 Mathieu N. Flaws defects after bridle rolls: a numerical analysis of leveling / N. Mathieu, R. Dimitriou, A. Parrico, M. Potier-Ferry, H. Zahrouni // International Journal of Material Forming. – 2013. – Vol. 6. – Issue 2. – pp. 255-266. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-011-1083-2>.
- 8 Petruška J. A New Model for Fast Analysis of Leveling Process / J. Petruška, T. Návrát, F. Šebek // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 586, pp. 389-393. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.586.389>.
- 9 Lemoine X. Bauschinger effect correspondence of experimental tests / X. Lemoine, A. Aouafi // International Journal of Material Forming. – 2008. – Vol. 1. – Supplement 1. – pp. 241-244. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-008-0357-9>.
- 10 Dratz B. Testing and modelling the behaviour of steel sheets for roll levelling applications / B. Dratz, V. Nalevjak, J. Birkard, Y. Chastel // International Journal of Material Forming. – 2009. – Vol. 2. – Supplement 1. – pp. 519-522. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-009-0560-3>.
- 11 Barabash A. V. Straightening of Sheet with Correction of Waviness / A. V. Barabash, E. Yu. Gavrilchenko, E. P. Gribov, O. E. Markov // Steel in Translation. – 2014. – Vol. 44. – No. 12. – pp. 916-920. <http://dx.doi.org/10.3103/S096709121412002X>.



УДК 621.438.002.2

Бень А.Н. асп.  
ЗНТУ, г. Запорожье, Украина

### СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В современном авиа двигателестроении особенно остро стоит вопрос увеличения долговечности деталей. Повышение ресурса и надежности авиационных двигателей позволяет в значительной мере определить экономичность, конкурентоспособность и безопасность полетов. Лопатки компрессора являются одними из важнейших деталей, выносливость которых определяет ресурс и надежность авиационных двигателей. Для повышения их эксплуатационных характеристик необходима разработка и внедрение в производство прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих высокое качество изготовления.

В настоящее время при изготовлении лопаток компрессора широко применяются полу-чили методы пластического деформирования, которые включают в себя: штамповку на прессах, деформирование в изотермических условиях и высокоскоростное выдавливание.

Готовые лопатки проходят ряд упрочняющих операций, которые могут включать: верхностное пластическое деформирование (пневмо дробеструйную обработку), вибрационное и ультразвуковое упрочнение, магнитно-образное полирование и т.д.

Одним из путей повышения долговечности лопаток авиадвигателей является изготовление биметаллических заготовок, которые позволяют значительно повысить прочность и износостойкость. Существуют технологии изготовления биметаллических лопаток авиадвигателей с защитными покрытиями методами различных напылений, которые в некоторой степени позволяют справиться с существующей проблемой [1], но обладая рядом недостатков, среди которых недостаточная плотность покрытия и невысокая производительность процесса. Существует также способ изготовления лопаток с защитным покрытием методом выдавливания, который отличается высокой трудоемкостью [2].

На предприятиях биметаллические изделия получают следующими способами: совместной прокаткой, соединением металлов взрывом, методы совместного деформирования в штампах (прессование или выдавливание), волочение, методы порошковой металлургии. [3]

В данной работе предлагается технологический процесс изготовления биметаллической заготовки компрессорной лопатки методом выдавливания. Заготовка под выдавливание состоит из двух частей: внутренней цилиндрической вставки и наружного слоя (рис.1).

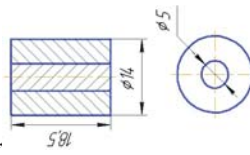


Рис. 1. Заготовка под выдавливание компрессорной лопатки

Разработанный технологический процесс позволил изготовить биметаллическую компрессорную лопатку [4]. После выдавливания заготовка разрезалась вдоль пера лопатки по центру внутренней цилиндрической вставки. На рис. 2 показаны сечения выдавленных биметаллических заготовок лопаток с различными степенями деформации относительно исходной высоты заготовки.

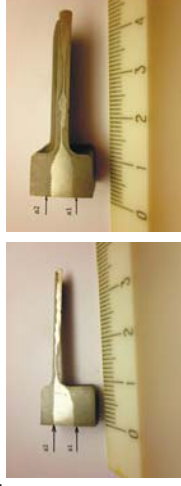


Рис. 2 – Сечения заготовок лопаток:

- а - наружный слой ВТ-8 – внутренний слой ВТ-1, относительная деформация – 48,6%;
- б - наружный слой ВТ-8 – внутренний слой ВТ-1, относительная деформация – 50,3%

На рис. 3, а приведено состояние граничной поверхности в перьевой части лопатки, которая подвергается деформации выдавливания. На рис. 3, б представлено состояние граничной поверхности в хвостовой части лопатки, которая претерпевает деформацию осаживания. Как видно, в первом случае зерна имеют вытянутую направленную равномерную структуру, а во втором – структура имеет зернистый характер. Просматриваются также участки возникновения интерметаллидных соединений, которые в перьевой зоне увеличиваются, то есть при прохождении биметаллической заготовки через область всестороннего неравномерного сжатия в поиске матрицы, достигается взаимодействие между слоями заготовки с возникновением интерметаллидного слоя.

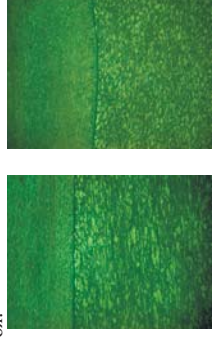


Рис. 3. Граница контакта двух слоев выдавленной заготовки компрессорной лопатки x500:

- а – перьевая часть, б – хвостовая часть

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования по выдавливанию биметаллической заготовки показали, что данный процесс является возможным. Металлографические исследования доказали, что при выдавливании биметаллической заготовки происходит взаимодействие слоев и образование в зоне взаимодействия интерметаллидов. Полученные результаты дают основу для усовершенствования процесса в дальнейших исследованиях. Благодаря биметаллической конструкции компрессорной лопатки повышается коррозионная стойкость, износостойкость, устойчивость от воздействия вибрационных нагрузок.

#### Литература

1. Абрашнов Н.Б. *Высокотемпературные материалы и покрытия для газовых турбин* / М.: Машиностроение, 1993 – 336 с.
2. Кутыкова А.С. *Технология изготовления лопаток с защитным покрытием методом изотермического выдавливания биметаллической заготовки под изотермическую штамповку* / А.С. Кутыкова // Электронное научно-техническое издание Наука и образование. Эл. № ФС 77-48211. Гос. рег. №0421200025. ISSN 1994-0408. – 2009, 07 июля.
3. Матрицлов В.Ф. и др. *Расчет процессов деформации композиционных материалов* / М.: Металлургия, 1992. – 208 с.
4. Бень А.Н. *Исследование процесса изготовления биметаллических заготовок компрессорных лопаток авиадвигателей методом выдавливания* / А.Н. Бень // *Обработка материалов давлением* – 2013. - № 4 (37). – С.83-86.

УДК 004.942: 621.7.04

Алтухов А.В.<sup>1</sup>, к.т.н., Добряк С.К.<sup>1</sup>, к.т.н., Тарасов А.Ф.<sup>1</sup>, д.т.н., проф.

1 - Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ИНТЕНСИВНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Моделирование технологических процессов пластического деформирования в программах на основе метода конечных элементов дает возможность изучить напряженно-деформированное состояние (НДС) исследуемой заготовки в виде обобщенных полей, а также тензоров деформаций, напряжений и др. При большой детализации инструмента и заготовки результат моделирования включает тысячи или десятки тысяч узлов и элементов, совокупность которых позволяет выполнить анализ распределения деформаций и оценить напряжения в объеме заготовки. Возможности визуализации результатов моделирования заложенные в современные САЕ-системы дают возможность детально и поэтапно изучить развитие очага пластического деформирования в объеме заготовки используя сечения по базовым плоскостям. Ряд САЕ-систем позволяют построить зависимости характеристик НДС по результатам моделирования. Однако на этом возможности САЕ-систем заканчиваются.

При исследовании процессов интенсивного пластического деформирования, которые включают несколько операций деформирования со сменой направления деформирования для получения равномерного распределения механических свойств по объему заготовки, требуются новые возможности, которые позволили бы выбрать оптимальный маршрут деформирования, анализировать влияние параметров инструмента на равномерность/неравномерность деформаций в отдельных участках и по всему объему заготовки, выявлять ключевые факторы и учитывать их при последующих исследованиях.

Для реализации таких функций разрабатывается интегрированная система автоматизированного проектирования (ИСАПР) на основе САЕ-системы с открытым интерфейсом. В качестве САЕ-системы для ИСАПР выбран Abaqus [1, 2]. В ИСАПР решается задача извлечения результатов моделирования многоэтапных процессов интенсивного пластического деформирования и построения закономерностей изменения НДС заготовки в зависимости от параметров инструмента.

Список литературы

- 1 Python scripts for Abaqus learn by example / Gautam M Puri // Charleston, S.C. – 2011. – P. 746.
- 2 *Khemtane Amar*. Introduction to finite element analysis using MATLAB® and Abaqus / Khemtane Amar // CRC Press. – 2013. – P. 486.

УДК 669.18:621.771:621.74

А.В. Ноговцин д.т.н., И.Р. Баранов

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины г.Киев, Украина

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДВУХВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКИ-ПРОКАТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

Валковая разливка-прокатка является одним из наиболее перспективных и эффективных процессов производства листовых заготовок из железуголеродистых и алюминевых сплавов. К преимуществам этой технологии относятся компактность агрегата и экономия до 80-89% энергоресурсов за счет минимизации промежуточных технологических операций [1]. Однако наладить устойчивый высокопродуктивный промышленный процесс двухвалковой разливки и обеспечить стабильное получение качественной полосы на сегодня в полной мере не удается. Ряд проблем связанных со сложностью управления гидродинамическими, температурными, кинетическими процессами литья-прокатки, с низкой стабильностью массопереноса в жидком металле и трудностью определения экспериментальным путем ключевых параметров технологической зоны кристаллизации-деформации в межвалковом пространстве, требуют длительных исследований и дальнейших усовершенствований всех этапов технологического процесса.

В работе проведены экспериментальные и теоретические исследования гидродинамики расплава в межвалковом зазоре при различных его параметрах, рассчитаны максимально допустимые скоростные режимы получения металлической полосы различной толщины в валках-кристаллизаторах разного диаметра. Выполнено физическое моделирование и математические расчеты гидродинамики расплава в межвалковом зазоре. Физическое моделирование проводилось на лабораторной двухвалковой установке (рис.1).

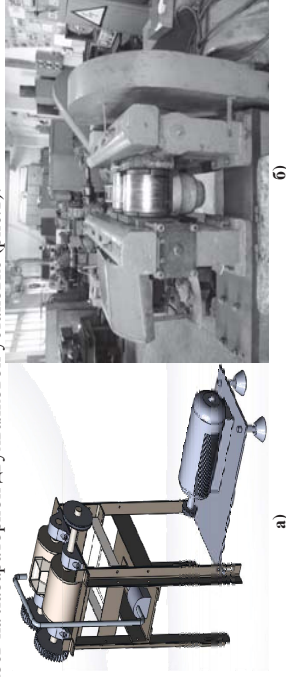


Рис. 1- Эскизная схема (а) и реальная двухвалковая установка (б)

Результаты физического моделирования сопоставляли с результатами компьютерного моделирования поля скоростей жидкости в межвалковом зазоре двухвалкового кристаллизатора. Результаты численного расчета и эксперимента дали возможность создания надежного математического аппарата для исследования течения металла в процессе валковой разливки и более глубокого понимания процессов, протекающих в межвалковом пространстве.

Оценка влияния геометрических параметров зоны разливки на параметры течения расплава показывает на значительную неравномерность распределения скоростей течения в поперечных сечениях межвалкового зазора. Особенностью работы двухвалковых кристаллизаторов является совмещение процессов затвердевания металла и его последующей пластической деформации в пространстве между двумя вращающимися навстречу друг другу валками. Металл находящийся в межвалковом пространстве, последовательно перемещается через зоны кристаллизации и деформации (рис.2).

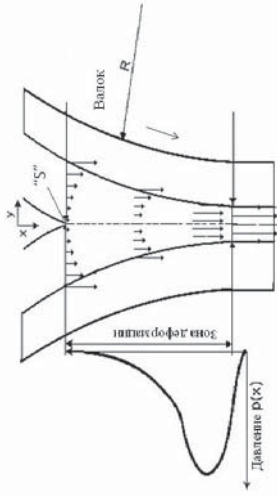


Рис.2 – Схема сечения межвалкового пространства при прохождении жидкого металла в процессе валковой разливки-прокатки

При формировании листовых заготовок в технологическом процессе двухвалковой разливки важность информации о длине участка кристаллизации является ключевой, однако сложность непосредственного экспериментального определения границы между двумя характерными областями зоны кристаллизации-деформации заставляет обращаться к математическому моделированию. Опубликованных работ по экспериментальному исследованию параметров затвердевания расплавов при валковой разливке крайне мало.

В данной работе толщина корочки определяли по формуле «квадратного корня» и путем расчета положения линии солидуса на рассчитанном поле температур металла в межвалковом зазоре. Для определения скорости кристаллизации при валковой разливки-прокатки стальной полосы использовали результаты экспериментальных исследований Т. Мизотучи и К. Мизава [2], а для алюминия С.Беркович [3]. Путем сопоставления экспериментальных данных и расчетных значений толщины корочки затвердевающего металла, установлено, что при валковой разливке-прокатке коэффициенты скорости кристаллизации для технического алюминия составляют  $k = 7,4 \text{ мм/сек}^0,5$  для стали  $k = 4,2 \text{ мм/сек}^0,5$ , и существенно превышают значения коэффициентов при затвердевании металла в слитках. Изучены реологические пределы текучести для углеродистых и легированных сталей. В сочетании с данными о вязкости жидкой стали и сопротивлении деформации стали в твердом состоянии получены зависимости наиболее полно описывающие реологию металла в жидком, жидко-твердом и твердом состояниях. Они могут быть основой для расчета энергооспловых параметров процесса и оборотов валковой разливки. Исследовано влияние скорости затвердевания и последующей горячей деформации на структуру стали.

Установленные в работе закономерности влияния технологических и физических параметров на формирование листовых заготовок при валковой разливке-прокатке показали, что необходимыми условиями для стабильного процесса являются постоянство температуры и расхода подаваемого в валки-кристаллизаторы металла, равномерность его распределения по длине зазора, способ подачи металла, при постоянной скорости, что обеспечивает постоянство физико-химических свойств расплава и стабильность гидродинамического режима разливки и теплофизических условий формирования качественной заготовки.

#### Литература

1. Шалымов А.Г. Двухвалковые литейно-прокатные агрегаты для производства тонких горячекатаных стальных полос. Ч.II // Электromеталлургия. - №2. - 2014. - С.12-16
2. Mizoguchi T., Miyazawa K. Formation of solidification structure in a twin-roll rapid solidification process // Advanced Materials and Process. - 1990. - Vol. 1. - P. 93-98.
3. Berkovici S.J. Optimisation of 3C roll caster by automatic control // Proc. of Conference "Light Metals". - TMS, New York. - 1985. - P. 1285-1299.

УДК

М. Б. Штерн, О. П. Майданюк, О. В. Михайлов  
НТУУ «КПІ», ІПМ НАН України

## НЕЛІНІЙНА ПРУЖНІСТЬ, ПЛАСТИЧНІСТЬ ТА ДИНАМІЧНА РЕАКЦІЯ РІЗНООПІРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглядається поведінка матеріалів, ефективна макроскопічна реакція яких є чутливою до траєкторії навантаження.

Зокрема, дослідження торкається матеріалів, механічні властивості яких при стисненні та розтязні різні.

Результати дослідження розповсюджуються на матеріали, що містять пошкодження генетичного походження або набуті в ході деформації та експлуатації.

Також, до даного класу можуть бути віднесені композиційні матеріали типу «матриця – вкраплення», деформування яких супроводжується деградацією межі між складовими рівнями типів.

Для опису поведінки таких матеріалів запропоновано фізично нелінійну модель пружного деформування, яка за припущеннями про ізотропію описується чотирма матеріальними параметрами. Двос з них характеризують фізичні причини різноопірності. В якості частинного випадку визначальні співвідношення запропонованої моделі переходять в узагальнений закон Гука.

На відміну від класичної теорії пружності, запропонована версія передбачає перехресний ефект, тобто вплив логічних напружень на об'ємну деформацію та, в свою чергу, шарової складової напружень на зсувну деформації (пружна дилатансія).

Отримана модель дозволяє перейти до характеристики пластичної поведінки з урахуванням незворотної зміни об'єму на підставі гіпотези Бельтрамі.

Отримана таким чином теорія пластичності узгоджується із найбільш поширеними моделями пластичної течії стисливих середовищ (Cam – Clay model, Shima – Green model). Ідентифікацію параметрів моделі проводили методами мікромеханічного аналізу на репрезентативній комірці.

Зокрема, для композиційних матеріалів припустили наявність недосконалого контакту на межі матриця – вкраплення, внаслідок чого враховувалась можливість формування в ході навантаження внутрішніх порожнин у вигляді пор та щілинподібних дефектів. Розглянуто зв'язок різноопірності, незвотної стисливості та дилатансії із наведеними типами дефектів.

Встановлено також вигляд залежності від них ефективних констант пружності та пластичності. Серед іншого, з'ясовано можливість розпушення на ранніх стадіях стиснення композитів.

Зазначений ефект виявився суттєвим з точки зору оптимізації динамічної реакції таких матеріалів, зокрема, з огляду на створення елементів ударостійких конструкцій.



Штери М.Б., д.т.н., проф., Тітов А.В., к.т.н., доц.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

### ПРО ГРАНИЧНИ КРИТЕРІИ ТА ВТРАТУ СТІЙКОСТІ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ МІКРОНЕОДНОРІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглядаються граничні критерії поведінки матеріалів, що містять пошкодження, як наслідок незворотного деформування, так і матеріалів порошкового походження. Основну увагу приділено формулюванню критерію їх руйнування, який мав би бути асоційованим із процесами накопичення дефектів, зміцненням, розпушенням, був певною мірою чутливим до еволюції структури таких матеріалів, а також до траєкторій навантаження та деформування. Критерій формулюється у вигляді макроскопічних співвідношень. В якості джерела для отримання шуканих співвідношень використовується уявлення про стійкість деформування. В якості критерію стійкості використовується нерівність Дракера, або її модифікації. Авторами доводиться той факт, що використання цього критерію у сукупності із моделлю пластично-деформування пошкоджених та пористих матеріалів, чутливих до зміцнення, веде до критеріїв деформування вельми близьких до тих, що запропоновані В. Л. Колмогоровим та В. А. Огородніковим. Структурна чутливість отриманих критеріїв забезпечується тим, що відповідна модель пластичної течії обирається такою, що узгоджується із мікромеханічними уявленнями, або безпосередньо виводиться з них, подібно тому, як це зроблено у випадку відомої моделі Герсона. Це дає змогу формулювати граничні умови для процесів пластично-траєкторій процесів обробки тиском, а також такі параметри як поточний вміст пошкоджень або пор, а також інші характеристики структури.

Використовуючи загальні властивості дисипативної функції для процесів незворотного деформування, авторам вдалося довести, що подібно до того, як це зроблено для випадку пластичного навантаження, відповідний критерій стійкості може бути сформульовано і для повзучості та нелінійно – в'язкої поведінки. Отримані таким чином критерії руйнування разом із наведеними вище параметрами також містять час деформування або навантаження. Це дає змогу формулювати критерії руйнування для процесів не тільки пластичної деформації, але й для процесів із незмінним зовнішнім навантаженням.

Отриманий результат дає змогу модифікувати критерії типу В. Л. Колмогорова та В. А. Огороднікова для процесів гарячого деформування, тобто тих, для яких витримка тиску у часі є характерною.

К.А. Гогаев, В.С. Воропаев, Ю.Н. Подрезов, Я.И. Евич, А.Ю. Коваль, Е.А. Потгилака  
ІПМ НАН України

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ Al-Mg

Одним из направлений в разработке новых материалов на алюминиевой основе является использование быстро закристаллизованных порошковых алюминиевых сплавов. Методы порошковой металлургии позволяют получать материалы из порошковых смесей, которые могут содержать в своем составе широкую гамму легирующих компонентов. Использование метода быстрой кристаллизации порошков позволяет получать сплавы с особо мелкозернистой структурой и предельно высоким содержанием легирующих компонентов в алюминиевой матрице, что обычно невозможно при использовании методов традиционной металлургии.

Одним из направлений получения компактных изделий из порошковых алюминиевых сплавов является применение деформационных технологий экструзии с последующей симметричной или асимметричной прокаткой. Цель настоящей работы – исследование влияния схемы прокатки, степени деформации и фракционного состава на механические свойства и характер разрушения экструдированных быстрозакаленных порошковых сплавов системы Al-Mg.

В работе проведено исследование влияния схемы прокатки на структуру и свойства порошкового материала из сплава 11,2Mg-2,2Mn-0,6Zr сформованного экструзией из порошков фракций -40 мкм, -63+40 мкм, -100+63 мкм и -160+100 мкм продеформированного прокаткой при температуре 400 С.

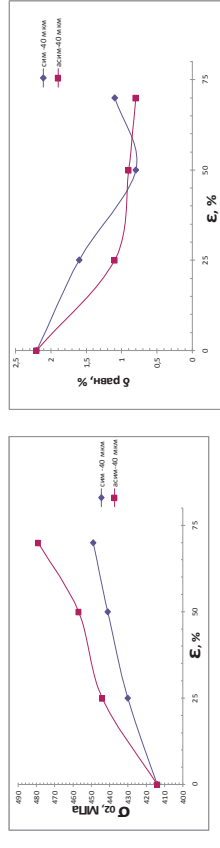


Рис. 1 Зависимость предела текучести (а), и равномерной деформации (б) от степени деформации порошкового сплава Al-11,2Mg-2,2Mn-0,6Zr фракция -40 мкм; прокатанных по симметричной (■) и асимметричной (●) схемам.

Установлено, что прокатка порошков сложнолегированных сплавов позволяет значительно повысить их прочность при сохранении удовлетворительной пластичности. Асимметричная прокатка является предпочтительной в тех случаях, когда упрочнение определяется накоплением деформационных дефектов. В тех случаях, когда деформация сопровождается рекристаллизацией, более высокие свойства демонстрируют образцы продеформированные симметричной прокаткой.

УДК 539.374.001.8

Чигиринский В.В. д.т.н., проф., Ленок А.А. аспирант каф. ОМД ЗНТУ  
Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

### АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАЗНОРАЗДЕЛЬНОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА

Процессы обработки металлов давлением характеризуются значительной неоднородностью напряженного состояния, которое определяется не только физическими величинами, такими как коэффициент трения, но и геометрическими соотношениями, характеризующими факторы формы. Анализ экспериментальных данных показывает, что в условиях развития контактного трения, разных факторов формы очага деформации в продольно-поперечном сечении возникают различные деформационные схемы течения металла, которые являются определяющими для напряженного состояния полосы. Можно утверждать, что существует одно- и двураздельные схемы течения металла в том или ином направлении [1]...[3].

В работах [4], [5] представлены пространственные математические модели напряженно-го состояния пластической среды в условиях одной и двух линий раздела течения металла. Схеме течения металла с одной линией раздела соответствует однокулольная эпюра контактных нормальных напряжений (рис.1, а), при двураздельном течении металла – двухкулольная (рис.1, б).

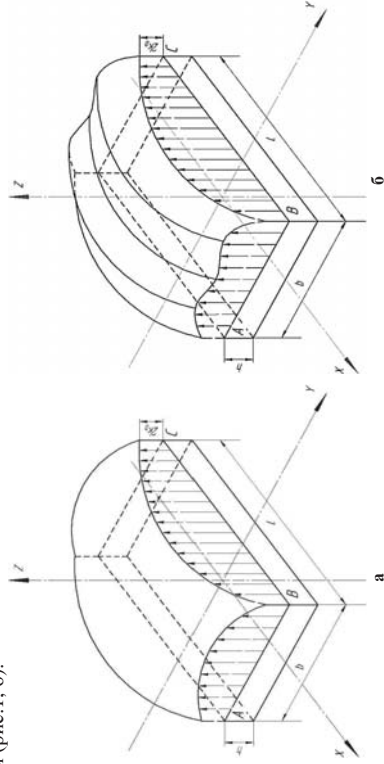


Рис.1 - Объемная эпюра контактных напряжений:  
а - однокулольная, б - двухкулольная.

Для решения поставленной задачи используется метод гармонических функций, рассматривается процесс осадки прямоугольной полосы. Компоненты тензора напряжений при разнораздельном течении металла имеют вид:

$$\sigma'_x = +C_{\sigma 3} \cdot \exp \theta'_3 \cdot \cos A_3 \Phi_3 + \sigma_0 + C,$$

$$\sigma'_y = +C_{\sigma 2} \cdot \exp \theta'_2 \cdot \cos A_2 \Phi_2 + \sigma_0 + C,$$

$$\sigma'_z = -C_{\sigma 3} \cdot \exp \theta'_3 \cdot \cos A_3 \Phi_3 - C_{\sigma 2} \cdot \exp \theta'_2 \cdot \cos A_2 \Phi_2 + \sigma_0 + C,$$

$$\tau'_{yz} = C_{\tau 2} \cdot \exp \theta'_2 \cdot \sin A_2 \Phi_2, \quad \tau'_{xz} = C_{\tau 3} \cdot \exp \theta'_3 \cdot \sin A_3 \Phi_3,$$

$$\text{при условии } \theta'_{2y} = -A_2 \Phi_{2z}, \quad \theta'_{2z} = A_2 \Phi_{2y}; \quad \theta'_{3z} = A_3 \Phi_{3x}, \quad \theta'_{3x} = -A_3 \Phi_{3z};$$

$$\theta'_{2yy} + \theta'_{2zz} = 0, \quad A_2 \Phi_{2yy} + A_2 \Phi_{2zz} = 0; \quad \theta'_{3zz} + \theta'_{3xx} = 0, \quad A_3 \Phi_{3zz} + A_3 \Phi_{3xx} = 0,$$

$$\sigma_0 = -2 \cdot C_{\sigma 2} \cdot \exp \theta'_2 \cdot \cos A_2 \Phi_2 - 2 \cdot C_{\sigma 3} \cdot \exp \theta'_3 \cdot \cos A_3 \Phi_3.$$

Граничные условия для расчета эпюр контактных нормальных напряжений в угловых точках:  $x = \frac{l}{2}$ ,  $y = \frac{b}{2}$ ,  $z = \frac{h}{2}$ ,  $\theta'_3 = \theta'_{20}$ ,  $\theta'_3 = \theta'_{30}$ ,  $A_2 \Phi_2 = A_2 \Phi_{20}$ ,  $A_3 \Phi_3 = A_3 \Phi_{30}$ ,  $\sigma_x = \sigma_y = 0$ ,  $\sigma_z = -2k_0$ . Для двухкулольной эпюры добавляются:  $\theta'_2 = \theta'_{20}$ ,  $A_2 \Phi_2 = A_2 \Phi_{20}$ .

Постоянные интегрирования для однокулольной эпюры контактных нормальных напряжений:  $C = 2k_0$ ,  $C_{\sigma 2} = \frac{2k_0}{3 \cdot \exp \theta'_{20} \cdot \cos(A_2 \Phi_{20})}$ ,  $C_{\sigma 3} = \frac{2k_0}{3 \cdot \exp \theta'_{30} \cdot \cos(A_3 \Phi_{30})}$ .

