

УДК 621.7.01

Подовження ресурсу пластичності алюмінієвого сплаву АМг6 термомеханічною обробкою

В.А. Тітов, В.О. Корева

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Анотація: В даній роботі досліджено подовження ресурсу пластичності термомеханічною обробкою шляхом використання проміжних відпалів в процесі деформування. Проводились випробування на зразках за схемою на розтяг. В результаті, встановлено, що падіння ефективності проміжного відпалу пояснюється накопиченням пошкоджень металу при попередній деформації. Було визначено подовження ресурсу пластичності алюмінієвого сплаву АМг6 термомеханічною обробкою при випробуваннях на розтяг. Встановлено, що за допомогою проміжних відпалів забезпечується зростання ресурсу пластичності матеріалу в 1,5...1,6 рази. Також показана перспективність деформаційної обробки зразків.

Ключові слова: ресурс пластичності, алюмінієвий сплав, термомеханічна обробка, проміжний відпал.

В останні роки інтенсивно розвиваються процеси, які подовжують ресурс пластичності за рахунок термомеханічної обробки, яка складає паралельну або послідовну дію факторів навантаження та температурного впливу [1-6]. До таких методів відносять використання проміжних відпалів, а також високотемпературне ізотермічне формоутворення зі складних конструкційних матеріалів. Важливими реологічними характеристиками можна вважати граничне подовження та їх особливості опору деформуванню. У зв'язку із появою нових важкодеформівних матеріалів та сплавів, починаючи із 70-х років минулого століття, задачею теорії пластичності стає визначення можливості здійснення технологічних операцій пластичного формування заготовок із різних матеріалів без руйнування. При цьому, оцінка ресурсу пластичності становиться важкою та іноді невирішальною задачею.

Метою роботи є дослідження подовження ресурсу пластичності термомеханічною обробкою шляхом використання проміжних відпалів в процесі деформування.

Методика роботи визначає порядок проведення експериментів на одиниcний розтяг з проміжними відпалами. Сумарне подовження зразків в процесі проведення експериментів визначається у відповідності до наведеного алгоритму.

Порядок проведення експерименту наступний:

1. Розподіл зразків на п'ять груп (1, 2, 3, 4, 5), їх маркування.
2. Вимірювання точних розмірів зразків електронним штангенциркулем.
3. Проведення відпалу всіх груп зразків.
4. Випробування на розтяг до руйнування 1-ої групи зразків (1.1, 1.2, 1.3) та визначення їх δ_{max1} .
5. Випробування на розтяг зразків групи 2 (2.1, 2.2, 2.3), групи 3 (3.1, 3.2, 3.3) та групи 4 (4.1, 4.2, 4.3) до величини $\delta_1 = 0,5\delta_{max1}$.
6. Проведення відпалу зразків груп 2, 3, 4 та 5.
7. Випробування на розтяг до руйнування 2-ої групи зразків та визначення їх δ_{max2} .
8. Випробування на розтяг зразків груп 3 та 4 до величини $\delta_2 = 0,5\delta_{max2}$.
9. Проведення відпалу зразків груп 3, 4 та 5.
10. Випробування на розтяг до руйнування 3-ої групи зразків та визначення δ_{max3} .
11. Випробування на розтяг зразків 4-ої групи до величини $\delta_3 = 0,5\delta_{max3}$.
12. Проведення відпалу зразків груп 4 та 5.
13. Випробування на розтяг до руйнування 4-ої групи та визначення δ_{max4} .

14. Випробування на розтяг до руйнування зразків 5-ої групи (5.1, 5.2, 5.3) та визначення.

Тут:

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – використаний ресурс пластичності заготовки на відповідному переході;

δ_{max0} – максимальний ресурс пластичності вихідного матеріалу заготовки після проведення термічної обробки – відпалу;

$\delta_{max1}, \delta_{max2}, \delta_{max3}, \delta_{max4}$ – максимальне значення ресурсу пластичності (відносного подовження) на відповідному переході;

δ_{max5} – контрольне значення для визначення впливу термічної обробки на властивості матеріалу.

За наступною залежністю було визначено сумарний ресурс пластичності:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_{max4}$$

1)

Цей ресурс пластичності відображає вплив проміжних операцій термообробки (відпалу) на пластичність сплаву.

Температурні режими термічної обробки (відпалу) для проведення експерименту:

- температура нагріву заготовок – 325 °C;
- час витримки в нагрітому стані – 30 хвилин;
- вид остаточного охолодження – на повітрі.

Методика проведення на одновісний розтяг виконувалася згідно ГОСТ 11701-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент» та ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение».

Внаслідок обмеження кількості матеріалу було вибрано короткі зразки для проведення експериментальних досліджень.

Для проведення експериментального дослідження по визначенню подовження ресурсу пластичності термомеханічною обробкою використано 15 зразків із листа товщиною 2 мм із алюмінієвого сплаву АМг6 для випробувань на одновісний розтяг.

На рис. 1 показано розміри експериментальних зразків на одновісний розтяг.

Сумарний ресурс пластичності після проведення експерименту було визначено за значеннями використаних ресурсів пластичності на кожному переході:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_{max4} = 13,1 + 10,6 + 7,9 + 9,7 = 41,3 \%$$

Отже, $\delta_{\Sigma} > \delta_{max1}$ в 1,58 разів.

Графік залежності максимального значення відносного подовження (ресурсу пластичності) від кількості відпалів показано на рис. 2.

В результаті, встановлено, що попередня пластична деформація 50 % від ресурсу пластичності дає підвищення ресурсу пластичності наступні:

а) на II-му переході:

- залишковий ресурс пластичності становить 13,1 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 21,3 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,6 разів.

б) на III-му переході:

- залишковий ресурс пластичності становить 10,7 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 15,9 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,5 разів.

в) на IV-му переході:

- залишковий ресурс пластичності становить 7,9 %;
- відновлений ресурс пластичності становить 9,7 %.

Отже, ресурс пластичності був підвищений в 1,2 разів.

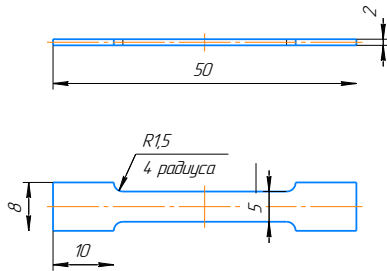


Рис. 1. Креслення зразка



Рис. 2. Графік залежності максимального відносного подовження від кількості відпалів

Введемо для відношення відновленого ресурсу пластичності до залишкового коефіцієнт K – коефіцієнт відновлення ресурсу пластичності.

$$K = \frac{\delta_{max_i}}{\delta_i} \quad (2)$$

тут δ_{max_i} – відновлений ресурс пластичності;

δ_i – залишковий ресурс пластичності.

Залежність коефіцієнта K від кількості відпалів показана на рис. 3.

Група зразків 5 свідчить про те, що на ресурс пластичності не впливає кількість відпалів, так як:

$$\delta_{max1} = 26,2 \approx \delta_{max5} = 26,1$$

Отже, можна дійти до висновку, що ефективність відпалу падає через накопичення пошкоджень металу при попередній деформації.

На рис. 4 показана залежність сумарного ресурсу пластичності від кількості відпалів.

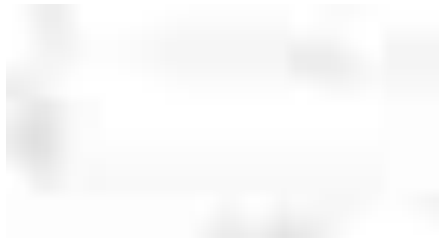


Рис. 3. Залежність коефіцієнта K від кількості відпалів.



Рис. 4. Залежність сумарного ресурсу пластичності від кількості відпалів.

Висновки

В ході виконання експериментальних досліджень було досягнуто наступних результатів:

Визначено подовження ресурсу пластичності алюмінієвого сплаву АМг6 за рахунок термомеханічної обробки при випробуваннях на розтяг. В результаті, встановлено, що після одного відпалу сумарний ресурс пластичності становив 26,2 %, після двох відпалів – 34,4 %, після трьох відпалів – 38,4 %, після чотирьох відпалів – 42,4 %, після п'яти відпалів – 46,4 %.

після трьох відпалів – 39,6 %, після чотирьох відпалів – 41,3 %. Отже, із збільшенням кількості відпалів сумарний ресурс пластичності підвищується.

Продление ресурса пластичности алюминиевого сплава АМг6 термомеханической обработкой.

В.А. Титов, В.О. Корева

Аннотация: В данной работе исследовано продление ресурса пластичности термомеханической обработкой путем использования промежуточных отжигов в процессе деформирования. Проводились испытания на образцах по схеме на растяжение. В результате установлено, что падение эффективности промежуточного отжига объясняется накоплением поврежденной металла при предварительной деформации. Было определено продления ресурса пластичности алюминиевого сплава АМг6 термомеханической обработкой при испытаниях на растяжение. Установлено, что с помощью промежуточных отжигов обеспечивается рост ресурса пластичности материала в 1,5 ... 1,6 раза. Также показана перспективность деформационного обработки образцов.

Ключевые слова: ресурс пластичности, алюминиевый сплав, термомеханическая обработка, растяжение, промежуточный отжиг.

Elongation of the plasticity resource of aluminium alloy AMg6 by thermomechanical treatment

V. Titov, V. Koreva

Abstract: In this work, the extension of the ductility resource by thermomechanical treatment by using intermediate annealing during deformation is investigated. Tensile tests were carried out on samples. As a result, it was found that the drop in the efficiency of intermediate annealing is explained by the accumulation of damage to the metal during preliminary deformation. The extension of the ductility resource of the AMg6 aluminum alloy by thermomechanical treatment during tensile tests was determined. It has been established that with the help of intermediate annealing, the plasticity resource of the material increases by 1.5 ... 1.6 times. The prospects of deformation processing of samples are also shown.

Keywords: plasticity resource, aluminum alloy, thermomechanical treatment, tension, intermediate annealing..

Список літератури

1. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов: учебное пособие для вузов /А. А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.
 2. А. С. Шпагин, В. В. Кучеряев, М. В. Бубнов Компьютерное моделирование процессов термомеханической обработки жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742 // Труды ВИАМ. 2019. №8 (80).
 3. Смирнов С.В., Богатов А.А., Колмогоров В.Л. Исследование пластического разрыхления металла и заживление деформационных дефектов при отжиге // Физика металлов и металловедение. – 1980. Т. 49, вып. 2. – С. 389-393.
 4. О заживлении дефектов в металлах при пластической деформации (аналитический обзор) / В.М. Мацевитый, К.В. Вакуленко, И.Б. Казак // Проблемы машиностроения. — 2012. — Т. 15, № 1. — С. 66-76.
 5. Смирнов С.В., Нестеренко А.В., Швейкин В.П. Определяющие соотношения механики поврежденности для молибдена в условиях теплой деформации // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 11-3. – С. 660-664.
- Жбанов Я. Г. Восстановление пластичности при изотермическом горячем дробном деформировании / Я. Г. Жбанов, Л. И. Алиева, В. М. Михалевич // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2013. - № 7. - С. 12-17.

УДК 621.777.1

Разрушение и фрагментация в слоистом композите при кручении под высоким давлением

Бейгельзимер Я.Е.¹; Кулагин Р.Ю.²; Давиденко А.А.¹

1- Донецкий физико-технический институт им.А.А.Галкина НАН Украины, Киев, Украина

2- Институт нанотехнологий, Технологический институт Карлсруэ, Карлсруэ, Германия

Аннотация. Предложена математическая модель фрагментации и разрушения слоистого композита при его кручении под высоким давлением. Модель позволила получить соотношение для параметра порядка исследуемого процесса - плотности геометрически необходимых дислокаций, и на этой основе сделать прогнозы, согласующиеся с результатами эксперимента.

Ключевые слова: сдвиговая деформация; кручение под высоким давлением; градиентная теория пластичности; геометрически необходимые дислокации

В последнее время все большее внимание исследователей привлекает синтез новых материалов путем кручения под высоким давлением (КВД) металлических слоистых композитов [1]. Непременным его условием является механическое перемешивание составляющих [2], которое вызвано потерей устойчивости слоев при КВД, с последующим их множественным разрушением [3]. В настоящей работе предлагается математическая модель этого процесса, основанная на представлениях градиентной теории пластичности [4].

На рис.1 показана схема КВД трехслойного композита Cu-Mo-Cu под высоким давлением и радиальные сечения образца после четырех оборотов наковален.

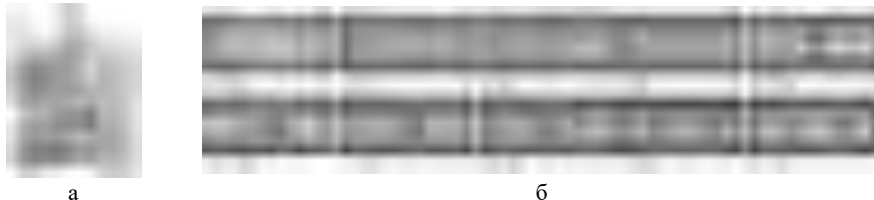


Рис.1. Визуализация слоя молибдена после четырех оборотов наковални: а – схема КВД, б – поперечное сечение образца. Числа представляют собой значения деформации сдвига в этом сечении

При всей своей стохастичности, приведенные на рис.1 б картины достаточно регулярны. Это указывает на некоторый физический механизм, управляющий формообразованием внутри образца на этапе перехода от плоского ламинарного течения к хаотическому перемешиванию составляющих композиции.

Согласно гипотезе работы [5], турбулентизация сдвигового пластического течения обусловлена локальным его торможением, вызывающим моментные напряжения и ротации в потоке вещества. Подходящий математический аппарат для исследования и расчета этого явления дает градиентная теория пластичности [4].

Согласно [4], большие градиенты деформации пластического материала приводят к искривлению его волокон, что отражено соотношением прямой пропорциональности:

$$\chi \sim \frac{dy}{dx}, \quad (1)$$

где $\chi = \sqrt{\frac{2}{3} \chi_{ni} \chi_{ni}}$, $\chi_{ni} = \frac{\partial \theta_n}{\partial x_i}$ – пластическая составляющая тензора кривизны, $\theta_n = \frac{1}{2} \epsilon_{njk} u_{kj}$ – вектор пластического поворота, u_{kj} – антисимметричная часть градиента пластических перемещений, ϵ_{njk} – символ Леви-Чивиты.

В этом пункте, работа [4] обобщает представления [6] об искривлении кристаллической решетки кристалла из-за его неоднородной деформации, вызванной геометрически необходимыми дислокациями (ГНД). Согласно [4], их плотность ρ_G пропорциональна χ :

$$\chi \sim \rho_G b, \quad (2)$$

где b – модуль вектора Бюргерса.

При КВД слоистых композитов, твердые слои тормозят сдвиг, происходящий в мягких слоях. Это приводит к градиенту деформации. Оценим его по величине.

При повороте наковален на угол φ , средняя деформация сдвига γ в любой точке образца, при ламинарном течении, вычисляется по известной формуле:

$$\gamma = \frac{r\varphi}{h}, \quad (3)$$

где r – расстояние точки до оси образца, h – его толщина.

Величину γ можно представить в виде:

$$\gamma = (1 - \vartheta)\gamma_s + \vartheta\gamma_h, \quad (4)$$

где γ_s и γ_h – деформации сдвига мягких и твердых слоев, соответственно; ϑ – объемная доля твердых слоев в образце.

Согласно классической теории пластичности [7],

$$\gamma_s \sim \frac{\tau_s}{\sigma_s}, \quad \gamma_h \sim \frac{\tau_h}{\sigma_h}, \quad (5)$$

где τ_s и τ_h касательные напряжения в мягких и твердых слоях, соответственно; σ_s и σ_h напряжения течения материалов мягкого и твердого слоев, соответственно.

Касательные напряжения на границе слоев непрерывны [7], т.е. $\tau_s = \tau_h$. В таком случае, из (5) следует:

$$\frac{\gamma_s}{\gamma_h} = \frac{\sigma_h}{\sigma_s}. \quad (6)$$

Из соотношений (4) и (6), получаем:

$$\gamma_h = \frac{\gamma}{\vartheta + (1 - \vartheta)k}, \quad (7)$$

$$\gamma_s = \frac{k\gamma}{\vartheta + (1 - \vartheta)k}, \quad (8)$$

где $k = \frac{\sigma_h}{\sigma_s}$.

В качестве меры градиента деформации примем следующее выражение:

$$\frac{d\gamma}{dx} = \frac{\gamma_s - \gamma_h}{\Delta}, \quad (9)$$

где Δ - характерная толщина слоя.

Подставляя в него (3), (7) и (8), получаем:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{(k-1)}{\vartheta+(1-\vartheta)k} \frac{r\varphi}{h\Delta}. \quad (10)$$

Из (1) и (10) имеем следующую оценку для модуля кривизны:

$$\chi = C \frac{(k-1)}{\vartheta+(1-\vartheta)k} \frac{r\varphi}{h\Delta}, \quad (11)$$

где C – безразмерный коэффициент пропорциональности.

Последнее соотношение показывает, что при КВД слоистых композитов, состоящих из металлов с разной твердостью ($k > 1$), их слои все более искривляются в плоскости сдвига (в сечениях, перпендикулярных радиусу образца). Это связано с накоплением ГНД, плотность которых, согласно (2) и (11), определяется соотношением:

$$\rho_G = C \frac{(k-1)}{\vartheta+(1-\vartheta)k} \frac{r\varphi}{h\Delta b}. \quad (12)$$

Модуль вектора Бюргерса в (12) может относиться к любому из материалов слоистого композита, что скажется лишь на величине коэффициента C .

Формула (12) показывает среднее значение плотности ГНД на расстоянии r от оси вращения наковален. Величина ρ_G должна зависеть от тангенциальной координаты, что можно обосновать следующими рассуждениями. На границе раздела, твердый слой сдерживает деформацию мягкого, из чего следует, что первый из них растягивается, а второй – сжимается. Это указывает на то, что выпучивание границы происходит в сторону твердого слоя. Если ρ_G не зависит от тангенциальной координаты, такое невозможно, т.к. означало бы равномерное уменьшение толщины твердого слоя. Скорее всего, при достижении некоторого критического значения ρ_G^* , однородное по углу распределение плотности ГНД теряет устойчивость, и вместо него возникает периодическое. При этом происходит согласованное перераспределение ρ_G на границах твердого слоя, так что его толщина оказывается периодически зависящей от тангенциальной координаты.

Приведенные выше рассуждения указывают на то, что в твердом слое возникают периодические пережимы, делящие его на фрагменты, которые затем, согласно [3], поворачиваются в сдвиговом потоке мягкого материала. Такие представления о судьбе твердого слоя при КВД слоистого композита согласуются с нашим экспериментом, который демонстрирует как периодическую фрагментацию твердого слоя, так и «замороженный» поворот его фрагментов (рис.1 б).

Предложенная модель слоистого композита содержит только один параметр Δ , имеющий размерность длины и характеризующий линейный масштаб изменения деформаций. Здесь этот параметр играет роль шкалы длины материала в градиентной теории пластичности [4]. Из соображений размерности можно допустить, что характерные размеры фрагментов, на которые разделяется твердый слой, должны быть порядка Δ . Рисунок 1 подтверждает это.

Допустив, что перераспределение ГНД, с образованием пережимов твердого слоя, происходит при достижении плотности ρ_G^* , из соотношения (12) получим следующую формулу для расчета угла поворота наковален φ^* , начиная с которого происходят описанные выше события:

$$\varphi^* = \frac{\rho_G^* \vartheta + (1-\vartheta)k}{c} \frac{h\Delta b}{(k-1)r}. \quad (13)$$

Как видим, угол φ^* растёт с уменьшением расстояния точки до оси вращения наковален, т.е. область с искажёнными слоями при КВД расширяется от периферии к центру образца.

Так как

$$\frac{d\varphi^*}{dk} = \frac{-1}{(k-1)^2} < 0, \quad (14)$$

то из (13) следует, что увеличение отношения твердостей составляющих приближает момент разрушения твёрдого слоя. Кроме того, это соотношение показывает, что к тому же результату приводит уменьшение толщины слоев.

Руйнування і фрагментація в шаруватому композиті при крученні під високим тиском

Бейгельзімер Я.Ю.; Кулагін Р.Ю.; Давиденко О.А.

Анотація. Запропоновано математичну модель фрагментації і руйнування шаруватого композиту при його крученні під високим тиском. Модель дозволила отримати співвідношення для параметра порядку досліджуваного процесу - щільності геометрично необхідних дислокацій, і на цій основі зробити прогнози, які добре узгоджуються з результатами експерименту.

Ключові слова: зсувна деформація; кручення під високим тиском; комп'ютерна томографія; градієнтна теорія пластичності; геометрично необхідні дислокації

Fracture and fragmentation in a layered composite under high pressure torsion

Beygelzimer Y.; Kulagin R.; Davydenko O.

Abstract. A mathematical model of fragmentation and fracture of a layered composite during high pressure torsion is proposed. The model made it possible to obtain a relation for the order parameter of the process under study - the density of geometrically necessary dislocations, and, on this basis, make predictions consistent with the experimental results.

Keywords: shear deformation; high-pressure torsion; gradient theory of plasticity; geometrically necessary dislocations

Список литературы:

1. J.K.Han, T.Herdon, J.I.Jang, T.G.Langdon, M.Kawasaki, Synthesis of Hybrid Nanocrystalline Alloys by Mechanical Bonding through High-Pressure Torsion. Adv. Eng. Mater. 22 (2020) 1901289. <https://doi.org/10.1002/adem.201901289>.
2. Y.Beygelzimer, Y.Estrin, A.Mazilkin, T.Scherer, B.Baretzky, H.Hahn, R.Kulagin, Mechanical Mixing of Metals by High Pressure Torsion, J. Alloys Compd. 878 (2021) 160419.
3. R.Kulagin, Y.Beygelzimer, Yu.Ivanisenko, A.Mazilkin, B.Straumal, H.Hahn, Instabilities of interfaces between dissimilar metals induced by high pressure torsion, Materials Letters 222 (2018) 172–175
4. N.A.Fleck, G.M.Muller, M.F.Ashby and J. W. Hutchinson, Strain gradient plasticity: theory and experiment. Acta metal. mater. Vol. 42, No. 2, pp. 475–487, 1994
5. Y.Beygelzimer, Vortices and Mixing in Metals during Severe Plastic Deformation. Materials Science Forum Vol. 683 (2011) pp 213–224
6. M.F.Ashby, The deformation of plastically non-homogeneous materials, Philosophical Magazine, 21:170, (1970) 399–424
7. L.M.Kachanov, Fundamentals of the Theory of Plasticity, Dover Publication, INC, Mineola, New York, 2004.

УДК 621.77

Моделирование деталей коробчатой формы в программном комплексе DEFORM

А.Д. Лавриненков, М.В. Иващенко, Н.К. Злочевская

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина.

Аннотация: В работе рассмотрено процесс вытяжки коробчатой детали из листовой заготовки, по имеющейся методике была рассчитана геометрия листовой заготовки. Было проведено моделирование процесса вытяжки методом конечных элементов для определения ресурса использования пластичности материала, а также оптимизации геометрии начальной заготовки.

Ключевые слова: листовая штамповка, метод конечных элементов, ресурс пластичности, напряженно-деформированное состояние

Как известно одним из видов деталей, получаемых операциями вытяжки есть детали коробчатой формы. Вытяжка таких деталей является достаточно сложным процессом, так как деформация по периметру детали является переменной (радиальные растягивающие напряжения распределены по контуру детали неравномерно).

В работе [1] авторы представили теоретические результаты по вытягиванию высоких коробчатых деталей квадратной формы. Компьютерное моделирование в программной среде DEFORM-3D вытяжки деталей коробчатой формы и их анализ приведены авторами в работе [2]. Сравнивалась вытяжка из заготовки, рассчитанной инженерным методом и с заготовки, полученной методом потенциалов. В работе [3] автор исследовал влияние угловых радиусов на процесс вытяжки изделий квадратной формы из круглых заготовок. Было исследовано влияние на силовые режимы и напряженно-деформированное состояние, показано распределение значений критерия разрушения Кокрофта-Латом при вытяжке коробчатых деталей с различными угловыми радиусами.

Целью данной работы является проведение моделирования процесса вытяжки детали коробчатой (рис. 1) формы с помощью метода конечных элементов.