Так как единый очаг деформации требует, чтобы соседние участки имели одинаковые постоянные и функции, т.е.  $\theta'_2 = \theta'_{20}$ ,  $\theta'_{20} = \theta'_{20}$ , постоянные интегрирования для двухкулольной эпюры контактных нормальных напряжений:

$$C = 2k_0, \quad C_{\sigma 2} = \frac{2 \cdot k_0}{3 \cdot \exp \theta'_{20} \cdot \cos A_2 \Phi_{20}}, \quad C_{\sigma 3} = \frac{2 \cdot k_0}{3 \cdot \exp \theta'_{30} \cdot \cos A_3 \Phi_{30}};$$

$$C = 2k_0, \quad C_{\sigma 2} = \frac{2 \cdot k_0}{3 \cdot \exp \theta'_{20} \cdot \cos A_2 \Phi_{20}}, \quad C_{\sigma 3} = \frac{2 \cdot k_0}{3 \cdot \exp \theta'_{30} \cdot \cos A_3 \Phi_{30}}.$$

Выражения нормальных компонентов тензора напряжений для однокулольной эпюры контактных нормальных напряжений:

$$\sigma'_x = -\frac{2}{3} k_0 \cdot \exp(\theta'_2 - \theta'_{20}) \frac{\cos A_2 \Phi_2}{\cos A_2 \Phi_{20}} - \frac{4}{3} k_0 \cdot \exp(\theta'_3 - \theta'_{30}) \frac{\cos A_3 \Phi_3}{\cos A_3 \Phi_{30}} + 2k_0,$$

$$\sigma'_y = -\frac{2}{3} k_0 \cdot \exp(\theta'_3 - \theta'_{30}) \frac{\cos A_3 \Phi_3}{\cos A_3 \Phi_{30}} - \frac{4}{3} k_0 \cdot \exp(\theta'_2 - \theta'_{20}) \frac{\cos A_2 \Phi_2}{\cos A_2 \Phi_{20}} + 2k_0,$$

$$\sigma'_z = -2k_0 \cdot \exp(\theta'_2 - \theta'_{20}) \frac{\cos A_2 \Phi_2}{\cos A_2 \Phi_{20}} - 2k_0 \cdot \exp(\theta'_3 - \theta'_{30}) \frac{\cos A_3 \Phi_3}{\cos A_3 \Phi_{30}} + 2k_0,$$

$$\tau'_{yz} = \frac{2}{3} k_0 \cdot \exp(\theta'_2 - \theta'_{20}) \frac{\sin A_2 \Phi_2}{\cos A_2 \Phi_{20}}, \quad \tau'_{xz} = \frac{2}{3} k_0 \cdot \exp(\theta'_3 - \theta'_{30}) \frac{\sin A_3 \Phi_3}{\cos A_3 \Phi_{30}}.$$

Функции  $A_1 \Phi_1$  и  $\theta'_1$  определяются из уравнений Лапласа и соотношений Коши-Римана:

$$A_2 \Phi_2 = A_2 A_4 \cdot y \cdot z, \quad A_2 A_{20} = A_2 A_4 \cdot \frac{b \cdot h}{4}, \quad \theta_2 = -\frac{1}{2} A_2 A_4 (y^2 - z^2), \quad \theta_{20} = -\frac{1}{2} A_2 A_4 \left( \frac{b^2}{4} - \frac{h^2}{4} \right),$$

$$A_3 \Phi_3 = A_3 A_6 \cdot x \cdot z, \quad A_3 \Phi_{30} = A_3 A_6 \cdot \frac{l \cdot h}{4}, \quad \theta_3 = -\frac{1}{2} A_3 A_6 (x^2 - z^2), \quad \theta_{30} = -\frac{1}{2} A_3 A_6 \left( \frac{l^2}{4} - \frac{h^2}{4} \right).$$

Для двухкулольной эпюры контактных напряжений компоненты тензора напряжений пространственной задачи теории пластичности (при  $k'_0 = \frac{2}{3} \cdot k_0$ ):

$$\sigma'_x = -2k'_0 \cdot \exp(\theta'_2 - \theta'_{20}) \frac{\cos A_2 \Phi_2}{\cos A_2 \Phi_{20}} - k'_0 \cdot \exp(\theta'_3 - \theta'_{30}) \frac{\cos A_3 \Phi_3}{\cos A_3 \Phi_{30}} + 3k'_0,$$

$$\sigma'_y = -k'_0 \cdot \exp(\theta'_2 - \theta'_{20}) \left( 2 \cdot \frac{\cos A_2 \Phi_2}{\cos A_2 \Phi_{20}} - \frac{\cos A_2 \Phi_2}{\cos A_2 \Phi_{20}} \right) - 2k'_0 \cdot \exp(\theta'_3 - \theta'_{30}) \frac{\cos A_3 \Phi_3}{\cos A_3 \Phi_{30}} + 3k'_0,$$

$$\sigma_z = -3k'_0 \cdot \exp(\theta'_3 - \theta_{30}) \frac{\cos A_3 \Phi_3}{\cos A_3 \Phi_{30}} - k'_0 \cdot \exp(\theta'_2 - \theta_{20}) \left( 2 \frac{\cos A_2 \Phi'_2}{\cos A_2 \Phi_{20}} + \frac{\cos A_2 \Phi_2}{\cos A_2 \Phi_{20}} \right) + 3k'_0,$$

$$\tau_{yz} = k'_0 \cdot \exp(\theta'_2 - \theta_{20}) \frac{\sin A_2 \Phi_2}{\cos A_2 \Phi_{20}}, \quad \tau_{xz} = k'_0 \cdot \exp(\theta'_3 - \theta_{30}) \frac{\sin A_3 \Phi_3}{\cos A_3 \Phi_{30}}.$$

Из уравнений Лапласа и соотношений Коши-Римана функции  $A_1 \Phi_1$  и  $\theta'_1$ :

$$A_3 \Phi_2 = \pi + 4 \frac{(\pi + \alpha \cdot A_2 \Phi_{20}) \cdot yz}{bh}, \quad A_2 \Phi_{20} = A_2 \Phi_{20} = A_2 A_3 \frac{b}{2} \frac{h}{2},$$

$$\theta'_2 = -\frac{1}{2} A_2 A_4 (y^2 - z^2), \quad \theta_{20} = -2 \cdot \frac{A_2 \Phi_{20}}{b \cdot h} \cdot \left( \frac{b^2}{4} - \frac{h^2}{4} \right),$$

$$A_3 \Phi_3 = A_3 A_6 \cdot x \cdot z, \quad A_3 \Phi_{30} = A_3 A_4 \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{h}{2}, \quad \theta'_3 = -\frac{1}{2} A_3 A_6 (x^2 - z^2), \quad \theta_{30} = -2 \cdot \frac{A_3 \Phi_{30}}{l \cdot h} \cdot \left( \frac{l^2}{4} - \frac{h^2}{4} \right).$$

Имеет место пластическое деформирование металла в поперечном направлении с одной линией раздела (рис.2, а). В то же время, при более широком очаге деформации может возникнуть другая схема течения – двураздельная (рис.2, б).

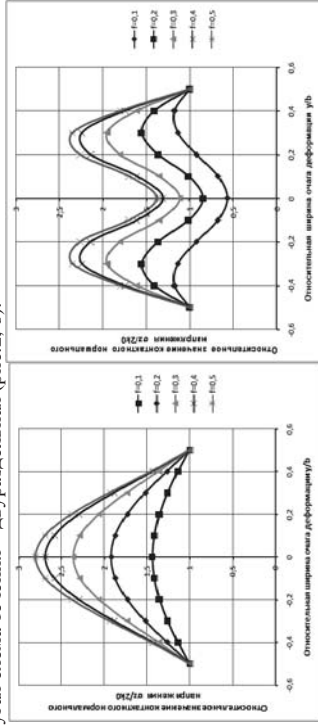


Рис.2 - Эпюры вертикальных нормальных напряжений при  $x=L/2$ : а) однокупольная (б), двухкупольная (б).

В первом случае металл растекается от оси симметрии в противоположные стороны нагружения. Во втором – в центральной части металл течет не наружу, а во внутрь. Данные физические модели определяют разное напряженное состояние полосы, включая контактные напряжения.

**Список использованной литературы:**

1. Катуров Л.Е. Контактные силы в очаге деформации при прокатке полос. Теория прокатки (материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства», под ред. А.П. Чекарнера. – Москва «Металлургия», 1975. – С.428-431.
2. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах / А.И. Целиков. – М: Металлургия, 1962. – 495 с.
3. Чекарнер А.П. Теория продольной прокатки / А.П. Чекарнер, А.А. Нефедов, В.А. Николаев. Изд. Харьковского ордена трудового красного знамени государственного университета им. А.М. Горького. – Харьков. – 1965. – 212 с.
4. Чигиринский В.В. Исследование влияния граничных условий на контактные напряжения при объемном нагружении / В.В. Чигиринский, А.А. Ленок // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. Крайноворок: ДТМА, 2016. – №1(42). – С. 37-44.
5. Чигиринский В.В. Двукупольная эпоха контактных напряжений в пространственной задаче теории пластичности / В.В. Чигиринский, А.А. Ленок, Х. Дая, М. Клянишки // XVIII International scientific conference New technologies and achievements in metallurgy, material engineering, production engineering and physics: monografie № 68. – Czestochowa, 2017. – С. 154-164.

УДК 539.3/4+534/(031)

**Чигиринский В.В. д.т.н., проф., Путьюки А.Ю. к.т.н., докторант каф. ОМД, ЗНТУ**  
 Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖКЛЕТЕЧЕВОГО**  
**ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СМЕЖНЫХ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРЫВНОГО**  
**ШИРОКОПОЛОСНОГО СТАНА**

Необходимость учета динамической составляющей процесса, в том числе факт при-ложения нагрузки во времени существует в прикладных задачах теории упругости. Напри-мер, рассматривая непрерывную прокатку, возникают следующие сочетания механических систем, в которых передача воздействия между клетями через полосу происходит с некото-рыми запаздыванием. Это отражается на переходных процессах и захватывающей способно-сти полосы в смежных клетях непрерывного стана. Полоса между клетями стана находится в упругом состоянии. В период захвата последующей клети валки передают возмущение поло-се в виде стационарного воздействия или колебаний. В итоге, это сказывается на качестве проката в виде продольной разнотолщинности, следовательно, потери точности [1]. Необхо-димо рассматривать и пространственную динамическую задачу при разных условиях взаи-модействия между клетями.

Представляет практический и теоретический интерес рассмотреть волновую задачу, как процесс распространения начального отклонения и начальной скорости. В первом при-ближении эту задачу можно, определить, как линейную. В работах [2]...[7] представлены решения линейной динамической задачи с использованием волнового уравнения вида

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}.$$

В работе рассмотрен метод разделения переменных (метод Фурье). Решение пред-ставляется в виде

$$u(x,t) = X(x) \cdot T(t).$$

В силу линейности и однородности, в общем случае, сумма частных решений будет иметь вид

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( A_n \cos \frac{m}{l} \cdot at + B_n \sin \frac{m}{l} \cdot at \right) \cdot \sin \frac{m}{l} \cdot x.$$

Постоянные интегрирования в данном выражении определяются краевыми условия-ми. Класс функций, определяющих граничные и краевые условия, ограничен.

В связи с возникновением сложностей использования полученного решения в практи-ческих задачах разработаны подходы, позволяющие определить условия существования не-скольких решений, соответствующие заданным граничным и краевым условиям разных при-кладных задач.

Полученное выражение нашло широкое применение при анализе волновых процессов. Однако, оно реализуется не для всех краевых условий прикладных задач.

Рассмотрен вариант частного решения уравнения с использованием функций-аргументов

$$u = C \cdot \exp \theta \cdot \cos A \Phi,$$

где аргумент-функции  $\theta, A \Phi$  подлежат определению решением задачи.

После несложных преобразований исследованы три варианта дифференциальные со-отношения между смежными аргумент-функциями:

$$a \theta_x = \theta_t, \quad a A \Phi_x = A \Phi_t,$$

$$a \theta_x = -\theta_t, \quad a A \Phi_x = -A \Phi_t,$$



$$a\theta_s = \theta_t, \quad aA\Phi_s = -A\Phi_t.$$

В итоге полученные уравнения превращаются в тождество, кроме последнего.

Анализ показывает, что ограничения на аргумент-функции представлены дифференциальными соотношениями и уравнениями такого же типа, как исходные волновые. Данная особенность определяет условия существования неизвестных аргумент-функций и, в конечном счете, решений исходного волнового уравнения.

Таким образом, решения последнего варианта позволяют определить серию новых решений волнового уравнения за счет аргумент-функций, с целью удовлетворения краевых условий разнообразных прикладных задач.

**Список использованной литературы:**

1. *Чигиринский, В. В.* Особенности динамической задачи в обработке металлов давлением / В. В. Чигиринский, В. В. Плахотник, С. П. Шейко // *Обработка металлов давлением. Сб. трудов ДонНУ МА.* – 2012. – № 4. – С. 21–25.
2. *Павлюк, Я. Г.* Основы прикладной теории упругих колебаний и удара. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
3. *Тихонов, А. Н.* Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1966. – 724 с.
4. *Бабанов, И. М.* Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 560 с.
5. *Бронштейн, И. М.* Справочник по математике / И. М. Бронштейн, К. Л. Семендяев. – М.: Наука, 1964. – 608 с.
6. *Норицин, И. А.* Проектирование кузнечных и холодноштамповочных цехов и заводов. – М. Высшая школа, 1977. – 422 с.
7. *Ritoko, A. Yu.* Mathematical model of rolling dynamics when filling finishing train of wide-strip mill with strip // *Metallurgical and Mining Industry "International scientific conference. Reliability of technologic equipment" RSTE-2015.* – Dnipropetrovsk. – №11 – 2015. – P. 218–222.

УДК 621.7-4: 621.7.092

Лавриненков А. Д., к.т.н.

Национальный технический университет Украины «КПИ им. Игрия Сикорского», г. Киев

**ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ МЕЖДУ ИНСТРУМЕНТОМ И ПОВЕРХНОСТЬЮ ДЕТАЛИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВЫЛАЗИВАНИИ НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ**

Характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое при поверхностной пластической деформации сильно зависит от коэффициента трения между материалом индентора и материалом обрабатываемой детали. В большинстве обрабатываемых материалов индентором из природного алмаза или поликристалла алмаза (как например АСПК) с разными смазочно-охлаждающими жидкостями коэффициент трения колеблется в пределах  $f=0,07-0,18$ . При поверхностно-упрочняющей обработке титановых сплавов возникает ряд сложностей, связанных со свойством титана к поверхностному схватыванию с обрабатываемым инструментом, в результате чего на поверхности образуются задиры и вырывы, происходит разрушение поверхностного слоя. В случаях обработки титановых сплавов следует использовать условия, при которых возможно значительное снижение коэффициента трения вплоть до появления гидродинамического трения или при которых влияние коэффициента будет минимизировано.

Очевидно, что при введении ультразвуковых (УЗ) колебаний в процессы поверхностно-упрочняющей обработки меняется схема трения между инструментом и поверхностью детали. Ключевое влияние на трение будет иметь относительное

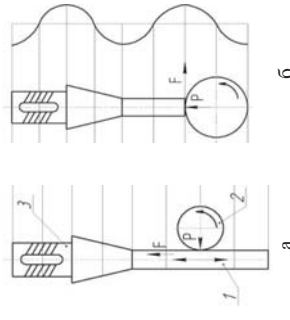


Рис. 1 – Схемы колеблющихся систем для исследования влияния ультразвука на трение: а – введение УЗ колебаний параллельно силе трения и поверхности контакта, б – введение УЗ колебаний перпендикулярно силе трения и поверхности контакта; 1 – волновод; 2 – деталь; 3 – преобразователь УЗ колебаний

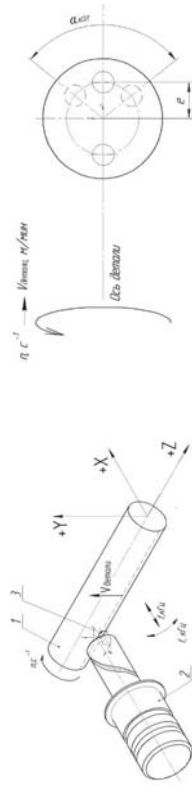


Рис. 2 – Схема расположения колеблющегося индентора по отношению к вращающейся детали (а, б) перемещение деформирующего инструмента и поверхности заготовки, которое в свою очередь будет зависеть от типа ультразвуковых колебаний. В [1, 2] проводилось исследование изменение контактного трения под действием ультразвуковых колебаний (рис. 1).

Отмечается, что наименьшее значение коэффициента трения имеет место при введении ультразвуковых колебаний параллельно силе трения (рис. 1, а) и поверхности контакта, несколько меньший эффект уменьшения трения наблюдается при введении колебаний перпендикулярно силе трения и поверхности контакта (рис. 1, б).

На рис. 2, а и б, изображена схема расположения торца концентратора ультразвуковых колебаний по отношению к обрабатываемой детали.

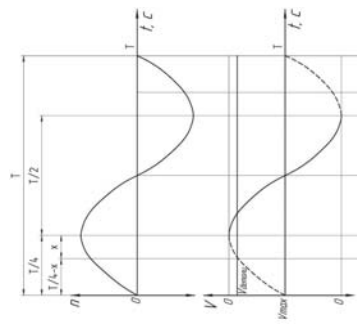


Рис. 3. Схема змінення коливальної швидкості, швидкості скользнення (вращення деталі) в теченні періода коливаний T

штриховая), другу половину періода  $T/2$  вектора швидкостей будуть направлені в протилежні сторони, ситуація при якій сили трення являються реактивними (на рисунку кривая коливаний - сплошная). На рис. 4 представлені зони внемконтатной деформації матеріала деталі в масштабованом состоянии в зависимости от схемы выглаживания. На

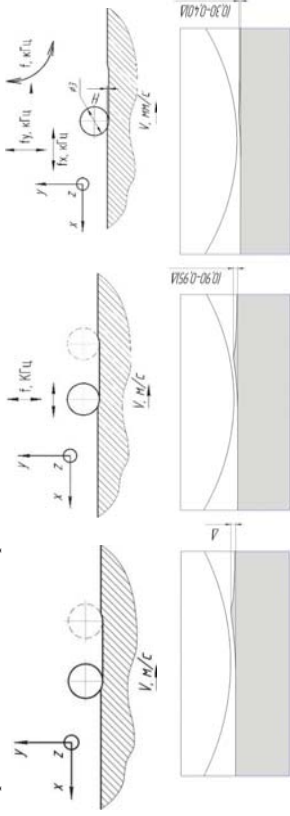


Рис. 4 - Всплывающие зоны внемконтатной деформации при выглаживании без УЗ колебаний (а), выглаживании с поперечными УЗ колебаниями (б) и выглаживании с поперечно-продольными УЗ колебаниями (в) индентора

рис. 3, б и в, высота зоны внемконтатной деформации показана относительно высоты  $\Delta$  зоны при выглаживании без УЗ колебаний (рис. 4, а). Из рис. 4, в, видно, что за счет совпадения направления движения индентора по горизонтали (ось x) при вдавливании индентора в поверхность детали, уменьшаются сдвиговые деформации поверхностного слоя, меньше влияние оказывают силы трения, результатом чего является меньшая высота валика внемконтатной деформации, которая составляет (0,3-0,4) $\Delta$ . Высота зоны внемконтатной деформации при выглаживании с поперечными УЗ колебаниями отличается от высоты зоны при выглаживании без УЗ колебаний и составляет (0,90-0,95) $\Delta$  (рис. 4, б). В натурном эксперименте это должно выражаться в уменьшении адгезионной составляющей сил трения и как результат получения лучших параметров качества поверхности.

**Список литературы**

1. Северденко В. П. Применение ультразвука в промышленности / В. П. Северденко, В. В. Клубович // Минск: Наука и техника, 1967. – 264 с.
2. Северденко В. П. Обработка металлов давлением с ультразвуком / В. П. Северденко В. В. Клубович, А. В. Степаненко // Минск: Наука и техника, 1973. – 286 с.

УДК 621.7.011

Піманов<sup>1</sup> В. В. к.т.н., Куріхін<sup>2</sup> В.С., Проненко<sup>1</sup> П.Ю. к.т.н., Савченко<sup>1</sup> А.В. студ. 1 - НГУУ «КП ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна  
2 - ПРАТ «Завод «Кузня на Рибальському», м. Київ, Україна

**СПОСІБ РОТАЦІЙНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ**

На сьогоднішній день актуальною проблемою є інтенсифікація процесів обробки металів тиском. Відомо ряд способів, як традиційних, так спеціальних, що дозволяють отримувати вісесиметричні порожнисті та трубчасті вироби. Серед них одним з перспективних способів є спосіб ротаційного видавлювання, який дозволяє отримувати вироби, як на спеціальних дильних верстатах так і на звичайних токарних верстатах за допомогою універсального інструменту. На відміну від виготовлення виробів в штампах, цей спосіб дозволяє знизити собівартість виробу за рахунок використання універсального інструменту, а також дозволяє виготовити вироби при шпунчному або дрібносерійному виробництві з високою ефективністю використання матеріалу.

Відомі способи виготовлення порожнистих вісесиметричних виробів багатопрохідним ротаційним видавлюванням, який здійснюють прямим або зворотним способом. [1-3]. Недоліками цих способів є те, що за рахунок несиметричної схеми навантаження, яка виникає в результаті дії деформуючого ролика на заготовку в процесі її деформації, відбувається протилежна дії деформування деформація, що призводить до зниження точності виготовлення порожнистих виробів. Також недоліком є те, що отримання порожнистих виробів відбувається в два етапи, що збільшує час виробництва одного виробу.

Для вирішення поставленої задачі нами було запропоновано, формують вироби виконувати парно кількістю роликів, одночасно двома або чотирма роликами, розміщеними симетрично відносно осі заготовки, а глибину вдавлення деформуючих роликів регулюють за рахунок синхронного повороту осей, на яких встановлені ролики [4].

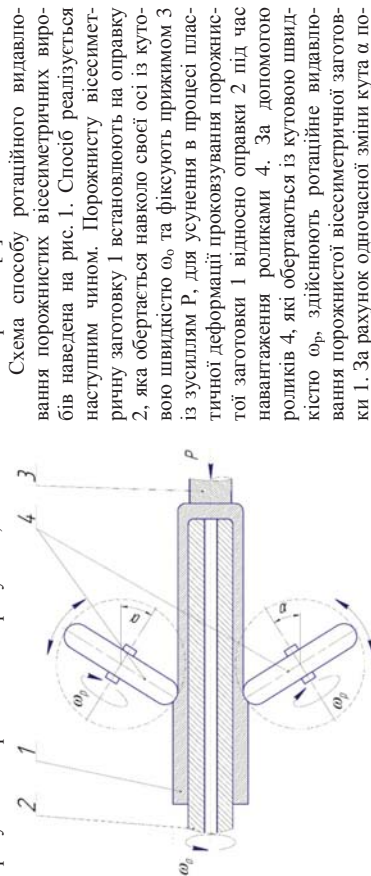


Рис. 1. Схема способу ротаційного видавлювання порожнистих вісесиметричних виробів

1 – заготовка, 2 – оправка, 3 – прижим, 4 – ролики

вання порожнистої вісесиметричної заготовки, можна отримати порожнистий вісесиметричний виріб із стінкою змінної товщини.

Для реалізації способу було сконструйовано пристрій для ротатійного видавлювання трубчатих та порожнистих вісесиметричних виробів двома поворотними роликками, який встановлюється на супорт універсального токарного верстату.

На рис. 2. показано пристрій для ротатійного видавлювання порожнистих вісесиметричних виробів.

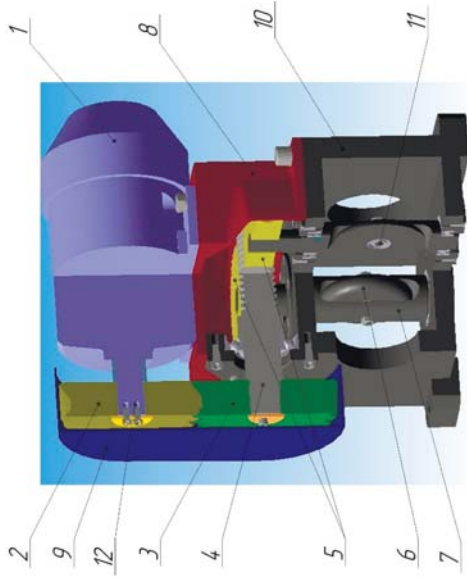


Рис. 2. Пристрій ротатійного видавлювання

Суть роботи пристрою полягає в наступному. Двигун 1 (свопривод), що керується оператором, шестерню 2 передає крутний момент до черв'ячного валу 4 через шестерню 3. Черв'як в свою чергу приводить в дію черв'ячне колесо 5, яке обертає вал з роликками навколо осей. Кут повороту валів 7 з роликками 6 навколо своїх осей забезпечує зміну відстані між нормальними до поверхні роликів 6. За рахунок цього забезпечується можливість контролю необхідної величини потоншення стінки вісесиметричних виробів. Діаметр роликів 5, їх ширина та радіус (розміри поверхні тору, яку вони утворюють) забезпечують зміну параметрів для необхідного технологічного процесу. Така установка встановлюється на універсальному токарне обладнання.

Перевагами даного пристрою є: можливість обробляти на оправці виробу малих діаметрів та значної довжини; в процесі формування можливо отримувати змінну по висоті виробу товщину стінки, або формувати профільну зовнішню поверхню. Крім того така установка може встановлюватися на універсальний токарний верстат.

#### Список літератури

1. Патент RU №2054341. МПК В21D22/16. "Способ изготовления полых осесимметричных деталей многопроходным ротационным выдавливанием" / опубл. 20.02.1996.
2. Патент RU №2223836. МПК В21D22/16. "Способ ротационного выдавливания трубчатых заготовок (варианты)" / опубл. 20.02.2004.
3. Степанов Б.А. Специализированное кузнечно-прессовое оборудование. - М.: МПГУ, 2005. - 212 с.
4. Патент на корисну модель UA 109120 МПК В 21 D 22/16, опубліковано 10.08.2016. Бюл. №15 «Список ротатійного видавлювання порожнистих осесиметричних виробів».

УДК 621.7.043

Арат Р.Г., Пузир Р.Г. к.т.н., доцент  
Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ ЗАГОТОВКИ БЕЗ ПРИТИСКУ ФЛАНЦЯ

Витягування циліндричних деталей без притиску є досить економічним способом отримання якісних виробів, однак можливості цього процесу обмежені втратою стійкості фланцевої частини заготовки у виді гофрування. Тому коєфіцієнти витягування й висота деталей, що отримуються витягуванням без притиску, є досить незначними.

Для розширення можливостей вищезазначеного способу на базі лабораторії кафедри «Технології машинобудування» Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського були проведені дослідження з витягування листового металу без притиску фланця. Метою досліджень було вивчення процесу хвилеутворення та витягування без притиску заготовок зі сталі 08 кп, міді М1 й алюмінію А4, які виходять за запропоновані довідковою літературою діапазони геометричних розмірів якісного формування [1, 2, 3].

В дослідях використовувалось наступне обладнання та оснащення. Кривошипний прес моделі КД 2118А зусиллям 6,3 тс., матриця з вхідним отвором  $\phi$  50 мм і радіусом закруглення 3 мм та упори.

Заготовки вирубувалися зі сталі 08 кп товщиною 1,2 мм, міді М1 товщиною 0,25 мм та алюмінію А 4 – 1,4 мм. Коєфіцієнти витягування змінювались в залежності від діаметрів заготовок для перевірки можливостей отримання якісних деталей без гофрування. Встановлено, що в діапазоні довідкових даних  $\frac{L}{D_{\text{вх}}} \geq 0,75 + 0,055$ , а також для деталей з фланцем

$L - (S + \phi) \geq [1]$  на всіх без виключення напівфабрикатах різних металів і сплавів гофрів не спостерігалося, було отримано якісні вироби. За межами запропонованих інтервалів, уже на початку процесу починалося формування декількох хвиль з торця заготовок. Кривизна гофрів по ходу опускання пуансону весь час збільшувалася, що приводило до відривання донної частини заготовки (рис. 1).



Рис. 1 – Відривання донної частини заготовки з алюмінію ( $s=1,4$ мм,  $m=0,7$ )



Процес хвилеутворення характерний для всіх без виключення металів, які застосовуються в експерименті.

Також були поставлені і виконані досліди з витягування без притиску деталей, які мають фланець. Без гофрування вдалося отримати вироб, висота яких не перевищує 8 мм (сталь 08 кп).

Але на практиці спостерігаються випадки, коли необхідно отримати циліндричні деталі, висота яких перевищує вказану. В таких умовах використовують притиск. Нами було запропоновано спосіб виготовлення деталей з фланцем, висота яких на 2-4 мм більша зазначеної у довідкових даних [1, 2, 3]. Заготовка вкладається на матрицю й виконується процес витягування до початку формоутворення гофрів на фланцевій частині (рис. 2, а).

Далі пуансон підіймається, а заготовка кантувалася на 180°, і знову пуансон опускали до вирівнювання гофрів й отримання нових із зворотною кривизною (рис. 2, б). Пуансон знову підіймали, кантували заготовку на 180° і витягування повторювали до остаточного вирівнювання гофрів і отримання якісного напівфабрикату.



Рис. 2 – Витягування заготовки з фланцевою частиною: а) – перший перехід з отриманням гофрів; б) другий перехід з кантуванням заготовки на 180°

Таким чином, вдалося на всіх досліджуваних металах створити сприятливі умови для розширення можливостей процесу витягування циліндричних деталей без притиску фланця. Даний спосіб можливо застосовувати в одиничному й мілько серійному виробництві для отримання виробів з найменшою собівартістю.

#### Література:

1. Скворцов Г.Д. Основы конструирования штампов для холодной штамповки / Г.Д. Скворцов. – М.: Машиностроение, 1972. – 360 с.
2. Романовский В.П. Стравоник по холодной штамповке / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.
3. Шофман Л.А. Теория и расчеты процессов холодной штамповки / Л.А. Шофман. – М.: Машиностроение, 1964. – 375 с.
4. D.Y. Yang, S.I. Oh, H. Huh and Y.H. Kim (eds.): Proc. of NUMISHEET 2002 Conference (Jeju Island, Korea 2002).

УДК 621.77.01

Добров И.В., д.т.н., проф.,

Национальной металлургической академии Украины г. Днепр, Украина.

## К ВОПРОСУ КЛАССИФИКАЦИИ СИЛ ИНЕРЦИИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

По результатам конференции «Механика машин – основная составляющая прикладной механики», посвященной памяти С.Н. Кожевникова.

**Введение.** Процесс обработки материалов давлением (ОМД) обусловлен взаимодействием твердых тел (инструментов) и твердого пластически деформируемого тела (заготовки), учитывающих особенности и общие закономерности в определении работы внешних и внутренних сил твердых и твердого пластически деформируемого тела. То есть процесс пластической деформации неразрывно связан с выполнением работы внешними силами, приложенными к заготовке со стороны твердых тел, и внутренними силами, действующими внутри заготовки, работа которых равна работе внешних сил. Общие закономерности процесса работы твердых и пластически деформируемых твердых тел определяет единый подход к определению силовых параметров процесса перемещения твердых тел и перемещения (или) деформации твердого пластически деформируемого тела на основе законов Ньютона. Кинематические отличия в процессах выполнения работ внешними и внутренними силами в механике твердых тел и в механике твердых пластически деформируемых тел состоит в том, что под воздействием внешних сил твердое тело не изменяет своего объема и размеров, а пластически деформируемое твердое тело при неизменном объеме «безвозвратно» изменяют свою конфигурацию [1].

**Целью работы** является применение методов прикладной механики<sup>2</sup> к анализу характерных отличий сил, действующих в механических системах<sup>3</sup> содержащих твердые и пластически деформируемые тела, которые непосредственно связаны с кинематикой процесса выполнения работ внешними и внутренними силами в этих системах. В первую очередь это касается сил инерции, которые обусловлены неравномерным движением тел (элементов тела), обладающих массой.

**Исследования.** Согласно предложенной классификации сил (табл. 1) все силы, действующие на тело (элемент тела) подразделяются на активные силы, которые совершают механическую работу, связанную с изменением механической энергии тела (элемента тела) и пассивные силы, которые не совершают механической работы, но обеспечивают возможность выполнения механической работы активными силами. Активные силы могут быть силами движения и сопротивления движения, которые, в свою очередь, подразделяются на потенциальные и непотенциальные силы. В работе [2] показано, что сила инерции ( $F$ ) твердого тела является потенциальной внутренней силой, приложенной к центру массы

<sup>1</sup> здесь и далее по тексту под термином твердое тело будем понимать абсолютно твердое тело, размеры которого не изменяются под действием внешних сил, приложенных к этому телу.

<sup>2</sup> «прикладная механика – раздел классической механики, связанный с решением инженерных (практических) задач в определенном отрезок времени в определенном пространстве при использовании источников энергии неживого происхождения» [2,3], для пластически деформируемого тела таким ограниченным пространством является очаг деформации, размеры которого всегда меньше размеров пространства, в котором перемещаются твердые тела, взаимодействующие с деформируемым телом и обеспечивающим его деформацию.

<sup>3</sup> механическая система, любая совокупность материальных точек,  $p$  и  $m$  и  $e$ , в механике *материальное тело* рассматривается как механическая система, образованная непрерывной совокупностью материальных точек [4].

Таблица 1

<p>Характеристика сил прикладной механики</p>	
<p><b>сила</b> (<math>P</math>) – векторная величина, являющаяся мерой механического действия одного материального тела на другое, которая характеризуется величиной, точкой приложения и направлением линии действия. результатом действия силы является перемещение тел(а) и (или) деформация тела (элементов тела) за счет работы (<math>A_P</math>) силы при изменении механической энергии (<math>\Delta E_P</math>) источника действия силы.</p>	<p><b>внутренняя сила</b> – сила, действующая на какое-либо материальное тело (точку тела) механической системы со стороны других материальных тел (точек тела), принадлежащих рассматриваемой механической системе (телу). источник энергии внешней силы находится за пределами системы тел.</p>
<p><math> A_P  \leq  \Delta E_P </math></p>	<p><math> A_P^{(t)}  =  \Delta E_P^{(t)} </math></p>
<p><b>активные силы</b></p>	
<p>совершают механическую работу (<math>A_P \neq 0</math>), связанную с перемещением <math>s = s_m \neq 0</math> и (или) деформацией тела массой <math>m</math>, на которое они действуют.</p>	
<p><b>сила движения</b> (<math>P_F</math>) – сила, точка приложения которой к подвижному телу перемещается в направлении движения этого тела (<math>A_P &gt; 0</math>).</p>	<p><b>сила сопротивления движению</b> (<math>P_Q</math>) – сила, точка приложения которой к подвижному телу перемещается в сторону противоположную направлению движения этого тела (<math>A_Q &lt; 0</math>).</p>
<p><b>потенциальная сила</b> – сила, точка приложения которой неподвижна (<math>s_P = s \neq 0</math>) относительно поверхности (объема) подвижного тела (<math>v_m \neq 0</math>), на которое она действует, не изменяя направления линии действия. <b>нормальная сила</b> (<math>F^{(n)}, Q^{(n)}</math>) – сила, точка приложения которой к подвижному телу перемещается относительно точки поверхности (объема) этого тела (<math>s_F \neq s, s_Q \neq s</math>) и (или) направление линии действия силы изменяет свое положение в пространстве (<math>0 &lt; A_F^{(n)} &lt; A_F, 0 &gt; A_Q^{(n)} &gt; A_Q</math>).</p>	<p><b>пассивные силы</b>, приложенные к телу, не совершают механическую работу (<math>A_P = 0</math>) по перемещению и (или) деформации этого тела:</p>
<p><b>диссипативная сила</b> – сила, действующая на тело таким образом, что точка приложения силы перемещается (<math>s_P \neq s = 0</math>) относительно поверхности (объема) неподвижного тела, на которое она действует; <b>сила реакции</b> (<math>R</math>) – сила, действующая на неподвижное тело, при этом точка приложения силы не перемещается (<math>s_P = s = 0</math>) относительно точки поверхности (объема) этого тела; <b>нормальная сила</b> (<math>N</math>) – сила, действующая на тело в направлении, перпендикулярном перемещению тела.</p>	
<p>Потенциалом силы инерции является скорость тела, его центра массы. Источником энергии силы инерции является кинетическая энергия тела. При движении тела с ускорением под действием внешней силы движения (<math>P_F</math>) сила инерции является силой сопротивления движению (<math>P_Q</math>) и работа силы инерции приводит к увеличению механической (кинетической) энергии. При замедленном движении тела за счет внешней силы сопротивления движению (<math>P_Q</math>) сила инерции является силой движения (<math>P_F</math>), и работа силы инерции обеспечивается при уменьшении кинетической энергии.</p>	

Рассмотрим (рис. 1) характер действия сил инерции при ОМД на примере установившегося процесса осадки симметричной призматической заготовки  $I$  ( $A_0 B_0 C_0 D_0$ ) единичной ширины  $B = I$  исходной высотой  $h_0$  и шириной  $b_0$  до текущих размеров заготовки ( $ABCD$ ): по высоте  $h$  и ширине  $b$ , плоским пуансоном 2, перемещающимся со

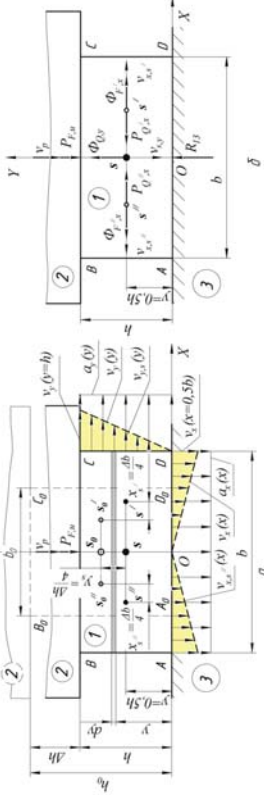


рис. 1. Кинематические и силовые параметры процесса осадки:  $a$  – кинематика процесса;  $\delta$  – расчетная схема взаимодействия сил, обусловленных кинематикой слоев материала заготовки скоростью  $v_p = \text{const}$ , при следующих допущениях. Рассматриваются кинематические и силовые параметры установившегося процесса осадки в текущий момент времени осадки без учета действия сил трения на контактной поверхности заготовки и пуансона, а так же заготовки  $I$  и основания 3. Боковые поверхности заготовки в процессе осадки не изменяют своей конфигурации (однородная деформация). Центр массы  $m$  исходной заготовки  $A_0 B_0 C_0 D_0$  ( $m = \rho h_0 b_0$ , где  $\rho$  – удельная плотность материала заготовки), положение которого определяется точкой  $s_0$  ( $x = 0, y = 0,5h_0$ ) может быть представлен двумя центрами масс  $m_1 = m_2 = 0,5m$  каждой из симметричных половин заготовки, положения которых определяют симметричные относительно оси  $OY$  точки  $s_0'$  ( $x = 0,5h_0, y = 0,5h_0$ ) и  $s_0''$  ( $x = -0,5h_0, y = 0,5h_0$ ).

За время установившегося процесса деформации  $\Delta h = \Delta h / v_p = (h_0 - h) / v_p$  исходная заготовка  $A_0 B_0 C_0 D_0$  приобретает форму  $ABCD$  и положения центра массы  $m$ , и его составляющих  $m_1$  и  $m_2$  в момент времени  $t_y$  определяют точки  $s$  ( $x = 0, y = 0,5h$ ),  $s'$  ( $x = 0,5b, y = 0,5h$ ) и  $s''$  ( $x = -0,5b, y = 0,5h$ ). Эпюры скоростей и ускорений слоев материала заготовки вдоль осей координат  $XOY$  в момент времени  $t_y$  представлены на рис. 1, а и определяются уравнениями [1]:

$$v_y(x, y) = v_y(y) = -v_p \frac{y}{h}; \quad (1)$$

$$v_x(x, y) = v_x(x) = v_p \frac{x}{h} \quad (-0,5b \leq x \leq 0,5b); \quad (2)$$

$$a_y(x, y) = a_y(y) = \frac{dv_y}{dt} = -\frac{v_p}{h}; \quad (4)$$

$$a_x(x, y) = a_x(x) = \frac{dv_x}{dt} = \begin{cases} \frac{v_p}{2h} \text{ при } -0,5b \leq x < 0, \\ -\frac{v_p}{2h} \text{ при } 0 < x \leq 0,5b; \end{cases} \quad (5)$$

$$v_{y,s} = v_{y,s'} = v_{y,s''} = -0,5v_p, \quad v_{x,s'} = |v_{y,s'}| = -0,25v_p \quad \text{и} \quad v_{x,s} = v_{x,s'} + v_{x,s''} = 0, \quad (6)$$

Уравнения (1)-(6) получены из условий:  $v_y(y=0) = 0, \quad v_x(y=h) = 0$  и  $\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0$ .

Если принять (рис. 1, б), что в момент времени  $t_y$  мощность силы, действующей со стороны пунсона ( $P_F = P_{F,u}$ ) будет затрачиваться только на преодоление мощности сил, обусловленных действием сил инерции  $\Phi_{Q,y}$ ,  $\Phi_{F',x}$  и  $\Phi_{F'',x}$ , приложенных в точках  $s(x=0, y=0,5h)$ ,  $s'(x=0,5h, y=0,5h)$  и  $s''(x=-0,5b, y=0,5h)$ , то на основании баланса мощности этих сил и их равновесия вдоль осей координат  $\sum Y=0$  и  $\sum X=0$ , получим:

$$P_{F,u} = -\Phi_{Q,y}(y=h) = -\int_0^h d\Phi_{Q,y} = -\int_0^h \rho a_y dy = -ma_y = m \frac{v_p}{h}; \quad (7)$$

$$\Phi_{Q,y}(y=0,5h) = -\int_0^{0,5h} d\Phi_{Q,y} = m \frac{v_p}{2h} \quad \text{и} \quad R_{I3} = P_{F,u} - \Phi_{Q,y} = m \frac{v_p}{2h}; \quad (8)$$

$$\Phi_{F',x} = -\Phi_{F'',x} = -\int_0^{0,5b} d\Phi_{F'',x} = -\int_0^{0,5b} \rho a_x dx = -0,5ma_{x,s''} = -m \frac{v_p}{4h} = -P_{Q',x} = -P_{Q'',x}, \quad (9)$$

где  $R_{I3}$  - сила реакции, действующая на заготовку I со стороны опоры 3 и обеспечивающая условия передачи энергии силой  $P_{F,u}$  для деформации слоев материала заготовки в направлении осей координат XOY относительно центра массы заготовки при его перемещении в направлении линии действия силы  $P_{F,u}$ ;  $P_{Q',x}$  и  $P_{Q'',x}$  - силы сопротивления движению слоев материала заготовки, обеспечивающие условия передачи энергии силами  $\Phi_{F',x}$  и  $\Phi_{F'',x}$  для деформации слоев материала заготовки в направлении оси OX без изменения положения центра массы заготовки в этом направлении.

**Выводы 1.** Установившийся процесс деформации заготовки под действием равномерно перемещающейся внешней силы очага деформации предопределяет неравномерную скорость движения слоев материала деформируемой заготовки относительно подвижного центра массы заготовки и, как следствие, действие силы инерции при обработке материалов давлением в любой текущий момент времени деформации заготовки.

2. В условиях однородной деформации заготовки при отсутствии внешнего трения в очаге деформации сила инерции деформируемой заготовки в текущий момент времени процесса деформации представляет внутреннюю потенциальную силу сопротивления движению материала заготовки. Работа составляющих сил инерции обеспечивает увеличение внутренней потенциальной энергии деформируемой заготовки за счет повышения предела прочностной заготовки в процессе деформации слоев материала заготовки относительно текущего положения центра массы заготовки в очаге деформации.

**Список литературы**

1. Сторожков М.П. Теория обработки металлов давлением / М.П. Сторожков, Е.А. Попов – М.: Машиностроение, 1982. – 312 с.
2. Dobrov I.V. Development of scientific bases of the dynamics of machines as a section of applied mechanics / I.V. Dobrov // Proceedings of Engineering. – 2015. – V.129. – P. 863-872.
3. Добров И.В. Развитие теоретических основ прикладной механики как раздела классической механики / И.В. Добров // Механика машин – основная составляющая прикладной механики: тезисы Всеукраинской научно-технической конференции, 11-13 апреля 2017 г., г. Днепр. – 2017. – С.23-26.
4. Теоретическая механика. Терминология. Буквенные обозначения величин: сборник рекомендованных терминов. – М.: Наука, 1984. – Вып. 102. – 45 с.

УДК 621.7.011

Грушко О.В., д.т.н., проф., Гуцалюк О.В., інж.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

**ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕДУКУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАГОТОВОК**

Досліджено порошкові заготовки виготовлені спіканням, що включають вольфрам, нікель та залізо (ВНЗ). Були поставлені задачі, для отримання деталей з необхідними механічними властивостями (високе енергопоглинання, пластичність). Ці властивості можуть бути реалізовані за допомогою методів холодної осесиметричної формозміни. Варто враховувати обмежені розміри спечених заготовок. Відомі нам способи осесиметричного деформування (пресування, волочіння) не передбачають обмежену довжину заготовки після деформації, що дозволяє вивчати механіку процесу лише на сталій сталі [1-2].

Для нашого випадку спечені заготовки мають співвідношення довжини до діаметру, в межах, що забезпечують осередок деформації практично на несталій сталі, що викликало необхідність розглянути процес осесиметричного редукування заготовок на стадіях несталіонарного і стаціонарного процесу редукування. У нашому випадку це дозволило вивчити процес формозміни заготовок з розмірами  $l/d = 30/10$ . Потрібно нам механічні властивості (залишкове пластичність, межі пластичності і міцності, енергопоглинання деталей при експлуатаційних навантаженнях) можуть бути отримані шляхом вивчення механіки процесу осесиметричного редукування при змінних параметрах технологічного процесу - обтиснення, кут нахилу матриці (рис. 1). З цією метою залучено програмний комплекс ANSYS / LS-DYNA [3]. Комплекс був використаний для розрахунку напружено-деформованого стану при різних параметрах процесу редукування. В результаті отримано головні компоненти тензора напружень, а також накопичену інтенсивність деформацій на різних стадіях редукування, що дозволило проаналізувати вплив кута нахилу матриці натягу на зміщення заготовки в межах ділянок стаціонарного процесу. При відносному натягу  $\bar{a} < 0,02$  спостерігається переважно поверхневе зміцнення матеріалу заготовки. При відносному натягу  $0,02 \leq \bar{a} \leq 0,1-0,11$  - матеріал заготовки зміцнюється по всьому перерізі ( $\bar{a} \leq 0,1$  для  $\gamma = 3..5^\circ$ ;  $\bar{a} \leq 0,11$  для  $\gamma = 7..15^\circ$ ). При відносному натягу  $\bar{a} > 0,1-0,11$  - матеріал характеризується значною нерівномірністю зміцнення по довжині заготовки. Нерівномірність розподілу деформацій, що визначається коефіцієнтом нерівномірності деформацій  $\omega$ , залежить від натягу  $\bar{a}$  та кута  $\gamma$ , зокрема при значеннях кута  $\gamma = 3..5^\circ$  коефіцієнт знаходиться в межах  $0,25 \leq \omega \leq 0,9$ ; при значеннях кута  $\gamma = 7..15^\circ$  -  $0,05 \leq \omega \leq 0,75$ . Отримання заготовок із заданими механічними характеристиками, обмежуються запасом пластичності спечених заготовок, або слідуючи сучасній термінології використовувати ресурсом пластичності. Використаний ресурс пластичності залежить від параметрів процесу, але його визначення на різних стадіях формозміни заготовок представляє складну задачу. Для вирішення цього завдання нам здавалося необхідним залучити сучасні технологічні критерії деформовності, в яких накладються обмеження на деформації. У роботі [4], здійснено аналіз результатів розрахунку граничних деформацій залежно від вигляду функції шляху деформування. Межі застосування критеріїв: Г.А. Смірнова-Алієва, В.А. Огороднікова та В.Л. Колмогорова проаналізовано в роботі [5]. Показано, що якщо перша похідна від показни-

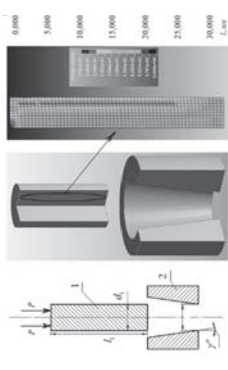
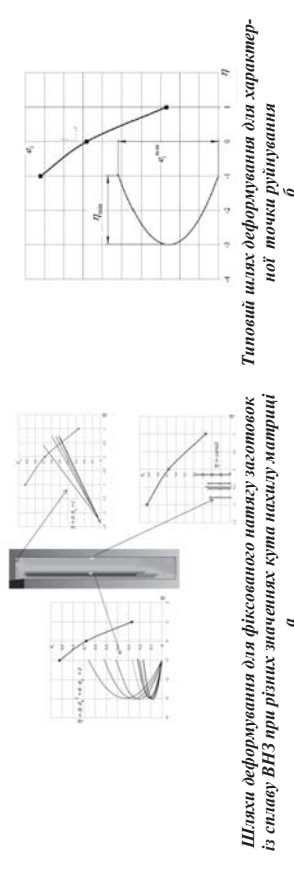


Рис. 1. Редукування заготовки (1 – заготовка, 2 – матриця)



ків напруженого стану  $\frac{d\eta}{de}$  має значення близьке до нуля ( $\eta = const$ ), то можна використовувати критерій Г.А. Смірнова-Аляева, що не враховує історію деформування (наприклад, формування крутовигнутих відводів, операцій - гнуття і ін.). При значенні похідної  $0,5 \leq \frac{d\eta}{de} \leq 1,75$  можна використовувати критерій В.Л. Колмогорова. Застосування цього критерію доцільно, якщо кривизна шляху деформування знаходиться в межах  $0,25 \leq \frac{d^2\eta}{de^2} \leq 2$ . У разі зміни параметра  $\frac{d\eta}{de} \geq 2$  найбільш точно дає критерій В.А. Огороднікова. Застосування цього критерію доцільно, якщо кривизна шляху деформування знаходиться в межах  $\frac{d^2\eta}{de^2} \geq 3$ . Зазначені критерії включають карту матеріалу, а також шляхи деформування в координатах: інтенсивність напружень – інтенсивність деформації. Карта матеріалу включає діаграми пластичності в координатах: гранична до руйнування деформація, безрозмірні показники напруженого стану (відносний гідростатичний тиск). Використання безрозмірних показників напруженого стану дало можливість розрахувати використаний ресурс пластичності заготовок для характерних точок процесу редукування (рис. 2а). Небезпека руйнування виникає в осередку деформації заготовки, де спостерігаються складні шляхи деформування (рис. 2б). Функція, що відображає вигляд шляху деформування небезпечної точки має вигляд (1):

$$\eta = \frac{8}{(e_{max}^3 \cdot e_1^2 - e_2^2) \cdot \sqrt{(\eta_{min} - 1) \cdot \frac{8}{(e_{max}^3 \cdot e_1 - 1)}}}, \quad (1)$$



Шляхи деформування для фіксованого наміку заготовок із сплавів ВНЗ при різних значеннях кута нахилу матриці

Розроблені рекомендації по вибору критеріїв деформовності в процесі редукування циліндричних заготовок; розроблено методику вибору раціональних технологічних параметрів, які забезпечують безвідмовне формування в процесі редукування, зокрема деформовність, рівномірність розподілу заданих деформацій, стабільне формування та розрахунок силових характеристик; розроблено методику оцінки технологічної спадковості в процесі редукування, яка включає оцінку механічних характеристик після формування, залишкових напружень, запропоновано новий спосіб редукування коротких циліндричних заготовок, які виготовлені зі сплаву WNiFe.

Список використаних джерел:  
 1. Зайдес С.А., Писев А.Н. Технологическая механика осесимметричного деформирования. Монография. – Ир-кутск: Изд-во ИрГТУ 2007. - 432с.  
 2. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирования протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990 – 320с.  
 3. Режим доступа : <http://www.is-dyna.com/>.  
 4. Аляева Л. И. Критерии деформируемости и возможности их использования в задачах обработки давлением. – Краматорск: Вестник Донбасской державной машинобудівної академії.  
 5. Огородников В.А., Грушко А.В., Гушалок А.В. История деформирования, определяющая применение феноменологических критериев разрушения в процессах обработки давлением – Винница: Вестник машинобудування та транспорту.

УДК 621.777.4

Горностай В.М. к.т.н., Потятинник А.М. аспірант, Коробка Є.М. студ., Бойчук М.А. студ. КПШ ім.І.Грига Сікорського», м. Київ, Україна

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ХОЛОДНОГО ЗВОРОТНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ З РОЗДАЧОЮ**

Процеси отримання виробів холодним об'ємним штампуванням використовуються в багатьох галузях промисловості. Особливої уваги заслуговує військовий промисловий комплекс, а саме виготовлення босприпасів [1]. Таке виробництво потребує високопродуктивних та маловитратних технологій, які дозволяють отримати високоточні вироби або напівфабрикати з підвищеними експлуатаційними властивостями [2, 3].

Метою роботи є визначити вплив різних параметрів (конструктивних та технологічних) на процес зворотного видавлювання порожнистих виробів з роздачею.

На рис.1 показано розрахункову схему процесу ( де: 1- матриця, 2 – пуансон, 3 – виготовлювач, 4- заготовка). Вихідна заготовка із сталі 20 діаметром 40 мм та висотою 50 мм з наступними властивостями: умовна межа текучості  $\sigma_{0,2} = 380 \text{ МПа}$ , модуль Юнга  $2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$  [3] та коефіцієнт Пуассона 0,3, яка отримується різанням в штампах з прутка.

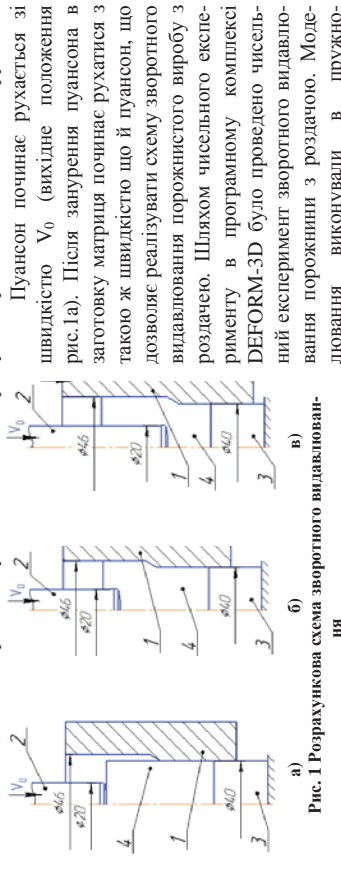


Рис. 1 Розрахункова схема зворотного видавлювання

пластичній постановці.