Рис 1. Чертеж детали

Для того, чтобы проверить возможность извлечения полуфабриката коробчатой формы за один переход, было осуществлено численное моделирование в программной среде «DEFORM-3D».

Следующие условия, которые были заданы при моделировании:

- скорость деформирующего инструмента $V_0 = 10$ мм/с;
- коэффициент трения $\mu = 0,08$;
- материал – AL-2024 (аналог Д16);
- модель материала – пластическая;
- температура процесса - 20°С.

Полуфабрикат в конце моделирования показан на рис. 2.

Наибольшее усилие деформирования возникает при перемещении пуансона на 17 мм и составляет 69 кН, наибольшее усилие на прижимы возникает в конце хода и составляет около 8 кН.

Распределение интенсивности напряжений и компонент напряжений по всему объему полуфабриката при максимальном усилии деформирования показано на рис. 3 и 4.



Рис 2. Полуфабрикат в конце моделирования

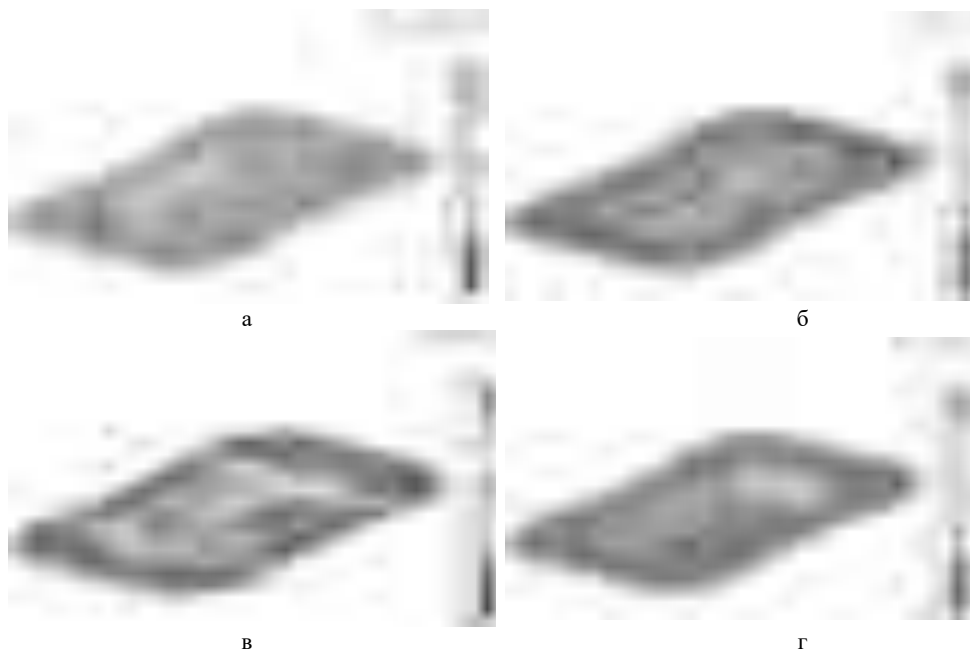


Рис 3. Распределение интенсивности напряжений (а) и компонент напряжений (а-г) по всему объему полуфабриката при максимальном усилии деформирования

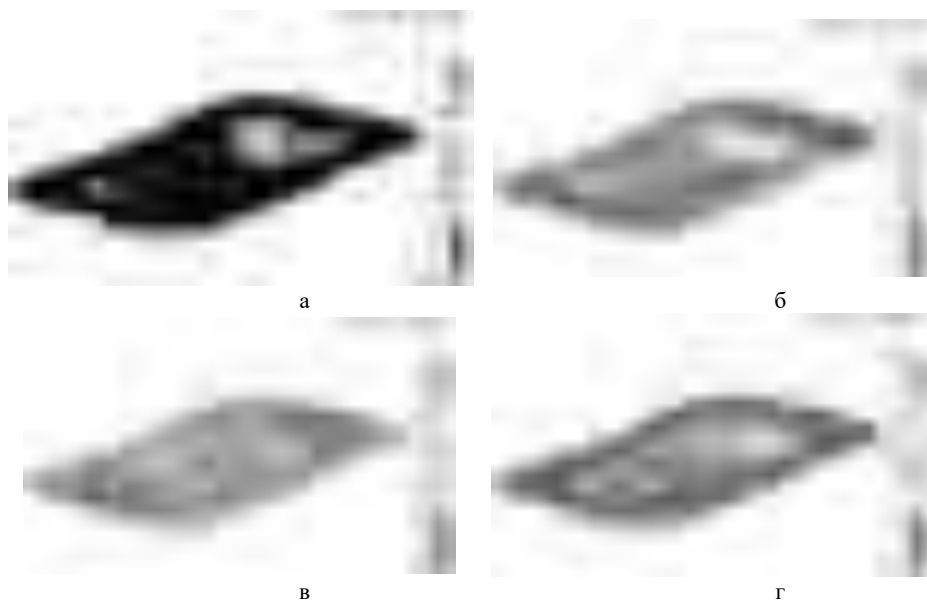


Рис 4. Распределение интенсивности деформаций (а) и компонент деформаций (в-г)

Также были определены критерий разрушения при максимальном усилии (рис. 5).



Рис 5. Распределение критерия разрушения

В результате моделирования была оптимизирована геометрия листовой заготовки. Показано, что при заданных параметрах полуфабриката разрушения не происходит.

Моделювання деталей коробчастої форми в програмному комплексі DEFORM

А.Д. Лавріненко, М.В. Івашенко, Н.К. Злочевська

Анотація: В роботі розглянуто процес витягування коробчастої деталі з листової заготовки, за наявною методикою була розрахована геометрія листової заготовки. Було проведено моделювання процесу витягування методом скінчених елементів для визначення ресурсу використання пластичності матеріалу, а також проведено оптимізація геометрії початкової заготовки.

Ключові слова: листове штампування, метод скінчених елементів, ресурс пластичності, напружено-деформований стан

Modeling box-shaped parts in the DEFORM software package

A. Lavrinenkov, M. Ivaschenko, N. Zlochevskaya

Abstract: The paper considers the process of drawing a box-shaped part from a sheet blank, according to the existing technique, the geometry of a sheet blank was calculated. The modeling of the drawing process by the finite element method was carried out to determine the resource of using the plasticity of the material, as well as to optimize the geometry of the initial workpiece.

Key words: sheet stamping, finite element method, plastic resource, stress-strain state

Список литературы

1. Кухарь В.Д. К вопросу определения рационального контура плоской заготовки при вытяжке низких прямоугольных коробок с большими угловыми радиусами / В. Д. Кухарь, А. Н. Малышев, Ю. В. Бессмертная // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 4. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. — С. 179-188.
2. Аналіз комп'ютерного моделювання зворотнього витягування прямокутних коробчастих деталей / О. В. Холявік, П. С. Вишневський, Ю. П. Меленчук, Т. О. Базиленко, К. К. Редька // Збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 25-26 листопада 2015 року — Т. : ТНТУ, 2015 — Том 1. — С. 81-82.
3. Морозов Ю.А. Влияние формы заготовок на качество штампованных изделий / Ю. А. Морозов, Е. Ю. Верхов, Е. В. Крутина // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. Москва: РУДН, 2017, № 3. — С. 76-80.

УДК 621.77

Разработка технологии штамповки детали «шатун»**А.Д. Лавриненков, Т. В. Иваница**

КПИ им. Игора Сикорского, г. Киев, Украина.

Аннотация: В работе рассмотрена задача моделирования процесса горячей объемной штамповки детали типа «шатун». Для увеличения коэффициента использования металла были рассчитаны параметры процесса предварительного вальцевания заготовки для последующей штамповки в чистовом ручае. Определено напряженно-деформированное состояние материала детали на каждом из этапов, определена температура штамповки, а также момент вальцевания и усилие штамповки.

Ключевые слова: горячая штамповка, метод конечных элементов, вальцевание, пластическая деформация

Главной задачейковки и объемной штамповки, как и других видов обработки металлов давлением (ОМД) является придания заготовке нужной формы путем пластической деформации. В процессе пластической деформации структура металла меняется; поэтому при правильной разработке технологического процесса обработки давлением и обеспечении необходимого термомеханического режима, можно в обрабатываемом металле создать такую структуру и механические свойства, которые в наибольшей степени удовлетворяли требованиям, предъявляемые к деталям, изготовленных из него. Чем выше требования к прочности машин (особенно, когда прочность должна сочетаться с легкостью, например у автомобилей, самолетов и т.п.), тем больше в таких машинах деталей, полученных обработкой давлением [1].

Целью работы является разработка технологии изготовления детали «Шатун» с использованием методов горячей объемной штамповки с использованием вальцовки и без нее и проведения компьютерного моделирования в программной среде DEFORM процессов вальцевания заготовки, горячей объемной штамповки из вальцованной заготовки и из кругляка.

Автором в работе [2] рассмотрено внедрение технологического процесса вальцовки заготовок из алюминиевых сплавов под последующую штамповку с использованием подготовительных ручьев. Отмечено, что известные технологические процессы изготовления штампованных деталей с вытянутой осью с непрофилированных и неподготовленных заготовок характеризуется низкой производительностью, высокой трудоемкостью и повышенными затратами металла. Автором отмечено, что процесс вальцовки заготовок с применением подготовительных ручьев необходим как подготовительная операция объемной штамповки, которая служит для перераспределения металла исходной заготовки с целью получения заготовки, максимально сходной по форме и размерам поперечных сечений до конечного штампованной детали.

Авторами в работе [3] исследована плотность материалов после вальцовки при различных условиях деформирования, на основе чего разработана технология горячего вальцевания и прокатки заготовки детали типа «лопатка направляющая компрессора высокого давления», которая предусматривает обеспечение высокого качества детали, а также повышение коэффициента использования металла. В работе [4] авторами выполнена оптимизация процесса калибровки при вальцовке. Предложена методика выбора оптимальных деформационных и силовых параметров калибровки при вальцовке.

Модель детали «Шатун», выполненную в системе автоматизированного проектирования (САПР) «КОМПАС» и ее чертежи показано на рис. 1 и рис. 2.



Рис. 1. Модель детали «Шатун».



Рис. 2. Чертеж детали «Шатун»

Параметры заготовки после вальцовки (рис. 3) и результаты моделирования штамповки цилиндрической заготовки (рис. 4)



Рис. 3. Вальцованная заготовка.



Рис. 4 Форма штамповки, полученной из невальцованной заготовки

В качестве исходной заготовки для штамповки детали «Шатун» используем цилиндрическую заготовку из стали 40 ХН. Аналогом этой стали в программе DEFORM является AISI-5140 (800°С - 1000°С).

При моделировании горячей объемной штамповки Быкова в программе DEFORM задавали следующие граничные условия процесса:

- пластическая модель материала заготовки;
- температура заготовки – 1000°С, температура инструмента – 300°С;
- скорость деформирующего инструмента - $V_0 = 4$ мм/с;
- коэффициент трения по Зибеля $\mu = 0,3$.

Максимальное усилие штамповки с цилиндрической заготовки возникает в конце хода и составляет 1700 кН (или 170 тс) при перемещении инструмента на 28 мм.

При моделировании первого перехода вальцовки (рис. 5) в программе DEFORM задавали следующие граничные условия процесса:

- пластическая модель материала заготовки;
- температура заготовки – 1000°С, температура инструмента – 300°С;
- угловая скорость валков - $\omega_0 = 7$ рад/с;
- коэффициент трения по Зибеля $\mu = 0,3$.
- цилиндрическая заготовка Ø36 мм и длиной 91 мм

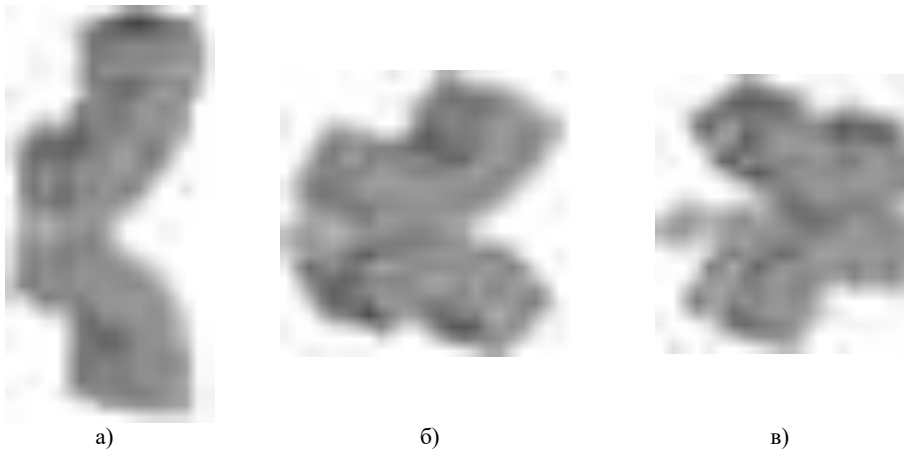


Рис. 5. Расчетная схема первого перехода вальцовки:
а – в начале вальцовки, б – в процессе вальцовки, в – в конце вальцовки

Максимальный крутящий момент, который возникает при первом переходе вальцовки составляет 3700 Н·м.

В качестве исходной заготовки для второго перехода вальцовки (рис. 6) используем деформированную заготовку после первого перехода вальцовки.

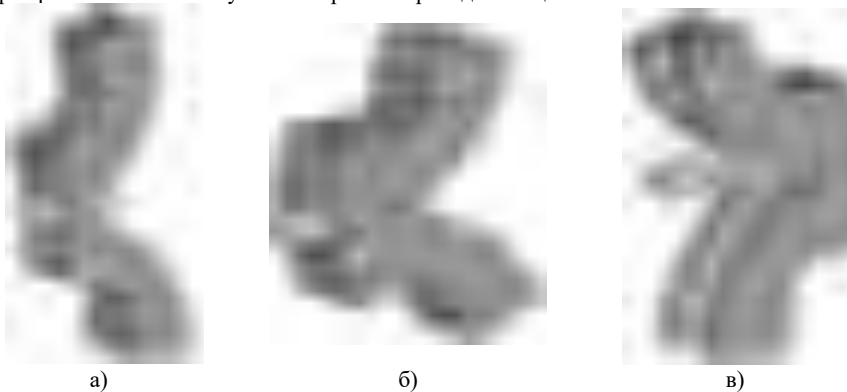


Рис. 6. Расчетная схема второго перехода вальцовки:
а - в начале вальцовки, б - в процессе вальцовки, в - в конце вальцовки

Максимальный крутящий момент, который возникает при первом переходе вальцовки составляет 2300 Н·м.

Максимальное усилие штамповки заготовки после вальцовки возникает в конце хода и составляет 3900 кН (или 390 тс) при перемещении инструмента на 32 мм.

Последовательность формообразования показано на рис. 7. Как видно из рисунка форма штамповки получилась нужной формы.



Рис. 7. Последовательность формообразования Быкова детали «Шатун» с Вальцованная заготовки.

По результатам моделирования установлены усилия процессов штамповки и моменты, возникающие при вальцовке, а также напряженно-деформированное состояние.

Розробка технології штампування деталі «шатун»

А.Д. Лавріненко, Т. В. Іваниця

Анотація: В роботі розглянуто задачу моделювання процесу гарячого об'ємного штампування деталі типу «шатун». Для збільшення коефіцієнта використання металу були розраховані параметри попереднього вальцювання заготовки для штампування в чистовому ручається. Визначено напружено-деформований стан матеріалу на кожному із етапів, визначена температура штампування, а також момент вальцювання і зусилля штампування.

Ключові слова: гаряче штампування, метод скінченних елементів, вальцювання, пластична деформація

Development of stamping technology for the "connecting rod"

A. Lavrinenkov, T. Ivanitsa

Abstract: The paper considers the problem of modeling the process of hot forging of a "connecting rod" type part. To increase the utilization rate of the metal, the parameters of the preliminary rolling of the billet were calculated for subsequent stamping in the finishing die tooling. The stress-strain state of the material of the part was determined at each of the stages, the temperature of stamping, as well as the moment of rolling and the force of stamping, were determined.

Key words: hot stamping, finite element method, rolling, plastic deformation

Список литературы

1. Ковка и штамповка: справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объемная штамповка. 2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е.И. Семенова. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 720.
2. Гунько И. В. Внедрение технологического процесса вальцовки заготовок из алюминиевых сплавов под последующую штамповку с применением подготовительных ручьев / И. В. Гунько // Обработка материалов давлением : сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 86–90. – ISSN 2076–2751.
3. Кохан Л. С. Исследование плотности материалов после вальцовки / Л.С. Кохан, В.И. Пунин, Г.Б. Ремпель // Известия вузов. Машиностроение. 2014. №2 (647). – С. 40-45.
4. Кохан Л. С. Оптимизация процесса калибровки при вальцовке / Л.С. Кохан, Г.Б. Ремпель // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2013. №4. – С. 43-47.

УДК 621.77.043

Підвищення механічних властивостей ливарного алюмінієвого сплаву

Злочевська Н.К., Тітов В.А., Лавріненков А.Д., Бондарь А.М.

«КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Анотація: Розглянуто питання підвищення механічних властивостей вторинного алюмінієвого сплаву АК7. Для підвищення властивостей використали схему гвинтового ушіряючого пресування (ГУП). Результати експериментальних досліджень показали, що підвищуються характеристики міцності. Показники підвищуються на 15% після першої обробки, на 20% після другої обробки, на 25% після третьої обробки, по відношенню до вихідного металу. При дослідіах на одновісне розтягування відносне видовження зразків, не змінюється. Величина мікротвердості збільшується при збільшенні ступеню накопиченої деформації. Показано, що в центральній зоні після третього переходу величина накопиченої деформації наближено до величини деформації після першого проходу в крайовій зоні.

Ключові слова: гвинтове ушіряюче пресування, деформації зсуву, пластична деформація, вторинний алюмінієвий сплав, механічні властивості.

В сучасному машинобудуванні використання деталей з ливарних алюмінієвих сплавів являється дуже перспективним. Переваги використанні ливарних сплавів полягає в наступному: можливість отримання відливок складної конфігурації, які максимально наближені до розмірів готових деталей, а також економічність формоутворення. Недостатня стабільність експлуатаційних та фізико-механічних властивостей отриманих традиційними методами литтям звужують галузь застосування в відповідальних конструкціях.

На сьогоднішній день більш економічно вигідно використання виплавки вторинного алюмінієвого сплаву [1]. Завдяки наявності шкідливих домішок (найбільш шкідливою домішкою являється залізо, збільшення до 1% призводить до зниження в 1,2-1,5 рази границі міцності при розтягу, використання вторинного матеріалу призводить до зниження механічних властивостей.

За рахунок інтенсивних пластичних деформацій (ІПД) (деформуванню сплавів в умовах великих деформаціях чистого зсуву) можливо підвищити та формувати механічні властивості. Найбільш поширені схеми для реалізації деформацій чистого зсуву являються рівноканальне кутове пресування [2-4] та гвинтова екструзія [5-6]. В роботі ми використали схему гвинтового ушіряючого пресування (ГУП). Схема показана на рис.1.

Метою роботи підвищення та формування властивостей у вторинного алюмінієвого сплаву АК7.

Методика досліджень: Розплав виплавляли з вторинних шихтових матеріалів. Заливку рідкого металу здійснювали в тонкостінну ливарну форму, виготовлену з алюмінієвої фольги.

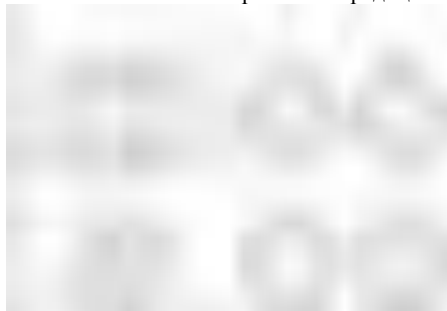


Рис. 1. Матриця для зміцнення матеріалу при багаторазовому гвинтовому ушіряючому пресуванні

Температура заливання дорівнювала 640° С. Теплові умови затвердіння металу відповідали литтю в піщані форми. Тому вміст масової частки домішки заліза в межах 0,8%

Схема дослідних зразків кілька перевищує вимоги ДСТУ 2839-94. Граничний вміст заліза в сплаві за вимогами стандарту не повинен перевищувати 0,6% при литті в піщані форми і 1,0% при литті в кокіль.

Хімічний склад алюмінієвого сплаву АК 7 [151] наведений в табл. 1. Механічні властивості в табл. 2.

Таблиця 1

Сплав	Al	Mg	Mn	Хімічний склад, %			Si
				Fe	З,В	К	Д
АК7	основа	0,2-0,5	0,2-0,6	1,1	1,2	1,3	0,6-0,8
АК7ч	основа	0,2-0,4	-	0,6	1,0	1,5	0,6-0,8

Таблиця 2

Механічні властивості			
сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АК7	240	160	2

Перед пресуванням проводили термообробку по режиму загартування та короткочасне штучне старіння: нагрів по режиму загартування відбувався до температури 535 ± 5°С з наступним охолодженням у воді з температурою 20-100°С для забезпечення стабільних механічних властивостей. Після загартування виконували процес старіння заготовки розігрівали до температури 150 ± 5°С та витримували в печі одну годину.



Рис. 2 Залежність границі текучості $\sigma_{0,2}$ та границі міцності σ_B від кількості проходів

Аналіз механічних властивостей (рис. 2) показав, що характеристики міцності підвищуються в залежності від циклів обробки. Показники підвищуються на 15% після першої обробки, на 20% після другої обробки, на 25% після третьої обробки, по відношенню до вихідного металу. При досліді на одновісне розтягування відносне видовження зразків, не змінюється.

При збільшенні ступеню накопиченої деформації величина мікротвердості збільшується. Повздовж радіальної координати від центру до краю заготовки величина накопиченої деформації збільшується. Деформація зсуву викликає зростання величин мікротвердості.

На рис. 3 наведено порівняння в залежності від накопиченої деформації після декількох проходів мікроструктури матеріалу зразка в центральній та крайовій зонах.



Рис. 3 Порівняння величини накопиченої інтенсивності деформацій для одного (1), двох (2), трьох (3) проходів та вплив цієї деформації на структуру матеріалу заготовки

Показано, що в центральній зоні після третього переходу величина накопиченої деформації наближено до величини деформації після першого проходу в крайовій зоні. Це підтверджують результати металографічного аналізу.

Висновки

Аналіз механічних властивостей показав, що характеристики міцності підвищуються в залежності від циклів обробки. Показники підвищуються на 15% після першої обробки, на 20% після другої обробки, на 25% після третьої обробки, по відношенню до вихідного металу. Величина мікротвердості збільшується при збільшенні ступеню накопиченої деформації. Показано, що в центральній зоні після третього переходу величина накопиченої деформації наближено до величини деформації після першого проходу в крайовій зоні. Це підтверджують результати металографічного аналізу.

Повышение механических свойств литейного алюминиевого сплава

Титов В.А., Злочевская Н.К., Лавриненков А.Д., Бондарь А.М.

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы повышения механических свойств вторичного алюминиевого сплава АК7. Для повышения свойств использовали схему винтового уширяющего прессования (ВУП). Результаты экспериментальных исследований показали, что прочностные повышаются, а их значения повышаются по отношению к исходному металлу на 15%, после второй обработки на 20%, после третьей 25%. При этом относительное удлинение образцов при опытах на одноосное растяжение, практически не меняется. Микротвёрдость увеличивается при увеличении степени накопленной деформации. Показано, что уже после третьего перехода в центральной зоне величина накопленной деформации примерно равна величине деформации после первого прохода в краевой зоне.

Ключевые слова: винтовое уширяющее прессование, деформации сдвига, пластическая деформация, вторичный алюминиевый сплав, механические свойства.

Improving mechanical properties foundry aluminum firing

Titov V.A., Zlochevskaya N.K., Lavrinenkov A.D., Bondar A.M.

Abstract: The paper considers the issues of increasing the mechanical properties of the secondary aluminum alloy AK7. To improve the properties used the scheme of screw expanding pressing (SUE). The results of experimental studies have shown that the strength characteristics increase, and their values increase in relation to the source metal by 15%, after the second treatment by 20%, after the third by 25%. The relative elongation of the samples in the experiments on uniaxial stretching, practically unchanged. The value of microhardness increases with increasing degree of accumulated deformation. It is shown that after the third transition in the central zone the value of the accumulated deformation is approximately equal to the amount of deformation after the first pass in the edge zone.