Залежність зусилля деформації від переміщення пуансона представлено та нормальних напружень на інструментах представлено на рис.2. Максимальне значення зусилля видавлювання складало 1920 кН.

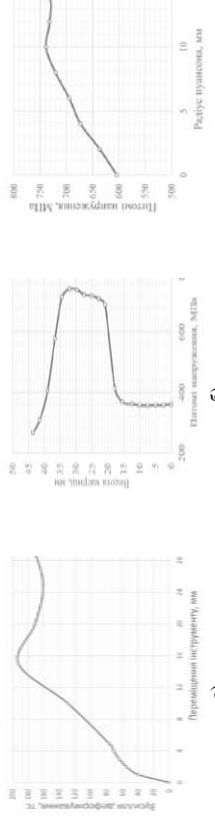


Рис. 2 Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона-а; розподіл питомих напружень на матриці-б; розподіл питомих напружень на пуансоні-в

На рис.3 представлено розподіл напружень в об'ємі заготовки в навантаженому стані при максимальному зусиллі процесу зворотного видавлювання порожнини з роздачею.

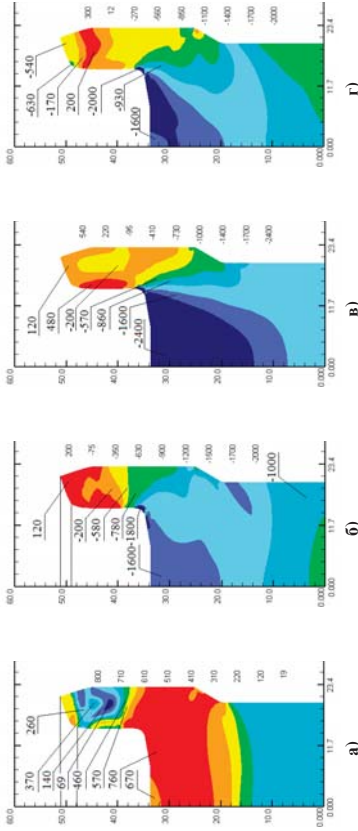


Рис.3. Розподіл напружень в об'ємі заготовки (а-інтенсивність напружень  $\sigma_x$ ; б-напруження  $\sigma_y$ ; в-напруження  $\sigma_z$ ; г-напруження  $\tau_{xy}$ ).

При зворотному видавлюванні порожнини з роздачею важливо визначити такі параметри процесу (ступінь деформування, кут конуса матриці, коефіцієнт роздачі, швидкість деформування та швидкість переміщення матриці) які б дозволили отримувати виріб за найменшою кількістю переходів з необхідними властивостями. На рис. 4а представлено розподіл ступеня використання ресурсу пластичності. З якого видно що при певних параметрах процесу використання ресурсу пластичності критичні значення ступеня пластичності, що може призвести до виникнення тріщин на поверхні, що контактує зі стінкою матриці.

#### Висновки

Досліджено можливість отримання порожнистих виробів зворотнім видавлювання з роздачею. Визначено параметри які суттєво впливають на цей процес. Сформульовано подальші етапи досліджень за допомогою чисельних експериментів для встановлення впливу параметрів (ступінь деформування, кут конуса матриці, коефіцієнт роздачі, швидкість деформування та швидкість переміщення матриці) процесу зворотного видавлювання.

#### Список літератури

1. Сарафянц А.Р. Технологій патронно-гильзового виробництва. Учебное пособие для техникумов // А.Р. Сафарянц – ЦИИИ информатики, 1975.-С.208.
2. Калюжий А.В. Применение метода конечных элементов при расчетах процессов изготовления вооружения для артиллерийских и стрелковых боеприпасов / А.В. Калюжий // Артиллерийское и стрелковое вооружение.-2009.-№2.-С.32-43.

Рис.4. Ступінь використання пластичності -а; розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_x$  в об'ємі заготовки - б

Рис.4. Ступінь використання пластичності -а; розподіл інтенсивності деформацій  $\epsilon_x$  в об'ємі заготовки - б

УДК 621.771.65

Маковей В.О., к.т.н., доц., Проненко П.Ю., к.т.н., асист., Сохан Д.В.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського\*, м. Київ, Україна

### ПОПЕРЕЧНО-ГВИНТОВА ПРОКАТКА ВИРОБІВ

**Вступ.** Поперечно-гвинтову прокатку застосовують при виробництві куль, осей та інших виробів з використанням спеціальних каліброваних валків. Тіло, що обробляється проходячи між валками, обертається і одночасно виконує поступальний рух, тобто кожна точка тіла крім осі рухається по гвинтовій траєкторії. Процес поперечно-гвинтової прокатки має ряд переваг, до яких відносяться: висока точність розмірів, підвищені механічні властивості матеріалу, висока продуктивність процесу, можливість автоматизації виробництва [1]. Тому на його базі було вирішено зробити стани для виготовлення ребристих труб та кульок.

**Мета роботи:** шляхом моделювання отримати напружено-деформований стан в процесі прокатки кульки та ребристої труби для подальшого проєктування обладнання.

**Основна частина.** В програмі Defor3D створена модель процесу прокатки кульки підшипників кочення, що показано на рис. 1. Заготовка 1 у вигляді прутка була розбита на сітку тетраедричних скінчених елементів, мінімальний розмір яких в зоні деформування склав 0,2 мм. Заготовка 1 направлялась за допомогою обмежувачів 2 і 3 в зону обробки. Формування кульки здійснювалось за допомогою валків 4 і 5, що мають спіральні канавки на бокових поверхнях. Заготовка 1 задалась як ідеально-пластичне тіло, властивості якого відповідають сталі ШХ15. Коефіцієнт тертя (Амонтона-Кулона) задавався – 0,3.

Процес прокатки шариків відбувався при обертанні валків 4 і 5 відносно своїх осей із частотою обертів  $n=100 \text{ хв}^{-1}$ . Діаметр заготовки  $D_3 = 8 \text{ мм}$ . Прокатка кульок підшипників здійснювалась в дві послідовні операції одними і тими ж валками: 1) формування кульки, з'єднаною перемичкою з заготовкою; 2) прогладжування кульки і відділення перемички.

Шляхом моделювання методом скінчених елементів також досліджувався процес прокатки ребристої труби із заготовки з зовнішнім діаметром  $D_2 = 20 \text{ мм}$  і товщиною стінки 3 мм із матеріалу АІ-1100. Модель цього процесу показана на рис. 2. На оправку 1 встановлено заготовку 2, яка захоплюється гвинтоподібними валками 3, що обертаються із частотою  $100 \text{ хв}^{-1}$ . Тертя між заготовкою і валками становить 0,3.

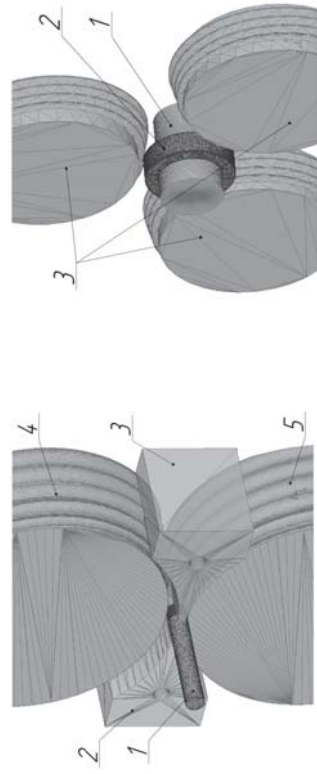


Рис.1. Модель процесу поперечно-гвинтової прокатки кульок

В результаті моделювання отримані розподіли інтенсивностей напружень та деформацій в заготовках та інструментах в обох процесах прокатки. Під час процесу прокатки кульки розподіл інтенсивності напружень у валках матиме вигляд, як на рис.3.

УДК 621.7

Каложний В.Л. д.т.н., проф., Погятинник А.М. асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

**СИЛОВІ РЕЖИМИ ТА ПИТОМІ ЗУСИЛЛЯ ПРИ ХОЛОДНОМУ ЗВОРОТНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ З РОЗДАЧОЮ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРІБІВ З ОДНАКОВОЮ ТОВЩИНОЮ СТІНКИ ІЗ ЗАГОТОВОК РІЗНОГО ДІАМЕТРА**

Схеми холодного видавлювання віссиметричних порожнистих виробів пуансоном з конусним робочим торцем приведені на рис. 1. Найбільш розповсюдженим способом виготовлення є зворотне видавлювання (ЗВ) (рис. 1а). Ліворуч від вісі симетрії показане положення перед видавлюванням, праворуч – після видавлювання. Вихідну заготовку 1 діаметром  $D_0$  і висотою  $H_0$  встановлюють в матриці 2 на виштовхувачі 3. Формоутворення виконують за допомогою опускання пуансона 4 та отримують виріб 5. Технологія і штампове оснащення для зворотного видавлювання проєктуються в основному на базі виробничого досвіду і експериментальних даних [1]. При ЗВ основною проблемою є зниження питомих зусиль та підвищення стійкості пуансонів. Зворотне видавлювання з роздачою (ЗВР), при якому діаметр вихідної заготовки менший за зовнішній діаметр виробу, дозволяє зменшити зусилля формоутворення і питоми зусилля на пуансоні в порівнянні із ЗВ. Схеми ЗВР з позначеннями показана на рис. 1б. Вихідну заготовку 1 розміщують в матриці 2 на виштовхувачі 3. Деформування виконують пуансоном 4. В процесі видавлювання матрицю опускають вниз зі швидкістю  $V_0$ , яка дорівнює швидкості пуансона. В кінці видавлювання отримують виріб 5. При цьому діаметр  $D_m$  виробу 5 більший за діаметр  $D_0$  вихідної заготовки 1.

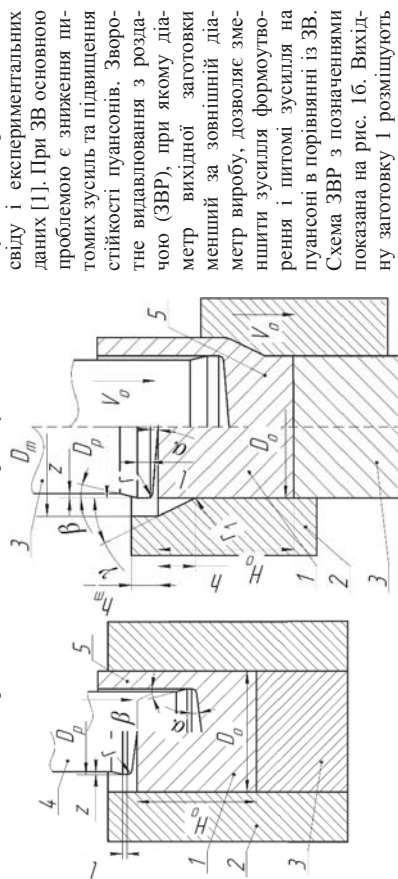


Рис. 1 - Схеми видавлювання порожнистих виробів: а – зворотне видавлювання, б – зворотне видавлювання з роздачою

Метою роботи є визначення розрахунковим шляхом силових режимів та питомих зусиль при холодному зворотному видавлюванні з роздачою порожнистих виробів із заготовок різного діаметра.

Застосування метода скінчених елементів (МСЕ) для теоретичного аналізу процесів холодного видавлювання дозволяє встановлювати дані для проєктування технології і штампового оснащення, які не потребують доопрацювання експериментальними роботами [2]. В роботі використана скінченно-елементна програма DEFORM. Вихідні заготовки із металу BRASS-CDA-377 (умовна межа текучості  $\sigma_{0,2} = 140$  МПа) мали однакову висоту  $H_0 = 52$  мм та різні діаметри  $D_0$ : 50, 46 та 42 мм. Розміри робочого торця конусного пуансона для всіх заготовок:  $D_p = 42$  мм,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $r = 2$  мм,  $z = 0,15$  мм,  $\beta = 5^\circ$ ,  $l = 2$  мм. Матриці для ЗВР мали

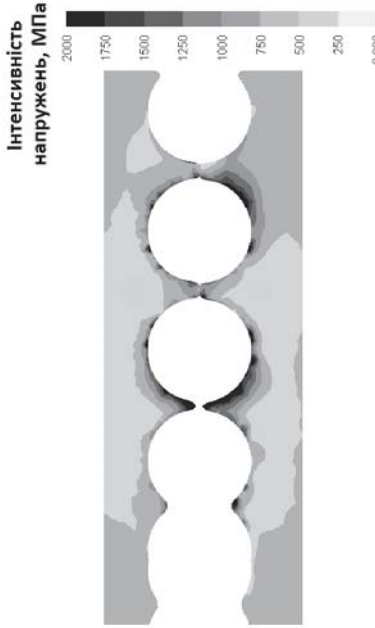


Рис. 3. Розподіл інтенсивності напружень у валках при поперечно-гвинтовій прокатці кульок Фізико-механічні властивості валків в моделях відповідали сталі Х12М.

**Висновки.**

Проведено моделювання процесів прокатки кульки та ребристої труби. Отримані розподіли напружено-деформованого стану в заготовках та інструментах, які будуть використані при проєктуванні обладнання для реалізації цих процесів на практиці.

**Список літератури:**

1. Грановский С.П. Новые процессы и станы для прокатки изделий в гвинтовых калибрах – М.: «Металлургия», 1980. – 116 с.



розміри:  $D_m = 52$  мм,  $h_m = 5$  мм. Інші розміри матриць: для заготовки  $D_0 = 50$  мм -  $\gamma = 10^\circ$  і  $h = 7,2$  мм; для заготовки  $D_0 = 46$  мм -  $\gamma = 22^\circ$  і  $h = 7,6$  мм; для заготовки  $D_0 = 42$  мм -  $\gamma = 32^\circ$  і  $h = 8,4$  мм.

На рис. 2 показані розрахункові схеми в розрізі для ЗВР заготовки діаметром  $D_0 = 42$  мм. На рис. 2а зображена схема на початку ЗВ. Заготовка 1 встановлена в матриці 2 на виштовхувачі 3. Формування виробу 5 виконується за допомогою зміщення пуансона 4 і матриці (рис. 2б). Далі виконується зворотне переміщення пуансона і матриці (рис. 2в). Після повернення матриці 2 в вихідне положення пуансон продовжує рух вгору та виходить із виробу 5, який залишається в матриці 2 (рис. 2г). Положення, коли виштовхувач 3 досягає торця виробу 5, показано на рис. 2д. Виштовхування виробу із матриці виконується подальшим зміщенням виштовхувача 3 (рис. 2е).

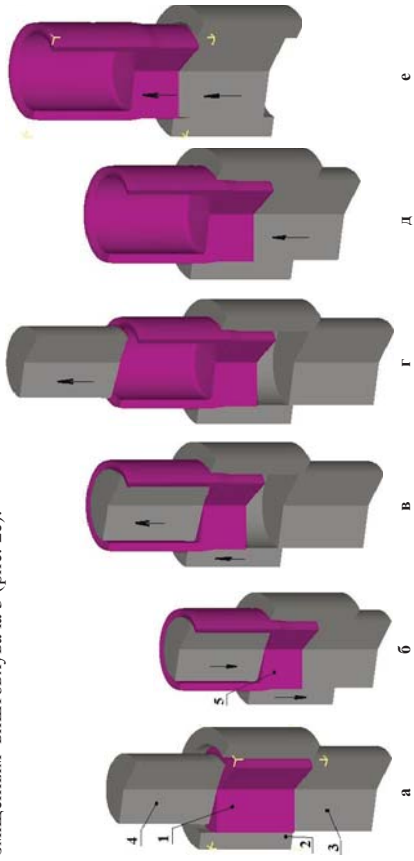


Рис. 2 - Розрахункові схеми в розрізі для ЗВР заготовки діаметром  $D_0 = 50$  мм

На рис. 3 зображені силові режими видавлювання. Залежності зусиль видавлювання від переміщення пуансонів показана на рис. 3а. Зі зменшенням діаметра заготовки  $D_0$  зусилля видавлювання зменшуються. Встановлено, що подальше зменшення діаметра заготовки до величини  $D_0 = 41$  мм приводить до отримання виробу з товщиною стінки, яка менша від величини зазору між пуансоном та матрицею. Використання пружно-пластичної моделі металу, що деформується, дозволило визначити розрахунковим шляхом зусилля виймання пуансона із виробу та зусилля виштовхування виробу з матриці (див. рис. 2г і 2е). На рис. 3б приведена залежність зусилля виймання пуансона із виробу від зворотного переміщення пуансона після видавлювання. Залежність зусилля виштовхування виробу із матриці від переміщення виштовхувача показана на рис. 3в. Після видавлювання виробів із заготовок діаметрами 46 і 42 мм при зворотному переміщенні пуансонів виробу залишаються на пуансонах. Для зняття виробів із пуансонів використані кільцеві знімачі (рис. 4). Максимальні величини зусиль знімання для наведених заготовок відповідно склали 18 і 22 кН. Для виробу матеріалу для пуансонів та виштовхувачів і встановлення кількості бандажів для матриць необхідно знати точний розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях здеформованих заготовок з інструментом при максимальному зусиллі видавлювання. Питомі зусилля можна оцінити по розподілу нормальних напружень на вказаних поверхнях.

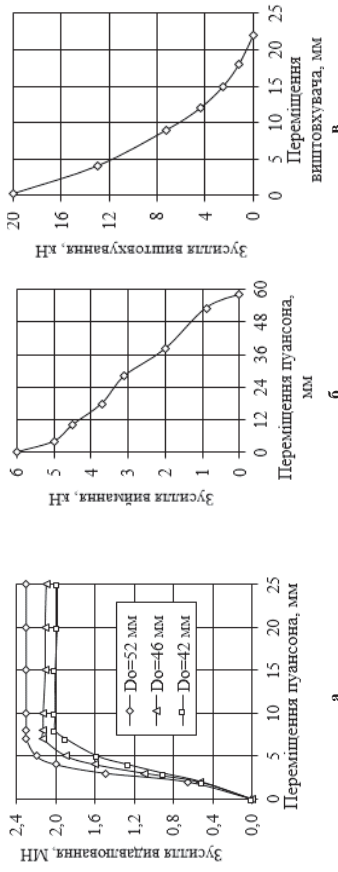


Рис. 3 – Силові режими видавлювання: а – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, б – залежність зусилля виймання пуансона із виробу від переміщення пуансона, в – залежність зусилля виштовхування виробу із матриці від переміщення виштовхувача

Розподіли нормальних напружень на контактуючих поверхнях при максимальному значенні зусилля видавлювання для трьох діаметрів заготовок приведені на рис. 5. Тонкими лініями зображений деформуючий інструмент. Найбільші значення цих напружень виникають на вісі симетрії пуансонів, на торцях виштовхувачів та на поверхнях матриць, які контактують зі стінкою здеформованої заготовки.

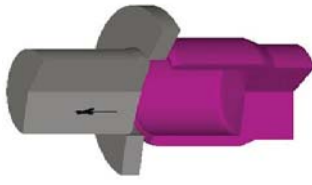


Рис. 4 – Схема в розрізі знімання виробу із пуансона за допомогою кільцевого знімача

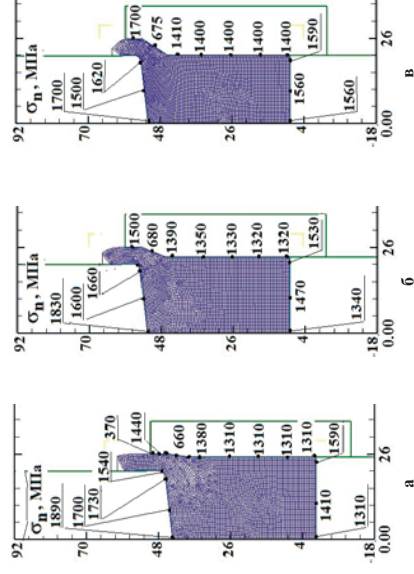


Рис. 5 – Розподіли нормальних напружень на контактуючих поверхнях при максимальному значенні зусилля видавлювання для трьох діаметрів заготовок: а -  $D_0 = 50$  мм, б -  $D_0 = 46$  мм і в -  $D_0 = 42$  мм. Розміри по всіх напрямках дані в міліметрах

Список літератури.

1. Ковка и объемная штамповка. Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. - Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. - М.: Машиностроение, 1987. - 384с.
2. Каложный В.Л. Сравнительный анализ процессов обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздвигшей издезией с помощью постоянного диаметра / В.Л. Каложный, Л.И. Алеева, И.П. Куликов // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. - Краматорск: ДТМА, 2013. - №4(37). - С. 87-92.

УДК 621.777.4

Горностай В.М. к.т.н., Потягиник А.М. аспірант, Коробко П.О. студ. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО КОМБІНОВАНОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ

Отримання виробів холодним об'ємним штампуванням характеризується значними питомими зусиллями на робочому інструменті, що суттєво зменшує стійкість робочого інструменту та призводить до збільшення кількості переходів для отриманні кінцевого виробу. Це призводить до збільшення собівартості кінцевого виробу. Особливої уваги заслуговує військовий промисловий комплекс де виробництво продукції носить масовий характер, а саме виготовлення босприпасів [1]. Таке виробництво потребує високопродуктивних та маловитратних технологій, які дозволяють отримати високоточні вироби або напівфабрикати з підвищеними експлуатаційними властивостями [2, 3].

Метою роботи є визначити можливість отримання виробу за мінімальну кількість переходів з необхідними фізико-механічними властивостями та дослідження течії металу в процесі комбінованого видавлювання циліндричної заготовки та визначення розрахунковим шляхом силових режимів та питомих зусиль на інструменті.

Схема процесу холодного комбінованого видавлювання наведена на рис. 1. Ліворуч від вісі симетрії показане положення перед видавлюванням, праворуч – після видавлювання.

Вихідну заготовку 1 діаметром  $D_0$  і висотою  $H_0$  встановлюють у матриці 2 до упору нижнього торця заготовки в кінцеву частину матриці. Формування виконують за допомогою пуансона 3, прямого видавлювання на кінцевій частині матриці 2 з подальшою роздільною на нерухомому пуансоні 4 та отримують виріб 6. Технологія і штампове оснащення для зворотного видавлювання проєктується в основному на базі виробничого досвіду і експериментальних даних [4].

Застосування метода скінчених елементів (МСЕ) для теоретичного аналізу процесів холодного видавлювання дозволяє встановлювати дані для проєктування технології і штампового оснащення, які не потребують доопрацювання експериментальними роботами [5]. Для дослідження була використана скінченно-елементна програма DEFORM. Вихідна заготовка із Сталі 30 (умовна межа текучості  $\sigma_{0.2} = 290 \text{ МПа}$ ) висотою  $H_0=90 \text{ мм}$  та діаметром  $D_0=56 \text{ мм}$ . Розміри робочих поверхонь інструменту: робочого пуансона: діаметр робочого торця пуансона  $d_2=21,615 \text{ мм}$ , кут переходу від робочого торця до робочого пояса пуансона  $\alpha_1=20^\circ$ , радіус переходу від кінцевої частини пуансона до робочого пояса  $r=2,5 \text{ мм}$ , довжина робочого пояса пуансона  $L_k=3 \text{ мм}$ , діаметр робочого торця пуансона  $d_2=15 \text{ мм}$ , кут переходу від робочого торця до робочого пояса пуансона  $\alpha_2=120^\circ$ , радіус переходу від кінцевої частини пуансона до робочого пояса пуансона  $r=2,5 \text{ мм}$ , довжина робочого пояса пуансона  $L_k=3 \text{ мм}$ , діаметр робочого торця пуансона  $D_m=48 \text{ мм}$ , кут кінцевої поверхні матриці  $\beta=11,3^\circ$ , довжина калібруючого пояса матриці  $L_k=7 \text{ мм}$ .

На рис. 2 представлені результати чисельних експериментів. На рис.2а показана залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона. Із графіка видно три стадії деформування виробу: перша – пряме видавлювання заготовки на ході пуансона 15 мм із зростанням зусилля видавлювання до 500 кН, друга – зворотне видавлювання порожнини  $\phi 36 \text{ мм}$  із зростанням зусилля деформування до 2600 кН, третя – упор стінок порожнини в торць пуансона і пряме видавлювання з роздільною порожнини  $\phi 30 \text{ мм}$  із різким зростанням зусилля до 3150 кН. На рис. 2б показана залежність зусилля виймання пуансона від переміщення. Максимального значення зусилля виймання досягає на виході пуансона із заготовки, коли робочий поясок пуансона розкладає утворену утяжину в процесі видавлювання. На рис. 2в показана залежність зусилля виймання деталей із матриці від переміщення виштовхувача. Графік демонструє поступове зниження зусилля виштовхування за рахунок зменшення площі контакту поверхні деталі із матрицею. На графіку видно область тимчасового зростання зусилля виштовхування на ході виштовхувача 30 мм, цей хід відповідає проходженню виштовхувача через область наближення поверхні робочого пояса нижнього пуансона та калібруючого пояса матриці.

На рис.3в зображений розподіл питомих зусиль по висоті матриці. При дії максимального зусилля видавлювання в області матриці до висоти 50 мм відсутній контакт із деформованим металом, оскільки нижня порожнина тільки почала утворюватися, тому розподіл напружень до висоти 50 мм на рисунку не показаний. У двох характерних точках, а саме область перед кінцевою частиною матриці та область після калібруючого пояса матриці, пи-

мування, перша – пряме видавлювання заготовки на ході пуансона 15 мм із зростанням зусилля видавлювання до 500 кН, друга – зворотне видавлювання порожнини  $\phi 36 \text{ мм}$  із зростанням зусилля деформування до 2600 кН, третя – упор стінок порожнини в торць пуансона і пряме видавлювання з роздільною порожнини  $\phi 30 \text{ мм}$  із різким зростанням зусилля до 3150 кН. На рис. 2б показана залежність зусилля виймання пуансона від переміщення. Максимального значення зусилля виймання досягає на виході пуансона із заготовки, коли робочий поясок пуансона розкладає утворену утяжину в процесі видавлювання. На рис. 2в показана залежність зусилля виймання деталей із матриці від переміщення виштовхувача. Графік демонструє поступове зниження зусилля виштовхування за рахунок зменшення площі контакту поверхні деталі із матрицею. На графіку видно область тимчасового зростання зусилля виштовхування на ході виштовхувача 30 мм, цей хід відповідає проходженню виштовхувача через область наближення поверхні робочого пояса нижнього пуансона та калібруючого пояса матриці.

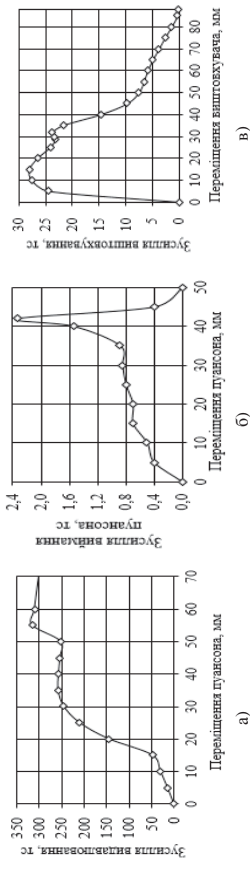


Рис.2 Силові режими

На рис.3 зображені залежності питомих напружень на інструменті від їх геометричних розмірів, при дії максимального зусилля видавлювання. На рис.3а зображений розподіл питомих напружень на рухомому(верхньому) пуансоні в залежності від його радіусу, найбільших значень питомі зусилля сягають на радіусі переходу від кінцевої частини пуансона до робочого пояса пуансона. На нерухомому пуансоні найбільших значень питомі зусилля сягають у області переходу від плоского робочого торця пуансона до конусної його частини.

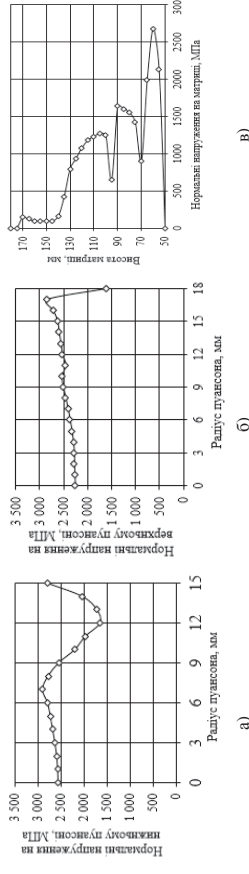


Рис.3 Питомі напруження на робочому інструменті

На рис.3в зображений розподіл питомих зусиль по висоті матриці. При дії максимального зусилля видавлювання в області матриці до висоти 50 мм відсутній контакт із деформованим металом, оскільки нижня порожнина тільки почала утворюватися, тому розподіл напружень до висоти 50 мм на рисунку не показаний. У двох характерних точках, а саме область перед кінцевою частиною матриці та область після калібруючого пояса матриці, пи-



томі зусилля мають дещо нижчі значення. Це пов'язано із характером течії металу у цих зонах. Максимального значення питомі зусилля сягають у зоні початку утворення порожнини  $\phi 30$  мм, оскільки течія металу направлена під кутом до поверхні матриці.

Моделюванням МСЕ встановлено напрямлені напружено-деформований стан в заготовці після видавлення. Результати моделювання наведені на рис.4. На рис.4а зображений розподіл інтенсивності напружень  $\sigma_1$  у момент дії максимального зусилля видавлення. Максимального значення величина розподілу  $\sigma_1$  набуває у зоні течії металу між робочим пояском нерухомого пуансона та калібруючим пояском матриці.

Максимального значення величина ступеня використання ресурсу пластичності в об'ємі деформованої заготовки при видавленні набуває  $\psi = 0,90$

Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією та зміцнення деформованого металу можна оцінити по розподілу інтенсивності деформації  $\epsilon_1$  та інтенсивності напружень  $\sigma_1$  [6]. Розподіл  $\epsilon_1$  в деформованому металі показаний на рис.6.1 б). Найбільші значення величини  $\epsilon_1$  зосереджені на робочих поясах пуансонів з поступовим зменшенням вплив деталей та до зовнішньої поверхні деталі.

**Висновки:** Завдяки чисельним експериментам було підібрані такі параметри процесу комбінованого видавлення порожнин, які дозволили отримати виріб за I перехід. Отримані силові режими, напружено-деформований стан та оцінена можливість руйнування заготовки.

**Список літератури**

1. Сарайчик А.Р. Технології патронно-тильзового производства. Учебное пособие для техникумов // А.Р. Сарайчик – ЦИИИ информатики, 1975.-С.208.
2. Каложний В.В. Применение метода конечных элементов при расчетах процессов изготовления гильз для артиллерийских и стрелковых боеприпасов / А.В. Каложный // Артиллерийское и стрелковое вооружение.-2009.-№2.-С.32-43.
3. Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением // А.В. Третьяков, В.И. Золот // «Металлургия», 1973.-С.109.
4. Ковка и объемная штамповка. Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. - Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Наврошкого. - М.: Машиностроение, 1987. - 384с.
5. Каложный В.В. Сравнительный анализ процессов обратного выдавливания и прямого выдавливания с раздечей изделий с полостью постоянного диаметра / В.И. Каложный, Л.И. Алева, И.П. Куликов // Обработка материалов давлением: сб. науч. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. - №4(37). – С. 87-92
6. В.А. Кроха Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. М.: Машиностроение , 1980. – 158 с.

УДК 621.7

Каложний В.В. д.т.н., проф., Куліков І.П. інж., Потгінник А.М. асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

**ВЛИВ ДІАМЕТРА ВИХІДНОЇ ЗАГОТОВКИ НА ТЕПЛОВИЙ ЕФЕКТ ТА ЯКІСТЬ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ПОРОЖНИСТИХ ВИРОБІВ ПРИ ХОЛОДНОМУ ЗВОРОТНОМУ ВИДАВЛЮВАННІ З РОЗДАЧОЮ**

Високоточні порожнисті вироби з великою продуктивністю отримують холодним видавленням. Найбільш розповсюдженим способом виготовлення таких виробів є зворотне видавлення [1], при якому зовнішній діаметр виробу дорівнює діаметру заготовки. Для зниження зусилля видавлення і питомих зусиль на інструменті використовують пряме видавлення з роздачою (ПВЗР) [2] та зворотне видавлення з роздачою (ЗВЗР), при яких діаметр вихідної заготовки менший за діаметр виробу. Схеми ПВЗР і ЗВЗР наведені на рис. 1. Ліворуч від осі симетрії показане положення на початку видавлення, праворуч – в процесі видавлення. Схема ПВЗР наведена на рис. 1а.

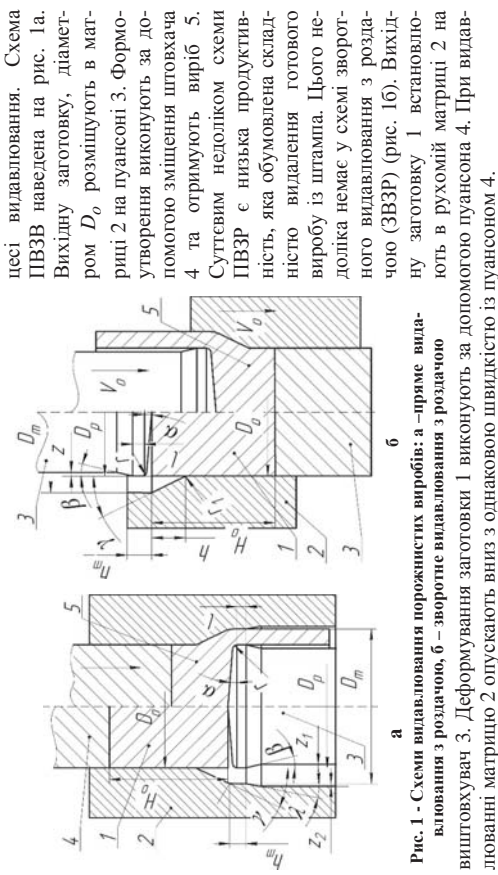


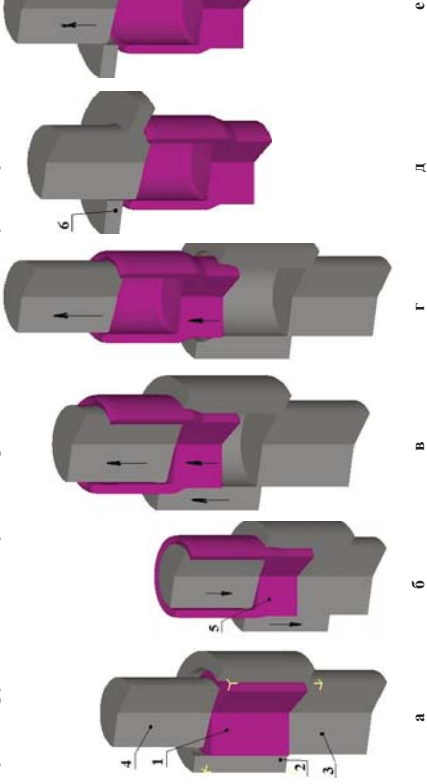
Рис. 1 - Схеми видавлення порожнистих виробів: а – пряме видавлення з роздачою, б – зворотне видавлення з роздачою

Метою роботи є встановлення впливу діаметра вихідної заготовки на тепловий ефект та якість виробів при зворотному видавленні з роздачою. Для проведення чисельних експериментів використана скінченно-елементна програма DEFORM. Вихідні заготовки із металу BRASS-CDA-377 (умовна межа текучості  $\sigma_{0,2}=140$  МПа) мали однакову висоту  $H_0=52$  мм та різні діаметри  $D_0$ : 50, 46 та 42 мм. Розміри робочого торця конусного пуансона для видавлення всіх заготовок були наступні:  $D_p=42$  мм,  $\alpha=7^\circ$ ,  $r=2$  мм,  $z=0,15$  мм,  $\beta=5^\circ$ ,  $l=2$  мм. При цьому відношення діаметра порожнини до діаметра заготовки відповідно склали  $D_p/D_0=0,96$ ; 0,88 і 0,8. Матриці мали розміри:  $D_m=52$  мм,  $h_m=5$  мм. Інші розміри матриць: для заготовки  $D_0=50$  мм -  $\gamma=10^\circ$  і  $h=7,2$  мм; для заготовки



$D_0=46$  мм -  $\gamma=22^\circ$  і  $h=7,6$  мм; для заготовки  $D_0=42$  мм -  $\gamma=32^\circ$  і  $h=8,4$  мм.

Моделювання за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ) встановлені силові режими видавлювання, напружено-деформований стан заготовок, температура деформованого металу та форма і розміри виробів з урахуванням пружної деформації після призулпнення дії деформуючого інструмента. Зі зменшенням величини  $D_p/D_0$  зусилля видавлювання зменшуються. Розрахункові схеми в розрізі на початку та в кінці видавлювання, при зворотному переміщенні пуансона та при зніманні виробу із пуансона приведені на рис. 2. Положення на початку видавлювання зображене на рис. 2а (1- заготовка, 2 - матриця, 3 - виштовхувач, 4 - пуансон). В кінці видавлювання отримується виріб 5 (рис. 2б). При зворотному переміщенні пуансона 4 матриця 2 з виробом 5 повертається у вихідне положення (рис. 2в), а в подальшому пуансон виймає виріб 5 із матриці 2 за рахунок охолодження торцем виробу 5 калібруючого пояса пуансона (рис. 2г). Знімання виробу 5 із пуансона 4 виконується



а б в г - Розрахункові схеми в розрізі для ЗБР заготовки діаметром  $D_0=46$  мм

зімачем 6, який встановлюють на торці виробу (рис. 2д). При подальшому русі пуансона проходить знімання виробу (рис. 2е). Необхідно відмітити, що для заготовки із  $D_p/D_0=0,96$  виріб залишається в матриці при зворотному переміщенні пуансона, а виштовхування виробу з матриці виконується за допомогою виштовхувача (див. рис. 1б).

Розподіли температури деформованого металу в кінці процесу видавлювання для розглянутих відношень  $D_p/D_0$  вихідних заготовок приведені на рис. 3. Зі зменшення величини  $D_p/D_0$  температура деформованого металу зменшується у стінках та донних частинах виробів. Якість виробів після холодної видавлювання визначається проірацювання структури металу пластичною деформацією, яке можна оцінити по розподілах інтенсивності деформації  $\epsilon_i$  по об'єму виробу, а також по розподілах ступеня використання ресурсу пластичності деформованого металу та по формах і розмірах виробів. На рис. 4 показані розподіли інтенсивності деформації по об'ємах виробів. Найбільша нерівномірність деформацій по ширині стінки має місце при видавлюванні заготовки із  $D_p/D_0=0,96$ . При цьому величина в значеннях  $\epsilon_i$  у внутрішніх і зовнішніх шарах металу стінки зменшується в 3р.

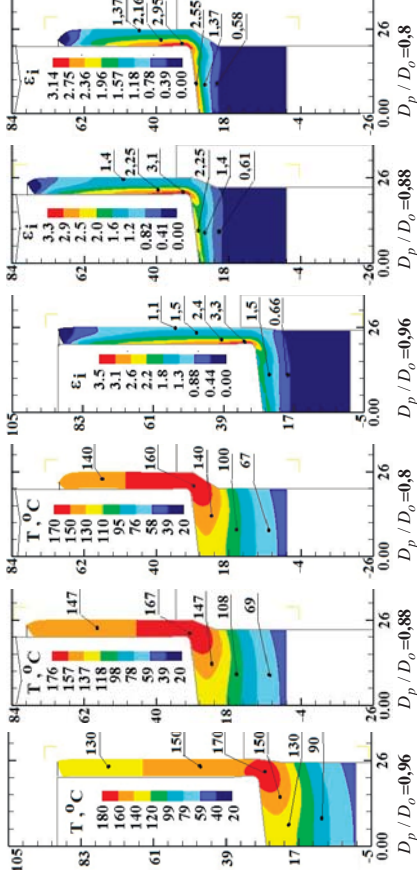


Рис. 3 – Розподіли температури деформованого металу по об'ємах виробів. Розміри по всіх приведі в міліметрах

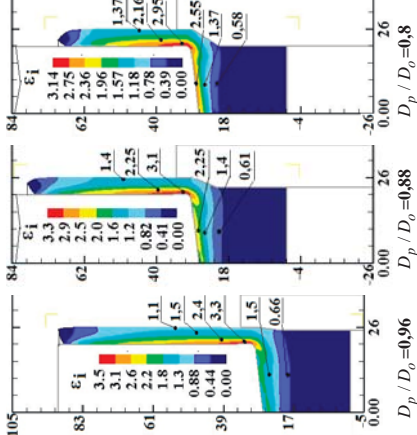


Рис. 4 – Розподіли інтенсивності деформації  $\epsilon_i$  по об'єму виробів. Розміри по всіх приведі в міліметрах

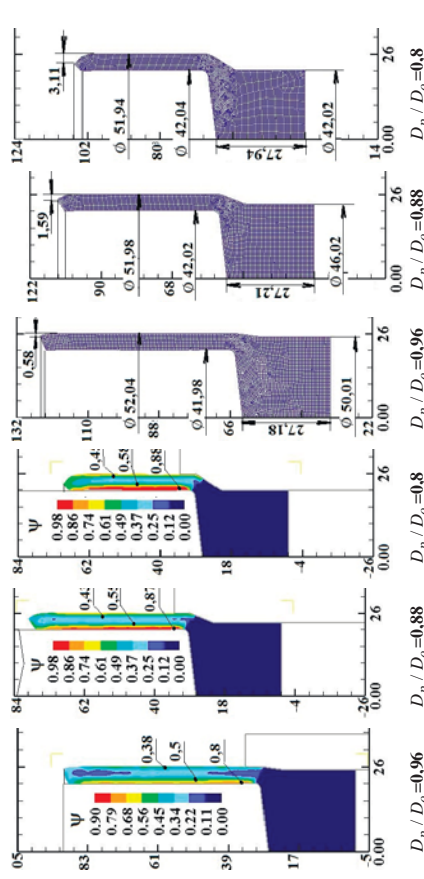


Рис. 5 – Розподіли ступеня використання ресурсу пластичності  $\psi$  деформованого металу. Розміри по всіх приведі в міліметрах

Отримані значення вичерпаного ресурсу пластичності  $\psi$  (при  $\psi=1$  настає руйнування металу заготовки) показують (рис. 5), що подальше деформування таких заготовок для потоншення стінок неможливе без проведення відпалу. Найбільшу точність форми та розмірів виробів забезпечує заготовка із  $D_p/D_0=0,96$  (рис. 6).

Список літератури

1. Ковалі і об'ємна штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) і др. - Т. 3. Холодная об'ємная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. - М.: Машиностроение, 1987. - 384 с.  
2. Дмитриев А.М. Исследование процесса выдавливания с раздвиг / А.М. Дмитриев // Известия вузов. Машиностроение, 1984. - №4. - С. 140-148.

УДК 621.73.016

Гожий С.П., д.т.н., Клиско А.В., ассистент, Рышівська Н.Г., студентка

НТУУ «Киевский политехнический институт им. И.Сикорского», г. Киев, Украина

### ОПТИМАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ШТАМПОВКИ ОБКАТЫВАНИЕМ

Анализ литературных данных свидетельствует о расширении промышленного использования штамповки обкатыванием (ШО). Это обусловлено тем, что использование процесса при изготовлении широкой номенклатуры изделий, в конечном счете, приводит к ощутимому снижению себестоимости изделия, повышению показателей качества и конкурентоспособности производителя. Прессы для ШО широкого распространения пока не получили, но современные производители стоят на пороге взрывного внедрения процесса. Это обусловлено как базовыми технологическими преимуществами (способностью обработки в холодном состоянии деталей с большими соотношениями диаметра к высоте), так и возможностями, которыми можно оснастить оборудование еще на этапе проектирования. Поэтому в конструкции прессы целесообразно заложить дополнительные технологические способности, выявленные исследователями в последнее время (возможность обработки как кольцевых, так и цилиндрических заготовок, получать детали с центральным отверстием, получать детали с конструктивными элементами на торцах, управлять формозменением материала в зависимости от геометрии изделия и др. [1, 2, 3]). Выбор таких, привлекающих технологических возможностей настало бы широким, что надо уделять значительное внимание на оптимальный баланс между себестоимостью оборудования и набором механизмов, которые обеспечивают те или иные технологические аспекты.

Цель – на концептуальном уровне заложить в конструкцию оборудования максимальные технологические возможности и обеспечить оптимальный баланс с его себестоимостью. Представленные материалы являются результатами исследований процессов и оборудования для ШО, полученными в последнее время.

#### Общая характеристика кинематических возможностей обкатывающего силового воздействия.

Анализ возможных движений верхнего и нижнего инструментов (возможно и другое их название, в частности, проф. Кривда Л.Т. ввел понятие активного и пассивного инструментов при ШО: активный - в котором сочетается несколько относительных движений, пассивный – который обладает одним относительным движением по отношению к активному) показывает, что совокупное силовое обкатывающее воздействие на заготовку возможно за счет приращения инструмента тех или иных кинематических и приводных возможностей. Каждое из относительных сочетаний движений подробно рассмотрено в [4] и имеет свои недостатки и преимущества.

#### Общая характеристика и параметры прессы.

Предлагаемое оборудование для ШО предназначается как правило для холодной или полугорячей штамповки, осесимметричных в плане изделий типа фланцев, полумуфт, заготовок шестерен и пр. из цилиндрических или кольцевых заготовок. Активный инструмент имеет постоянный угол наклона обкатывания. Что определяется минимальными затратами на механизм обкатывающего движения активного инструмента, а также назначением угла наклона в области максимального КПД процесса. Предлагается изготавливать серию прессов с номинальным усилием в диапазоне 1,6...4,0 МН. На следующем этапе перейти к оборудованию большего усилия – до 6,0...10 МН.

#### Компоновка прессы и оснащение его дополнительными устройствами.

Конструктивно пресс для ШО состоит из двух основных узлов: механизма силового нагружения, как правило, в виде гидравлического цилиндра (как у традиционного гидропрессы) и механизма обкатывающего движения активного инструмента (механизма обкатывания).

вания). При этом упомянутые узлы представляют базовую комплектацию оборудования для ШО. В качестве дополнительных устройств, которые обеспечивают особые технологические возможности можно предложить такой приблизительный ряд:

- автоматизация и механизация загрузочно-разгрузочных операций;
- формообразование внутренней полости в сплошной цилиндрической заготовке параллельно с внешним формообразованием;
- формообразование внешних конструктивных элементов на нижнем и верхнем торцах изделия;
- интенсификация внешнего формообразования изделия путем наложения активных сил трения;
- экономичное изготовление осесимметричных, но не круглых в плане деталей;
- регулирование параметрами ШО в оптимальных режимах обработки как в ручном, так и автоматическом режимах и пр.

Сами дополнительные устройства, обеспечивающие особые технологические возможности, составляют соответствующий перечень:

- механизм ловителя-выталкивателя, который смонтирован в полости силового гидроцилиндра, работающий в комплексе загрузочным роботом;
- второй силовой цилиндр, который установлен в механизме обкатывания безводильного типа;
- механизм синхронизации обкатывания и положения активного инструмента при использовании которого каждая точка активного инструмента и при каждом цикле обкатывания занимает тоже положение в плане относительно пассивного;
- механизм муфты-тормоза с дополнительным приводом поворота активного инструмента и механизма изменения полей сварных заготовок разнообразной конфигурации в устройстве получения полей сварных заготовок разнообразной конфигурации в плане;
- механизм регулировки частоты обкатывания и скорости приближений, который позволяет задавать обобщающий параметр (площадь очага локальной пластической деформации) в наиболее оптимальных соотношениях, при которых достигается максимальный КПД процесса;
- механизм предотвращения от перегрузки по силовому моменту обкатывания и пр.

Пресс для ШО в зависимости от технологических запросов заказчика оснащается тем или иным устройством или их набором, что влияет на окончательную стоимость оборудования, а оборудование по своим технологическим возможностям и комплексному воздействию на заготовку приобретает функции обрабатывающего центра объемной штамповки, так как позволяет параллельно с основным формообразованием выполнять дополнительные операции.

#### Механизм обкатывания.

Существует несколько, опробованных на практике схем механизмов обкатывания: водильного [5, 6] и безводильного [7] типов. Механизм обкатывания водильного типа назван по названию основной детали, в виде продольного стержня (водила) с развитой сферической опорной частью (наличие развитой сферической опоры дало еще одно распространённое название процессу – сферодвижная штамповка). Такая схема используется в специализированных прессах, так как имеет развитые по высоте прессы габаритные размеры, а также при оснащении двойным эксцентриком ротором позволяет реализовать множество видов обкатывания. Безводильная схема лишена этого недостатка, что позволяет также механизмы обкатывания оформить и в виде отдельного штампового блока с индивидуальным приводом. Безводильная схема наиболее приемлема в нашем случае, так как конструктивно является более приемлемой для оснащения дополнительными устройствами.

### Преимущества примерного исполнения и оснащения.

Базовая конструкция оборудования для ШО имеет 20-летнюю промышленную апробацию. Для использования этой схемы для оснащения дополнительных механизмами и узлами, необходимы минимальные конструктивные изменения и дополнения, в том числе для реализации в устройствах с другими (большими) технологическими усилиями.

В базовом варианте нагрузки и деформации при ШО приводит к ряду положительных эффектов, влияющих непосредственно на характеристики оборудования и оснастки:

- снижению усилия деформирования по сравнению с традиционными методами в 5...30 раз;
  - возможностью обработки в холодном состоянии деталей, которые раньше изготавливались в горячем и полугорячем состоянии на оборудовании такого же технологического уровня;
  - созданию технологических процессов и оборудования, отвечающих высоким требованиям безопасности и условий труда, так как процесс ШО отличается низким уровнем шума, возможностью протеканием в холодном состоянии, возможностью механизации и автоматизации;
  - уменьшению размеров, веса и стоимости оборудования и штамповой оснастки;
  - возможностью реализации методом ШО широкого спектра технологических операций объемной и листовой штамповки, а также технологий, не имеющих традиционных аналогов.
- При оснащении механизмами и устройствами расширяющими технологические способности дополнительно достигаются и соответствующие технологические возможности оборудования.
- Таким образом предложена и реализована концептуальная возможность изготовления современного поколения оборудования для ШО, вплоть до создания обрабатывающих центров объёмной штамповки. Несмотря на предполагаемые значительные затраты на оборудование такого типа каждый потребитель сможет самостоятельно, в зависимости от своих потребностей, иметь соответствующий набор технологических возможностей с корректной стоимостью относительно базового варианта оборудования для ШО.

### Список литературы

1. Гожий С.П. Штампування об'єктами як засіб ресурсозбереження // С.П. Гожій, Л.Т. Кривда. Наукові вісті Національного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2006. - № 2(46). - С. 55-60.
2. Гожий С.П. Засади і проблеми використання ресурсозберігаючих технологій обробки металів тиском // С.П. Гожій; Технологіческие системы. – 2006. - №2 (34). - С. 64-68.
3. Пат. 15241 Україна, МПК В21D 37/00. Спосіб виготовлення кільцевих деталей: Пат. 15241 Україна, МПК В21D 37/00 Л.Т. Кривда, С.П. Гожій (Україна); Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". - №20512818; Заявл. 29.12.2005; Опубл. 15.06.2006, Бюл. №6, - 7 с.
4. Sato G. Investigation of the Cold Orbital Forging Process of an AlMgSi Alloy Bevel Gear / G. Sato // Journal of Materials Processing Technology. – Elsevier, 2013. - № 213. - pp. 1692 – 1702.
5. Шувальский Я. Гидролизационный пресс с качающимся пуансоном (сферодвижателем) // Я. Шувальский. Качающе-штамповочное производство. -1978. - № 5. С. 43-45.
6. Марциняк З. // Качающе-штамповочное производство. – 1970. – № 9. – С. 18 – 20.
7. Кривда Л.Т. Блок для штамповки обкальванием усилием 300 кН // Л.Т. Кривда, С.П. Гожій; Вестник Киевского политехнического института. Машиностроение. – 1993. - № 30. - С. 67-72.

УДК 621.7.011

Тітов<sup>1</sup> А. В., к.т.н., доц., Михалевич<sup>2</sup> В. М., д.т.н., проф.;

1 - НГУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна;

2 - Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

## АНАЛІТИЧНІ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ШЛЯХУ ДЕФОРМУВАННЯ ДЛЯ ТОЧОК БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ЗРІЗКА ПРИ ТОЦЕВОМУ ОСАДЖЕННІ МІЖ ПЛОСКИМИ ШОРТКІМИ ПЛИТАМИ

У працях [1, 2] представлено методику побудови шляхів деформування у вигляді залежностей накопиченої деформації  $e_i$  від безрозмірного показника напруженого стану  $\eta$ :

$$e_i = e_i(\eta) \in C_1[a, b], \quad (1)$$

де  $C_1[a, b]$  - множина функцій, що мають на  $[a, b]$  неперервні похідні першого порядку.

Представлено різні аналітичні залежності шляхів деформування, що побудовані на основі конструювання з врахуванням механіки процесу деформування різних диференціальних рівнянь для осової та колової деформацій. Відзначено переваги параметричного представлення [1, 2]

$$\begin{cases} e_i(m, t) = m \cdot \int_0^t \sqrt{3 + \frac{1}{\cos^4(z)}} \cdot dz, \\ \eta(t) = \frac{1 - 3 \cdot \cos^2(t)}{\sqrt{1 + 3 \cdot \cos^4(t)}}, \end{cases} \quad t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right], \quad (2)$$

де  $m$  - характеризує інтенсивність бочкоутворення, що залежить від умов тертя на контактних поверхнях зразка з плоскими шорткими плитами. До основних переваг співвідношення (2) віднесено його однопараметричність та достовірність описання напружено-деформованого стану матеріалу за вказаних умов деформування.

У праці [3] зазначено про необхідність розробки метода аналітичного розв'язку основної задачі теорії деформованості.

Проте співвідношення (2) не є елементарною функцією та надто складне для побудови аналітичного розв'язку основної задачі теорії деформованості. Тому у цій праці пропонується замінити її на апроксимацію сплайн-функцією

$$e_i = f(m, \eta) = \begin{cases} m \cdot a_1 \cdot (a_2 + \eta)^{a_3}, & -1 \leq \eta \leq 0 \\ m \cdot a_4 \cdot (a_5 - \eta)^{a_6}, & 0 < \eta < 1 \end{cases}, \quad (3)$$

де  $a_i$  ( $i=\overline{1,6}$ ) - параметри, що підлягають визначенню.