Key words: screw widening pressing, shear deformations, plastic deformation, secondary aluminum alloy, mechanical properties.

Список літератури

1. Гинц Э.Ч. Литейное производство в 20 веке Анализ истоков. Литейное производство – 2002, № 7, С. 6-8.
2. Voznyak Yuri The effect of radiation treatment on mechanical and thermal properties of semicrystalline polymers processed by severe plastic deformation / Yu. Voznyak // Macromolecular Research. – 2017. – Vol. 25, № 1. – P. 38–44.
3. D. Reinitz Alexander Equal channel angular extrusion of ultra-high molecular weight polyethylene / D. Reinitz Alexander, J. Engler Evan, M. Carlson Douglas, W. Van Citters Materials // Science and Engineering: C. – 2016. – Vol. 67, P. 623–628.
4. Yan Beygelzimer, Roman Kulagin, Yuri Estrin. Severe Plastic Deformation as a Way to Produce Architected Materials. In book: Architected Materials in Nature and Engineering, Eds. Y. Estrin, Y. Brechet, J. Dunlop, P. Fratzl. R. Dendievel, Springer, 2018. (in press)
5. Valiev R.Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / R.Z. Valiev, T.G. Langdon // Prog. Mat. Sci. – 2006. – V. 51. – P. 881-981.
6. Chengpeng W, Fuguo L., Qinghua L., Lie W. Numerical and experimental studies of pure copper processed by a new severe plastic deformation method Materials Science and Engineering A 548 (June 2012) PP19-26
7. Пат. 64346 України, МПК B21C25/00 Матриця для зміцнення матеріалу при багаторазовому пресуванні /В.А. Тітов, М.С. Тривайло, Н.К. Злочевська, Е.В. Кондратюк, Г.І. Пейчев. - № u201102822; заявл. 10.03.2011; опубл. 10.11.2011, Бюл.21.
8. Злочевська Н.К. Деякі закономірності формування структурних властивостей ливарного сплаву АК7ч в умовах інтенсивних пластичних деформацій / Н.К. Злочевська, В.М. Дука, В.В. Піманов, П.С. Вишневецький // Вісник НТУУ “Київський політехнічний інститут”, серія «Машинобудування». – 2011. - № 62. - С. 251-254

УДК 621.77

Порівняльний аналіз варіантів штампування заготовки гільзи гранатометного пострілу 40x53

М.В. Орлюк, В.В. Піманов, В.О. Жуков
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Анотація: В роботі за допомогою комп'ютерного моделювання досліджено два способи штампування порожнистої заготовки для виготовлення гільзи гранатометного пострілу 40x53 – двостороннє видавлювання та послідовне зворотнє видавлювання з кантуванням заготовки. В результаті досліджень встановлені енергосилові параметри та параметри НДС процесів та особливості деформування за заданими схемами. Отримані у результаті досліджень результати можуть слугувати критеріями для вибору оптимального варіанту штампування заготовки.

Ключові слова: порожниста заготовка, двостороннє видавлювання, зворотнє видавлювання, інтенсивність деформації, критерій руйнування.

Рациональні технологічні процеси виготовлення трубчастих виробів (втулок, гільз) не можливі без використання штампованих заготовок. В свою чергу основним способом виготовлення заготовок, що мають дві порожнини, є видавлювання [1, 2].

Якщо заготовка має дві однакові порожнини (рис. 1а), то при її виготовленні перевага надається двосторонньому видавлюванню, як більш продуктивному та енергоефективному [1, 2]. Утворення порожнин при цьому може здійснюватися без обмеження течії металу по висоті напівфабрикату. Однак при цьому збільшуються габарити штампів, штампи мають біль складну конструкцію, певною мірою зменшується точність (співвідношення) штампованого напівфабрикату.

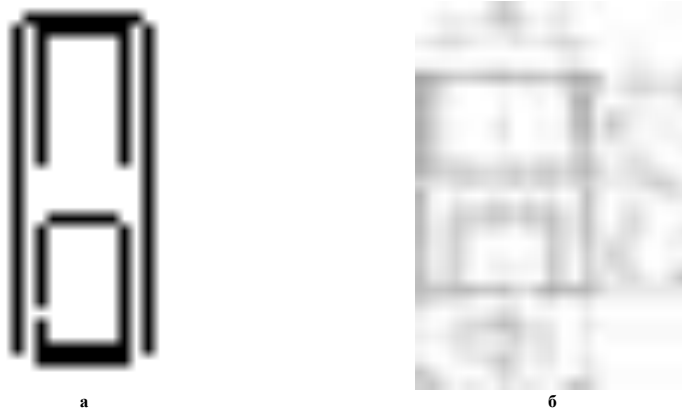


Рис. 1. Порожністі напівфабрикати:
а – з однаковими порожнинами; б – з порожнинами різного розміру

Якщо ж напівфабрикат має порожнини різного діаметру (рис. 1б), то без обмеження течії металу зі сторони порожнини меншого діаметру (яка формується першою) необхідні розміри напівфабрикату отримати не можливо.

В цьому випадку альтернативним варіантом штампування може стати послідовне зворотнє видавлювання порожнин з кантуванням заготовки [1].

Напівфабрикат, зображений на рис. 1б, використовується при виготовленні гільзи гранатометного пострілу 40х53, матеріал – алюмінієвий сплав АД35.

З метою визначення раціонального способу отримання вказаної заготовки в роботі виконано порівняльний аналіз штампування напівфабрикату за схемами двостороннього та послідовного зворотного видавлювання.

Процеси досліджувались за допомогою чисельного моделювання у середовищі DEFORM 2D.

Результати моделювання підтвердили, що при забезпеченні надійного змащення (при моделюванні сили тертя визначались за законом Зібеля, фактор тертя 0,1) при двосторонньому видавлюванні спочатку формується порожнина меншого діаметру, а потім більшого (рис. 2) за умови обмеження течії матеріалу в напрямку меншої порожнини.

Також було підтверджено, що за даної схеми сили тертя суттєво впливають на характер деформування вихідної заготовки. При зростанні сил тертя може спостерігатись практично одночасне формування порожнин (рис. 3).

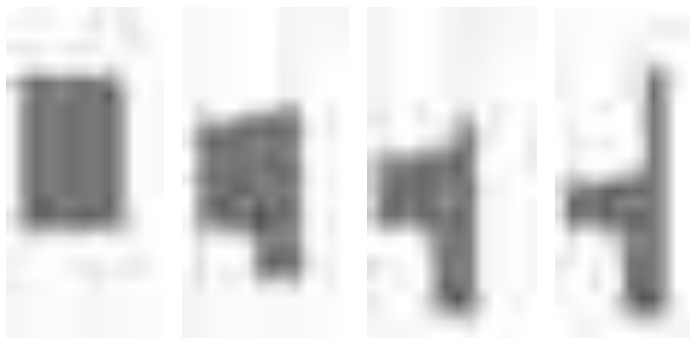


Рис. 2. Послідовність формування порожнин при двосторонньому видавлюванні за мінімального тертя

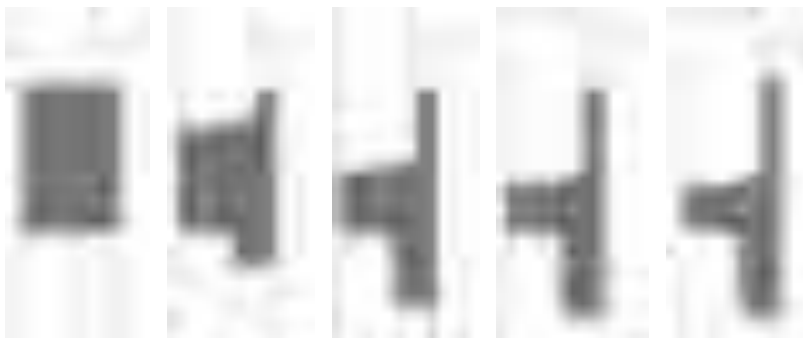


Рис. 3. Послідовність формування порожнин при двосторонньому видавлюванні при збільшених силах тертя (фактор тертя за Зібелем 0,4)

В свою чергу послідовне зворотне видавлювання порожнин з кантуванням заготовки (рис. 4) в плані напрямку течії металу меншою мірою залежить від величини сил тертя, тобто є більш прогнозованим способом, ніж попередній варіант.



Рис. 4. Послідовне зворотнє видавлювання порожнини

Окрім цього за результатами моделювання встановлено, що послідовне видавлювання забезпечує більш рівномірний розподіл інтенсивності деформації по поперечному перерізу напівфабрикату (рис. 5а), ніж двостороннє (рис. 6а). При цьому зростання сил тертя при послідовному видавлюванні мало впливає на картину розподілу інтенсивності деформації (рис. 5б), а при двосторонньому видавлюванні нерівномірність розподілу інтенсивності деформації суттєво збільшується (рис. 6б).

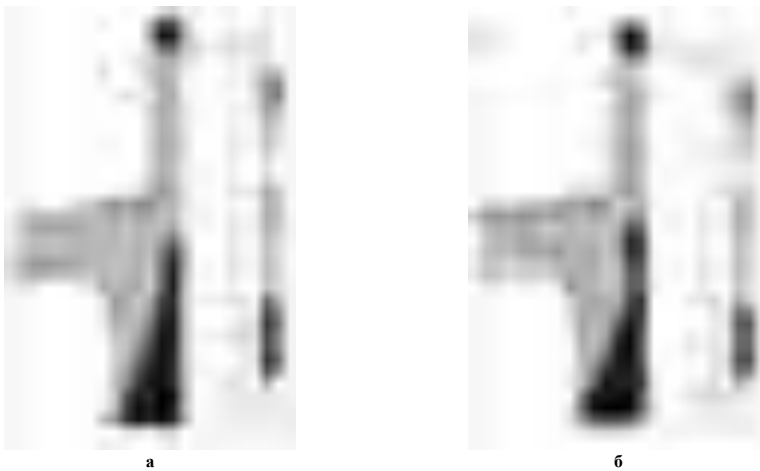


Рис. 5. Розподіл інтенсивності деформації при послідовному зворотньому видавлюванні порожнини:
а - фактор тертя за Зібелем 0,1; б - фактор тертя за Зібелем 0,4

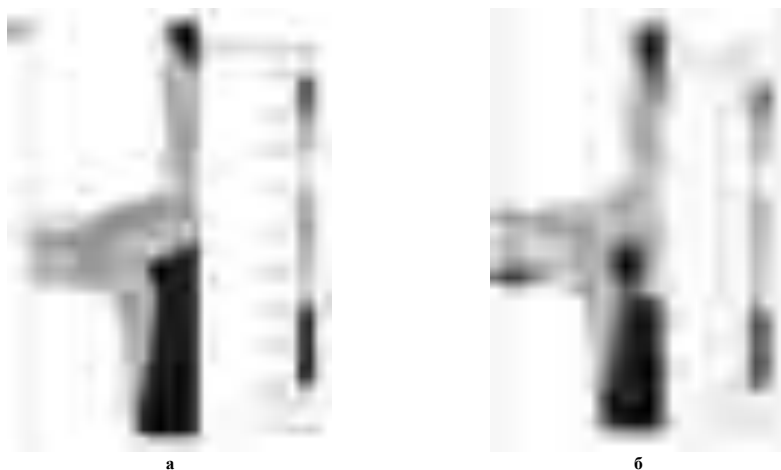


Рис. 6. Розподіл інтенсивності деформації при двосторонньому видавлюванні порожнини:
а - фактор тертя за Зібелем 0,1; б - фактор тертя за Зібелем 0,4

Також за результатами моделювання було встановлено, що максимальні зусилля, які виникають при формуванні порожнини більшого діаметру для обох процесів практично однакові (рис. 7).

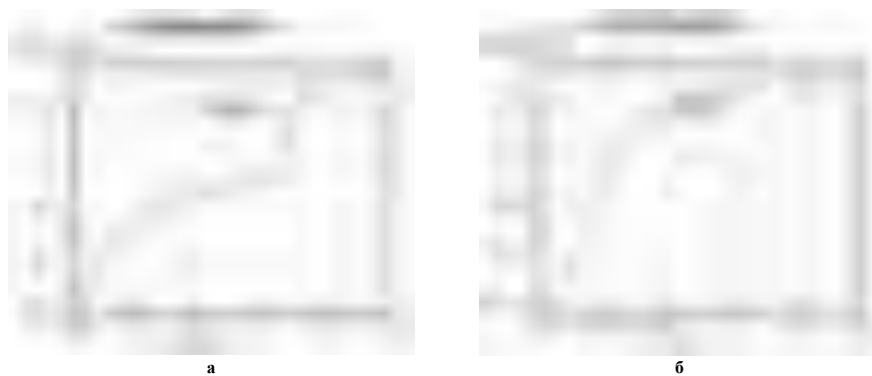


Рис. 7. Діаграма технологічного зусилля:
а – при двосторонньому видавлюванні порожнини;
б – при формуванні порожнини більшого діаметру
(попереднє видавлювання)

Максимальні значення критерію руйнування (за замовчуванням Normalizet C&L, рис. 8) не перевищують граничних значень [3].

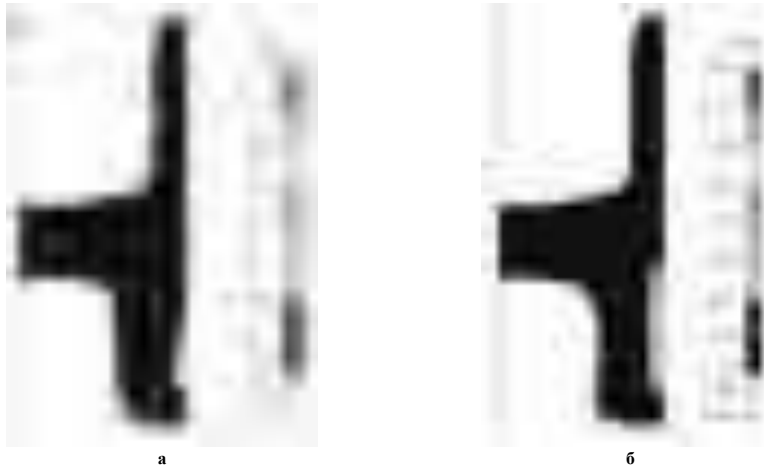


Рис. 8. Картина розподілу критерію руйнування:
а – при двосторонньому видавлюванні порожнини;
б – при формуванні порожнини більшого діаметру
(послідовне видавлювання)

Висновки

Отримані результати досліджень засвідчують, що відштампувати задану заготовку можна як за схемою двостороннього, так і за схемою послідовного зворотного видавлювання. Однак при двосторонньому видавлюванні спостерігається значна нерівномірність деформування. У випадку, коли в процесі подальшого виготовлення виробу zdeформована заготовка не піддається термічній обробці, значна нерівномірність механічних властивостей металу, викликана нерівномірністю деформування, може призвести до руйнування готової деталі (особливо коли вона працює в умовах значних динамічних навантажень). Тому у виробництві гільз гранатометних пострілів при виборі варіанту штампування заготовок вирішальним може стати не продуктивність двостороннього видавлювання, а прогнозованість та більш рівномірне деформування (пропрацювання структури матеріалу вихідної заготовки) при послідовному зворотному видавлюванні.

Сравнительный анализ вариантов штамповки заготовки гильзы гранатометного выстрела 40x53

М.В. Орлюк, В.В. Пиманов, В.О. Жуков

Аннотация: В работе с помощью компьютерного моделирования исследованы два способа штамповки полой заготовки для изготовления гильзы гранатометного выстрела 40x53 - двустороннее выдавливание и последовательное обратное выдавливание с кантовкой заготовки. В результате исследований установлены энергосиловые параметры и параметры НДС процессов и особенности деформирования по заданным схемам. Полученные в результате исследований результаты могут служить критериями для выбора оптимального варианта штамповки заготовки.

Ключевые слова: полая заготовка, двустороннее выдавливание, обратное выдавливание, интенсивность деформации, критерий разрушения.

Comparative analysis of stamping options for 40x53 blank cartridge cases of grenade launcher rounds

M. Orliuk, V. Pimanov, V. Zhukov

Abstract: In the article with the use of computer modeling two methods of stamping a hollow blank to manufacture a cartridge case for 40x53 grenade launcher round are researched - double-sided extrusion and sequential reverse extrusion with the tilting of the blank. As a result of the studies, energy and stress-strain rate parameters of the processes and deformation features according to the given schemes were established. The results obtained from the studies can serve as criteria for choosing the optimal stamping method of the blank.

Keywords: hollow blank, double-sided extrusion, reverse extrusion, strain intensity, failure criterion.

Список літератури

1. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. - М.: Машиностроение, 1987. - Т. 3: Холодная объемная штамповка / Под ред. Г.А. Навроцкого. 1987. - 384 с.: ил.
2. Холодная объемная штамповка. Справочник. Под ред. д-ра. техн. наук проф. Г.А. Навроцкого. - М.: Машиностроение, 1973. - 496 с.
3. Орлюк М.В. Граничні значення критеріїв руйнування при моделюванні процесів витягування в середовищі DEFORM // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. - Краматорск: ДГМА, 2017. - № 2(45). - С. 22-29. Режим доступа: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27990>, [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(45\)_2017/article/6.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(45)_2017/article/6.pdf)

УДК 739.4

Дослідження пружинення при гнутті волют

О.С. Аніщенко, А.В. Гушин, В.В. Кухар, А.Г. Присяжний

Приазовський державний технічний університет, м. Маріуполь, Україна

Анотація: для волют, умовно поділеної на 5 ділянок, наведений алгоритм розрахунків збільшення радіусів та кутів гнуття кожної з ділянок. Розрахунки показують, що пружинення тим інтенсивніше, чим більше відношення радіусу гнуття до товщини для кожної ділянки волоти, вище міцнісні властивості сталей, їх схильність до зміцнення в процесі деформації. Значне пружинення фіксується, якщо радіуси гнуття та товщина відрізняються майже на порядок.

Ключові слова: пружинення, волота, радіус гнуття, кут гнуття, степенева функція.

Найбільш поширеними декоративними елементами в художньому куванні є волоти [1]. Важливою задачею при куванні волоти є отримання правильної спіральної форми. Цьому заважає пружинення заготовки при гнутті [2, 3]. Це пружинення або усувають, або враховують за рахунок вдосконалення технології і інструменту. Якщо волоти призначені для прикрас або потрібно виготовляти значну їх кількість, потрібен шаблон, в контури якого повинні вписуватися кожен оборот спіралі і товщина заготовки, призначеної для виготовлення спіралі. Формоутворююча поверхня шаблону повинна мати кривизну, відмінну від кривизни заготовки, що згинається, на величину пружинення [2]. Отже саме на цю величину кут загину в шаблоні повинен бути більше, ніж заданий.

В розрахунках пружинення при гнутті зазвичай [4] використовують лінійні залежності між геометричними параметрами заготовок та кутом пружинення, хоча для більш повної картини при прогнозуванні пружинення вони повинні бути нелінійними, окремо для малих і великих кутів гнуття. Існуючі числові програмні методи мають істотні обмеження. Або метод можна застосовувати для чисельного розрахунку в області пружних або пружно-пластичних деформацій, або - для чисельного розрахунку в області пластичних деформацій, що обмежує можливість чисельного розрахунку пружинення при малих кутах, де присутні всі три області.

Мета роботи – визначити вищезгадані нелінійні залежності та з їх допомогою знайти кривизну і кут загибу, на які необхідно провести гнуття заготовки, з тим, щоб отримати їх значення після пружинення, що дорівнюють заданим.

Дослідження виконували на заготовках зі сторонами квадрата в перерізі $h = 2-12$ мм, які вирізали з гарячекатаних листів зі сталей 09Г2, 09Г2С, зі сталі 10 після нормалізації, а також з гарячекатаних та загартованих листів сталі 08Х26Н6Т. Волоти згинали нахолодно у вигляді спіралі Архімеда. Перед гнуттям поверхню заготовок обробляли до шорсткості $Ra\ 2,5$. Хімічний склад і механічні властивості листів наведені в таблиці 1 і відповідають заводським сертифікатам.

Гнуття заготовки у волотоподібну форму складається з двох стадій. На стадії навантаження відбувається пружно-пластичне формозмінення заготовки. Пружна деформація описується лінійною функцією (законом Гука):

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1)$$

пластична деформація - степеневою функцією напруження в заготовці σ від деформації ε :

$$\sigma = k\varepsilon^n, \quad (2)$$

де E – модуль пружності матеріалу; k – модуль зміцнення; n – показник деформаційного зміцнення матеріалу заготовки.

Таблиця 1

Хімічні та механічні властивості прокату, що використовується													
Марка сталі	Хімічний склад, % за масою									Механічні властивості			
	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni	Ti	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	ϵ_B , %	E, МПа
09Г2	0,09	0,26	1,65	0,030	0,028	-	-	-	-	305	440	21	$2,1 \cdot 10^5$
09Г2С	0,10	0,64	1,62	0,032	0,029	-	-	-	-	325	470	21	$2,1 \cdot 10^5$
10	0,11	0,31	0,43	0,036	0,031	-	-	-	-	205	330	31	$2,0 \cdot 10^5$
08Х26Н6Т	0,07	0,69	0,73	0,022	0,028	0,28	21,8	5,6	0,62	340	590	20	$1,98 \cdot 10^5$

На другій стадії гнуття відбувається часткове відновлення вихідної форми заготовки.

Зазвичай, при виготовленні валют заготовки вигинають на велику кривизну, тому згідно з [2] замість закону Гука доцільно використовувати при розрахунках степеневу функцію. Параметри k і n можна визначити за формулами:

$$n = \frac{\ln(\sigma_B/\sigma_{0,2})}{\ln(\epsilon_B/\epsilon_{0,2})}, \quad k = \frac{\sigma_B}{\epsilon_B^n}$$

Для сталей 10, 09Г2, 09Г2С, 08Х22Н6Т отримані відповідні коефіцієнти:

$$k = 404,5; 561,2; 650,4; 2464,7; \quad n = 0,174; 0,157; 0,156; 0,239$$

Розглянемо формування волоти, яка закручена зі змінним радіусом кривизни з прутка, квадратний перетин якого має сторону h . Формули, що визначають зміну кривизни i -тої ділянки волоти V_i^{pp} внаслідок пружинення і її значення W_i , яке залишилося після розвантаження, приймуть такий вигляд (для перетину з двома осями симетрії) [2]:

$$\begin{aligned} V_i^{pp} &= V_i[v^3 + (1 - v^{n+2})\beta(hV_i)^{n-1}], \\ W_i &= V_i\{1 - [v^3 + (1 - v^{n+2})\beta(hV_i)^{n-1}]\}, \end{aligned} \quad (3)$$

де V_i – кривизна зігнутого елемента прутка відносно нейтрального шару деформації;

$v = \frac{2}{hV_i} \left(\frac{k}{E} \right)^{1/1-n}$ – коефіцієнт, що характеризує відносну величину пружної зони по висоті

перетину; $\beta = \frac{6k}{E2^n(n+2)}$ – сталий для кожного металу коефіцієнт, який визначається через його механічні властивості; $\beta \cdot 10^3 = 6,67, 7,85, 4,95, 28$ для сталей 09Г2, 09Г2С, 10 і 08Х22Н6Т.

Якщо ввести у формули (3) відносний радіус кривизни r_i^p :

$$r_i^p = R_i^p/h = 1/hV_i, \quad (4)$$

де R_i^p – радіус кривизни центрального шару зігнутого елемента,

то формула для розрахунків відносної кривизни $w_i^p = W_i/V_i$ будемо мати вигляд:

$$w_i^p = \frac{r_i^p}{1 - [v^3 + (1 - v^{n+2})\beta(r_i^p)^{n-1}]} \quad (5)$$

Якщо треба збудувати шаблон для виготовлення волоти (сталь 09Г2С), останню спочатку поділяють на 5 ділянок [3] (рис. 1). Хай буде для першої ділянки $R_1^p = 13$ мм. Тоді $r_1^p = R_1^p/h = 13/12 = 1,083$. Обчислюємо v, β і w_1^p : $v = 2,34 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 7,85 \cdot 10^{-3}$, $w_1^p = 1,092$. Отже при гнутті внаслідок пружинення параметр R_1^p для першої ділянки волоти збільшиться до $R_1^{pp} = hw_1^p = 13,11$ мм, тобто збільшення радіусу кривизни складе:

$$z = R_1^{pp} - R_1^p = 13,11 - 13 = 0,11 \text{ мм}$$



Рис. 1. Схема умовного поділення волоти на ділянки

де i – номер ділянки волоти.