Звернемо увагу на те, що останнє співвідношення, за аналогією до першого співвідношення (2), є лінійною однорідною функцією відносно параметра інтенсивності бочкоутворення  $m$ :

$$f(m, \eta) = m \cdot f(1, \eta), \quad (4)$$

що зводить задачу побудови апроксимації функції двох змінних  $e_i = y(m, \eta)$  до задачі побудови апроксимації функції однієї змінної  $e_i = y(1, \eta)$ .



Із умов, яким має задовольняти це співвідношення отримаємо

$$f(1, -1) = 0 \rightarrow \{a_2 = 1, a_3 > 0\}; \tag{5}$$

$$\lim_{\eta \rightarrow +1-0} f(1, \eta) = +\infty \rightarrow \{a_5 = 1, a_6 < 0\}$$

$$f(1, 0) \approx 2, 205747 \rightarrow \{a_1 = a_4 = e^{(0)}, 2, 205747\}$$

Тоді співвідношення (3) набуває вигляду

$$f(1, \eta) = \begin{cases} e^{(0)} \cdot (1 + \eta)^{a_5}, & -1 \leq \eta \leq 0 \\ e^{(0)} \cdot (1 - \eta)^{a_6}, & 0 < \eta < 1 \end{cases} \tag{6}$$

Знайдемо першу похідну

$$\frac{\partial f(1, \eta)}{\partial \eta} = \begin{cases} e^{(0)} \cdot a_5 \cdot (1 + \eta)^{a_5-1}, & -1 \leq \eta \leq 0 \\ -e^{(0)} \cdot a_6 \cdot (1 - \eta)^{a_6-1}, & 0 < \eta < 1 \end{cases} \tag{7}$$

Із умов неперервності першої похідної в точці  $\eta=0$

$$\lim_{\eta \rightarrow +0} \frac{\partial f(1, \eta)}{\partial \eta} = \frac{\partial f(1, \eta)}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = \lim_{\eta \rightarrow +0} \frac{\partial f(1, \eta)}{\partial \eta} \tag{8}$$

з урахуванням

$$\lim_{\eta \rightarrow -0} \frac{\partial f(1, \eta)}{\partial \eta} = \frac{\partial f(1, \eta)}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = e^{(0)} \cdot a_5, \tag{9}$$

$$\lim_{\eta \rightarrow +0} \frac{\partial f(1, \eta)}{\partial \eta} = -e^{(0)} \cdot a_6 \tag{10}$$

впливає

$$a_5 = -a_6 = b > 0. \tag{11}$$

Остаточно співвідношення (3) набуває вигляду двопараметричної апроксимації

$$f(m, \eta) = \begin{cases} m \cdot e^{(0)} \cdot (1 + \eta)^b, & -1 \leq \eta \leq 0 \\ m \cdot e^{(0)} \cdot (1 - \eta)^{-b}, & 0 < \eta < 1 \end{cases} \tag{12}$$

Знайдемо частинну похідну другого порядку від отриманого виразу

$$\frac{\partial^2 f(m, \eta)}{\partial \eta^2} = \begin{cases} m \cdot e^{(0)} \cdot b \cdot (b-1) \cdot (1 + \eta)^{b-2}, & -1 \leq \eta \leq 0 \\ m \cdot e^{(0)} \cdot b \cdot (b+1) \cdot (1 - \eta)^{-b-2}, & 0 < \eta < 1 \end{cases} \tag{13}$$

Оскільки в точці  $\eta=0$

$$\lim_{\eta \rightarrow -0} \frac{\partial^2 f(m, \eta)}{\partial \eta^2} \Big|_{\eta=0} = \frac{\partial^2 f(m, \eta)}{\partial \eta^2} \Big|_{\eta=0} = m \cdot e^{(0)} \cdot b \cdot (b-1), \tag{14}$$

$$\lim_{\eta \rightarrow +0} \frac{\partial^2 f(m, \eta)}{\partial \eta^2} \Big|_{\eta=0} = m \cdot e^{(0)} \cdot b \cdot (b+1), \tag{15}$$

в цій точці маємо розрив першого роду для другої похідної при

$$b \in (0, 1). \tag{16}$$

Причому для фіксованого  $m$ , з урахуванням умови (15) функція (11) опукла при  $-1 < \eta < 0$  та угнута при  $0 < \eta < 1$ .

Очевидно, що значення параметра  $b$  залежатиме від обраної міри відхилення двох функцій.

кції. У теорії наближення найбільш поширеними є відстань нульового порядку (теорія рівномірного наближення) та середньоквадратичне інтегральне наближення.

В останньому випадку за міру відхилення двох функцій  $y_1(\eta)$  та  $y_2(\eta)$  на відрізку  $[\eta_1, \eta_2]$  прийматиметься величина

$$R_2 = \|y_1(\eta) - y_2(\eta)\| = \frac{1}{\eta_2 - \eta_1} \sqrt{\int_{\eta_1}^{\eta_2} [y_1(\eta) - y_2(\eta)]^2 \cdot dx}. \tag{17}$$

Для функцій (2), (11) матимемо

$$R = \frac{m}{\eta_2} \sqrt{\int_0^{\eta_2} [e^{(0)}(1, x) - e^{(0)} \cdot (1 + \eta(x))^b]^2 \cdot dx + \int_{\eta_0}^x [e^{(0)} + \int_{\eta_0}^x \sqrt{3 + \frac{1}{\cos^4(t)}} \cdot dt - \frac{e^{(0)}}{(1 - \eta(x))^b}]^2 \cdot dx}, \tag{18}$$

де  $\eta(x_0) = 0, (x_0 \approx 0, 955)$ .

Оскільки в точці  $\eta=1$  функції (2), (11) мають розрив другого роду, важливим питанням є визначення відрізка  $[\eta_1, \eta_2]$ , а точніше величини  $\eta_2$ . Для більшості матеріалів ординати критичної деформації не перевищують значення 1÷3, отже з урахуванням можливих значень параметра  $m$  з певним запасом можна прийняти

$$e^{(0)}(1, x_k) \approx 10, 86 \Rightarrow x_k \approx 1, 47. \tag{19}$$

Спроби знайти значення параметра  $b$ , що мінімізує відстань  $R_2$  згідно (17), за допомогою стандартних команд спеціального пакета *Optimization* системи комп'ютерної математики (СКМ) Maple до успіху не привели. Спроба звести пошук мінімуму до розв'язання нелінійного рівняння, що отримано диференціюванням виразу (17), також виявилася не ефективною. Тому оптимальне значення параметра  $b$  знаходили методом золотого перерізу в середовищі СКМ Maple за допомогою спеціально створеної користувацької процедури. В результаті обчислень отримали оптимальне значення  $b \approx 0, 458$ ;  $R_2 \approx 0, 0429$ .

Використання в якості міри відхилення між двома функціями відстані нульового порядку  $R_1$ , призвело до оптимального значення  $b \approx 0, 455$ ;  $R_1 \approx 0, 130503766$ .

Інтуїтивно очевидно, що похибка визначення параметра  $b$  в залежності від прийнятої міри відхилення, принаймні на порядок менша похибки визначення цього ж параметра на основі експериментальних даних. Проте це питання необхідно довести, що має стати темою іншої статті.

Заміна функції аналітичного представлення (2) на (11), що має кращі аналітичні властивості, зокрема є елементарною функцією, що має обернену функцію у явному вигляді, надає можливість отримання аналітичного розв'язку основної задачі теорії деформацій стосовно торцевого осадження циліндричного зразка.

### Список літератури

1. Михалевиц В. М. Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні: монографія / В. М. Михалевиц, Ю. В. Добржанок. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 180 с. ISBN 978-966-641-532-8
2. Mikhalovich V. M. Modeling of plastic deformation in a cylindrical specimen under edge compression / V. M. Mikhalovich, A. A. Lebedev and Yu. V. Dobranjuk // Strength of Materials. – Volume 43, Number 6 (2011), P. 591–603. DOI: 10.1007/s11223-011-9332-7.
3. Михалевиц В. М. Розробка методу знаходження аналітичного розв'язку основної задачі теорії деформацій / В. М. Михалевиц, А. В. Лєбєдєв // Матеріали VIII МНТК «Теоретичні та практичні проблеми обробки матеріалів тиском та якості фахової освіти», Київ-Херсон, 2017. – С. 172 – 174.

УДК 621.777.4

Алиева Л. И. к. т. н., доц., Гончарук К.В., Шкира А. В. к. т. н., Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина

**КОМБИНИРОВАННОЕ ТРЕХСТОРОННЕЕ ВЫДАВЛИВАНИЕ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ С ОТРОСТКОМ И ФЛАНЦЕМ**

В промышленности широко применяются полые детали и детали с фланцем, которые, как правило, изготавливаются обработкой резанием. Между тем, процессы холодного выдавливания, обеспечивают высокое качество поверхности и точные размеры штампуемых заготовок и деталей, что снижает или полностью исключает необходимость в дополнительной механической обработке резанием [1–5].

Для теоретического анализа выбран метод конечных элементов (программы QForm 2D, DeForm 3D) и энергетический метод верхней оценки (баланса мощностей) [3] на основе модального подхода в построении и описании кинематически возможных полей скоростей [6, 7].

Предложены кинематические модули - поля скоростей (КВПС) трапецеидальной формы для переходных кромок верхней и нижней матриц, что позволило дать оценку силовых характеристик выдавливания с учетом реальной геометрии инструмента. Энергетическим методом баланса мощностей получены аналитические зависимости приведенного давления деформирования  $\bar{p} = p / \sigma_s = f(\bar{R}_1, \bar{R}_n, \bar{R}_k, \bar{R}_o, \bar{R}_m, \bar{h}_i, \alpha, \beta, \gamma)$  от относительных параметров процесса (относительного радиуса матрицы):  $\bar{R}_1$  - относительного радиуса фланца  $R_1$ ,  $\bar{R}_n$  - относительного радиуса пуансона  $R_n$ ,  $\bar{R}_k$ ,  $\bar{R}_o$ ,  $\bar{R}_m$  - относительного критического радиуса  $R_k$ ,  $\bar{R}_o$  - относительного радиуса отрезка  $R_o$ ,  $\bar{h}_i$  - относительных высот участков детали  $h_i$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  - углов скоса инструмента для схемы с прямоугольными модулями (рис. 1,а) и для схемы вытянутой фаски на инструменте (рис. 1,б).

При комбинированном трехстороннем выдавливании наблюдается наличие двух очагов деформации: верхний очаг деформации, сформированный обратным течением материала, и нижний очаг деформации радиально-прямого течения. Особенностью радиально-прямого выдавливания является наличие границы, разделения течения материала в двух направлениях, которая описывается варьируемым параметром - радиусом  $R_k$ .

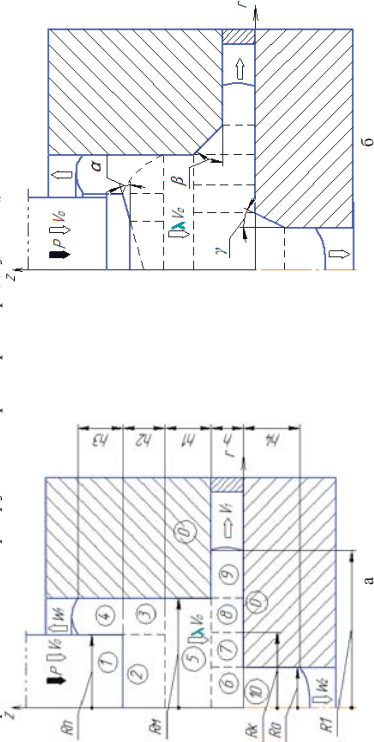


Рис. 1 – Расчетные схемы комбинированного выдавливания для схемы выдавливания в инструменте без фасок (а) и с учетом фасок (б) на инструменте

радиуса  $R_k = R_o + t \cdot (R_m - R_o)$ , где параметр  $t$ , который определяет положение границы раздела течения материала равен 0,23 (рис. 2, а). Для схемы выдавливания в инструменте с фасками на переходных кромках  $R_k = R_o \cdot (1 + t \cdot \gamma) + t \cdot (R_m - R_o \cdot (1 + t \cdot \gamma))$  при значении параметра  $t$ , равном 0,25 (см. рис. 2, б).

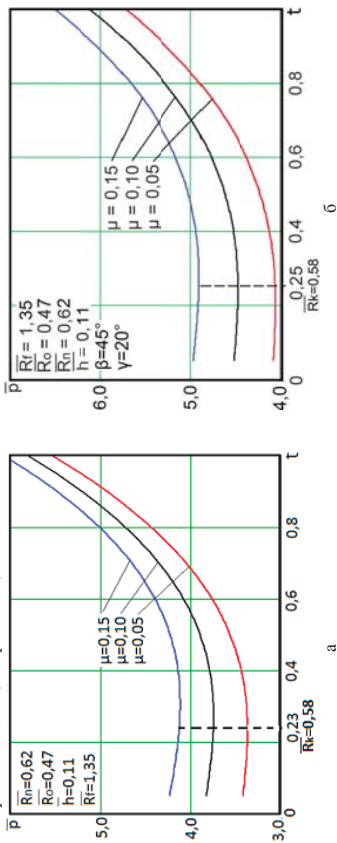


Рис. 2 – Графики зависимости приведенного давления выдавливания от параметра разделения течения материала для схем трехстороннего выдавливания без учета фасок (а) и с учетом фасок (б) на инструменте

На основе выполненных расчетов установлено, что при увеличении относительной высоты фланца от  $\bar{h} = 0.06$  до  $\bar{h} = 0.16$  наблюдается снижение приведенного давления на 11%, что связано с уменьшением степени деформации в зоне фланца, уменьшением контактной поверхности трения между фланцем и матрицами (из-за искажения формы фланца и дефекта в виде «сапога») (см. рис. 3, а). При увеличении относительного радиуса отрезка с  $\bar{R}_o = 0.34$  до  $\bar{R}_o = 0.60$  снижается приведенное давление на 16% за счет увеличения очага деформации (см. рис. 3, б). Также определено, что рост относительного радиуса фланца с  $\bar{R}_f = 1.0$  до  $\bar{R}_f = 1.5$  приводит к возрастанию значений приведенного давления на 8%. Это связано с увеличением объема и размера фланца. При изменении относительного радиуса пуансона от  $\bar{R}_n = 0.51$  до  $\bar{R}_n = 0.73$  приведенное давление возрастает на 12%, что объясняется увеличением поверхности трения и степени деформации при обратном течении материала.

Для схем с кинематическими трапецеидальными модулями, которые учитывают наличие фасок на переходных кромках инструмента, анализ теоретических данных показал аналогичный характер распределения показателей приведенного давления с отклонением 7-10% в большую сторону, что связано с увеличением объемов очагов деформации и зон срезов на границах модулей.

Сравнительный анализ энергосиловых параметров при трехстороннем выдавливании заготовки в инструменте с фасками и без фасок, проведенный при помощи МКЭ показал аналогичный результат. Установлено, что силы деформирования по двум схемам имеют незначительное расхождение (до 5%) максимальных значений, причем в начале процесса сила выдавливания по схеме с фасками ниже, что объясняется большей свободой для истечения металла. При достижении максимальных значений сил деформирования, меньшим становится сила выдавливания для схемы деформирования в инструменте без фасок, что можно объяснить уменьшением поверхности трения.

Прогноз поэтапного формообразования детали по ходу процесса, выполненный энергетическим методом баланса мощностей на основе предложенной расчетной схемы и методом конечных элементов, при сопоставлении показывает близкие результаты (рис. 3). Результаты

эксперимента (рис. 4) подтвердили полученные данные.

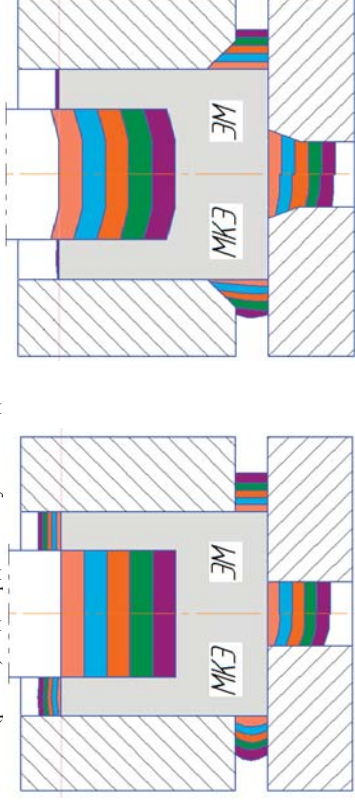


Рис. 3 – Приращение линейных размеров заготовки по ходу деформирования



Рис. 4 – Детали, полученные комбинированным трёхсторонним выдавливанием

#### Список литературы

1. *Евстратов В.А. Основы технологии выдавливания и конструирования штампов.* Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. - 144 с.
2. *Алиев И. С. Технологические процессы холодного поперечного выдавливания / И. С. Алиев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – №6. – С. 1–4.*
3. *Теорияковки и штамповки / Е. П. Унксов [и др.]. Под общ. ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.*
4. *Алиева Л.И. Альтернативные способы штамповки стержневых деталей с фланцем / Л.И. Алиева, К.В. Гончарук, Е.М. Солодун // Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2016. – С. 5 – 8.*
5. *Алиева Л. И. Процессы комбинированного деформирования и выдавливания // Обработка материалов давлением. Краматорск: ДГМА, – 2016. – № 1 (42). – С. 100-108.*
6. *Алиева Л. И. Применение математического аппарата для определения энергосиловых характеристик комбинированного трёхстороннего выдавливания / Л. И. Алиева, А. В. Шкира, К. В. Гончарук // Научный Вестник ДГМА: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. – № 2 (17Е). – С. 5–10. URL: [http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vestnik/%E2%84%96\(17%D0%95\)\\_2015/article/3.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vestnik/%E2%84%96(17%D0%95)_2015/article/3.pdf)*
7. *Алиева Л.И. Энергетический анализ процесса комбинированного выдавливания стержневых деталей с фланцем/ Л.И. Алиева, К.В Гончарук, А.В. Шкира// Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2015. –№ 2 (41). – С. 35 – 40.*

УДК 621.73.016

Гожий С.П., д.т.н., Кліско А.В., ассистент, Шетманюк Д., студент  
НТУУ «Киевский политехнический институт им. И. Сикорского», г. Киев, Украина

### РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИСКОВ КОЛЕС АВТОМОБИЛЯ

В мире эксплуатируется около миллиарда автомобилей [1 ел. сайт]. В каждом из них, как минимум, четыре колеса. Основа колеса – автомобильный диск. Поэтому важность производства и эксплуатации такой детали была и будет оставаться актуальной для современного общества, в том числе и при переходе на электрический привод, который выдвигает еще более жесткие требования экономичности.

Струшировав требования к диску их можно разделить на несколько основных под-групп: - конструкторские; - технологические; - прочностные; - производственные; - эксплуатационные. Во многих случаях эти подгруппы оказывают взаимное влияние и зависимость друг от друга, что послужило развитию того или иного вида и производства дисков.

Наиболее распространенными способами массового изготовления дисков автомобилями являются такие:

- Способ 1. Листоштамповано-сварные стальные.
- Способ 2. Литые легкосплавные.
- Способ 3. Кованые (объемноштампованные) легкосплавные.
- Способ 4. Раскатанные роликами легкосплавные.

Каждый из перечисленных способов имеет свои преимущества и недостатки. Например, диски, полученные по способу 1, являются наиболее массовыми и относительно дешевыми, ремонтируются при эксплуатационных повреждениях, но имеют сравнительно простой внешний вид и завышенные показатели массы и момента инерции, так как изготавливаются из листовой заготовки постоянной толщины. Также на заключительных операциях формовки с обкаткой на роликовых станах происходит утонение ответственных элементов конструкции [2 автореферат], из-за чего для обеспечения прочности толщина изначальной заготовки назначается еще большей.

Литые диски (по способу 2) из легких сплавов на основе алюминия имеют привлекательную форму, но более дорогие и из-за стоимости сплава, относительно низкие механические характеристики материала из-за литой структуры и соответственно характеризуются завышенными площадями сечений массы. Не ремонтируются после повреждений.

Кованые (объемноштампованные) легкосплавные диски (по способу 3) имеют привлекательную и ажурную форму, что вытекает из минимальных сечений и наименьшей материалоемкости из-за получения максимальных механических характеристик материала после объемного формоизменения. Их использование обеспечивает эффективную эксплуатацию и максимальные динамические характеристики автомобиля. Стойкость возрастает по сравнению с литыми дисками.

Диски, которые изготавливают по способу 4 также можно отнести к технологии объемной штамповки, которая сочетает штамповку обкатыванием с применением локального формоизменения с помощью раскатанных роликов на заключительной стадии. Диски в этом случае по своим характеристикам сопоставимы с прельдущим вариантом, но требуют менее материалоемкого специализированного оборудования, которое в свою очередь менее производительное, что повышает себестоимость производства.

Целью предлагаемой статьи является описание разработанного универсального технологического процесса изготовления дисков автомобильных колес, который с одной стороны обладает преимуществами описанных выше способов, а другой свободен от соответствующих недостатков. Преимущество предлагаемого процесса основываются на сочетании техно-



логических достоинств штамповки обкатыванием и листовой штамповки. Также его можно использовать как при изготовлении лектосплавных, так и стальных дисков.

Эффективность штамповки обкатыванием достигается при изготовлении относительно тонких деталей (с отношением диаметра к высоте  $>4$ ) или изделий с тонкими конструктивными элементами, в том числе с относительно тонкими фланцами. Такая относительно тонкая деталь или конструктивный элемент может рассматриваться как заготовка под операции листовой штамповки. Пооперационное сочетание двух видов обработки при изготовлении одного изделия, которые по сути относятся к объёмной и листовой штамповке, позволяет получать монолитные детали довольно сложной конструкции, каковыми являются и диски автомобилей колес. Причем для удовлетворения условиям прочности и легкости возможно задавать необходимую геометрию сечений в различных местах диска.

При изготовлении дисков из алюминиевого сплава, и в несколько упрощенном виде, технологический процесс состоит из следующих технологических переходов.

Во время первого перехода на цилиндрической заготовке 1 (рис.1) постоянной толщиной на прессе для штамповки обкатыванием раскатывается фланцевый участок 2 (рис.2).

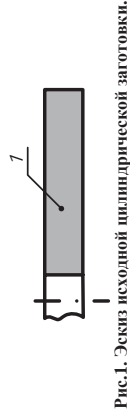


Рис.1. Эскиз исходной цилиндрической заготовки.



Рис.2. Эскиз изделия после первого перехода.

На втором переходе фланцевый участок 2 на прессе для глубокой вытяжки формируется в цилиндрическую часть 3 без деформирования центральной зоны (рис.3).

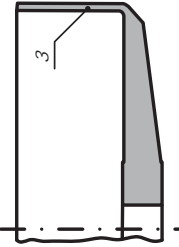


Рис.3. Эскиз изделия после второго перехода.

Третий переход – повторение технологии второго перехода. При укладке в нижний штамп заготовка кантуется на  $180^\circ$ , а цилиндрическая часть 3 размещается в специальной полости и не деформируется. В результате штамповки обкатыванием окончательно формируется центральная зона 4 диска и фланцевый участок 5 (рис.4).

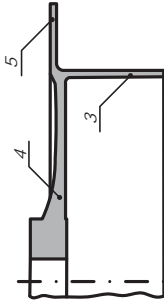


Рис.4. Эскиз изделия после третьего перехода.

На четвертом переходе фланцевый участок 5 также на прессе для глубокой вытяжки формируется в цилиндрическую часть 6 с фланцевым элементом 7 без деформирования центральной зоны 4 и цилиндрической части 3, размещенной в специальной полости нижнего прижима вытяжного штампа. Во время окончательного перехода цилиндрическая часть 3 формируется в конический элемент 8 с фланцем 9 (рис.5).

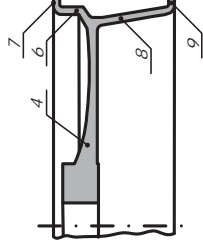


Рис.5. Эскиз готового автомобильного диска.

При изготовлении дисков из стали предлагается несколько иная последовательность технологических переходов, но сама их суть состоит в том же – объединение преимуществ штамповки обкатыванием и листовой штамповки. Уже упоминалось, что основная технологическая проблема, которая возникает при изготовлении стальных дисков – утонение отдельных элементов конструкции при обкатке роликом. Эта проблема решается путем профилирования заготовки на этапе штамповки обкатыванием, при этом места, которые будут подвержены утонению, делают утолщенными.

Предложенные технологические процессы изготовления дисков автомобильных колес позволяют получать качественные и эффективные при эксплуатации изделия с минимальной себестоимостью.

#### Список литературы

1. <http://www.pilotov.net>
2. Пузир Р.Г. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступення доктора технічних наук, Розвиток теоретичних основ методів розрахунку технологічних параметрів процесів формозміни ободів коліс транспортних засобів, Спеціальність 05.03.05 "Процеси та машини обробки тиском" 2017 Кременчук 2017, 50 с.

УДК 621.7

Каложний В.Л. д-т.н., проф., Унгурян С.І. студ., Баляс А.А. студ. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

**ХОЛОДНЕ ПРЯМЕ ВИДАВЛЮВАННЯ ПО СХЕМІ «ЗАГОТОВКА ЗА ЗАГОТОВКОЮ» СТЕРЖНЕВИХ ВИРОБІВ ІЗ МІДІ МЗ З РІЗНИМ СТУПЕНЕМ ДЕФОРМАЦІЇ**

Пряме видавлювання по схемі «заготовка за заготовкою» зображене на рис. 1. Ліворуч від вісі симетрії наведено положення перед видавлюванням, праворуч - в процесі видавлювання. Першу заготовку 1 діаметром  $D_0$  і висотою  $H_0$  встановлюють в конусній матриці 2, на якій розміщений контейнер 3 (рис. 1а). Контейнер 3 і матрицю 2 фіксують на плиті 4. Деформування виконують за допомогою пуансона 5 та отримують напівфабрикат 6. Після видавлювання першої заготовки в контейнер 3 розміщують другу заготовку 7, яка при формоутворенні напівфабриката 8 дозволяє отримати виріб 9, що має висоту  $H_1$  (рис. 1б). Таку схему видавлювання використовують для отримання круглих стержнів із заданим пропрацюванням структури металу холодною пластичною деформацією та виготовлення профілів різної конфігурації.

Метою роботи є визначення за допомогою метода скінчених елементів параметрів видавлювання по схемі «заготовка за заготовкою» стержневих виробів із міді МЗ з різним ступенем деформації. В роботі використана скінченно-елементна програма DEFORM [1]. Розрахунки проводились для видавлювання заготовок із міді МЗ з розмірами  $D_0=38$  мм,  $H_0=76$  мм. Розміри матриці були наступні:  $\alpha=16^\circ$ ,  $\beta=45^\circ$ ,  $l=3$  мм,  $z=0,15$  мм,  $r_m=2$  мм. Діаметр матриці  $D_m$  визначався ступенем деформації  $\varepsilon$ . Розрахунки проводились для  $\varepsilon=10, 20, 30, 40, 50, 60$  і  $70\%$ . При цьому величина діаметра  $D_m$  відповідно складає 36; 34; 31,8; 29,4; 26,9; 24 і 20,8 мм.