Аналогічні розрахунки були виконані для всіх ділянок волот (рис.1), що були зігнуті із заготовок ($h = 12$ мм) чотирьох марок сталей (табл.1). На рис.2-3 представлені діаграми, які показують вплив пружинення на параметри збільшення z і f радіусів та потрібних кутів кривизни при виготовленні волот. Графіки показують, що пружинення тим інтенсивніше, чим більше співвідношення R_i^p/h для кожної ділянки волоти, вище міцнісні властивості сталей, їх схильність до зміцнення в процесі деформації, яка визначається параметрами n і k .

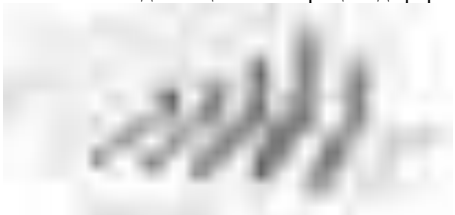


Рис. 2. Збільшення радіусів кривизни на п'ятьох ділянках волот внаслідок пружинення при гнутті заготовок з різних марок сталей

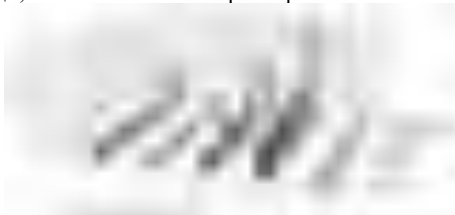


Рис. 3. Збільшення кута θ_i при гнутті ділянок волоти, яке потрібне для забезпечення його значень на рис.3 після пружинення

Хоча діаграми мають дещо різний вигляд, але значення z і f відносно радіуса кривизни і кута кожної ділянки знаходяться між собою в пропорційних залежностях. Ці значення мінімальні для першої і максимальні для четвертої ділянки волоти. В зв'язку з цим для цих ділянок волоти були розраховані відносні зміни Q радіусів кривизни внаслідок пружинення:

$$Q = (R_i^{pp} - R_i^p) / R_i^p \cdot 100 \%,$$

де R_i^{pp} - радіус кривизни центрального шару зігнутого елемента після пружинення.

Результати розрахунків були експериментально перевірені на заготовках зі сталей 10 та 08X22H6T зі стороною квадрата в перерізі 2, 4 і 8 мм (рис.4). Графіки показують, що відносне пружинення Q заготовок зі сталі 08X22H6T вище, ніж зі сталі 10 для першої ділянки волоти в 1,5-2 рази, для четвертої - в 2,3-2,6 рази. В цілому розрахунки пружинення відповідають експериментальним результатам, похибка у визначенні параметра Q не перевищує 16 %.

Якщо припустимо пружинення з параметром $Q = 10 \%$, то його слід враховувати при гнутті заготовок з $R_i^p/h \geq 10$ і 7 відповідно для сталі 10 і 08X26H6T. При збільшенні Q до 20% пружинення враховується тільки для заготовок зі сталі 08X26H6T з $R_i^p/h \geq 10$.

Результати роботи були використані при виготовленні шаблонів і художньому куванні виробів, які були відзначені нагородами на ковальфестах в Маріуполі, Бердянську і Рівне.



Рис. 4. Вплив відносного радіуса волоти на відносне пружинення заготовок: ліворуч – для ділянки 1; праворуч – для ділянки 4; суцільні лінії – експериментальні дані, штрихові лінії – розрахункові дані

Висновки

Пружинення заготовок при гнутті волот можна розрахувати з похибкою не більш 16 % на основі степеневих функцій напруження від деформації та співвідношень між радіусами кривизни нейтрального шару ділянок волоти та товщиною заготовки. Значне пружинення фіксується, якщо останні параметри відрізняються майже на порядок.

Исследование пружинения при гибке волот

А.С. Анищенко, А.В. Гушин, В.В. Кухар, А.Г. Присяжный

Аннотация: для волоты, условно разделенной на 5 участков, приведен алгоритм расчетов увеличения радиусов и углов гибки каждого из участков. Расчеты показывают, что пружинение тем интенсивнее, чем больше отношение радиуса гибки к толщине для каждого участка волоты, выше прочностные свойства сталей, их склонность к упрочнению в процессе деформации, которая определяется коэффициентами степенной функции. Значительное пружинение фиксируется, если радиусы гибки и толщина отличаются почти на порядок.

Ключевые слова: пружинение, волота, радиус гибки, угол гибки, степенная функция.

Study of springback during bending of volutes

O. Anishchenko, A. Hushchyn, V. Kukhar, A. Prysiazhnyi

Abstract: For a volute, which is conditionally divided into 5 sections, an algorithm for calculating the increase in radii and bending angles of each section is given. Calculations show that the spring is more intense, the greater the ratio of bending radius to thickness for each section of the volute, the higher the strength properties of steels, their tendency to harden during deformation, which is determined by the coefficients of power function. Significant springing occurs when the bending radii and thickness differ by almost an order of magnitude.

Keywords: honeycomb, elastic characteristics, composite materials, stress-strain state.

Список літератури

1. Богман К., Семерак Г. Художественная ковка и слесарное искусство / К. Богман, Г. Семерак, - М.: «Книга по требованию», 2016.- 231с.
2. Лысов М. И., Сосов Н. В. Формообразование деталей гибкой / М. И. Лысов, Н. В. Сосов.- М.: Машиностроение, 2001.- 388с.
3. Филиппов Д. И., Морозов Ю. А. Инженерная теория расчета геометрических и силовых параметров изготовления гнутых элементов художественной ковки / Д. И. Филиппов, Ю. А. Морозов // Молодежный научный форум: технические и математические науки, 2014, №11 (18), С.71-79.
4. Сапрыкин Б. Ю. Анализ способов расчета пружинения листовых материалов /Б. Ю. Сапрыкин // Известия МГТУ «МАМИ», 2013, №2 (16), т.2, С.133-139.

УДК 621.983

Удосконалення технології холодного штампування із маловуглецевої сталі заготовки гільзи малих розмірів

В.Л. Калюжний, А.М. Бондарь, К.Л. Марчук

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Анотація: в роботі наведені результати моделювання методом скінченних елементів переходів холодного штампування із маловуглецевої сталі заготовки гільзи малих розмірів. Штампування складається із зворотного видавлювання, витягування з потоншенням та обтиску. Для кожного переходу визначені зусилля деформування і вилучення інструменту із напівфабрикатів, розподіли питомих зусиль, напружено-деформований стан zdeформованого металу, форма і розміри напівфабрикатів та заготовки гільзи. Удосконалення полягає в скороченні кількості переходів штампування та зменшення витрат металу при виробництві гільз.

Ключові слова: переходи штампування, метод скінченних елементів, зворотне видавлювання, витягування з потоншенням, обтиск, напівфабрикат, зусилля деформування, питомі зусилля, напруження, деформації.

При виробництві із маловуглецевих сталей заготовок гільз малих розмірів використовуються наступні переходи штампування у такій послідовності: холодне зворотне видавлювання для отримання порожнистих напівфабрикатів із стінкою постійної товщини по висоті; декілька операцій холодного витягування з потоншенням для зменшення товщини стінки та збільшення висоти напівфабрикатів зі стінкою змінної товщини; холодний обтиск. Сучасне виробництво таких гільз потребує підвищення продуктивності та зменшення витрат металу. Зростання продуктивності можна забезпечити за рахунок зменшення кількості переходів штампування, а зменшення витрат металу – за рахунок пластичного формоутворення отвору у донній частині заготовки гільзи. Останні розробки в процесах холодного витягування з потоншенням та холодного обтиску за рахунок використання деформуючого інструменту спеціального профіля забезпечують підвищення ступеня деформації за один перехід та зменшення в два рази кількість переходів отримання виробів [1-3]. Використання методу скінченних елементів (МСЕ) для визначення параметрів холодного штампування дозволяє суттєво зменшити час та витрати на підготовку виробництва різноманітних виробів.

Метою роботи є використання методу скінченних елементів для встановлення технологічних параметрів переходів холодного штампування заготовки гільзи малих розмірів із маловуглецевої сталі.

Моделювання проведено в програмному комплексі DEFORM із застосуванням циліндричної системи координат і пружно-пластичної моделі металу.

Тертя враховане по Кулону з коефіцієнтом тертя $\mu=0,08$, швидкість деформування складала 7 мм/сек. і третя матриця 4 розташовані таким чином, щоб наступне витягування починалося після завершення деформування у попередній матриці.

На рис.1 введені положення деформуючого інструменту при видавлюванні та форма і розміри половини напівфабрикату. Заготовка 1 розміщена в матриці 2, в якій встановлений штовхач 3, а деформування виконується пуансоном 4 (рис. 1а). При опусканні пуансона отримується напівфабрикат 5 (рис.1б). При вилученні пуансона напівфабрикат 5 залишається



Рис. 1. Положення в розрізі деформуючого інструменту при видавлюванні та форма і розміри напівфабрикату: а – на початку видавлювання, б – в кінці видавлювання, в – при вилученні пуансона, г – при виштовхуванні напівфабрикату, д – форма і розміри напівфабрикату

в матриці (рис. 1в) і видаляється з неї штовхачем 3 (рис. 1г). На рис. 1д і надалі розміри на вісях приведені в міліметрах. Силкові режими видавлювання та розподіли нормальних напружень при максимальному значенні зусилля видавлювання, по яких можна оцінити величини питомих зусиль зображені на рис. 2.

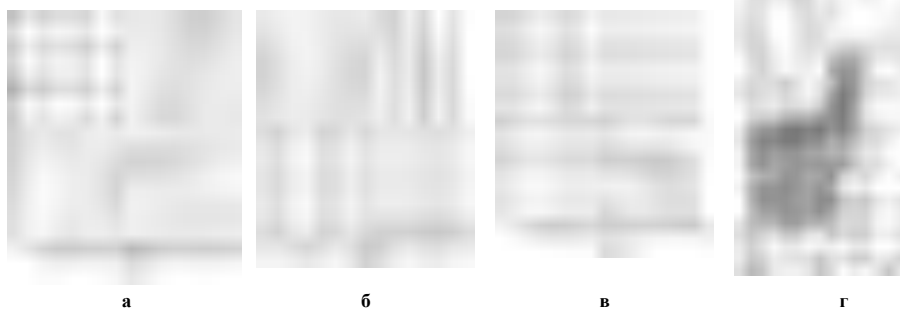


Рис. 2. Силкові режими при видавлюванні та розподіли нормальних напружень σ_n : а – залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, б – залежність зусилля вилучення пуансона від його переміщення, в – залежність зусилля виштовхування від переміщення штовхача, г – розподіли σ_n

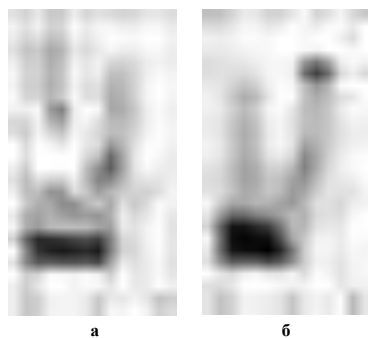


Рис. 3. Розподіли температури T (°C) та інтенсивності деформацій ϵ у напівфабрикаті після видавлювання

На рис. 3 представлені розподіли температури zdeформованого металу та інтенсивності деформацій у напівфабрикаті після видавлювання.

Положення деформуючого інструменту при першому витягуванні з потоншенням та форма і розміри половини напівфабрикату наведені на рис. 4. Напівфабрикат після видавлювання 1 розміщена в матриці 2, під якою встановлені знімачі 3, а деформування виконується пуансоном 4 (рис. 4а). При опусканні пуансона отримується напівфабрикат 5 (рис. 4б). При вилученні пуансона 4 напівфабрикат 5 торцем стінки спирається на знімачі 3. Залежність зусилля витягування від переміщення пуансона представлена на рис. 5. На рис. 6 показані розподіли температури zdeформованого металу (рис. 6а) та інтенсивності деформацій (рис. 6б) у напівфабрикаті

після витягування.

На наступному переході (другому витягуванні з потоншенням) відбувається формоутворення отвору у доній частині напівфабрикату. Положення в розрізі деформуючого



Рис. 4. Положення в розрізі деформуючого інструменту при витягуванні та форма і розміри напівфабрикату: а – на початку витягування, б – в кінці витягування, в – при вилученні пуансона, г – форма і розміри напівфабрикату



Рис. 5. Залежність зусилля витягування від переміщення пуансона

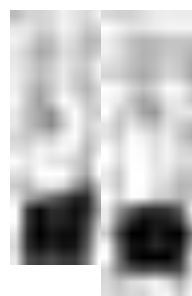


Рис. 6. Розподіли температури T (°C) та інтенсивності деформацій ε_y у напівфабрикаті після видавлювання

інструменту при другому витягуванні з потоншенням через 3 матриці та форма і розміри половини напівфабрикату наведені на рис. 7. Положення на початку витягування зображене на рис. 7а. Напівфабрикат 1 після першого витягування з потоншенням встановлений в першій 2 із трьох матриць. Матриці 3 і 4 розташовані таким чином, щоб витягування починалося практично після завершення в матриці 2 та в матриці 3. Обойма 5 з нижнім пуансоном 6, в якій здійснюється формоутворення отвору, також розташована на такій віддалі, щоб завершилося деформування в матриці 4. При опусканні пуансона 7 спочатку відбувається витягування з потоншенням, а потім з одночасним рухом вниз обойми 5 видавлюється отвір (рис. 7б). При зворотному переміщенні пуансона напівфабрикат 8 залишається в обоймі 5 (рис. 7в) і вилучення пуансона 6 відбувається при зворотному переміщенні обойми 5 (рис. 7г). На рис. 7д показані форма і розміри половини напівфабрикату після другого витягування. Залежності зусилля витягування і зусилля виштовхування від переміщення деформуючого інструменту представлені на рис. 8. Вигляд напівфабрикату в розрізі та розподіл інтенсивності деформацій в ньому наведені на рис. 9.

Останній перехід штампування заготовки гільзи – холодний обтиск. На рис. 10 зображені в розрізі положення деформуючого інструменту при обтиску та форма і розміри половини напівфабрикату. На рис. 10а приведені положення на початку обтиску. Напівфабрикат 1 після другого витягування розміщений матриці 2, в якій розташований пуансон-виштовхувач 3 (рис. 10а). Розміри матриці 2 відповідають кінцевим зовнішнім розмірам заготовки гільзи, а розміри пуансона виштовхувача 3 – відповідають внутрішнім розмірам горловини. Деформування здійснюється пуансоном 4, при опусканні якого отримується заготовка гільзи 5 (рис. 10г). Виштовхування цієї заготовки із матриці 2 відбувається переміщенням пуансона-виштовхувача 3 (рис. 10в). Залежності зусилля обтиску і зусилля виштовхування від переміщення деформуючого інструменту представлені на рис. 11. Вигляд напівфабрикату в розрізі та розподіл інтенсивності деформацій в ньому наведені на рис. 12.

Таким чином, заготовка гільзи по запропонованій технології отримується за чотири переходи штампування: зворотне видавлювання з відпалом напівфабрикату, витягування з потоншенням з відпалом напівфабрикату, витягування з потоншенням і формоутворенням отвору та обтиск. Наведена технологія є більш продуктивною, в порівнянні з існуючою,

завдяки зменшенню кількості переходів і проміжних відпалів та забезпечує зниження витрат металу завдяки пластичному формоутворенню отвору у донній частині.

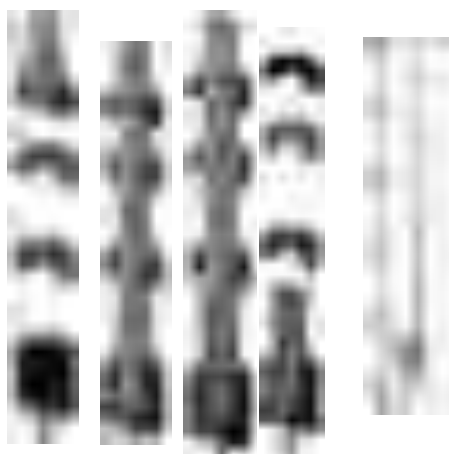


Рис. 7. Положення в розрізі деформуючого інструменту при другому витягуванні та форма і розміри напівфабрикату: а – на початку витягування, б – в кінці витягування, в – при вилученні пуансона, г – форма і розміри напівфабрикату

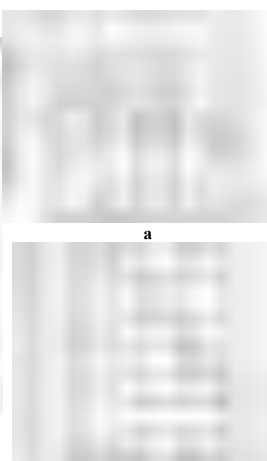


Рис. 8. Залежність зусилля витягування і зусилля виштовхування напівфабрикату від переміщення деформуючого інструменту: а – витягування, б – виштовхування

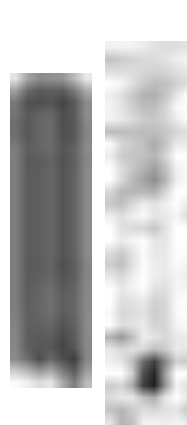


Рис. 9. Вигляд напівфабрикату та розподіл інтенсивності деформацій ε_i : а – вигляд, б – розподіл ε_i

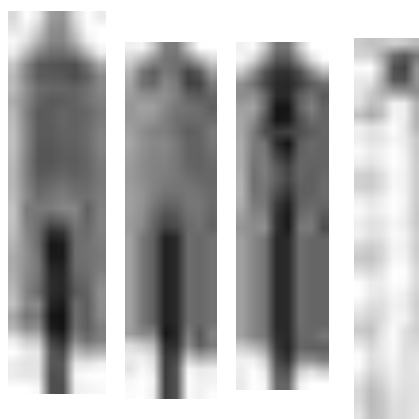


Рис. 10. Положення в розрізі деформуючого інструменту при обтиску та форма і розміри заготовки гільзи: а – на початку обтиску, б – в кінці обтиску, в – при вилученні заготовки гільзи, г – форма і розміри заготовки гільзи

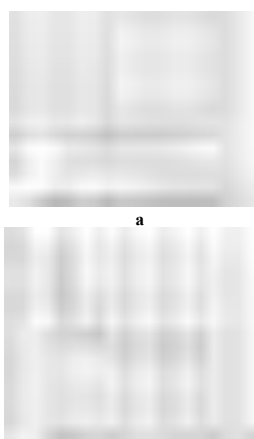


Рис. 11. Залежність зусилля обтиску і зусилля виштовхування заготовки гільзи від переміщення деформуючого інструменту: а – зусилля обтиску, б – зусилля виштовхування

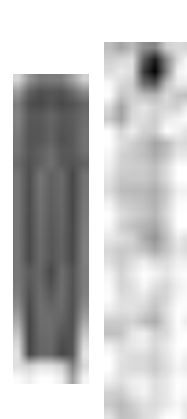


Рис. 12. Вигляд заготовки гільзи та розподіл інтенсивності деформацій ε_i в ній: а – вигляд, б – розподіл ε_i

Висновки.

Методом скінченних елементів встановлені технологічні параметри холодного штампування заготовки гільзи із маловуглецевої сталі. Штампування включає зворотне видавлювання напівфабрикату із стінкою постійно товщини, перше витягування з потоншенням, друге витягування з потоншенням і формоутворенням отвору у донній частині та обтиск. Встановлені зусилля деформування та зусилля вилучення інструменту із напівфабрикатів, розподіли нормальних напружень на контактуючих поверхнях. При максимальних значеннях зусиль деформування, напружено-деформований стан металу, отримані кінцеві розміри напівфабрикатів та заготовки гільзи. Приведена конструкція штампів для виконання витягування.

Усовершенствование технологии холодной штамповки из малоуглеродистой стали заготовки гильзы малых размеров

В.Л. Калюжный, А.М. Бондарь, К.Л. Марчук

Аннотация: в работе приведены результаты моделирования методом конечных элементов переходов холодной штамповки с малоуглеродистой стали заготовки гильзы малых размеров. Штамповка состоит из обратного выдавливания, вытягивания с утонением и обжима. Для каждого перехода определены усилия деформирования и извлечения инструмента из полуфабрикатов, распределения удельных усилий, напряженно-деформированное состояние деформированного металла, форма и размеры полуфабрикатов и заготовки гильзы. Совершенствование заключается в сокращении количества переходов штамповки и уменьшения расхода металла при производстве гильз.

Ключевые слова: переходы штамповки, метод конечных элементов, обратное выдавливание, вытягивание с утонением, обжим, полуфабрикат, усилия деформирования, удельные усилия, напряжения, деформации.

Improvement of cold forming technology from low-carbon steel for small-size liner blanks

V. Kaliuzhnyi, A. Bondar, K. Marchuk

Abstract: the paper presents the results of modeling by the finite element method of transitions of cold stamping from low-carbon steel of a small-size sleeve blank. Stamping consists of reverse extrusion, pulling with thinning and crimping. For each transition, the forces of deformation and extraction of the tool from semifinished products, the distribution of specific forces, the stress-strain state of the deformed metal, the shape and dimensions of the semifinished products and the blank of the sleeve are determined

Key words: punching transitions, finite element method, reverse extrusion, thinning stretching, crimping, semi-finished product, deformation forces, specific forces, stresses, deformations.

Список літератури.

1. Калюжный О.В., Калюжный В.Л. Интенсификация формоутворяющих процессов холодного листового штампования. Київ: ТОВ «Сік Груп Україна». 2015. 292 с.
2. Калюжный О.В., Соколовська С.С. Визначення параметрів витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном порожнистих заготовок після видавлювання. Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії», Харків: НТУ «ХПІ». 2017. №36 (1257). С. 21-28.
3. Калюжный В.Л., Ярмоленко О.С. Интенсификация процесса холодного обтиска порожнистых напівфабрикатів для отримання виробів зі змінною товщиною стінки. Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Mechanics And advanced Technologies. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, №1 (85). С. 111-117.

Моделирование процесса поверхностного пластического деформирования головки эндопротеза тазобедренного сустава

А.Д. Лавриненков, В.П. Милешенко

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина.

Аннотация: в работе проведен анализ технологии получения головки эндопротеза тазобедренного сустава. Для поверхностной пластической деформации головки был выбран процесс алмазного выглаживания. Для уменьшения износа инструмента используется ультразвук. В работе исследовано влияние траектории движения деформирующего инструмента на его износ. Определено напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя материала, установлены энергосиловые параметры процесса, температура заготовки в месте контакта с инструментом.

Ключевые слова: эндопротез тазобедренного сустава, метод конечных элементов, титановые сплавы, поверхностная пластическая деформация

Все пары трения, используемых в современном эндопротезировании тазобедренного сустава очень износостойкие. Теоретически, вкладыш с высокомолекулярного полиэтилена, контактирующий с металлической головкой, может служить 40-45 лет.

Один из самых актуальных аспектов использования титана и его сплавов в медицине - их использование в качестве материала для изготовления имплантированных на долгий срок конструкций различного функционального назначения.

Однако вопрос об оптимальном выборе металлических материалов для изготовления имплантатов, в частности эндопротезов, остается открытым. Это подтверждается тем фактом, что целый ряд свойств материала, определяющих успешность его использования (износостойкость, сопротивление усталости, прочность и др.), зависит не только от его физико-химической природы. Он зависит и от технологии получения и обработки, условий функционирования в организме, особенностей взаимодействия со структурами организма и т.д.

Согласно работы авторов [1, 2] основными материалами, используемыми для изготовления имплантатов, является металлические сплавы (титановые, кобальтовые, нержавеющие стали), полимеры и керамика. Количество изделий из титановых сплавов оценивают примерно в 28%

Несмотря на очевидные преимущества титановых сплавов, их более широкое использование в медицине сдерживается рядом проблем, среди которых можно выделить следующие:

- недооценка преимуществ титановых сплавов при разработке медицинских изделий;
- низкое качество полуфабрикатов из-за нарушения или несовершенство технологии производства;
- сложность и трудоемкость технологии производства;
- низкие трибологические характеристики [3];
- низкие механические свойства фасонных отливок [4].

Для повышения износостойкости несущей поверхности с технически чистого титана без изменений свойств сердцевины имплантата ставится задача ее модификации сочетанием различных методов холодного поверхностного пластического деформирования (ХППД) и низкотемпературного азотирования с варьированием технологических режимов как азотирования, так и ХППД.

Для минимизации коэффициента трения и, соответственно, работы фрикционных сил необходима максимальная чистота поверхности компонента (головки и части ножки, чувствительных к циклическим смещениям большой амплитуды). Однако механическое полирование изделий из титановых сплавов достаточно трудоемкое вследствие высокой

вязкости материала и приводит к «налипанию» титана на части абразива и покрытию его на полированную поверхность.

В случае формирования наноструктурного состояния материал может приобретать свойства, принципиально отличные от крупнозернистого аналога. Например, микротвердость может повыситься в 2-7 раз, прочность при растяжении - в 1,5-2 раза, наблюдается повышение вязкости разрушения и существенное повышение износостойкости и работоспособности при циклических нагрузках [5].

В результате интенсивной пластической деформации (ИПД) и измельчения структуры титана простым методом равноканального углового прессования его твердость возрастает на 30 ... 40%.

Схему процесса выглаживания сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава показано на рис. 1.

Для упрощения расчета было принято решение перейти от сферы к плоскости.

Численное моделирование процесса обычного выглаживания и процесса выглаживания с наложением продольных ультразвуковых колебаний и продольно-поперечных ультразвуковых колебаний решался в программном комплексе QForm в трехмерном постановке задачи.

Модель материала – упруго-пластическая. Упруго-пластическая модель задавалась исходя из необходимости оценить величину остаточных напряжений в тонком приповерхностном слое материала, который формируется после снятия нагрузки.

Для моделирования процесса выглаживания индентор считался абсолютно твердым, радиус индентора - $R = 3$ мм.

Целью проведения численного моделирования процессов с/без ультразвуковыми (УЗ) колебаниями индентора было определение влияния траектории движения индентора относительно движения детали на формирование напряженно-деформированного состояния (НДС) поверхностного слоя детали, также определение влияния УЗ колебаний в целом на картину распределения остаточных напряжений. Материалом детали является титановый сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V). Механические свойства сплава ВТ6 в холодном состоянии были взяты из базы материалов программного комплекса QForm.

Эффективным способом повышения сопротивления знакопеременным нагрузкам, которые могут привести к возникновению микротрещин и в итоге к выходу узла из строя, повышение ресурса детали и узла отдельно, и узла в целом, является поверхностно-пластическое деформирование (ППД) на финишной стадии механической обработки детали.

В ряде работ одним из способов интенсификации процесса выглаживания является использование дополнительного ультразвукового нагрузки, процесс УЗ выглаживания.

Поэтому целью данного исследования было оценить влияние траектории движения индентора (инструмента) на НДС приповерхностного слоя детали.

Второй вариант моделирования выглаживания - УЗ выглаживания с поперечными УЗ колебаниями (вдавливания индентора происходит перпендикулярно к поверхности детали). Процесс УЗ выглаживания состоит из одного этапа:



Рис. 1. Схема выглаживания сферической головки эндопротеза тазобедренного сустава

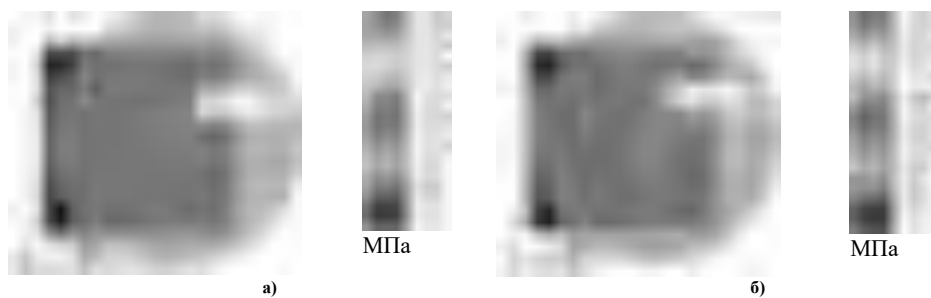


Рис. 2. Давление на заготовку при шлифовании без УЗ колебаний:
а - со скоростью шлифования $V_x = 300$ мм / с; б - со скоростью шлифования $V_x = 600$ мм / с

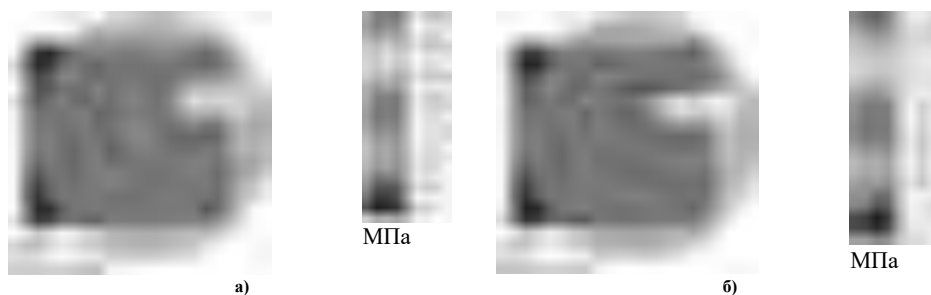


Рис. 3. Давление на заготовку при шлифовании с продольно-поперечными УЗ колебаниями со скоростью шлифования $V_x = 300$ мм / с:

а - крайнее нижнее положение индентора; б - начало обратного движения индентора

Давление на заготовку больше во время шлифования без УЗ колебаний, чем во время шлифования с УЗ колебаниями. Во время шлифования с помощью УЗ колебаний, независимо от типа колебаний, давление на заготовку в центральной части будет почти одинаковым, давление больше при продольно-поперечных УЗ колебаниях по периферии зоны. Площадь давления на заготовку, как во время вдавливания, так и во время подъема инструмента, будет больше при продольно-поперечных колебаниях (через маятниковый движение инструмента).

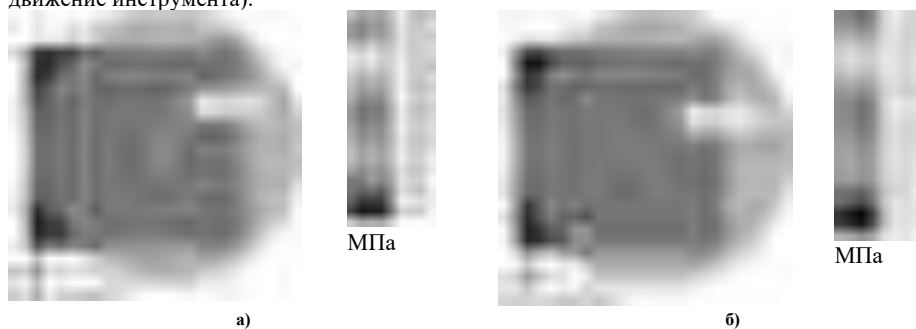


Рис. 4. Давление на заготовку при шлифовании с продольно-поперечными УЗ колебаниями со скоростью шлифования $V_x = 600$ мм / с:

а - крайнее нижнее положение индентора; б - начало обратного движения индентора

Большой износ инструмента будет происходить во время выглаживания без УЗ колебаний. Износ инструмента в 25-30 раз меньше при выглаживания с помощью УЗ колебаний. Правда, стоит отметить, что в расчете не учитывается динамическая составляющая воздействия инструмента на поверхность.

Таким образом, установлено, что выглаживания с помощью продольно-поперечных УЗ колебаний позволяет получить большие значения остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое. Применение УЗ колебаний уменьшает температуру в зоне деформации и износ инструмента. Использование продольно-поперечных УЗ колебаний во время выглаживания позволит обрабатывать титановые сплавы на высоких скоростях, не разрушая поверхность детали. Эффективность выглаживания с УЗ колебаниями зависит от линейной скорости материала детали в зоне контакта

Моделювання процесу поверхневого пластичного деформування головки ендопротеза тазостегнового суглоба

А.Д. Лавріненко, В.П. Мілешенко

Анотація: у роботі проведено аналіз технології отримання головки ендопротеза кульшового суглоба. Для поверхневої пластичної деформації головки був обраний процес алмазного вигладжування. Для зменшення зносу інструменту використовується ультразвук. В роботі досліджено вплив траєкторії руху деформуючого інструменту на його знос. Визначено напружено-деформований стан поверхневого шару матеріалу, встановлені енергосилові параметри процесу, температура заготовки в місці контакту з інструментом.

Ключові слова: ендопротез кульшового суглоба, метод кінцевих елементів, титанові сплави, поверхнева пластична деформація

Modeling the process of surface plastic deformation of the head of the hip joint endoprosthesis

A. Lavrinenko, V. Mileschenko

Abstract: The paper analyzes the technology of obtaining the head of the hip joint endoprosthesis. For surface plastic deformation of the head, the diamond burnishing process was chosen. Ultrasound is used to reduce tool wear. The paper investigates the influence of the trajectory of the deforming tool on its wear. The stress-strain state of the surface layer of the material is determined, the energy-power parameters of the process, the temperature of the workpiece at the point of contact with the tool are established.

Key words: hip joint endoprosthesis, finite element method, titanium alloys, surface plastic deformation

Список литературы

1. Титан: Совместное издание программы ООН по окружающей среде: пер. с англ. М.: Медицина, 1986.
2. ISO 5832-2-2014 Имплантаты для хирургии. Металлические материалы. Часть 2. Нелегированный титан.
3. Мамонов А.М., Скворцова С.В., Спектор В.С., Нейман А.П., Лукина Е.А., Митропольская Н.Г. Принципы построения комплексных технологических процессов производства имплантатов из титановых сплавов, включающих вакуумные ионно-плазменные нанотехнологии / Титан. 2012. №3, с. 45-50.
4. Ильин А.А., Скворцова С.В., Мамонов А.М. и др. Влияние термодиффузионной обработки на структуру и свойства отливок из титановых сплавов / Ми ТОМ. 2002. № 5. с.10-13.
5. Скороход В. В., Уварова І. В., Рагуля А. В. Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах. Київ : Академперіодика, 2001. 180 с.

УДК 621.77

Моделирование процесса штамповки ножки эндопротеза тазобедренного сустава

А.Д. Лавриненков, В.П. Милещенко, Н.К. Злочевская

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина.

Аннотация: в работе проведено моделирование ножки эндопротеза тазобедренного сустава методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM. В качестве заготовки были выбраны цилиндрическая заготовка, треугольная и профилированная, которая может быть получена вальцеванием. Были установлены энерго-силовые параметры процесса, напряженно-деформированное состояние материала, температура материала. Также представлены результаты анализа современного состояния технологии получения ножки эндопротеза.

Ключевые слова: эндопротез тазобедренного сустава, метод конечных элементов, титановые сплавы, горячая штамповка

Титан и его сплавы широко используются в медицине из-за хорошей биологической совместимости и низкого модуля упругости. Одним из примеров применения титана в медицине - полная замена тазобедренного сустава. Все части эндопротеза, как ножка, так и головка должны соответствовать высоким параметрам качества (механические свойства, микроструктура, поверхность и поверхностный слой и т.д.). На сегодняшний день заготовки для них изготавливают в основном литьем с последующей механической обработкой. Высокий процент брака, а также низкие механические свойства литого материала ставят задачу замены литья на горячую объемную штамповку.

Эндопротезы тазобедренного сустава изготавливают из металлов и сплавов, обладающих хорошей биосовместимостью с организмом человека. Круг материалов, удовлетворяющего критерию биосовместимости в теле человека, достаточно ограничен. К таким материалам относятся Pt, Ta, Nb, Zr, Ti и титановые сплавы.

Важнейшее преимущество титановых сплавов перед другими конструкционными материалами - это их высокая удельная прочность и жаропрочность вместе с хорошей коррозионной стойкостью в большинстве агрессивных сред. Приняв во внимание указанные характеристики были предприняты попытки использования титановых сплавов в ортопедии для изготовления эндопротезов тазобедренного сустава [1-6].

Эффективным методом обработки титановых сплавов является горячая объемная штамповка, внедрение которого способствует улучшению структуры, свойств и эксплуатационных характеристик изделий. Это также приводит к значительному повышению технико-экономических показателей производства [7-12].

В работе [13] авторами проведено исследование по разработке технологии производства титановых эндопротезов методом горячей объемной штамповки. В указанной работе более подробно рассматривается вопрос необходимых параметров штамповки, выполнен расчет исходных форм заготовок предварительно вальцованных с цилиндрических прутков, рассчитано необходимое усилие процесса, разработаны основное оборудование и проведены расчеты на прочность его основных элементов.

На рис. 1 показано сконструированную модель в сборке эндопротеза тазобедренного сустава, состоящий из ножки 1 и головки 2.

Для горячей штамповки с единичных заготовок ножки эндопротеза тазобедренного сустава выбрали три вида исходных заготовок (рис. 2):

1. Цилиндрическая заготовка из прутка (рис. 2, а) 2. Треугольная заготовка с плиты (рис. 2, б) 3. профилированная заготовка (рис. 2, в).

Оба компонента эндопротеза тазобедренного сустава изготавливают из титанового сплава ВТ6. Аналог в программном комплексе DEFORM - материал Ti-6Al-4V (20-1000°С).

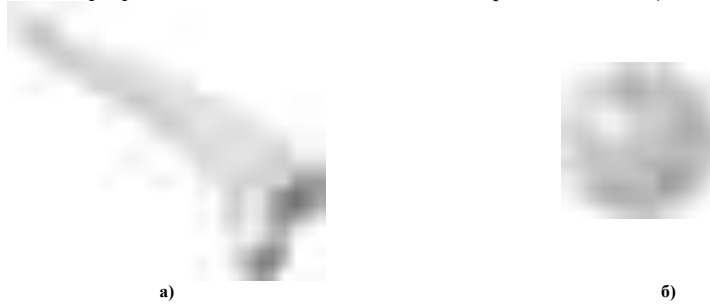


Рис. 1. Компоненты эндопротеза тазобедренного сустава:
а - ножка; б - головка

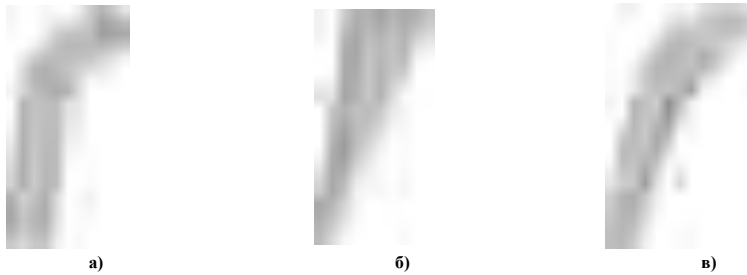


Рис. 2. Геометрии заготовок для горячей штамповки ножки эндопротеза:
а - цилиндрическая согнутая заготовка; б - треугольная заготовка; в - профилированная заготовка

При моделировании горячей штамповки Быкова ножки эндопротеза тазобедренного сустава с Ti-6Al-4V (титановый сплав ВТ6) с единичных заготовок задавались следующие параметры и граничные условия:

- температура заготовки – 900°С, температура инструмента – 900°С;
- скорость деформирующего инструмента - $V_0 = 2$ мм/с;
- коэффициент трения по Зибеля $\mu = 0,3$;
- модель материала заготовки – пластическая

На рис. 3 показан вид сверху на нижнюю вставку с исходной заготовкой в начале штамповки и после штамповки для цилиндрической изогнутой заготовки (рис. 3, а), для треугольной заготовки (рис. 3, б) и для профилированной заготовки (рис. 3 в).

В результате моделирования горячей штамповки ножки эндопротеза с единичных заготовок также установлены силовые режимы деформирования, напряженно-деформированное состояние заготовки, распределение температуры и вероятность разрушения.

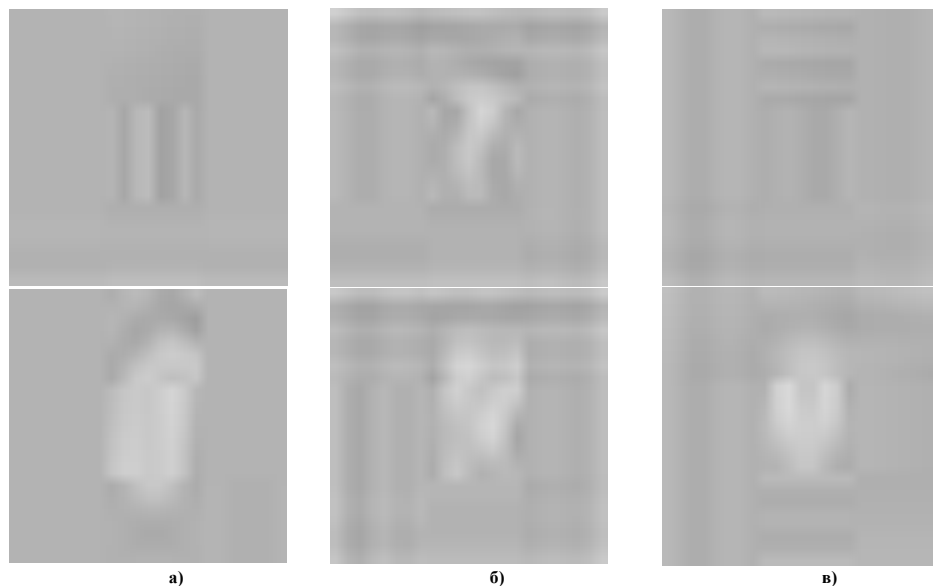


Рис. 3. Вид сверху на нижнюю штамповую вставку с заготовкой в начале штамповки и в конце:
а - цилиндрическая согнута заготовка; б - треугольная заготовка; в - профилированная заготовка

При штамповке ножки эндопротеза тазобедренного сустава с цилиндрической изогнутой заготовки максимальное усилие деформирования составляет 4500 кН при перемещении 24 мм; треугольной заготовки - 6400 кН при перемещении 17 мм; с профилированной заготовки - 4900 кН при перемещении 24 мм.

На рис. 4 показано напряженно-деформированное состояние, распределение температуры и критерия разрушения по объему. Распределение интенсивности напряжений σ_i показано на рис. 4, а, распределение интенсивности деформаций ϵ_i - рис. 4, б, распределение средних напряжений $\sigma_{сер}$ - рис. 4, в, распределение температуры T - рис. 4, г.

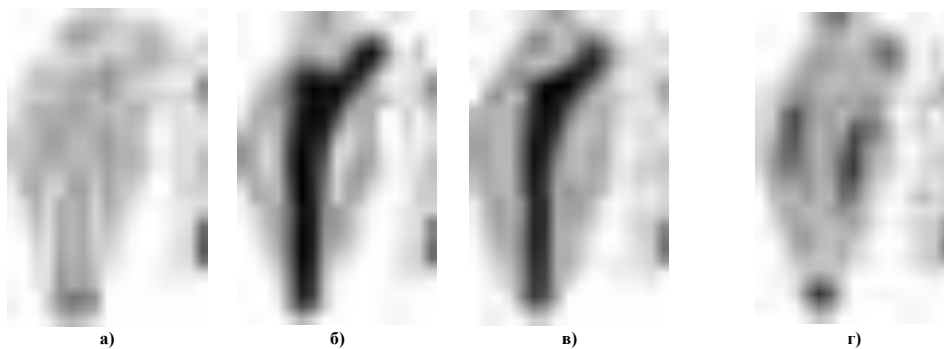


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние и распределение температуры по объему штамповки из профилированной заготовки

В результате работы проведено моделирование в программе DEFORM горячей штамповки ножки эндопротеза из трех видов единичных заготовок (цилиндрической

изогнутой, треугольной и профилированной). Приведены расчетные схемы процессов и граничные условия процесса. Определены силовые режимы деформирования, напряженно-деформированное состояние штамповки в конце деформирования. Показано распределение температур по объему штамповки и распределение критерия разрушения.

Моделювання процесу штампування ніжки ендопротеза тазостегнового суглоба

А.Д. Лавріненко, В.П. Мілешенко, Н.К. Злочевська

Анотація: у роботі проведено моделювання ніжки ендопротеза тазостегнового суглоба методом скінчених елементів в програмному комплексі DEFORM. Форма заготовки були циліндрична, трикутна і профільована, яка може бути отримана вальцюванням. Були встановлені енерго-силові параметри процесу, напружено-деформований стан матеріал заготовки та його температура. Також представлені результати аналізу сучасного стану технології отримання ніжки ендопротеза.

Ключові слова: ендопротез тазостегнового суглоба, метод скінченого елементів, титанові сплави, гаряче штампування

Modeling the process of stamping the stem of the hip joint endoprosthesis

A. Lavrinenkov, V. Mileschenko, N. Zlochevska

Abstract: In this work, the modeling of the stem of the hip joint endoprosthesis was carried out using the finite element method in the DEFORM software package. As a workpiece, a cylindrical workpiece, triangular and profiled, which can be obtained by rolling, was chosen. The energy-force parameters of the process, the stress-strain state of the material, and the temperature of the material were established. The results of the analysis of the current state of technology for obtaining the stem of the endoprosthesis are also presented.

Key words: hip joint endoprosthesis, method of finite element, titanium alloys, hot stamping

Список литературы

1. Ильин А.А. Применение титана и материалов на его основе в медицине / А.А. Ильин, В.Н. Карпов, А.М. Мамонов, М.Ю. Коллеров // Тi – 2006 в СНГ, 2006. С. 324-327.
2. Ильин А.А. Применение материалов на основе титана для изготовления медицинских имплантатов / А.А. Ильин, С.В. Скворцова, А.М. Мамонов, В.Н. Карпов // Металлы. 2002. № 3. С. 97-104.
3. Ильин А.А. Применение титана и его сплавов в медицине / А.А. Ильин, С.В. Скворцова, А.М. Мамонов и др. // Перспективные технологии легких и специальных сплавов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. С. 399-408.
4. Ильин А.А. Титановые сплавы в эндопротезировании тазобедренного сустава / Н.В. Загородный, А.А. Ильин, В.Н. Карпов и др. // Вестник травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова. 2000. № 2. С. 73-76.
5. Nillert H.G. Crevice corrosion of cemented titanium alloy stems in total hip replacement / Nillert H.G., Broback L.G. // Clinical orthopedics and related research. 1996. N 333. P. 51-75.
6. Semlitsch M. Titanium-aluminium-niobium alloy, development for biocompatible, high strength surgical implants / Semlitsch M., Staub F., Weber H. // Sonderdruck aus biomedizinische technik. 1985. N 30 (12). P. 334-339.
7. Атрошенко А.П. Горячая штамповка труднодеформируемых материалов / А.П. Атрошенко, В.И. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 287 с.
8. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов – М.: МИСиС, 1996. – 416 с.
9. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М.: Машиностроение, 1976. – 450 с.
10. Фиглин С.З. Изотермическое деформирование металлов / С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с.
11. Мажарова Г. Е., Комановский А. З., Чечулин Б.Б. Обработка титановых сплавов давлением.— М.: Металлургия, 1977.— 96 с.
12. Никольский Л.А. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов / Л.А. Никольский, С.З. Фиглин, В.В. Бойцов и др. — М.: Машиностроение, 1975. — 285 с.
13. Цыдыпов Б. С., Лыгденов Б.Д. Разработка технологии производства титановых эндопротезов // Успехи современного естествознания. — 2015. — № 1–8. — С. 1351–1354.

УДК 621.77

Вплив технологічних умов зовнішнього обтиснення на розмірні параметри отриманих трубчастих виробів з профільними поверхнями

Розов Ю.Г.; Федорчук Д.Д.; Селіверстов І.А.

Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна

Анотація: Досліджено розмірні характеристики отриманих методами холодної пластичної деформації трубчастих виробів з профільованою внутрішньою поверхнею в залежності від технологічних факторів, таких як: зусилля та ступінь обтиснення. Визначено відхилення конструктивних елементів трироlikової волоки, як слабкі місця в полі пружних деформацій засобами моделювання та виконано експериментальні вимірювання відтискань, що впливають на якість готових трубчастих виробів. Розглянуто розмірне співвідношення профілю каналу з комбінацією ділянок по дузі кола з евольвентою у різних їх співвідношеннях та кута евольвентного профілю

Ключові слова: обтиснення, трироlikова волока, профільована поверхня, трубчасті вироби

Основними методами отримання трубчастих виробів з профільованою внутрішньою поверхнею на сьогодні є радіальне кування (гаряче або холодне) [1], обтиснення в конічній матриці з рухомою оправкою [2] та деформуюче протягування — процес отримання отворів у деталях методом холодом ступінчастого пластичного деформування яке відомо як дорнування ("Heym", "Sauer", "Browning", "Winchester", "Blaser", "Mauser", "Cezka Zbrojovka", "Remington", "Steyr-Mannlicher") [3, 4]. Технологія кування потребує значних виробничих площ для розташування і наявності спеціального технологічного обладнання ("Lothar Walter", "Shillien", "Hart", "Weatherby", "Bergara", "Barrels Factory"). В свою чергу деформуюче протягування супроводжується наявністю високого контактного тиску в зоні взаємодії інструменту та оброблюваного виробу, відбувається адгезійне схоплювання в місцях поперечних перетинів з різкою зміною геометрії каналу.