Розрахункові схеми в розрізі на початку та в кінці видавлювання першої і другої заготовки зображені на рис. 2. На рис. 2а наведена схема на початку видавлювання першої заготовки (1 – заготовка, 2 – контейнер, 3 – матриця, 4 – пуансон). Здеформована перша заготовка 5 приведена на рис. 2б. Друга заготовка 6 встановлена на zdeформовану заготовку 5 (рис. 2в). При видавлюванні другої заготовки отримується виріб 7 (рис. 2г).

На рис. 3 зображені залежності зусилля видавлювання першої заготовки від

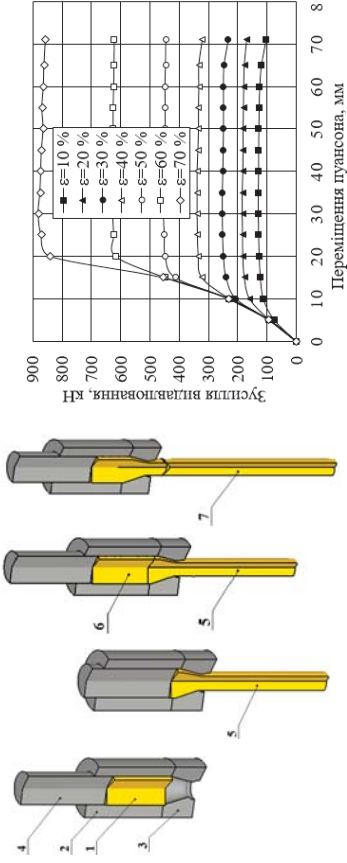


Рис. 2 - Розрахункові схеми в розрізі на початку та в кінці видавлювання першої та другої заготовки

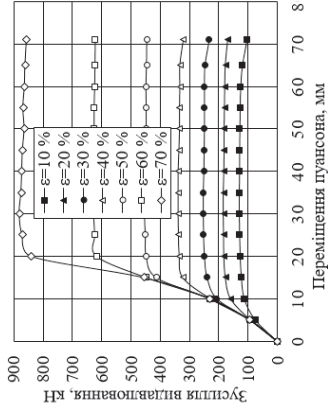


Рис. 3 - Залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона при видавлюванні першої заготовки з різним ступенем деформації

переміщення пуансона для розглянутих ступенів деформації  $\varepsilon$ . Зусилля зростає до певної величини, а далі залишається постійним до кінця видавлювання. При збільшенні величини  $\varepsilon$  максимальне значення зусилля видавлювання зростає. Для проектування деформуючого інструменту необхідно знати точний розподіл питомих зусиль на контактуючих поверхнях zdeформованих заготовок з інструментом при максимальному зусиллі видавлювання. Питомі зусилля можна оцінити по розподілу нормальних напружень  $\sigma_n$  на вказаних поверхнях. Такі розподіли  $\sigma_n$  приведені на рис. 4. Тонкими лініями зображений деформуючий інструмент.

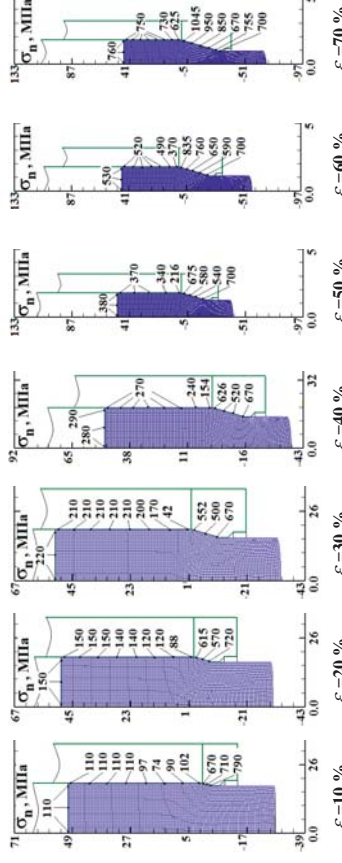


Рис. 4 - Розподіли нормальних напружень на деформуючому інструменті при максимальному зусиллі видавлювання

Моделюванням визначений напружено-деформований стан заготовок при формоутворенні виробів. На рис. 5 приведені розподіли інтенсивності напружень  $\sigma_i$  у zdeформованих заготовках при максимальній величині видавлювання для всіх розглянутих ступенів деформації. Осередок деформації зосереджений в конусній частині матриці. При збільшенні величини  $\varepsilon$  зростає максимальне значення  $\sigma_i$ . Розподіли інтенсивності деформації  $\varepsilon_i$  наведені на рис. 6. При холодному видавлюванні підвищується

**Борис Р.С., к.т.н., доц., Тітов В.А., д.т.н., проф. Вишневецький П.С., ст. викл.**  
 КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ РЕЛЬЄФУ ГРАНИЧНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ З'ЄДНАННІ РІЗНОРІДНИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ВИТЯГУВАННЯМ З ПОТОННЕННЯМ**

В наш час машинобудівна промисловість як в Україні, так і за кордоном характеризується підвищеними вимогами до якості та експлуатаційних властивостей виробів та низької собівартості їх виробництва. Для забезпечення ефективності виробів машинобудування в їх конструкціях широко використовують послідання різних матеріалів для забезпечення необхідних специфічних функціональних властивостей, котрі не притаманні жодному з елементів окремо.

Однією з найбільш актуальних науково технічних проблем використання різних матеріалів у конструкціях є забезпечення якості з'єднання деталей з різнорідних металів і сплавів. Для цих цілей широко застосовування знаходять шаруваті металеві композиції трубчастої форми (біметалеві трубчасті елементи – БТЕ), а для їх з'єднання запропоновано використання рельєфу граничної поверхні. Вони забезпечують ефективне з'єднання трубопроводів з різних металів.

В даній роботі авторами вирішена науково-технічна актуальна науково-практична задача підвищення міцності з'єднання біметалевих трубчастих елементів у машинобудівному виробництві, теоретично та експериментально обґрунтована машинобудівна концепція процесу виготовлення біметалевих трубчастих елементів з використанням рельєфу граничної поверхні з окремих листових різнорідних металів витягуванням з потонненням у нагрітому стані, що базується на існуючих теоріях дифузійно-механічного з'єднання.

Розроблена комплексна методика теоретичного та експериментального дослідження процесу витягування з потонненням двошарової заготовки з різнорідних металів з використанням рельєфу граничної поверхні. Обґрунтування аналітичних результатів та результатів чисельного моделювання проведено за допомогою натурного експерименту з використанням стандартизованих методів на сертифікованому обладнанні.

З використанням теорії пластичної течії розроблена математична модель деформування процесу сумісного витягування з потонненням двох різнорідних металів з нагрівом в умовах плоского деформованого стану, яка дозволила встановити взаємозв'язок параметрів напружено-деформованого стану на граничній поверхні та ступеню деформації потоннення шарів з вихідними геометричними параметрами заготовки, та проаналізувати необхідні умови для заповнення рельєфу граничної поверхні.

В результаті чисельного моделювання процесу в програмному комплексі CAD/CAE Simufact Forming 12.0 встановлено, що для витягування з ступенем деформації потоннення 31% для біметалу системи 08кп + АМГ-5м відбувається заповнення рельєфу граничної поверхні матеріалом з меншими характеристиками міцності Величина радіальних напружень на граничній поверхні шарів змінюється пропорційно в залежності від форми конструктивних елементів рельєфу.

Експериментально підтверджено основні наукові результати, що отримані аналітичними та чисельними розрахунками. Показано, що заповнення рельєфу відбувається у всіх випадках моделювання.

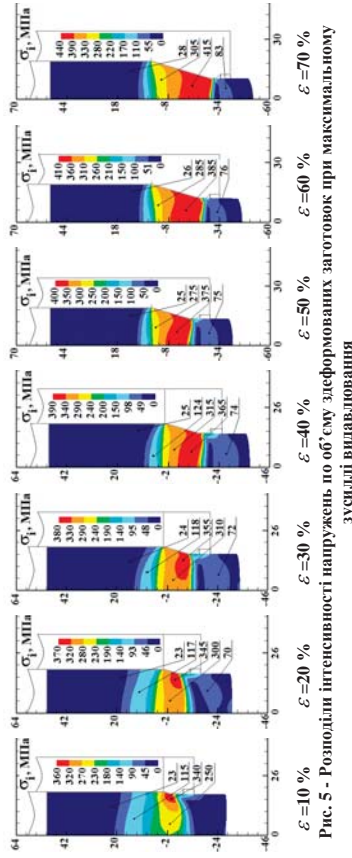


Рис. 5 - Розподіл інтенсивності напружень по об'єму деформованих заготовок при максимальному зусиллі видавлювання

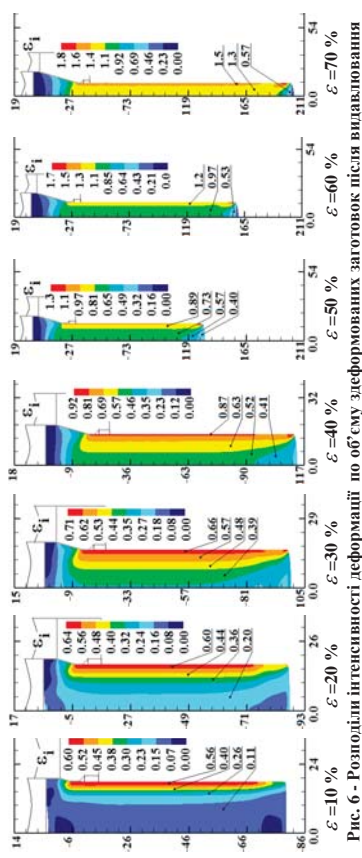


Рис. 6 - Розподіл інтенсивності деформації по об'єму деформованих заготовок після видавлювання

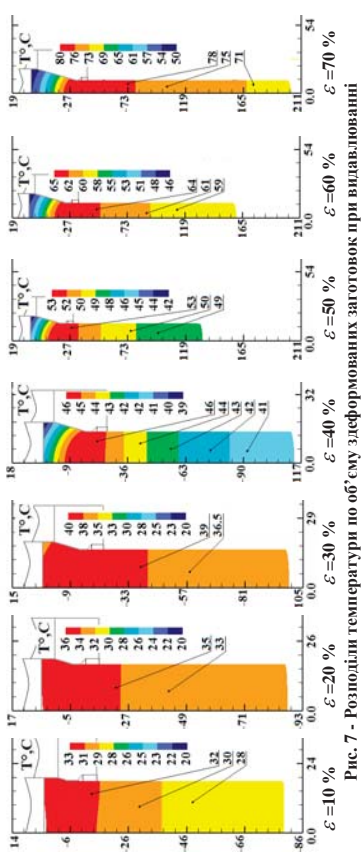


Рис. 7 - Розподіл температури по об'єму деформованих заготовок при видавлюванні

температура деформованого металу. Розподіл температури на кінцевих стадіях видавлювання першої заготовки наведені на рис. 7. Зі збільшенням значення  $\epsilon$ , зростає температура деформованого металу.

Список літератури.

1. DEFORM. Users Manual, 2000, Scientific Forming Technologies Corporation, Version 10/



УДК 621.771

С.А. Івасюк, магістр; О.В. Холявік, к.т.н., доц.; М.В. Орлюк, к.т.н., доц.;  
В.І. Стеблюк, д.т.н., проф.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОФІЛЮВАННЯ ПРОКАТУВАННЯМ ПОЛІГОНАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ СТВОЛІВ ШТУРМОВИХ І СНАЙПЕРСЬКИХ ГВИНТІВКОВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЧОТИРЬОХВАЛКОВОЇ ПРОКАТНОЇ КЛІТИ

Ствол є основною частиною стрілецької зброї. Будова ствола визначається призначенням зброї та особливостями його експлуатації. Ствол нарізної стрілецької зброї призначений для надання кулі обертального і поступального руху з певною початковою швидкістю в заданому напрямку за рахунок енергії порохового заряду. Обертальний рух кулі забезпечує її гіроскопічну стійкість в польоті [1].

Ствол як частина зброї працює в особливих умовах. Для того, щоб ствол витримував великий тиск порохових газів та їх високу температуру, тертя від руху кулі в каналі ствола та різноманітні службові навантаження, ствол повинен мати достатню міцність. Необхідна міцність забезпечується товщиною його стінок та вибором матеріалу, здатним витримувати тиск порохових газів 250-400 МПа при температурі до 3000°С. При цьому геометрія зовнішнього контуру ствола і товщина його стінок визначаються не лише умовами міцності, а й методами охолодження, способами кріплення ствола до ствольної коробки, необхідністю кріплення на стволі додаткових пристосувань.

В роботі Розова Ю.Г. [2] розглянуті методи одержання на внутрішній поверхні трубочасті заготовки ствола полігонального профілю волочінням або пресуванням через роликові матеріали. Більш сприятливою є схема пресування (в роботі Розова Ю.Г. вона називається прокатування в не приводних валках). В даному випадку має місце схема напружено-деформованого стану (НДС) близька до схеми всебічного нерівномірного стиснення. При цьому геометричні параметри профілю практично без відхилень відповідають профілю оправки.

Недоліком такої схеми є те, що довжина профільованої заготовки обмежується втратою стійкості внаслідок поведованого згину. Тому таким методом можна профілювати короткі ствольні заготовки пістолетів та пістолет-кулеметів. Наприклад ствольна заготовка калібру 9 мм не може бути більшою 200 мм по довжині. В той же час довжина стволів штурмових гвинтівок в більшості випадків складає 600-650 мм, а довжина ствола снайперської гвинтівки 1000-1500 мм. Виходячи з цього для отримання полігонального профілю запропоновано схему прокатування, за якої заготовка затягується у зону деформування активними силами тертя на поверхні приводних валків. Дана схема реалізована в експериментальній чотирьохвалковій прокатній клітці, конструкція якої показана на рис. 1:

Принцип дії кліти: трубочаста заготовка 17 профілюється обтискуванням приводними роликами 4 на рухомій оправці. Ступінь обтиснення визначається натискними гвинтами 14, що переміщують корпус ролику 3 в напрямлюючих 2, закріплених на корпусі 15 і стриймають зусилля обтискування. Кришка кліти 5 фіксується гвинтами 16 в корпусі 1. Привід роликів виконується зубчастими конічними шестернями 11, закріпленими на валах 6, 7, 8. Вал 8 з'єднаний шарніром 9 з валом 10 і далі через муфту з черв'ячним редуктором та двигуном (на схемі не показані).

В роботі Розова Ю.Г. по процесу одержання полігонального профілю методом волочіння рекомендується вибрати ступінь обтиску з умови сталості об'єму (площі). В нашому випадку рекомендований ступінь деформування становить  $\psi = \Delta F / F_0 = 0.011$ .

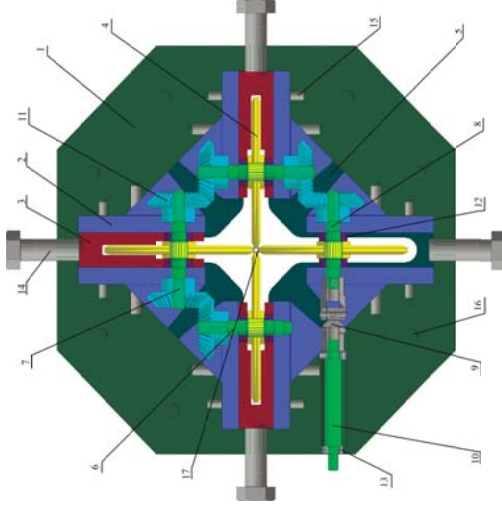


Рис. 1 – Конструкція 4-х валкової кліти для профілювання внутрішньої поверхні трубочасті заготовки:  
1 – корпус; 2 – вал; 3 – корпус ролика; 4 – ролик; 5 – кришка;  
6 – вал короткий; 7 – вал; 8 – шарнір; 9 – шарнір; 10 – вал проміжний; 11 – шестерня; 12 – підшипник; 13 – підшипник; 14 – гвинт натискний; 15 – гвинт кріплення напрямлюючих; 16 – гвинт кріплення кришки;  
17 – заготовка.

З метою оцінки можливості профілювання внутрішньої поверхні трубочасті заготовки прокатуванням у валках при невеликому ступені обтиску було проведено комп'ютерне моделювання процесу з визначенням геометричних параметрів полігонального гвинтового профілю після деформування та параметрів НДС процесу [3]. Результати моделювання зображено на рис. 2.

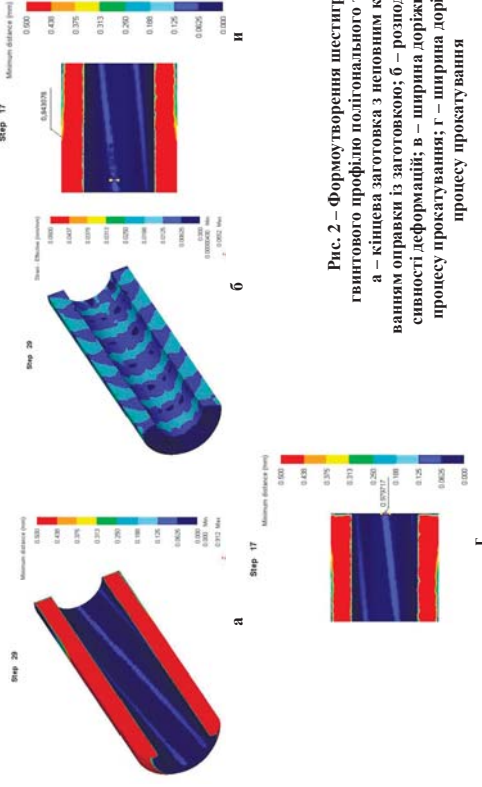


Рис. 2 – Формування шестигранного гвинтового профілю полігонального гніту:  
а – кінцева заготовка з неовним контактуванням оправки із заготовкою; б – розподіл інтенсивності деформації; в – ширина доріжки після процесу прокатування; г – ширина доріжки до процесу прокатування

Як видно з рисунку, профілювання прокатуваним у валках на оправці при невеликому ступені обтиску дає неприйнятні результати: матеріал вихідної заготовки незначно деформується лише на поверхні (рис. 2б), а ширина незаповнених доріжок залишається практично незмінною (профіль не формується, рис. 2в, г).



Рис. 3. Формування шестигранного гвинтового профілю полігонального типу:  
а – зовнішній вид заготовки з утвореними ребрами, б – прилягання оправки до внутрішньої поверхні ствольної заготовки

Модельовання профілювання із збільшенням ступенем обтиску ( $\psi = 0,22$ ) підтвердило працездатність запропонованої схеми. За даного ступеня обтиску відбувається повне заповнення полігонального профілю (утворюються направляючі доріжки), але на зовнішній поверхні заготовки утворюються повздовжні ребра (рис. 3), які можуть негативно впливати на експлуатаційні властивості ствола.

Тому в подальшому необхідно виконати додаткові дослідження з метою оптимізації ступеня обтиснення при прокатуванні (зменшення висоти повздовжніх ребер без втрати якості сформованого полігонального профілю).

#### Список використаної літератури:

1. Стеблюк В.І., Розов Ю.Г. Шкарлута Д. Б., Холявик О. В. Перспективи використання в артилерійстві стволів з полігональним профілем. Збірник доповідей П науково технічної конференції УВМА ім. П.С.Нахімова. 2011г., с.19-22.
2. Розов Ю.Г. «Технологія виготовлення прецизійних трубчатих изделий холодним пластическим деформованием», Херсон, 2013г.
3. Орлюк М.В, Шкарлута Д. Б., Ниж, Холявик О.В., Кт.п.н. доц, Кулида А. магістр, Стеблюк В.І., д.т.н., проф. «Определение геометрических параметров полигонального профиля канала ствола стрелкового оружия». Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, тези доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», 2016р, с161-163.

**Білоус М.П., Стеблюк В.І., Орлюк М.В.**  
КПШ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА САМОРЕГУЛЮЮЧА УСТАНОВКА ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ПОЛІГОНАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ СТВОЛА ПК «ІМПУЛЬС» ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОФІЛЮВАННЯ

Сучасна війна переконливо довела, що військовослужбовці союзних військ, яким по штату не передбачена штурмова гвинтівка, як правило, озброювалися пістолетами-кулеметами і армійськими пістолетами, розрахованими на використання застарілого пістолетного патрона 9-мм НАТО. Але масове використання засобів індивідуального захисту (бронежилети, каски) призвело до зниження їх ефективності.

У зв'язку з цим для підвищення ефективності індивідуальної зброї почалася розробка нових систем озброєння, що складаються з компактних зразків стрілецької зброї (пістолетів і пістолетів-кулеметів), але під нові патрони зменшеного калібру з загостреними високошвидкісними кулями з підвищеною пробивною здатністю.

Німецькі військові фахівці за результатами багаторічних досліджень, розпочатих в 1980-х роках і що проходили в рамках створення зброї ближнього бою за програмою NBW (Nahbereichswaffe - зброя ближнього бою), після проведення аналізу перспектив розвитку стрілецької зброї в XXI столітті прийшли до висновку про те, що необхідно більш чітко окреслити коло основних бойових завдань, що вирішуються в бою піхотинцями за допомогою стрілецької зброї: індивідуальна і групова оборона; штурмові дії на малих відстанях; ураження живої сили на великих відстанях і боротьба з легкоброньованими бойовими машинами.

В результаті Німеччина представила перспективні зразки зброї піхоти, основним з яких є пістолет-кулемет МР7а1 з такими характеристиками:

- Маса, кг: 1,8 (без магазину); 0,1 / 0,15 / 0,2 (порожній магазин на 20/30/40 патронів); 0,23 / 0,34 / 0,46 (заряджений магазин на 20/30/40 патронів);
  - Довжина, мм: 638/415 з розкладеним / складеним прикладом;
  - Довжина ствола, мм: 180 (без пламегасителя);
  - Ширина, мм: 51;
  - Висота, мм: 169,5 (без прицілу);
  - Патрон: 4,6 × 30 мм;
  - Калібр, мм: 4,6;
  - Принципи роботи: відведення порохових газів, поворотний затвор;
  - Скорострільність, пострілів/хв: ~ 950;
  - Початкова швидкість кулі, м/с: ~ 725;
  - Максимальна дальність, м: 200 (ефективна);
  - Вид боспостачання: коробчаті магазини на 20/30/40 патронів;
  - Приціл відкритий.
- Вітчизняним аналогом МР7а1 може стати ПК «ІМПУЛЬС» розроблений в КБ «Завод Маяк» за участі науковців НТУУ «КПШ ім. І. Сікорського». Проектно-технічні характеристики вказаного пістолета-кулемета наступні:

- Довжина із складеним / розкладеним прикладом : 365/555мм
- Ширина(без бокових планок Пікатіні) - 40мм
- Висота з магазином на 30 набоїв - 180мм
- Маса із спорядженим магазином - 2,4кг \*
- Темп стрільби 700-800 пострілів/хв.
- Дальність ефективної стрільби 200м\*  
\*дані для варіанту ПК під патрон 9 × 19мм , з корпусом із штампованого листового металу. (У випадку використання полімерного корпусу маса може бути зменшена до 1,8 - 1,9кг). Корпус з титанового листа - до 1,2 кг.

Канали ствола обох моделей мають полігональний профіль. Важливим моментом проекту є розробка технології і конструкції одержання полігонального профілю каналу ствола. Для отримання необхідних параметрів полігональних доріжок необхідно встановити потрібну ступінь обтиску зовнішньої поверхні заго-

товки. При малих ступенях обліску профілі полігональних доріжок або зовсім не заповнюються або заповнюються недостатньо для утримання кулі внаслідок обколювання. При великих ступенях обліску на зовнішній поверхні ствольної заготовки утворюються гвинтові ребра, що викликає зниження бапистичних характеристик кулі. Знаходження оптимальних параметрів обліску являлось однією із задач даної роботи.

Профільовання каналу ствола можна виконати декількома способами: обтищенням ствольної заготовки волоочінням або пресуванням в гладкій кінцевій матриці на рухомій оправці; пресування в роликівій матриці («прокачуванням не приводними роликками»), прокачування в приводних валках.

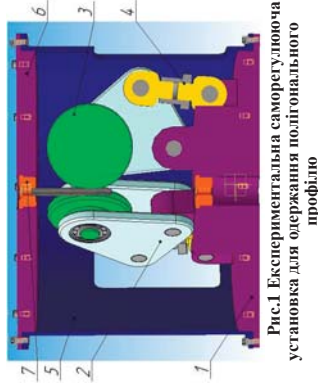


Рис.1 Експериментальна саморегулююча установка для одержання полігонального профілю

В даному випадку кращим варіантом буде пресування не приводними роликками завдяки простій конструкції установок порівняно з прокатною кліткою, меншою зусиллю порівняно з обтищенням в кінцевій матриці. При незначній довжині ствола пресування в роликівій матриці з не приводними роликками не викликає втрати довжини ствола пресування в роликівій матриці стійкості. Для цього було розроблено експериментальну установку, зображену на рис. 1. Установка складається з основи (нижньої плити) 1, на яку встановлено 6 важелів 2, в яких, на підшипниках кочення, встановлено 3 прокатних роликів 3. Зазор між роликками регулюється за допомогою регулюючих гвинтів 4. Вся установка поміщена в корпус 5 і закрита кришкою 6, в якій встановлена центруюча втулка 7 для заготовки. Процес профільовання відбувається наступним чином: установка встановлюється на стіл гідравлічного преса, в центруючу втулку встановлюється заготовка з оправкою і ходом повзуна преса відбувається пресування. Потім заготовку повертають на 60° і повторюють процес.

Було проведено моделювання процесу пресування, яке показало можливість виготовлення ствола ПК «Імпульс» способом пресування в матриці з не приводними роликками. На рисунках 2, 3 і 4 показано моделювання процесу пресування.

На рис.2 показано мінімальні відстані між заготовкою та оправкою, як видно з цього ризику, по мірі проходження заготовки через роликівій матрицю відбувається прилягання внутрішньої поверхні заготовки до поверхні оправки, тобто утворюється полігональний профілю.



Рис. 2. Формування полігонального профілю

Рис. 3. Розподіл деформацій

Рис. 4. Розподіл напруження

З рис.3 можна побачити що деформація розподілена досить рівномірно по об'єму заготовки, її максимальне значення сягає 0,803 мм/мм.

На рис.4 показано розподіл напружень. Так як і деформація, напруження також розподілені по об'єму заготовки досить рівномірно і знаходяться в межах 100-350 МПа, а максимальне досягає значення 1670 МПа.

УДК 669.715:62-412:621.74.047

Полівода С.Л., Сірий О.В., Гордіня О.М.  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ,

### ВИСОКОЯКІСНІ ЗЛИВКИ З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ТИСКОМ

У Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України розроблений, виготовлений та успішно експлуатується плавильно-заливний комплекс для приготування алюмінієвих сплавів та виготовлення з них зливок методом напівбезперервного лиття [1]. Коротка технічна характеристика комплексу наведена у таблиці.

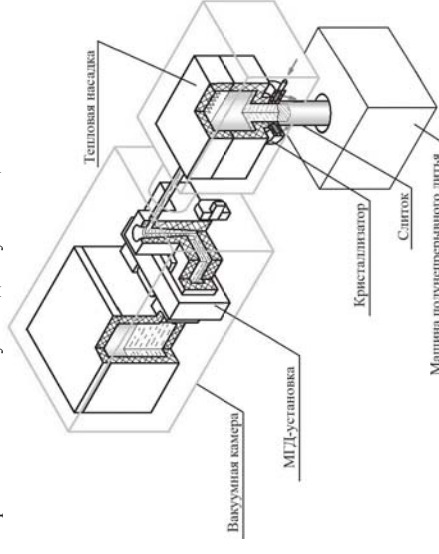


Рис. 1. Схема плавильно-заливного комплексу для виготовлення зливок з алюмінієвих сплавів

Обладнання дозволяє отримувати високоякісні зливки зі сплавів систем Al-Mg, Al-Mg-Zn, Al-Mg-Zn-Cu, Al-Li-Mg-Cu, які використовуються для виготовлення деталей авіакоsmічної техніки, у судно- та автомобілебудуванні, в атомній енергетиці та ін.