Альтернативою може стати технологія зовнішнього обтиснення неприводними роликками з проштовхуванням деталі на профільній оправці [5]. Для цього використовуються три- або чотирироlikова волока (рис. 1.) як технологічне пристосування, в якому профільна оправка вкладається в циліндричну трубчасту заготовку подається за допомогою пресу крізь циліндричний отвір, що укладають зовні неприводні роликки на регульованих опорах безстанинного типу.

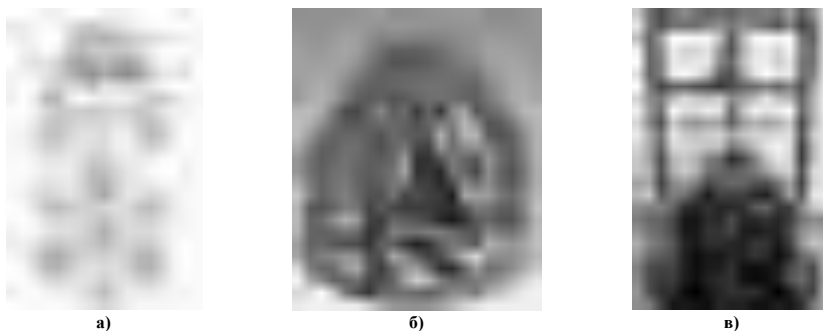


Рис. 1. Технологічне пристосування для виготовлення трубчастих виробів з профільованою внутрішньою поверхнею на оправці: а) - схема трироlikової волоки, б) - САD-модель, в) - виготовлений дослідний зразок

Відомо, що тиск по контактній поверхні уздовж твірної профілю каналу розподіляється не рівномірно [3, 6], тому вплив технологічних факторів таких як: величина та швидкість обтиснення, кількість проходів, є впливовим фактором, щодо розмірної якості отримуваних виробів та їх механічних властивостей.

В роботі поставлено за мету дослідити розмірну точність при холодному пластичному деформуванні внутрішнього каналу з комбінованою поверхнею діляниць кола з евольвентою в різним співвідношенням їх діляниць і кутом евольвентного профілю α (табл. 1.)

Таблиця 1.

Приклади теоретичних перерізів каналу трубчастого виробу в комбінації діляниць кола та евольвенти

Кількість діляниць і кут евольвентного профілю			
чотири ділянки		вісім діляниць	
$\alpha=90^\circ$	$\alpha=70^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=35^\circ$
			

Було виготовлено конічну заготовку з внутрішнім отвором (рис. 2.) та виконано її обробку зовнішнім обтисненням з фіксацією зусилля навантаження через динамометр стиснення (ДОСМ-3-0,2).



Рис. 2. Схема і загальний вигляд оброблюваної заготовки

Заготовку із збільшенням по конусу зовнішньої поверхні було обрано з метою контрольованого визначення ступеню обтиснення після обробки та можливістю плавного збільшення зусилля проштовхування. Виміряні значення зусилля та ступеню пластичної деформації у відповідному перерізі наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

№ перерізу	Позначення перерізів деталі для вимірювання згідно рис. 2.									
	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	9-9	10-10
Розмір заготовки в перерізі, мм	18	18,3	18,6	18,9	19,2	19,6	20	20,4	20,8	21,1
Розмір деталі в перерізі після волочіння, мм	16,9	17,4	17,7	17,6	17,8	18	18,2	18,6	19	21,1
Зусилля осьового навантаження на кожному перерізі, Н	1265	1320	1441	1595	1760	1859	2420	2563	2761	3311

Технологія обтиснення неприводними роликми хоча і знижує ризик адгезійного зчеплення матеріалу заготовки з оправкою, однак потребує високого рівня жорсткості місць кріплення роликів волоки їх міцності так і усіх несучих елементів технологічного обладнання. на рис. 3. показані результати моделювання пружно-напруженого стану трироlikової волоки.

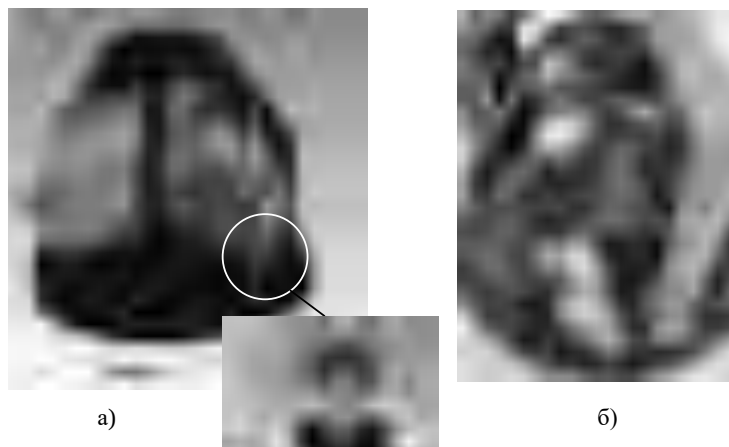


Рис. 3. Пружно-напружений стан трироlikової волоки: а) - результати моделювання; б) - експериментальне визначення

Експериментально отримано ряд значень під час проштовхування конічної заготовки, яка надає можливість поступово збільшувати вимірювані величини з метою їх контролю та

відповідним забезпеченням ступеню обтиснення, що забезпечує якість внутрішніх поверхонь контактуючих з внутрішньою оправкою.

Влияние технологических условий внешнего обжатия на размерные параметры полученных трубчатых изделий с профилированными поверхностями

Розов Ю.Г.; Федорчук Д.Д.; Селиверстов И.А.

Херсонский национальный технический университет, Херсон, Украина

Аннотация: Исследованы размерные характеристики полученных методами холодной пластической деформации трубчатых изделий из профилированной внутренней поверхностью в зависимости от технологических факторов, таких как: усилия и степень обжатия. Определены отклонения конструктивных элементов трехроlikовой волоки, как слабые места в поле упругих деформаций средствами моделирования и выполнены экспериментальные измерения отжиманий, влияющие на качество готовых трубчатых изделий. Рассмотрены соразмерное совпадение профиля канала с комбинацией участков по дуге окружности с эвольвентой в различных их соотношениях и угла эвольвентного профиля

Ключевые слова: обжатие, трехроlikовая волока, профилированная поверхность, трубчатые изделия

Influence of technological conditions of external reduction on the dimensional parameters of the obtained tubular products with profiled surfaces

Yu.G. Rozov; D.D. Fedorchuk; I.A. Seliverstov

Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

Abstract: Investigated the dimensional characteristics of tubular products obtained by cold plastic deformation from a profiled inner surface, depending on technological factors, such as: efforts and the degree of reduction. The deviations of the structural elements of the three-roller die are determined as weak points in the field of elastic deformations by means of modeling and experimental measurements of push-ups, which affect the quality of finished tubular products, are carried out. A commensurate coincidence of the channel profile with a combination of sections along an arc of a circle with the involute in their various ratios and the angle of the involute profile is considered

Keywords: reduction, three-roller die, profiled surface, tubular products

Список літератури

1. Тюрин В.А., Лазоркин В.А., Поспелов И.А., Флаховский Х.П. Ковка на радиально-обжимных машинах. М.: Машиностроение, 1990. - 256 с.
2. Бардачев Ю.Н. Компьютерное моделирование процесса обжатия трубчатой заготовки на подвижной оправке в гладкой конической матрице/ Бардачев Ю.Н., Розов Ю.Г.// Проблеми інформаційних технологій. 2015, №18. - С. 6-13.
3. Шейкін С. Є. Про контактну взаємодію твердосплавних деформуючих протяжок із заготовкою при формоутворенні пазів в отворах трубчастих виробів/ С.Є. Шейкін, О.В. Грушко, В.В. Мельниченко, С.Ф. Студенець, І.Ю. Ростоцький, Д.В. Єфросінін, Я.В. Мельниченко// Науковий журнал Надтверді матеріали, 2021, №3. - С. 91-101.
4. Розенберг О.А. Механика взаимодействия инструмента с изделием при деформирующем протягивании. Київ: Наук. думка, 1981. 288 с.
5. Розов Ю. Г. Моделирование і конструктивне забезпечення технології виготовлення трубчастих виробів з профільною поверхнею / Ю. Г. Розов, Д. О. Дмитрієв, С.А.Русанов, Д. Д. Федорчук // Вісник Херсонського національного технічного університету. - Херсон. ХНТУ. - 2020. - №3 (74), С. 38-44.
6. Цеханов Ю.А., Шейкін С.Е. Механика формообразования заготовок при деформирующем протягивании. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2001. 201 с.

УДК 621.721

Штапування фланців на заготовках гільз із створенням необхідної макроструктури

В.Л. Калюжний, О.С. Ярмоленко, К.Л. Марчук, А.М. Бондарь

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Анотація: в роботі розглянуто моделювання методом скінченних елементів процесів гарячого зворотного видавлювання полого напівфабрикату з виступом на зовнішній поверхні донної частини і калібрування цієї частини з утворенням фланця. Визначені зусилля деформування, розподіли питомих зусиль на інструменті, напружений стан при максимальній величині зусилля та кінцевий деформований стан. Отримані форма і розміри напівфабрикату після видавлювання і заготовки гільзи після калібрування. Розроблені конструкції штампів для реалізації видавлювання та калібрування.

Ключові слова: зворотне видавлювання, калібрування, метод скінченних елементів, зусилля, питомі зусилля, напруження, деформації, конструкція штампів.

При виробництві із латуні або маловуглецевої сталі заготовок гільз для артилерійського озброєння використовуються наступні операції штапування у такій послідовності: гаряче чи холодне зворотне видавлювання для отримання порожнистих напівфабрикатів із стінкою постійної товщини по висоті; гаряче або холодне витягування з потоншенням чи ротаційне видавлювання для зменшення товщини стінки та збільшення висоти напівфабрикатів та гарячий або холодний обтиск [1]. При цьому отримується фланець на зовнішній поверхні гільзи для вилучення її із ствола артилерійського озброєння. Фланець витримує певні зусилля при вилученні і повинен мати необхідні механічні властивості для забезпечення надійності при разовому і довговічності при багаторазовому використанні гільзи. Підвищення таких показників можливо завдяки створенню відповідної макроструктури металу в місці переходу фланця у донну частину гільзи.

Метою роботи є використання методу скінченних елементів для встановлення технологічних параметрів пластичного формоутворення фланця із створенням необхідної макроструктури у zdeформованому металі та розроблення штапкового оснащення.

Розрахунковий аналіз вісесиметричних задач проведений в програмному комплексі DEFORM із застосуванням циліндричної системи координат.

Перший перехід штапування – гаряче зворотне видавлювання. Вихідна циліндрична заготовка із сталі 20 мала діаметр $D_0=109,6$ мм і висоту $H_0=32,7$ мм. Температурний інтервал гарячого штапування знаходився в межах $1000\div 850^\circ\text{C}$. Тертя враховане по Зібелю з коефіцієнтом тертя $\mu=0,25$. Швидкість деформування складала $V_0=60$ мм/сек. Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту при видавлюванні показані на рис. 1. Положення інструменту на початку видавлювання зображено на рис. 1а. Вихідна заготовка 1 встановлена на плиті 2 з центруванням по матриці 3. Деформування здійснюється пуансоном 4. При опусканні пуансона 4 отримується напівфабрикат 5, що має виступ на донній частині зі сторони порожнини та круговий виступ на нижньому торці (рис. 1б). Виступ на торці необхідний для формоутворення фланця на подальшій операції штапування. При зворотному переміщенні пуансона напівфабрикат залишається в матриці (рис. 1в) та виштовхується з неї за допомогою плити 2 (рис. 1г).

На рис. 2 приведені залежності зусилля видавлювання від переміщення пуансона, розподіли нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях zdeформованої

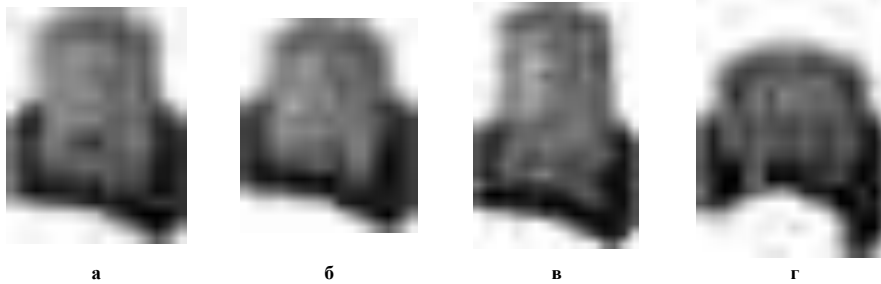


Рис. 1. Розрахункові положення в розрізі деформуючого інструменту при видавлюванні: а – на початку видавлювання, б – в кінці видавлювання, в – при вийманні пуансона, г - при виштовхуванні напівфабрикату

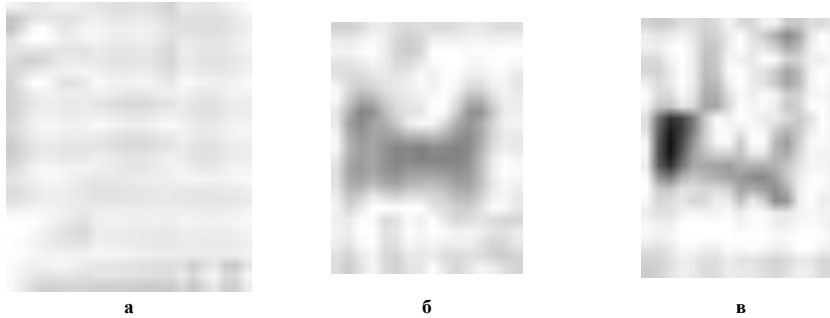


Рис. 2. Залежність зусилля видавлювання від переміщення пуансона, розподіли нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях і розподіл інтенсивності деформацій ϵ_i : а – залежність зусилля, б – розподіли σ_n , в – розподіл ϵ_i

заготовки з інструментом при максимальному значенні зусилля деформування та розподіл інтенсивності деформацій. Для проектування штампового оснащення потрібно знати розподіл питомих зусиль на деформуючому інструменті. Ці зусилля можна оцінити по розподілу нормальних напружень σ_n на поверхнях здеформованої заготовки з інструментом, які виникають при максимальній величині зусилля

видавлювання. Тут і надалі представлена половина здеформованої заготовки, тонкими лініями показаний деформуючий інструмент, а розміри по вісях наведені в міліметрах. На рис. 3 приведена конструкція штампку для реалізації видавлювання, а також зображені розміри напівфабрикату.



Рис. 4. Конструкція штампку для видавлювання

Після видавлювання цей напівфабрикат підлягає деформуванню двома переходами витягування з потоншенням. Потім здійснюється операція холодного калібрування. На рис. 3 представлені положення в розрізі деформуючого інструменту на різних стадіях калібрування та отримана заготовка гільзи. Положення на початку калібрування зображене на рис. 3а. Напівфабрикат 1 після витягування розміщений в матриці 2 на опорі 3. При опусканні

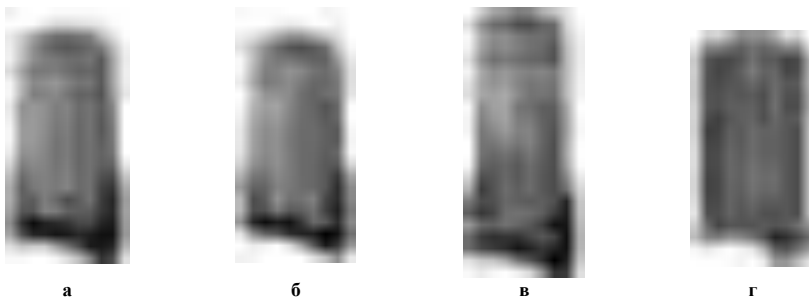


Рис. 3. Положення в розрізі деформуючого інструменту на різних стадіях калібрування та отриманий напівфабрикат: а – положення на початку калібрування, б – положення в кінці калібрування, в – положення при вилученні пуансона, г - напівфабрикат

пуансона 4 здійснюється отримання внутрішніх розмірів донної частини та формоутворення фланця на зовнішній поверхні напівфабрикату 5 (рис. 3б). На рис. 3в показане положення при вилученні пуансона із отриманого напівфабрикату, який наведений на рис. 3г.

На рис. 4 представлені силові режими калібрування, питомі зусилля на інструменті та розподіл інтенсивності деформацій у стінці. Наведене формоутворення фланця дозволяє створити відповідну макроструктуру і механічні властивості у здеформованому металі та забезпечити службові властивості гільзи.

На рис. 5 приведена конструкція штампів для виконання переходу калібрування на гідравлічному пресі.

Висновки.

Методом скінчених елементів встановлені технологічні параметри пластичного формоутворення фланця на заготовці гільзи із маловуглецевої сталі. На першій операції штампування зворотним видавлювання для цього утворюється круговий виступ на торці донної частини. При виконанні калібрування здійснюється кінцеве утворення фланця. Для вказаних операцій встановлені зусилля деформування, розподіли нормальних напружень на контактуючих поверхнях здеформованої заготовки з інструментом, напружено-деформований стан металу, отримані розподіли інтенсивності деформацій. Приведені конструкції штампів для виконання видавлювання і калібрування.

Штамповка фланцев на заготовках гильз с образованием необходимой макроструктуры
В.Л. Калужный, А.С. Ярмоленко, К.Л. Марчук, А.М. Бондарь

Аннотация: в работе рассмотрено моделирование методом конечных элементов процессов горячего обратного выдавливания полой заготовки с выступом на внешней поверхности донной части и холодной калибровки этой части с образованием фланца. Определены усилия деформирования, распределения удельных усилий на инструменте, напряженное состояние при максимальной величине усилия та конечное деформированное состояние. Получены форма и размеры полуфабриката после выдавливания и заготовки гильзы после

калібровки. Разработаны конструкции штампов для реализации выдавливания и калибровки.

Ключевые слова: обратное выдавливание, калибровка, метод конечных элементов, усилие, удельное усилие, напряжения, деформации, конструкция штампа.

Stamping of flanges on sleeve blanks with the formation of the required macrostructure

V. Kaliuzhnyi, A. Yarmolenko,
K. Marchuk, A. Bondar

Abstract: the paper considers the modeling by the finite element method of the processes of hot reverse extrusion of a hollow billet with a protrusion on the outer surface of the bottom part and cold calibration of this part with the formation of a flange. The deformation forces, the distribution of specific forces on the tool, the stress state at the maximum value of the force, and the final deformed state are determined. The shape and dimensions of the semi-finished product after extrusion and the product after calibration have been obtained. Designs of dies for the implementation of extrusion and calibration have been developed.

Key words: back extrusion, calibration, finite element method, force, specific force, stresses, deformations, die design.

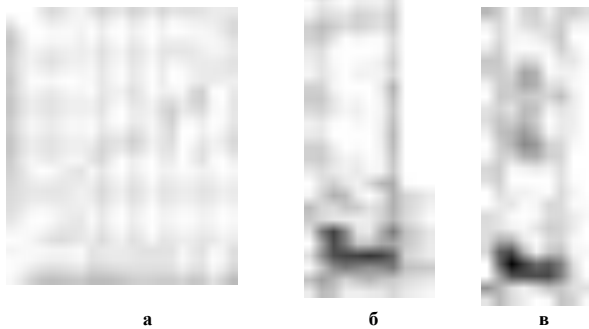


Рис. 4. Зусилля калібрування, питомі зусилля на інструменті та розподіл інтенсивності деформацій: а – залежність зусилля калібрування від переміщення пуансона, б – розподіл нормальних напружень на інструменті, в – розподіл ϵ_i



Рис. 5. Конструкція штампів для калібрування

Список літератури.

1. Калюжний В.Л., Бісик С.П., Калюжний О.В., Горностаї В.М. Підвищення продуктивності та зниження витрат металу при штампуванні латунних гільз великої довжини. Озброєння і військоватехніка. Київ: ЦНДІ ОВТ ЗС України. 2021. N 2. С. 26-34.

УДК 621.983

Силові режими та напружено-деформований стан металу при холодному витягуванні з потоншенням через три матриці порожнистого виробу із маловуглецевої сталі

В.Л. Капюжний, О.С. Ярмоленко, А.М. Бондарь

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

***Анотація:** в даній роботі нами розглянуто чисельне моделювання методом скінченних елементів одного з процесів деформації, а саме: холодне витягування з потоншенням через три матриці порожнистого виробу, що виготовлений з маловуглецевої сталі. Заготовка для даного процесу була отримана гарячим зворотним видавлюванням. В роботі було встановлено кінцевий деформований стан, напружений стан металу заготовки при максимальній величині зусилля та власне зусилля витягування. Також в роботі отримано кінцеві форми і розміри виробу. Крім того, розроблено конструкція штампів для реалізації витягування з потоншенням на гідравлічному пресі.*

***Ключові слова:** витягування з потоншенням, силові режими, метод скінченних елементів, деформації, напруження, конструкція штампів.*

Під час виробництва з маловуглецевих сталей заготовок для гільз середніх розмірів в переважній більшості використовуються такі операції штампування саме у такій послідовності: гаряче зворотне видавлювання (, що застосовується для отримання порожнистих напівфабрикатів зі стінкою незмінної товщини по всій висоті виробу); витягування з потоншенням або ротаційне видавлювання (, що використовується для зменшення самої товщини стінки, а також для збільшення висоти напівфабрикатів даної деталі); холодний обтиск. Сам процес гарячого зворотного видавлювання досить ретельно відпрацьований [1]. Найостанніші розробки в подібних процесах холодного обтиску за рахунок використання деформуючого інструменту спеціально розробленого профілю, а також холодного витягування з потоншенням, як правило забезпечують зменшення в два рази кількості переходів для отримання подібних виробів та значне підвищення ступеня деформації за один перехід [2-4]. Значне пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією під час витягування з потоншенням повинно забезпечити необхідні механічні властивості у здеформованому металі по всій висоті стінки заготовки гільзи. Застосування нами методу скінченних елементів (МСЕ) для розрахунку параметрів процесу витягування з потоншенням дозволяє значно зменшити час та витрати на саму підготовку виробництва виробів різної конфігурації.

Метою нашої роботи являється розроблення конструкцій штампового оснащення для процесу витягування з потоншенням та використання методу скінченних елементів для визначення технологічних параметрів даного процесу.

Розроблення пружно-пластичної математичної моделі та її розрахунковий аналіз проведено в програмному комплексі DEFORM з використанням циліндричної системи координат. Нами встановлена можливість саме такого витягування через три конусні матриці розташовані послідовно. На рис 1. приведені розміри половини вихідної заготовки, яка отримана за допомогою видавлювання. На рис. 1. і в подальшому розміри по всіх вісях вказані в міліметрах, а деформуючий інструмент зображений тонкими лініями. На рис. 2. зображені розрахункові положення деформуючого інструменту в розрізі на різних стадіях витягування. На рис. 2а. представлено положення на початку витягування. У першій матриці 2 розміщена вихідна заготовка 1. Друга і третя матриці (3 та 4) розташовані таким способом, щоб

наступний етап витягування починався після завершення деформування в попередніх матрицях.



Рис. 1. Розміри половин вихідної заготовки

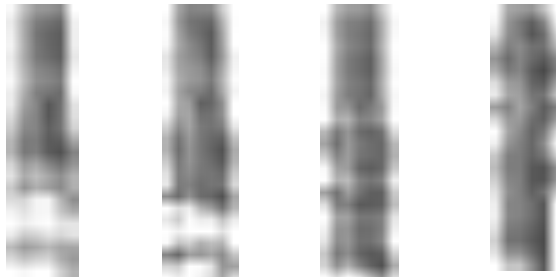


Рис. 2. Розрахункові положення деформуючого інструменту в розрізі при витягуванні: а – на початку процесу витягування, б – в першій матриці в кінці процесу витягування, в – у другій матриці в кінці процесу витягування, г – у третій матриці в кінці процесу витягування

Діаметр отвору в матриці 2 складає 113 міліметрів, в матриці 3 – 110 міліметрів, в матриці 4 – 109,2 міліметрів. Кут конусних поверхонь всіх матриць дорівнював 16° , висота калібруючого пояска отвору матриць – 2 міліметри, радіус закруглення пояска та конусної поверхні 2 міліметри. Коефіцієнтом тертя $\mu=0,08$ враховано тертя по Кулону. Швидкість переміщення пуансона дорівнює $V_0=7$ мм/сек. На рис. 2б. показано положення після витягування в 1-й матриці, на рис. 2в. - в 2-й матриці, на рис. 2г. - в 3-й матриці.

На рис. 3. приведені розподіли σ_n нормальних та осьових σ_z напружень при максимальній величині зусилля витягування, залежність зусилля витягування від переміщення пуансона.

Найбільша величина зусилля $P=867$ кН отримана при витягуванні в 1-й матриці (рис. 3а). Для вказаної величини зусилля $P=867$ кН представлені розподіли напружень σ_n (рис. 3б.) і σ_z (рис. 3в.). Під час витягування виникають значні величини розтягувальних напружень σ_z , що можуть бути причиною відриву стінки від донної частини. В наведеному випадку напруження σ_z величиною 660 МПа виникають тільки у зовнішніх шарах металу

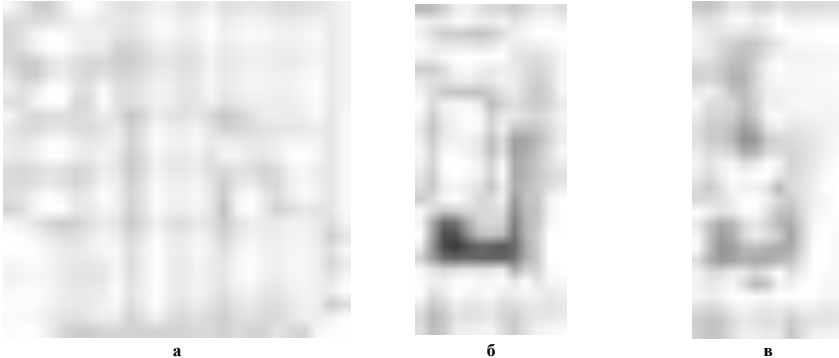


Рис. 3. Залежність зусилля P витягування від переміщення S пуансона, розподіл нормальних напружень σ_n на контактуючих поверхнях і розподіл осьових напружень σ_z : а – залежність зусилля, б – розподіл σ_n , в – розподіл σ_z стінки.

На рис. 4. нами представлені розподіли вичерпаного ресурсу пластичності, інтенсивності деформацій та температури у здеформованій заготовці після витягування в 3-й матриці. Якщо після витягування у 1-й матриці температура T металу в області торця стінки була в діапазоні $110\div 120^{\circ}\text{C}$, то витягування в 3-й матриці не призводить до підвищення температури T здеформованого металу в стінці, але натомість збільшується температура T донної частини (показано на рис. 4а). Відбувається нерівномірне пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією по всій висоті стінки. По розподілу інтенсивності деформацій ε_i можна оцінити нерівномірне пропрацювання структури металу по висоті стінки виробу (рис. 4б). В області торця стінки отримано $\varepsilon_i = 1,8$ з подальшим зменшенням до місця переходу стінки у донну частину ($\varepsilon_i = 0,35$). Аналогічний характер має розподіл вичерпаного ресурсу пластичності ψ здеформованого металу, що показано на рис. 4в. Найбільше значення вичерпаного ресурсу пластичності ($\psi = 0,8$) отримане в області торця стінки. При вичерпаному ресурсі пластичності $\psi = 1$ відбувається руйнування металу виробу. На рис. 5. Зображено загальний вигляд в розрізі після витягування з потоншенням та розміри здеформованої заготовки.

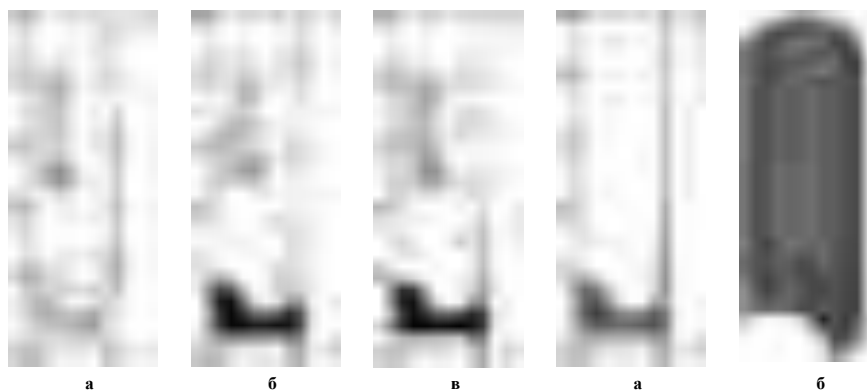


Рис. 4. Розподіли вичерпаного ресурсу пластичності ψ , температури $T(^{\circ}\text{C})$ та інтенсивності деформацій ε_i після витягування в 3-й матриці: а – розподіл $T(^{\circ}\text{C})$, б – розподіл ε_i , в – розподіл ψ

Рис. 5. Вигляд здеформованої заготовки та її розміри після витягування у 3-й матриці: а – розміри, б – вигляд у розрізі

На рис. 6. представлена розроблена конструкція штампу для реалізації витягування. Розроблена конструкція штампу може бути встановлена на гідравлічному пресі ДБ 2436 зусиллям 4 МН.

Висновки.

У даній роботі нами встановлені технологічні параметри витягування порожнистого виробу із маловуглецевої сталі з потоншенням через три матриці методом скінчених елементів. Також отримані кінцеві розміри виробу, розраховано напружено-деформований стан металу, встановлено розподіл нормальних напружень та зусилля витягування на контактуючих поверхнях здеформованої заготовки з інструментом. В роботі наведена конструкція штампу для виконання даного витягування.

Силовые режимы и напряженно-деформированное состояние металла при холодной вытяжке с утонением через три матрицы полого изделия из малоуглеродистой стали В.Л. Калюжный, А.С. Ярмоленко, А.М. Бондарь

Аннотация: В данной работе нами рассмотрено численное моделирование методом конечных элементов одного из процессов деформации, а именно: холодная вытяжка с утонением через три матрицы полого изделия, которое изготовлено из малоуглеродистой стали. Заготовка для данного процесса была получена горячим обратным выдавливанием. В работе было установлено конечное деформированное состояние, напряженное состояние металла заготовки при максимальной величине усилия и усилие вытяжки. Также в работе получены конечные форма и размеры изделия. Кроме того, разработана конструкция штампа для реализации вытяжки с утонением на гидравлическом прессе.

Ключевые слова: метод конечных элементов, вытяжка с утонением, усилие, деформации, напряжения, конструкция штампа.

Power modes and stress-strain state of metal during cold drawing with thinning through three matrices of a hollow article made of mild steel

V. Kaliuzhnyi, A. Yarmolenko, A. Bondar

Abstract: In this work, we considered a numerical simulation by the finite element method of one of the deformation processes, namely: cold drawing with thinning through three matrices of a hollow product made of mild steel. The blank for this process was obtained by hot back-extrusion. In the work, the final deformed state, the stressed state of the workpiece metal at the maximum value of the force and the drawing force were established. The final shape and dimensions of the product were also obtained in the work. In addition, a die design has been developed for the implementation of thinning drawing on a hydraulic press.

Key words: finite element method, stretching with thinning, stresses, force, die design, deformations.

Рис. 6. Розроблена конструкція штампу для витягування з потоншенням через три матриці

Список літератури.

1. Ковка и штамповка: Справочник в 4-х. т. М.: Машиностроение. 1986. т.2. Горячая объемная штамповка. Под ред. Е.И. Семенова. 1986. 592 стр.
2. Калюжный В.Л., Ярмоленко О.С. Інтенсифікація процесу холодного обтиску порожнистих напівфабрикатів для отримання виробів зі змінною товщиною стінки. Вісник КПІ ім. Ігоря Сікорського. Mechanics Andadvanced Technologies. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019, №1 (85). Стр. 111-117.
3. Калюжный О.В., Соколовська С.С. Визначення параметрів витягування з потоншенням зпрофільованим пуансоном порожнистих заготовок після видавлювання. Вісник НТУ «ХПІ»: Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії», Харків: НТУ «ХПІ». 2017. №36 (1257). С. 21-28.
4. Калюжный О.В., Калюжный В.Л. Інтенсифікація формоутворюючих процесів холодного листового штампування. Київ: ТОВ «Сік Груп Україна». 2015. 292 стр.

УДК 621.983.07:669.017

Development and implementation of innovative technologies for the manufacture of science-intensive engineering products from layered metal and metal-ceramic materials

R. Borys, O. Kholyavik

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Abstract: Achieved refined theoretical and experimental study of the process of manufacturing of bimetallic tubular elements extract from separate blanks. As a result of finite element modeling is justified favorable distribution of stresses and strains in the outbreak strain in the drawing with thinning to form a compound layer. It is shown experimentally formation of the compound when interacting layers. The results provide the basis for process improvement in future studies in this field.

Keywords: stress-strain state, components of stresses and strain rates, dissimilar metals, boundary surface, degree of deformation, surface relief, elongation with thinning, two-layer workpiece, initial geometrical parameters of workpiece.

Modern trends in the development of the machine-building industry are characterized by increased requirements for the quality and performance properties of products while reducing the cost of their production. To ensure the efficiency of mechanical engineering products in their designs are widely used various materials with high relative strength, as well as specific functional properties - aluminum and titanium alloys, steel ceramics and others.

One of the most pressing scientific and technical problems of using different materials in structures is to ensure the quality of the connection of parts made of dissimilar metals and alloys. For these purposes, layered tubular metal compositions (bimetallic tubular elements - BTE) are widely used and used as adapters for connecting pipelines in fuel and other systems. They ensure efficient connection of pipelines made of different metals.

Fierce competition of mechanical engineering products on the world market requires mobility of production, and discrete-unstable programs of product production - their production in single copies. Mobility of production can be provided at use of the universal equipment of the machine-building enterprises, and also at creation of technologies of manufacturing of bimetallic tubular elements from traditional semi-finished products, for example sheet semi-finished products of metals and alloys, with use of simple stamping equipment by drawing methods.

The actual scientific and practical problem of introduction of innovative technologies of manufacturing of products of science - intensive mechanical engineering from layered metal and metal - ceramic materials is solved in the work.

Based on the theory of plastic flow and mechanics of composite materials in the interaction of layers of different metals on the boundary surface, as well as extreme energy principles of plastic deformation. A mathematical model of the process of joint deformation of two dissimilar metals during drawing with thinning in the heated state is constructed. The relationship in the form of analytical dependences of the kinematics of the flow of layers, the degree of their deformation and the parameters of the stress-strain state on the boundary surface with the initial geometric parameters of the workpiece, mechanical properties of layers and geometry of the working surface of the matrix.

Based on numerical simulations in CAD / CAE ANSYS and DEFORM-3D systems, confirmation of the main analytical results at the angle of conicity of the matrix $4^\circ \dots 10^\circ$ is presented. It is also shown that at the exit of the deformation center on the boundary surfaces of the workpiece composed of two materials there are maximum compressive stresses and shear deformations near the surface, while the difference in axial strain rates is zero, which ensures the interaction of layers. To increase the range of contact stresses and contact time of the layers under load, it is proposed to use an additional angle $1^\circ \dots 2^\circ$ on the conical surface of the matrix.

Experimental studies were performed for various combinations of alloys: AMg5M + VT1-0, AMg5M + 12HN10T, AMg5M + L63 and others. Comparison of the calculated results with experimental data showed that the maximum error in the calculation of power parameters does not exceed 7... 10%, the advance of the layer with a lower yield strength does not exceed 9... 11%, deformation of layer thicknesses after drawing with thinning does not exceed 10... 14% for different values coefficients of mechanical inhomogeneity of metals. Metallographic analysis showed that the deformation of the wall thinning of 40... 50% between the layers creates a relationship that forms the connection of the layers. The shear strength at the boundary surface of the bimetallic joint is 85... 88% of the theoretical value of shear strength of the material with lower strength.

The problem of increase of durability of diffusion connection due to use of intermediate layers of metals which have good weldability with layers of metals of a bimetallic design is solved in work. To select the material of the intermediate layer, generalized tables of weldability of metals by different types of welding and an algorithm for selecting the material of the intermediate layer are created. It is established that the most effective for the application of the intermediate layer is the process of plasma spraying. The use of intermediate layers allowed to increase the shear resistance of bimetallic joints to 94-96% of the theoretical value.

To implement the plasma sputtering process, a low-power plasmatron with a remote anode was developed, for which rational values of the distance between the cathode and the remote anode at the level of 7-8 mm at an optimal arc current of 80 A, plasma-forming gas-argon flow rate 0, 16-0.17 m³/h, which provide the generation of a laminar plasma jet of maximum length with a temperature of 1300 - 1700°C at a distance of 120-140 mm from the nozzle cut.

The developed technology of plasma spraying provided realization of processes of drawing on a surface of metals of layers of ceramic powders clad by a vacuum-arc method. The application of layers of alumina powders clad with two-layer shells Ti-Al and Ti-Cu makes it possible to create wear- and corrosion-resistant coatings with low porosity for metal-ceramic structures.

Using a mathematical model, the optimal diameter of alumina particles is established, which provides heating of the particle to a temperature above the melting temperature of the refractory core, but below the evaporation temperature of the shell material.

Experimental studies of the properties of coatings showed that the lowest porosity (3-6%), the highest adhesion strength and corrosion resistance in solutions of hydrochloric and nitric acids has a coating based on powder clad with a two-layer shell of titanium and copper at the optimal mass fraction of copper in the coating levels of 5-10%. The increase in the polarization resistance of the coating system - the corrosive environment depends more on the thickness of the main coating layer than on the material and the thickness of the sublayer, which is associated with a decrease in the number of bonded pores.

Developed technical recommendations of plasma spraying with the use of clad ceramic powders for plasma spraying of protective coatings helps to prevent the development of microcracks in individual deformed particles, increase the wear resistance of coatings in 5 - 6 times, corrosion and erosion resistance in 2-3 times, bending strength - bending composition metal-ceramic coating by 20%.

Инновационные технологий изготовления изделий наукоемкого машиностроения из слоистых металлических и металлокерамических материалов

Р.С. Борис, О.В. Холявик

Аннотация: Выполнено уточненное теоретическое и экспериментальное обоснование процесса изготовления биметаллических трубчатых элементов вытяжкой из раздельных заготовок. В результате конечно-элементного моделирования обосновано благоприятное распределение напряжений и деформаций в очаге деформирования при вытяжке с утонением для формирования соединения слоев. Экспериментально показано образование соединения при взаимодействии слоев. Полученные результаты дают основу для усовершенствования процесса в последующих исследованиях в этой отрасли.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, компоненты напряжений и скоростей деформаций, разнородные металлы, граничная поверхность, степень деформации, рельеф поверхности, вытяжка с утонением, двухслойная заготовка, исходные геометрические параметры заготовки.

Інноваційні технології виготовлення виробів наукоемного машинобудування з шаруватих металевих та металокерамічних матеріалів

Р.С. Борис, О.В. Холявік

Анотація: Виконано уточнене теоретичне і експериментальне обґрунтування процесу виготовлення біметалевих трубчастих елементів витягуванням з розділених заготовок. В результаті кінцево-елементного моделювання обґрунтовано сприятливий розподіл напружень та деформацій в осередку деформування при витягуванні з потоншенням для формування з'єднання при взаємодії шарів. Експериментально показано утворення з'єднання при взаємодії шарів. Отримані результати дають основу для вдосконалення процесу в подальших дослідженнях в цій галузі.

Ключові слова: напружено-деформований стан, компоненти напружень і швидкостей деформацій, різномірні метали, гранична поверхня, ступінь деформації, рельєф поверхні, витягування з потоншенням, двошарова заготовка, вихідні геометричні параметри заготовки.

References

1. Titov V.A. Extraction with thinning of bimetallic tubular elements from dissimilar metals and alloys [text]: monograph / V.A Titov, R.S Boris. - Kyiv: Center for Educational Literature, 2014. - 180 p.
2. Titov V.A. Directions of development of methods of manufacturing bimetallic tubular elements from dissimilar materials by drawing / V.A. Titov, R.S Boris, M.S. Trivailo // Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", series "Mechanical Engineering", Kyiv, 2009, №56. - P. 154-159.
3. Titov V.A. Substantiation and implementation of the experimental process of manufacturing bimetallic tubular elements. / Titov V.A, Boris R.S, Vishnevsky P.S, Lukyanenko O.O. // Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", series "Mechanical Engineering", Kyiv, 2010, №59. - P. 13-18.
4. Alekseev Yu.N. Questions of plastic flow of metals / Yu.N. Alekseev - Kharkiv, KSU Publishing House, 1958. - 188p.
5. Titov V.A. Calculation of the stress-strain state of drawing with thinning of ideal-plastic two-layer metal / Titov V.A, Boris R.S // Processing of materials by pressure. - 2012. - №1 (30). - P. 45-52
6. Boris R.S. Peculiarities of taking into account friction forces during drawing with thinning of two-layer blanks / Boris R.S, Titov V.A., Vishnevsky P.S // Material processing by pressure. - 2012. - № 2 (31). - P. 22-29
7. Limberg E.A. Determination of specific pressures of filling of radii of coupling in the tool for volume stamping / E.A. Limberg, G.D. Selivanov // Processing of metals by pressure in mechanical engineering, issue. 17, 1981 - P. 22-27.

УДК 621.73.016

С.П. Гожій, В.А. Мироненко, А.В. Кліско
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Універсальна дослідницька установка для прокатування

Анотація: В роботі описано універсальну дослідницьку установку, яка дозволяє виконувати виконувати більшість операцій прокатування, які виконуються при обертанні валків як в одну, так і в різні напрями. При зміні форми валків в установці є можливість отримувати заготовки х поперечним та подовжнім прокатуванням.

Ключові слова: прокатування, обтиск, валки, обертання.

Представлена універсальна дослідницька (лабораторна) установка, що дозволяє виконувати більшість операцій прокатування, які виконуються при обертанні валків як в одному, так і в різних напрямках: традиційне прокатування [1], вальцювання, клинове прокатування, в тому числі протягування (обтиск) тягнучим або проштовхуючим зусиллям трубчасті заготовки на оправці (загальний вигляд установки з валками відповідного профілю представлений на рис.1.). При зміні форми валків можливе отримання заготовок поперечного і подовжнього прокату.



Рис.1 - Загальний вигляд установки з валками характерної форми для прокатування (обтиску) трубчастої заготовки

Для роботи в режимі прокатування [2], коли заготовка обтискається за рахунок сил тертя між приводними валками, установка приводиться в дію за допомогою електродвигуна з торцевим кріпленням, який встановлюється в отвір плити, що показано на рис.2. Всі елементи установки закріплені між двох 12 мм пластин, які з'єднанні між собою чотирма дистанційних колонок. Валки мають консольне кріплення. Валки встановлені в установці мають можливість обертатись в різні боки. Така можливість досягається за рахунок верхньої шестерні рис.1, 2, яка з'єднує між собою дві шестерні які приводять в дію два вали. В цій конструкції можливе обертання валків в різні боки та в один бік, така функція досягається за рахунок центральної шестерні яку можна вилучити з конструкції і обертання валів не буде залежить один від одного.



Рис.2 - Загальний вигляд установки з отвором (а) у плиті для кріплення електродвигуна з торцевим кріпленням та приводною шестерню на валу

Відстань між валками можна регулювати спеціальним клиновим механізмом, один з клинів якого має можливість подовжнього пересування під дією поперечного переміщення іншого при загвинчуванні регулювального бічного гвинта. Цей гвинт переміщує один клинів з нахиленою поверхнею відносно іншого і тим самим змінює відстань між центрами обертання валків, що в свою чергу дозволяє збільшувати або зменшувати діаметр оброблюваної заготовки або ж регулювати зусилля дії на заготовку в залежності від обтиснення. Зовнішній діаметр валків до 145 мм, радіус робочої зони валка до 10 мм.



Рис.3 - Загальний вигляд установки з механізмом (а) регулювання відстані осей обертання валків

Також установка оснащена механізмом обертання валків при зміні відстані між їх осями при обертанні в одному напрямі. Для забезпечення в режимі обертання в різних напрямках механізм демонтується.

Висновки

Дослідницька установка має універсальні можливості з точки зору натурного моделювання широкого спектру процесів (в тому числі формозміни (пластичної течії матеріалів) при прокатуванні. Оснащення установки тензометричними датчиками та засобами цифрового обчислення енерго-силових параметрів значно розширить її дослідницькі можливості.

Универсальная исследовательская установка для прокатки

С.П. Гожий, В.А. Мироненко, А.В. Клиско

Аннотация: В работе описано универсальную исследовательскую установку, которая позволяет выполнять большинство операций прокатки, которые выполняются при вращении валков как в одну, так и в различные направления. При изменении формы валков в установке есть возможность получения заготовок x поперечным и продольным прокаткой.

Ключевые слова: прокатки, обжим, валки, вращения.

Universal research installation for rolling

S. Gozhiy, V. Myronenko, A. Klisko

Abstract: The paper describes a universal research installation that allows you to perform most of the rolling operations that are performed when rotating the rolls in one and in different directions. When changing the shape of the rolls in the installation, it is possible to obtain blanks x by transverse and longitudinal rolling.

Key words: rolling, crimping, rolls, rotation.

Список літератури

1. Смирнов В.С. Теория прокатки. (Учебник) / В.С. Смирнов; – М.: Металлургия, 1979. – 460 с.
2. Целиков А.И. Прокатные станы. (Монография) / А.И. Целиков; – М.: Металлургиздат, 1946.

УДК 621.7

С.П. Гожій, В.А. Мироненко, А.В. Кліско
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Альтернативні схеми обтиску стволів стрілецької зброї з полігональним внутрішнім профілем

***Анотація:** В роботі розглядається процес отримання стволів стрілецької зброї з полігональним внутрішнім профілем. Розглянуто методи отримання стволів та пропонується метод обтискування ствола рухомою матрицею методом штампування обкочування.*

***Ключові слова:** дорнування, обробка, схема.*

Переважаюча частина профільованого ствола має на своїй поверхні формоутворюючі елементи, що надають кулі обертовий рух у вигляді гвинтових нарізів або поверхонь (полігонів). З огляду на очевидні переваги стрілецької зброї (СЗ) з полігональним профілем конструктори провідних збройових фірм віддають перевагу саме такому типу поперечного перерізу (Heckler-und-Koch, Glock, Česká Zbrojovka, Ковровський механічний завод, Іжевський механічний завод та ін.).

Профільовання внутрішньої поверхні ствольних трубчастих заготовок з формоутворенням гвинтових елементів для забезпечення обертового руху кулі здійснюється методами, як правило, механічної обробки різанням або, в більш нерозповсюджених випадках, пластичним деформуванням. До традиційних методів належать виготовлення нарізів спеціальним інструментом - шпалерами і протяжками до більш сучасних - радіального кування і дорнування.

Виготовлення стволів методами, заснованими на різанні металообробними інструментами - вартісне та малоефективне.

Радіальне кування, зокрема, може проводитися на машинах типу SHK-17 австрійської фірми GFM, що є фактичним монополістом у виробництві цього виду обладнання [1]. До головних переваг радіального кування відносяться те, що даний спосіб відносно продуктивний (близько 3 хвилин на виготовлення одиниці виробу), що дозволяє отримувати стволи з внутрішньою геометрією (іноді разом з патронником), з внутрішньою поверхнею необхідної геометрії з достатньою для більшості завдань точністю. До недоліків можна віднести, в першу чергу, дороге спеціалізоване обладнання та складні умови праці.

Дорнування дозволяє отримувати стволи дуже високої якості. Недоліком методу можна назвати неминучу наявності внутрішніх напружень, складність підбору термічних режимів для дотримання розмірів, а також велику кількість «ручних» операцій. Метод застосовують багато фірм, з відомих: Лотар Вальтер, Шилен, Харт.

Низка країн мають власні розробки і виробляють сучасну високотехнологічну і високоефективну стрілецьку зброю.