Технічна характеристика плавильно-заливного комплексу

Параметри	Існуючий у ФТМС НАНУ	Перспективний
Повна ємність тиглю, кг	200	600
Встановлена потужність, кВт	80	120
Температура рідкого металу (короткочасно), °С	750 (800)	
Робочий вакуум, кПа (мм рт.ст.)	50; 90; 150; 160; 180; 250	0,133 (1).
Діаметр зливки, мм	1500	до 500
Довжина зливки, мм		до 4000

Високу якість зливок забезпечують такі технічні рішення, реалізовані у конструкції комплексу та технологіях виготовлення зливок:



- електромагнітне перемішування на всіх етапах приготування сплаву дозволяє досягти високого рівня засвоєння легуючих та модифікуючих елементів та рівномірності розподілення їх у розплаві;
- вакуумне рафінування сплаву при залишковому тиску у вакуумній камері  $\sim 1$  мм рт.ст. забезпечує вміст водню у сплаві на рівні  $0,05-0,12$  см<sup>3</sup>/100 г;
- фільтрування розплаву через пористий керамічний фільтр дозволяє ефективно видаляти оксидні включення, остаточний вміст їх у сплаві не перевищує  $0,05$  об.%;
- можливість створення захисної атмосфери під час приготування сплаву в МГД-міксері та при транспортуванні його по герметичному металопроводу у кристалізатор виключає вторинне газонасичення та окислення розплаву;
- регульовані інтенсивність електромагнітного перемішування сплаву в кристалізаторі, швидкість руху ливарного столу та витрата охолоджуючої води дозволяють управляти процесом структуроутворення в зливках;
- запатентована конструкція низького кристалізатора з тепловою насадкою забезпечує практично плоский фронт кристалізації зливків, що сприяє формуванню у них однорідної дрібнозернистої структури;
- нанесення сублімуючого покриття на внутрішню поверхню кристалізатора дозволяє отримувати гладеньку, блискучу поверхню зливка, яка не потребує механічної обробки перед обробкою тиском.

#### Перелік використаних джерел

1. Пужайло Л.П., Серый А.В., Подивода С.Д. Технологія и оборудованіе для получения сплитков из высокопрочных алюминиевых деформируемых сплавов методом полунепрерывного литья // "Вісник Донбаської державної машинобудівної академії". - 2010. - №3. - с.227-229.

УДК 621.961.2:621.974

Карнаух С.Г., к.т.н., доц.  
Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ,

### МЕТОДИКА ВИБОРУ БЕЗВІДХОДНОГО СПОСОБУ ПОДЛІЛУ СОРТОВОГО ПРОКАТУ (ТРУБ) НА МІРНІ ЗАГОТОВКИ

Перспективними напрямками вдосконалення машинобудівного виробництва є розробка заходів щодо зниження витрат металу в заготівельному виробництві, підвищення точності і продуктивності поділу прокату. Зазначені фактори суттєво впливають на техніко-економічні показники наступних формотворчих процесів обробки і в кінцевому підсумку на собівартість готової продукції [1].

У заготівельному виробництві використовуються більш десяти способів поділу прокату, які класифікують за цілою низкою ознак: за ступенем «відхідності», за механічною схемою деформації прокату, способу затієку заготовки тощо [2-6]. Кожен з відомих способів має свої переваги і недоліки. Найбільш ефективними і перспективними, з точки зору продуктивності і відхідності, є відрізка зсувом і ломка згином.

До переваг ломки згином можна віднести високу продуктивність і низькі енергосилові параметри розділення. До недоліків: додаткові витрати часу на попередню розмітку і операцію нанесення концентратора напружень і, у ряді випадків, невисоку якість поверхні поділу (косина, вириви тощо) [2]. Відрізка зсувом забезпечує більшу продуктивність процесу поділу, але потребує більших енерговитрат на розділення і, в ряді випадків, не гарантує високу якість заготовок, що поділяються [3].

Таким чином, відомі безвідходні способи поділу сортового прокату не є універсальними для поділу сортового прокату (труб) із різних сталей та сплавів кольорових металів. До теперішнього часу не існує методики, яка б дозволяла зробити раціональний вибір безвідходного способу поділу і отримати прогнозований позитивний результат для матеріалів в широкому діапазоні механічних властивостей, довжин і розмірів поперечних перерізів заготовок при мінімальній енергоемності і високій продуктивності процесу. Рішення з цього питання можуть бути різноманітними, а вибір одного з варіантів не очевидний і часто заснований на інженерній інтуїції і практичному досвіді. Крім того, прийняття рішень відбувається в умовах виробничих обмежень, обмежень матеріальних ресурсів, економічних можливостей, енергетичних ресурсів, наявності кваліфікованих кадрів та ін.

Метою роботи є розробка методики з використання системи критеріїв, що дозволяють достовірно класифікувати матеріали по їх чутливості до руйнування, зокрема, для вибору оптимального способу поділу прокату (труб) на мірні заготовки.

В результаті аналізу закономірностей формозмін і руйнування прокату виявлено, що розвиток геометричних дефектів викликаній пластичною деформацією в процесі розділення [2,3]. Тому руйнування прийнято класифікувати з урахуванням величини пластичної деформації: якщо руйнування передувала значна пластична деформація, його називають в'язким; якщо пластична деформація не перевищувала  $1...2\%$  – крихким.

Для комплексної оцінки чутливості матеріалу до руйнування у роботі [7] розроблено критерій руйнування: показник в'язкості металу, критерій зародження тріщини, критерій розповсюдження тріщини, критерій крихкості і критерій «масштаб».

У роботі [8] відомі критерії руйнування застосовані для комплексної оцінки чутливості матеріалу заготовок і приведені результати розрахунків для різних сталей і сплавів кольорових металів. Матеріали за кожним критерієм були ранжировані за величиною розрахункових значень, що дозволило виконати їх порівняльний аналіз. Для оцінки міри здатності критеріїв руйнування характеризувати чутливість матеріалу до розділення, була визначена інформативність цих критеріїв. Для цього було вирішено таксонометричну задачу знаходження у

багатовимірному просторі ознак безлічі мінімальної потужності, що забезпечує класифікацію об'єктів із заданою достовірністю [9].

Пошук рішення такої задачі складається з ітеративної послідовності виконання двох операцій: висунення і верифікації гіпотез. Висунення гіпотез здійснювалось за алгоритмами вибору ознак [9]. Зокрема, за алгоритмом послідовного додавання ознак, коли спочатку розглядається одновимірний простір ознак, після чого, на підставі ознаки з найкращою оцінкою, переходять до розгляду простору ознак і так далі. Верифікація інформативності отримуваної безлічі ознак здійснюється шляхом виконання на його основі операції класифікації об'єктів і подальшого порівняння результату з еталоном.

При цьому найбільшу складність представляє задача класифікації об'єктів у багатовимірному просторі ознак. Це завдання вирішується методами кластерного аналізу, призначеного для розбиття початкової безлічі об'єктів на задане (чи невідоме) число кластерів – кластерів на підставі деяких критеріїв, що віддзеркалюють основні вимоги розбиття [10]. Класифікація об'єктів виконується у багатовимірному просторі, що формується з векторів, компоненти яких є параметрами об'єктів. Тоді кластером буде група векторів, відстань між якими у середній цій групі менша, ніж відстань до сусідніх груп.

У зв'язку з високою розмірністю завдань кластеризації, одним з найбільш ефективних інструментів, який застосовується для їх вирішення, є нейронні мережі, що представляють собою універсальний засіб апроксимації [11].

В даний час існує декілька видів спеціальних нейронних мереж, призначених для вирішення завдань кластеризації. Найбільшого поширення набули так звані структури, що самоорганізуються, зокрема, карти Кохонена [12]. Таким чином, карти Кохонена можна вважати одним з методів проектування багатовимірного простору в простір з більш низькою розмірністю (двовимірний), при цьому вектори, схожі у вихідному просторі, виявляються поруч і на отриманій карті. Область застосування карт Кохонена для кластеризації обмежується завданнями, в яких число кластерів заздалегідь відомо. У той же час, фіксоване число кластерів, за рахунок досить повільної модифікації ваг, робить даний алгоритм у порівнянні з аналогами більш стійким, здатним функціонувати в умовах переходу і пропуску даних [12].

Як еталон була прийнята кластеризація матеріалів, виконана на підставі методу експертних оцінок з виділення трьох класів, що відповідає традиційній класифікації матеріалів на ті, які можуть поставлятися в крихкому, пружно-пластичному і пластичному станах [8]. Така класифікація матеріалів зручна при виборі способу розділення.

У кластер матеріалів, що знаходяться у пластичному стані, були об'єднані: сталь Ст3, сталь 10 (гарячекатана), сталь 20 (гарячекатана), латунь ЛС 59-1. У кластер матеріалів, що знаходяться у пружно-пластичному стані, були об'єднані сталі марок: 10 (калібрована нагартована), 20 (калібрована нагартована), 30 (гарячекатана), 40 (гарячекатана), 45 (гарячекатана), 45 (калібрована нагартована), 3Х13, У8А. У кластер матеріалів, що знаходяться у крихкому стані, були об'єднані сталі марок: 45, 40Х, 65Г, 60С2, 30ХГСА, ШХ15 (гарт 860 °С, мастило, температура відпустки 550 °С), ШХ15 (відпал 800 °С, повітря).

Оцінка інформативності безлічі критеріїв класифікації здійснювалась підрахунком кількості збігів і розбіжностей знаходжень об'єктів в заданих кластерах. Кількість ітерацій при побудові карт Кохонена становить 7000 для кожного обчислювального експерименту, що забезпечувало стійкість класифікації при сумарній корекції, яка не перевищує  $10^{-5}$ .

На підставі виконаних розрахунків зроблені наступні висновки:

1. Серед традиційних критеріїв механічних властивостей не виявлено безлічі, що дозволяє із заданою вірогідністю класифікувати матеріали по їх чутливості до руйнування.

2. При цьому комплексні критерії: критерій розповсюдження тріщин і критерій крихкості, є базовими інформативними ознаками, і при додаванні до них будь-якого з решти комплексних критеріїв (критерій зародження тріщин або «масштаб»), вони утворюють найбільш

інформативні безлічі мінімальної потужності, що забезпечують із заданою вірогідністю класифікацію матеріалів по їх чутливості до руйнування.

3. З урахування отриманих результатів можна дати наступні рекомендації щодо вибору способу поділу сортового прокату (труб).

Найменш енергоємний спосіб поділу – холодна ломка згином може бути рекомендований для поділу переважно крихких матеріалів із сталей марок: ШХ15, 65Г, 60С2, 50ХФА, У8А і ін., а також для поділу пружно-пластичних матеріалів із сталей марок: 45, 40Х, 30ХГСА і ін. при створенні в зоні руйнування певного напруженого стану, наприклад, за рахунок комбіновано статико-динамічного навантаження.

Способом відрізки зсувом доцільно розділяти пружно-пластичні матеріали. У цьому випадку гарантовано отримання заготовок високої геометричної точності. Для поділу пластичних матеріалів із сталей марок: 3, 5, 10, 20, а також міді М1, латуні ЛС59-1 і ін. доцільно використовувати: схему відрізки з диференційованим затиском прокату, відрізки зсувом при підвищених швидкостях деформування, спосіб відрізки у втулкових ножах без попереочного звору або відрізки ексцентричним закручуванням. Якщо до геометричної точності заготовок з пластичних матеріалів пред'являються підвищені вимоги, рекомендується використовувати комплексні заготовельно-розділові процеси.

#### Список використаних джерел

1. Соловцов С. С. Состояние и перспективы развития производства точных заготовок из сортового проката / С. С. Соловцов, Н. Л. Лисунец / Перспективы производства точных заготовок и деталей методами объемного деформирования – МДНТП, 1990. – С. 76-81.
2. Фиксель В.М. Холодная ломка проката / В.М.Фиксель, Ю.И.Головин, Г.Б.Родюков. – М.: Металлургия, 1982. – 192 с.
3. Соловцов С. С. Безотходная резка сортового проката в штампах / С. С. Соловцов. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
4. Карнаух С. Г. Совершенствование безотходных энергосберегающих способов разделения сортового металлопроката и оборудования для получения заготовок высокого качества : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Карнаух С. Г. – Краматорск, 1999. – 221 с.
5. Роганов Л. Л. Теоретические основы разработки и внедрение эффективных кузнечно-прессовых машин на базе гидродвигательного привода : дис. ... доктора техн. наук : 05.03.05 / Роганов Л. Л. – Краматорск, 1988. – 506 с.
6. Высоцкий Е. Н. Исследование и разработка процесса ломки проката : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Высоцкий Е. Н. – Донецк, 1982. – 212 с. (ДСП).
7. Скуднов В. А. Влияние температуры термической обработки на спертетические критерии разрушения стали // Технологія машиностроєння, 2003, №2. - С. 6-7.
8. Карнаух С.Г., Винников М.А., Карнаух Д.С. Применение критериев разрушения материалов для выбора способа разделения сортового проката // Металлообработка. №1(61). – Санкт-Петербург. – 2011. – С. 25-31.
9. Классификация и кластер // Под. ред. Дж. Вэн Райзин. – М.: Мир, 1980. – 390 с.
10. Глова В.И., Аникин И.В., Алжели М.А. Мягкие вычисления и их приложения. – М.: Наука, 2000. – 312 с.
11. Терехов С.А. Нейросетевые информационные модели сложных инженерных систем // Нейроинформатика. – Новосибирск: Наука, 1998. - С. 101-136.
12. Дебок Г., Кохонен Т. Анализ финансовых данных с помощью самоорганизующихся карт. - М.:Альпина Паблишер, 2001. – 368 с.

## УДК 621.983

Савченко Д.М., інж., Петришин А.І., к.т.н., Холявік О.В., к.т.н., доц.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РІЗКИ ТОНКОСТІННИХ ТРУБ НА ДЕТАЛІ ТА НАШВАБРИКАТИ

Вступ На сьогоднішній день відома велика кількість способів відрізки деталей і напівфабрикатів від тонкостінної трубчастої заготовки. Найбільш часто використовуються: механічні на відрізних верстатах різними сталевими або керамічними інструментами, гідробразивним струменем, термічним відділенням, в т.ч. випромінюванням лазера [1, 2]. Але всі вони мають недоліки, а саме: втрати металу на прорізаний шар, енергосмітність, наявність зони термічного впливу, недостатня продуктивність, що особливо проявляється у великосерійному і масовому виробництві. Найбільш перспективним виглядає різання в штапах чистим зсувом на пресах. При чистому зсуві обсяг осередку деформації мінімальний. Це призводить до мінімізації енергосмітності процесу, відсутності втрат на прорізаний шар, а також дозволяє забезпечити високу продуктивність процесу простими засобами механізації.

При різанні в штапах чистий зсув спостерігається тільки в початковій стадії процесу з утворенням на поверхні зрізу ділянки з незначною шорсткістю ( $<0.32\mu$ ). Після чого зрушення супроводжується вигином, викривленням поверхні зрізу, що призводить в кінцевому підсумку до руйнування сколом. В результаті поверхня поділу має характерну сигмаподібну форму на перпендикулярну осі заготовки. Для виключення або мінімізації впливу моменту згину при відділенні профільних заготовок в штапах застосовують різання з диференціальним притиском, з осьовим стисканням. Застосування зазначених методів супроводжується спотворенням профілю поперечного перерізу, а також нанесенням пошкоджень на поверхні. Для розрізання тонкостінних трубчастих заготовок застосовують спеціально профільовані пуанسونи. Недоліком даного методу є низька стійкість пуансона. Альтернативним методом, позбавленим зазначених недоліків, може служити розрізання тонкостінних трубчастих заготовок, укладених в двох парах оправок. Зазор між зовнішніми і внутрішніми оправками дорівнює товщині стінки тонкостінної трубчастої заготовки з урахуванням допуску на товщину і співвідношення внутрішнього і зовнішнього контуру поперечного перерізу.

Оправки шліфованими торцями притискаються в процесі відрізання в площині зрізу, чим виключається вигин відрізуваної частини заготовки. Для визначення швидкості в певній точці інструменту необхідно у дану залежність підставити значення кута  $\varphi_i$ , який відповідає положенню точки інструменту у системі координат  $S_i$ . Визначення нормального та тангенціального складових швидкості точки проводиться по залежностях:

$$V_{F_n} = V_F \cdot \sin \varphi$$

$$V_{F_T} = V_F \cdot \cos \varphi$$

На основі цього було побудовано розподіл нормальних складових швидкостей точок інструменту для двох положень інструменту. На Рис. 7, тонкими лініями виділено нерухому частину заготовки, жирними лініями – поточне положення інструменту.

**Висновок** У роботі для процесу відокремлення заготовки від трубчастою напівфабриката за допомогою експериментальної установки з однією втулкою запропоновано використання трьох систем координат, визначено закон руху будь-якої точки інструменту, визначено функції переміщення характерних точок перетину контуру заготовки та внутрішньої і зовнішньої кромки інструменту.

**Список використаних джерел:**

1. Соловьев С.С. Безотходная разрезка сортового проката в штапах / С.С. Соловьев - М.: Машиностроение, 1985. - 176 с.
2. Веселовский С.И. Разрезка материалов. - М.: Машиностроение, 1985. - 360 с.

## УДК 629

Тітов В.А., д-т.н., проф. Рехта О.С., маг., Гараненко Т.Р., ас.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ОСОБЛИВОСТІ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ПРИ ФОРМУВАННІ МЕМБРАН З АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ В ІЗОТЕРМІЧНИХ УМОВАХ

В даній роботі розглянута можливість виготовлення тонкостінних елементів деталей моноколіс із алюмінієвого сплаву В93лч. До цього часу деталі типу моноколіс виготовляються або литтям і подальшою обробкою, або різанням на ґіткоординатних станках. Обидва способи потребують значних зусиль, часу і затрат на виготовлення. Якщо розглянути метод виготовлення на ґіткокоординатних станках, то він потребує як дорогого обладнання, так і дорогого інструменту і багато часу на виготовлення однієї деталі. Якщо розглядати метод виготовлення литтям під тиском, то даний метод потребує значних затрат на виготовлення моделі майбутньої деталі, а також дорогого обладнання.

Виготовлення тонкостінних елементів деталей моноколіс в ізотермічних умовах дає змогу зменшити затрати на обладнання, зменшити час на виготовлення однієї деталі, можливість штамувати ливарні сплави, отримувати якісну мікроструктуру деталі, оскільки під час даного процесу зерна проходять етап подрібнення і витягуються в напрямку пресування. Внаслідок цього, міцність матеріалу, що деформується, значно зростає.

В свою чергу, штамування в ізотермічних умовах супроводжується багатьма підготовчими операціями. В першу чергу, необхідно отримати заготовки з дрібнокристалічною структурою. Звичайно, температурний інтервал дуже малий і для алюмінієвого сплаву В93 складає всього 30°C (460-490°C). Тому, для штамування в ізотермічних умовах необхідно використовувати або індукційний нагрів, в якого буде мінімальний час транспортування заготовки до робочої преси (до 2с), або, при використанні іншого виду нагріву, – автоматизувати час транспортування з місця нагріву до робочої зони преси. Блок штаму повинен нагріватись до температур близьких до температури заготовки, що також супроводжується додатковим обладнанням. Аналіз літератури [1, 2] показав, що зв'язок між подрібненням елементів структури і підвищенням механічних властивостей міцності на 25 - 40% при збереженні показників пластичності. На практиці відпрацювання конструкції установок та штампової оснастки, а також параметрів процесу ізотермічного формоутворення моноколіс ГТД на даний момент є перспективним напрямком досліджень.

В результаті чисельного моделювання в САD/САE DEFORM-3D встановлено зв'язок основних технологічних параметрів процесу (тиск та час) з параметрами форми мембрани та НДС матеріалу заготовки. Показано, що при збільшенні тиску деформуючого середовища значно зменшується час деформування заготовки мембрани, при цьому зменшується величина ефективних напружень по всьому перерізу мембрани.

Встановлено також вплив коефіцієнту швидкісного зміцнення на розподіл напружень і деформацій по поперечному перерізу заготовки. Показано, що при збільшенні коефіцієнту швидкісного зміцнення зменшується величина деформацій потоншення в центрі тиску мембрани, а також зростає рівномірність розподілу деформацій по перерізу мембрани.

#### Список літератури:

1. M.Balasarathanian, K.Ramanathan, V.S.Senthilkumar, —Mathematical Modeling and Finite Element Analysis of Superplastic Forming of Ti-6Al-4V Alloy in a Stepped Rectangular Die International Conference On DESIGN AND MANUFACTURING, ICnDM 2013, Procedia Engineering 64 (2013 ) 1209 – 1218
2. M.Balasarathanian, K.Ramanathan, V.S.SenthilkumarFinite Element Modeling and Numerical Simulation of Superplasticforming of 8090 Al-Li alloy in a rectangular die, Advanced Materials Research Online: 2012-03-15ISSN: 1662-8985, Vol. 487, pp 116-121



УДК 629

Тітов В.А., д.т.н., проф., Стародуб О.О., маг.  
КІП ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ОСОБЛИВОСТІ ІЗОТЕРМІЧНОГО ШТАМПУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ В93

Найдійність та ресурс сучасної авіаційної техніки значною мірою залежить від ефективності авіаційних газотурбінних двигунів. Удосконалення авіаційних двигунів, в свою чергу, висуває нові вимоги до технологій їх виготовлення. Зростання робочих температур та тиску вимагає більш широкого використання високоміцних та жаростійких сплавів. Тенденція скорочення кількості деталей приводить до ускладнення геометричних форм, а зниження маси двигуна призводить до використання деталей малої питомої жорсткості.

В даній роботі розглянута можливість виготовлення тонкостінних елементів деталей моноколес із алюмінієвого сплаву В93пч. До цього часу деталі типу моноколес виготовляються або литтям і подальшою обробкою, або різанням на ґ'ятикоординатних станках. Обидва способи потребують значних зусиль, часу і затрат на виготовлення. Якщо розглянути метод виготовлення на ґ'ятикоординатних станках, то він потребує як дорогого обладнання, так і дорогого інструменту і багато часу на виготовлення однієї деталі. Якщо розглядати метод виготовлення литтям під тиском, то даний метод потребує значних затрат на виготовлення моделі майбутньої деталі і також дорогого обладнання. Виготовлення тонкостінних елементів деталей моноколес в ізотермічних умовах дає змогу зменшити затрати на обладнання, зменшити час на виготовлення однієї деталі, можливість штампувати ливарні сплави, отримувати якісну мікроструктуру деталі, оскільки під час даного процесу зерна проходять етап подрібнення і витягуються в напрямку пресування. Внаслідок цього, міцність матеріалу, що деформується, значно зростає. Для штампування в ізотермічних умовах необхідно використовувати або індукційний нагрів, в якого буде мінімальний час транспортування заготовки до робочої преси (до 2с), або, при використанні іншого виду нагріву, – автоматизувати час транспортування з місця нагріву до робочої зони преси. Блок штампу повинен нагріватись до температур близьких до температури заготовки, що також супроводжується додатковим об'ємним нагрівом. Літогляд показав, що зв'язок між подрібненням елементів структури і підвищенням механічних властивостей міцності на 25-40% при збереженні показників пластичності. На практиці відпрацювання конструкції установки та штампової оснастки, а також параметрів процесу ізотермічного формоутворення моноколес ГТД на даний момент є перспективним напрямком досліджень [1, 2]. В роботі сформульована загальна структура технологічного процесу отримання тонкостінних елементів в ізотермічних умовах. Проведено експериментальне дослідження процесу пресування тонкостінних елементів із алюмінієвого сплаву В93пч. Проведено моделювання процесу в програмному комплексі САD/CAE DEFORM 3D. Проведено порівняння результатів моделювання з експериментальними. Виконане експериментальне відпрацювання процесу та досліджені властивості матеріалу після пресування.

Авторами розроблені рекомендації по реалізації процесів формоутворення тонкостінних елементів деталей з алюмінієвого сплаву В93пч.

#### Список літератури:

1. Jens Karppe and Mathias Liewald/Evaluation of Pneumatic Bulge Test Experiments and Corresponding Numerical Forming Simulations/Journal of Materials Science and Engineering B 1 (2011) 472-478
2. В.П.Пойда, В.В.Брюховцевий, Р.И.Кузнецова, А.В.Пойда, В.Ф.Клишков. Влияние высокой томологической температуры на процессы порообразования в ходе сверхпластического течения алюминий-литиевого сплава 1420. Вопросы атомной науки и техники. 2002. №6. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (82), с.65-68.

УДК 621.983

Холявік О.В., к.т.н., доц., Меленчук Ю.П., маг., Стеблюк В.І., д.т.н., проф.,  
Вишневський П.С., ст. викл.  
КІП ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ ПОРОЖНИСТИХ КОРОБЧАСТИХ ВИРОБІВ П'ЯТИКУТНОЇ В ПЛАНІ ФОРМИ

В складі продукції приладо-, машино- та авіабудування, серед деталей широкого застосування значне місце займають тонкостінні корпусні порожнисті деталі коробчастої форми. Найбільш досконалим методом їх виготовлення, є витягування із листового металу. Як показує виробнича практика, раціональна форма вихідної заготовки дозволяє скоротити кількість операцій, забезпечити високу якість виробів і зменшити відходи металу. В більшості випадків такі форми вдається відшукати шляхом проб і помилок, що є дуже затратним, адже потребує виготовлення та підгонки дорогого оснащення. Тому одним із напрямків вдосконалення процесу витягування коробчастих деталей із листового металу є створення наукових основ визначення форми заготовки. Внаслідок чого актуальною залишається потреба в окресленні напрямків вдосконалення процесів витягування, винайдення тих рішень, які у майбутньому дозволять б вдосконалити технологію виготовлення тонкостінних порожнистих коробчастих деталей різної у плані форми у відповідності з вимогами сьогодення.

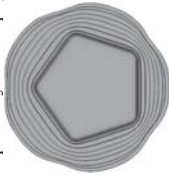


Рис. 1. Суміщення контурів п'ятикутної коробки в процесі зворотної витяжки



Рис. 2. Результати прямого моделювання процесу витягування із заготовки, розрахованої традиційним методом

Порівняння корисних висот коробок отриманих за допомогою моделювання процесу витягування із заготовки, розрахованих традиційним методом, та із заготовок, визначених у ході дослідження показано на Рис.3.

У ході дослідження було проведено комп'ютерне моделювання витяжки з традиційних заготовок, встановлено недоліки готових виробів. Для уникнення цього було прийняте рішення розробки технології отримання форми заготовок.



Рис. 3. Порівняння корисних висот п'ятикутних коробок

Спроєктовано установку для зворотного витягування, та виконано моделювання процесу в програмному комплексі DEFORM 3D. Отримані заготовки використали для прямої витяжки. Результатом порівняння корисних висот коробок п'ятикутної форми показав, що за допомогою розробленої технології ми отримусмо значно вищі коробки. Отже, з однакової площі заготовок отримусмо значно більше коробчастих виробів, які майже не потребують обрізки, тобто відхід металу зводиться майже до нуля.