Основною проблемою, яка не дозволяє Україні налагодити власне виробництво стрілецької СЗ є відсутність вітчизняних сучасних технологій виготовлення нарізних стволів. Враховуючи високу трудомісткість виробництва таких виробів, а також необхідність організації вітчизняного виробництва СЗ на новій технологічній базі в умовах обмежених матеріально-технічних ресурсів, розробка провідних технологій є важливим пріоритетним завданням.

Основними методами профілювання каналів стволів слід вважати. Традиційні методи. Механічна обробка: - шпалерування; - протягування. Обробка тиском: - радіальне кування; - дорнування. Електрохімічна нарізка каналів (електроерозійний спосіб). Перспективні методи: - протягування (обтиснення) через роликові волокни; - прошовування через валки; - редуціювання (обтиснення) обкочуванням.

Схеми виготовлення трубчастих виробів з профільованої порожниною методами ОМТ: - радіальне обтиснення заготовки на профільній оправці (радіальне кування) (див. рис.1); - пресування (гідропресування); волочіння (див. рис.2); - волочіння (обтиснення) роликовими волокнами (роликами) (див. рис.3); - продавлювання оправки (дорну) по каналу заготовки (дорнування) (див. рис.4). Спільна риса наведених видів обробки полягає в тому, що трубчаста заготовка обтискається по оправці, яка має полігональний профіль, і внутрішня поверхня є її відбитком. Оскільки шаг полігонів оправки постійний по довжині, але має змінний перетин перерізу, після технологічної операції оправка фактично вигинчується з заготовки ствола.



Рис.1 - Схема обтиску ствольної заготовки ротаційним куванням (1 – трубчаста заготовка; 2 – ролики; 3 – бійки)



Рис.2 - Схема обтиску ствольної заготовки при волочінні (1 – трубчаста заготовка; 2 – оправка)



а)

б)

Рис.3 - Схеми обтиску ствольної заготовки між 3-ма (а) та 4-ма (б) роликми (1 – трубчаста заготовка; 2 – ролик; 3 – оправка)



Рис.4 - Схема обтиску ствольної заготовки при дорнуванні (1 – трубчаста заготовка; 2 – оправка)

При промисловій реалізації кожної із зазначених схем виникають технологічні проблеми, які в певній мірі впливають на якість виробу та мають позитивні риси та недоліки. Розповсюдженим явищем є неповне заповнення перетину каналу ствола по оправці, тому деякі способи вимагають повторного проходу з додатковим обтиском. В той же час існує низка операцій штампування обкочуванням, ціла група яких призначена для ротаційного обтиску довгомірних циліндричних і трубчастих заготовок [2].

Сутність схеми полягає в тому, що матриця яка виконує обкочувальні рухи та має привод від спеціального механізму, взаємодіє в розташовану на оправці трубчастою заготовкою (див. рис.5). Відмінністю схеми і матриці є те, що обтискання проводиться одночасно по двом локалізованим осередкам. Спочатку трубчаста заготовка обтискається верхньою конусною частиною матриці з силою F_1 , а на наступному обороті нижньою конусною частиною матриці опозиційною силою F_2 . Утворення двох послідовних локальних осередків утворює в кожному схемі всебічного стискання та гарантований перехід металу в пластичний стан з усіма перевагами локальних видів обробки [2].

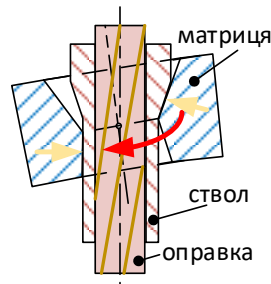


Рис.5 - Схема обтиску ствольної заготовки редуціованням з обкочуванням

Висновки

1. Розширено уявлення про технологічність трубчастих виробів полігонального профілю з внутрішніми гвинтовими доріжками на прикладі виготовлення стволів стрілецької зброї методами холодного об'ємного штампування, показана ефективність експлуатаційних характеристик виробів.
2. Запропоновано інноваційну схему технологічного процесу виготовлення ствола стрілецької зброї з полігональним профілем засновану на радіальному обтисненні на профільній оправці, що дозволяє забезпечити якість, знизити собівартість виробництва.
3. Впровадження розробленого процесу дозволить зменшити собівартість, збільшити продуктивність, знизити брак, збільшити коефіцієнт використання металу, зменшити енергоємність виробництва, забезпечити якість виготовлених виробів.

Альтернативные схемы обжима стволов стрелкового оружия с полигональным внутренним профилем

С.П. Гожий, В.А. Мироненко, А.В. Клинко

Аннотация: В работе рассматривается процесс получения стволов стрелкового оружия с полигональным внутренним профилем. Рассмотрены методы получения стволов и предлагается метод обжатия ствола подвижной матрицей методом штамповки обкочування.

Ключевые слова: дорнования, обработка, схема.

Alternative schemes for crimping small arms barrels with a polygonal internal profile

S. Gozhiy, V. Myronenko, A. Klisko

Abstract: The paper deals with the process of obtaining small arms barrels with a polygonal internal profile. Methods of obtaining barrels are considered and a method of compression of a barrel with a movable die by punching is proposed.

Key words: mandrel, processing, scheme.

Список літератури

1. Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems, Polyvoda, O., Rudakova, H., Kondratieva, I., Rozov, Y., Lebedenko, Y., Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, 1020, pp. 97-109.
2. Кривда Л.Т. Теорія і практика штампування обкочуванням: (Монографія) / Л.Т.Кривда. - Київ. 1998. - 179 с.

УДК 623.746

Аналітичний огляд взаємодії робочих поверхонь інструменту з заготовкою за наявністю твердого проміжного середовища

О.В. Герасимова¹, В.А. Тітов², Н.К. Злочевська²

1 – Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

2 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Анотація: Виконано аналіз взаємодії робочих поверхонь інструмента з заготовкою на прикладі штампів для розділових операцій листового штампування при наявності твердих проміжних покриттів. На основі основних джерел наукових публікацій дана оцінка стійкості штампового інструменту в залежності від методу нанесення покриття. Розглянуто вплив відносної ширини та відносної товщини покриття на величину відносних еквівалентних напружень, що діють на робочі поверхні матриці і пуансону для вирубних штампів. Надані загальні рекомендації по використанню твердих проміжних покриттів.

Ключові слова: вирубний пуансон, зміцнююче поверхнєве покриття, легування, вакуум-плазмовє покриття, поверхнєво-пластичне деформування, хімічні методи нанесення покриття, втомний знос пуансона, еквівалентні напруження, відносна ширина та товщина покриття, суцільні покриття, дискретні покриття, стійкість штампів.

Зношення штампів представляє, центральну проблему при операціях штампування в технологічному і організаційному відношенні [1]. Підвищення довговічності штампів диктується жорсткою конкуренцією на ринку цієї продукції. Основні тенденції зводяться до підвищення якості та терміну служби штампів [2]. Найбільш успішно ці тенденції реалізуються застосуванням зміцнюючих покриттів [3]. Оцінка розвитку ринку зміцнюючих покриттів, що наносяться вакуум-плазмовим методом (PVD), показала, що якщо в 1980 році частка ріжучих інструментів становила 95%, то в 2000 р - тільки 50%, а решта 50% припадали на зміцнення штампів і деталей вузлів тертя [4].

Зміцнюючі покриття багаторазово підвищують довговічність штампів. Низькотемпературна нітроцементация підвищує стійкість вирубних штампів в 1,4-1,5 рази [5]. Лазерне легування підвищує стійкість вирубних пуансонів в 2,5-5 разів [6-9]. Іонна нітроцементация підвищує довговічність вирубних штампів в 6 разів [10]. Значний ефект зміцнення забезпечує застосування тонких надтвердих плівок товщиною 2-10 мкм, нанесених методом PVD [11, 12]. Покриття TiN збільшує стійкість вирубних пуансонів в 3 рази, покриття TiCN - в 7 разів, покриття (TiAl) N - 17,5 разів і покриття (TiB) CN - в 87,5 разів [10]. Вважають [13], що найбільш перспективними є багатокомпонентні наноструктурні плівки складів TiBSiN і TiBCrN, що наносяться методами PVD.

В промисловій практиці для зміцнення вирубних штампів застосовують також технології електроіскрового легування і поверхнєво-пластичного деформування [3].

Успіхи в розвитку технології іонного азотування дозволяють перейти до реального серійного зміцнення штампів при забезпеченні надійності технологічного процесу і необхідних споживчих властивостей виробів, що зміцнюються, з багаторазовим підвищенням стійкості штампів [14, 15].

Необхідність поверхнєвого зміцнення штампів викликана також застосуванням більш дешевих конструкційних матеріалів, а також матеріалів, що легше обробляються; в тому числі застосуванням алюмінієвих сплавів для виготовлення штампів [16].

Найбільш навантаженим елементом є пуансон вирубного штампа. Характерним механізмом його зносу є викрипування ріжучої кромки пуансона. Малоциклове руйнування вирубного пуансону обумовлює досить низьку довговічність - 10^3 - 10^4 циклів навантаження при середній довговічності 10^5 - 10^6 циклів [16, 17]. Прискорений втомний знос пуансону викликається також за рахунок його високочастотної вібрації в напрямку осі руху пуансону,

що обумовлено ударним розвантаженням, накопиченої в пресі енергії деформування при утворенні сколу оброблюваного матеріалу [18].

Зміцнюючим покриттям притаманні такі недоліки, як розтріскування і відшарування при високих контактних навантаженнях в умовах експлуатації. Саме ці явища обмежують ресурс штампа з покриттям. Покриття TiC / TiN, нанесене хімічним методом (CVD), значно збільшує довговічність штамів. В тих само умовах експлуатації ці ж покриття, що нанесені методом PVD, не показали ніякого збільшення довговічності через низьку адгезійну міцність з'єднання з поверхнею деталей штамів [19]. Гальванічні Cr-покриття не завжди відповідають вимогам зносостійкості, а газотермічні покриття через недостатню міцність зчеплення вимагають додаткової обробки, що здорожує виготовлення штампа [20]. Відзначають швидкий знос CrN-покриття при підвищенні швидкості деформування та робочого тиску [21]. При карбонізуванні стійкість штамів при вирубці магнітопроводів з електротехнічної сталі товщиною 0,2 мм збільшується в 1,4-1,5 рази, а при вирубці листового матеріалу товщиною 1,0 мм та більше таке зміцнення не дає позитивних результатів, що пов'язано з викрешування кромки [22].

Тому, завдання підвищення несучої здатності зміцнюючих покриттів для штампового інструменту, що працює при високих контактних навантаженнях, залишається актуальною. Істотне підвищення навантажувальної спроможності покриттів реалізує принцип створення покриттів дискретної структури підвищеної термомеханічної стійкості [23]. Цей принцип дозволяє багаторазово підвищити граничний стан покриття: контактні навантаження - в кілька разів, критичні деформації основи - до 2 порядків, довговічність - в кілька разів у порівнянні з суцільним покриттям тієї ж товщини, складу і твердості. Знижуються багаторазово залишкові напруження, що дозволяє збільшувати товщину покриття.

Ефективність взаємодії інструменту з поверхнею деталі при наявності твердих проміжних шарів на прикладі вирубних штамів

Розглянемо роботу найбільш навантажених ріжучих кромки штамів при розрізанні заготовок.

В робочому циклі розділового штампу можна виділити два основних етапи деформування заготовки [24]:

- перший етап малих пружнопластичних деформацій заготовки;
- другий етап пластичного зрізу заготовки.

На першому етапі навантаження діє тільки на торцеві поверхні пуансону та матриці. Розподілене навантаження стиску діє в зоні, що примикає до ріжучих кромки на обмеженій ширині пуансону b_n та матриці b_m . Осьове навантаження створює за рахунок малих переміщень матеріалу заготовки дотичні напруження в поверхневих шарах пуансону τ_n та матриці τ_m .

На другому етапі матеріал поверхневого шару знаходиться в умовах нерівномірного всебічного стиску.

Виходячи з припущення про крихкість поверхневого шару та проміжного шару твердого покриття, зрозуміло, що наприкінці першого етапу поверхневий торцевий шар пуансону та матриці знаходиться в більш жорстких умовах, ніж на другому етапі. Тому в якості розрахункової обрана схема навантаження на першому етапі (рис 1).

Оцінку взаємодії інструмента з деталлю виконано для типових



Рис. 1. Схема навантаження, що діє на пуансон та матрицю на етапі малих пружнопластичних деформацій заготовки [24]

матеріалів розділового штамп. Матеріал пуансона та матриці сталь У10А, а в якості матеріалу проміжного твердого шару обраний твердий крихкий сплав ВК6. Властивості цих матеріалів зведені до табл.1.

Розрахунок напружено-деформованого стану виконано чисельним методом скінченних елементів MSC Visual Nastran for Windows [25].

Таблиця 1

Механічні властивості матеріалів інструменту та покриття

Матеріал	Модуль пружності, МПа	Коефіцієнт Пуассона, μ	Межа міцності при розтягуванні $[\sigma_+]$, МПа	Межа міцності при стиску $[\sigma_-]$, МПа
У10А	$2,1 \cdot 10^5$	0,26	1700	2700
ВК6	$7,2 \cdot 10^5$	0,26	350	2720

Результати розрахунку напруженого стану дозволили отримати еквівалентні напруження по критерію Г.С. Писаренко – А.А. Лебедева [27].

$$\sigma_{\text{екв}} = \chi \sigma_1 + (1 - \chi) \sigma_1 \quad (1)$$

$$\chi = \frac{[\sigma_+]}{[\sigma_-]} \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}, \quad (3)$$

де $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ – головні нормальні напруження;

$[\sigma_+]$ та $[\sigma_-]$ – границя міцності при розтягуванні та стиску відповідно.

Відносний рівень напружень розраховується за формулою:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{\text{екв}}}{[\sigma_+]} \quad (4)$$

В якості $\sigma_{\text{екв}}$ приймалось максимальне значення еквівалентного напруження в довільній зоні покриття.

Результати розрахунків рівня відносних напружень суцільних покриттях наведені на рис. 2 та рис. 3.

Аналіз результатів показує, що напруження в покритті швидко підвищуються зі збільшенням відносної ширини покриття L/b , де b - ширина контактного пояса. Найменше напруження в покритті досягається при його ширині, яка дорівнює ширині контактного пояса ($L/b = 1$).

При $L/b > 1$ (рис. 3, крива 2,3) спостерігається монотонне зменшення напружень з ростом товщини покриття. Для кривої 1 (рис.3) при $L/b = 1$ існує співвідношення лінійних параметрів покриття що відповідає мінімуму рівня напружень.



Рис. 2. Залежність відносних напружень в покритті ВК6 від ширини покриття:

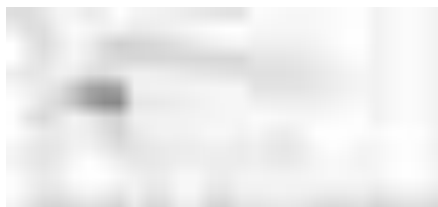


Рис. 3. Залежність відносних напружень в покритті ВК6 від товщини покриття:

1 - $h/b = 0,04$; 2 - $h/b = 0,08$; 3 - $h/b = 0,12$ 1 - $L/b = 1$; 2 - $L/b = 2$; 3 - $L/b = 3,8$

Суттєво знизити рівень напружень та за рахунок цього збільшити несучу здатність ріжучої кромки можливо при використанні принципово нової конструкції поверхневого шару покриття. Так на рис. 4 та на рис. 5 наведені результати розрахунків рівня напружень для покриттів дискретної структури.

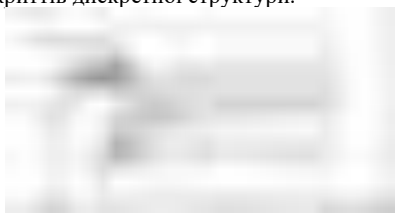


Рис. 4. Залежність відносних напружень в дискретних покриттях ВК6 від ширини покриття:

1 - $h_{\min}/h = 1$; 2 - $h_{\min}/h = 0,67$;
3 - $h_{\min}/h = 0,33$; 4 - $h_{\min}/h = 0$



Рис.5. Залежність відносних напружень в дискретних покриттях ВК6 від ступеня дискретності:

1 - $L/b = 1$; 2 - $L/b = 2$; 3 - $L/b = 3,8$

Як видно з рис. 4, збільшення ширини дискретного покриття L відносно ширини контактного пояса, так само як і для випадку із суцільним покриттям, викликає підвищення рівня напружень в нерозрізному поверхневому шарі: суцільному (крива 1) або змінної товщини (криві 2, 3). Мінімальний вплив ширини покриття досягається на дискретному шарі «розрізний» («островкової») конструкції, коли мінімальна товщина шару $h_{\min}$ дорівнює 0 та елементи («островки») покриття не пов'язані один з одним. Для такої конструкції напруження в покритті кілька зростають тільки до $L = 2b$ та далі не змінюються (крива 4). З малюнка 5 видно, що зі зменшенням мінімальної товщини дискретного покриття $h_{\min}$ особливо для випадків, коли ширина покриття перевищує ширину контактного пояса (криві 2, 3), рівень напружень в покритті суттєво зростає. Цей факт має просте пояснення, так як зменшується його згинальна жорсткість покриття (балки).

В точці $h_{\min} = 0$, тобто для розрізної конструкції незалежно від співвідношення ширини покриття і ширини контактного пояса, має місце стрибкоподібне зниження напружень (точки 1, 2, 3). В цьому випадку кожен з коротких ділянок покриття працює як окремий елемент зі значною жорсткістю. Слід зазначити, що для випадку, коли ширина контактного пояса дорівнює ширині покриття в діапазоні $h_{\min}/h \leq 0,5$, найкращою конструкцією покриття є «островкова». А в діапазоні $h_{\min}/h \geq 0,5$ такого ж низького рівня напружень можна досягти при «нерозрізній» конструкції, тобто зі збільшенням жорсткості (криві 1, 2 на рис. 4; крива 1 на рис. 5). Цей результат особливо важливий для ситуації, коли до покриттів пред'являються вимоги суцільності, наприклад, для захисту від корозії.

Слід зазначити, що всі розрахунки для покриттів дискретної структури проводилися для дискретного шару суцільністю $\psi = 70\%$. При цьому під суцільністю розуміємо відношення площі ділянок товщиною h до загальної площі покриття. Разом з тим, в умовах зношування створення достатніх міждискретних проміжків («карманів»), є сприятливим явищем, так як, затримуючи продукти зносу і мастила, покращує умови фрикційного контакту [28].

Висновок

Отримані результати розрахунків дозволяють зробити ряд рекомендацій щодо конфігурації поверхневого шару розділових штампів.

Аналитический обзор взаимодействия рабочих поверхностей инструмента с заготовкой при наличии твердого промежуточной среды

О.В. Герасимова, В.А. Титов, Н.К. Злочевская

Аннотация: Выполнен анализ взаимодействия рабочих поверхностей инструмента с заготовкой на примере штампов для разделительных операций листовой штамповки при наличии твердых промежуточных покрытий. На основе основных источников научных публикаций дана оценка устойчивости штампового инструмента в зависимости от метода нанесения покрытия. Рассмотрено влияние относительной ширины и относительной толщины покрытия на величину относительных эквивалентных напряжений, действующих на рабочие поверхности матрицы и пуансона для вырубных штампов. Предоставлены общие рекомендации по использованию твердых промежуточных покрытий.

Ключевые слова: вырубной пуансон, укрепляющее поверхностное покрытие, легирования, вакуум-плазменное покрытие, поверхностно-пластическое деформирование, химические методы нанесения покрытия, усталостный износ пуансона, эквивалентные напряжения, относительная ширина и толщина покрытия, сплошные покрытия, дискретные покрытия, устойчивость штампов.

Analytical review of the interaction of the working surfaces of the tool with the workpiece in the presence of a solid intermediate medium

O.V. Gerasimova, V.A. Titov, N.K. Zlochevska

Abstract: The analysis of the interaction of the working surfaces of the tool with the workpiece on the example of dies for separating operations of sheet metal stamping in the presence of solid intermediate coatings. Based on the main sources of scientific publications, an assessment of the stability of the stamping tool depending on the method of coating. The influence of the relative width and relative thickness of the coating on the value of the relative equivalent stresses acting on the working surfaces of the die and the punch for die dies is considered. General recommendations for the use of hard intermediate coatings are given.

Keywords: punch, reinforcing surface coating, alloying, vacuum-plasma coating, surface-plastic deformation, chemical coating methods, fatigue punch wear, equivalent stresses, relative width and thickness of coating, solid coatings, discrete coatings, resistance.

Список літератури

1. Doege E., Schliephake U., Nagele H. Ausfallprognose an Gesenkschmiedewerkzeugen // Umformtechnik - 1993 - 27, № 1. - S.58-63.
2. Schuh G., Weber P., Zohm F. Was macht Werkzeugbauer erfolgreich // Technica (Suisse), 2003 - 52, №7. -S. 12-14, 16.
3. Долматов А.И., Богуслаев А.В. Повышение жизненного цикла оснастки на основе защитных технологий. - Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2000 - 296 с.
4. Teeter F.J. Improved P/M tooling performance through the use of PVD thin film wear resistant coatings // Compact, Sinter, and Second. Oper.: Proc. 1994 Int. Conf. and Exhib. PM and Part. Mater., Toronto, May 8-11, 1994 - Princetone (N.J.), 1994 - P 1-9.
5. Салманов Н.С. Упрочнение режущих деталей вырубных штампов из полутеплостойких сталей // МнТОМ - 1997 - № 12.-С.27-28.
6. Прохорова А.И., Белова С.А., Зуев В.М. Лазерное упрочнение штампового инструмента // Автомоб. пром-сть- 1999 - № 10.-С.23-24.
7. Баженова Л.В., Каюнов С.В., Якушкин Г.И. и др. Термообработка вырубных штампов импульсным лазерным излучением // Технол. и орг. пр-ва (Киев) - 1987 - № 2.-С.45-47.

8. Томсинский В.С., Гаврилов В.В., Калашникова М.С. и др. Лазерное легирование и упрочнение поверхности штамповых сталей // *Вопр. металловед, и терм. обр. мет. и сплавов. Челяб. гос. техн. ин-т - Челябинск* - 1993.-С.66-71.
9. Митин В.Я., Тескер Е.И., Бондаренко Ю.В. и др. Повышение стойкости вырубного инструмента излучением лазера // *Металловед, и прочн. матер. Волгогр. политехи, ин-т - Волгоград*, 1988.-С.33-37.
10. Schulz H., Dubenkropp G., Vogel J. Einsatz von Hartstoffschichten bei der Blechumformung // *Blech - Rohre - Profile* - 1992-39, № 12.-S.1039-1041.
11. Mutte F. Fester JEindruck // *Maschinenmarkt* - 2006 -№ 12. -S.36-37.
12. Dunne Schichten haben es in sich // *ZulieferMarkt Konstr. und techn. Einkauf-* 2002 - № 5 -S.58.
13. Панфилов Ю.В., Гладышев И.В., Левашов Е.А. и др. Многокомпонентные наноструктурные тонкопленочные покрытия для упрочнения инструмента // *Матер. 10 междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышл. России» и 14 Междунар. симп. «Тонкие пленки в электронике»*, Москва, 9-11 сент. 2004. М.: Изд-во ЦНИТИ «Технологии», 2004. -С.322-334.
14. Фукс-Рабинович Г.С. Комплексная технология упрочнения вырубных штампов // *Кузн.-штамп, пр-во* - 1993 - № 1.-С. 17-19.
15. Plasma - Wärmebehandlung plus Hartstoffbeschichtung für bessere Umformtechnik // *Galvanotechnik* - 2004 - 95, № 4 - S.956.
16. Георгиев М.Н., Фукс-Рабинович Г.С. Роль трещиностойкости в изнашивании гетерофазных штамповых сталей при вырубке // *Физ.-хим. мех. матер.* - 1987 - 23, № 3.-С.63-66.
17. Георгиев М.Н., Фукс-Рабинович Г.С. Влияние трещиностойкости инструментальных сталей на долговечность вырубных штампов // *Физ.-хим. мех. матер.* - 1986 - № 4.-С.89-92.
18. Scheitz M. Schritt für Schritt: Einflüsse auf die Werkzeugstandzeit bei Umformen mit einer Differenzdruckpresse // *Maschinenmarkt* - 1992 - 98, № 21.-S.22-24, 26.
19. Franklin S.E. The wear behaviour and practical performance of coated tools for metal stamping // *EUROTRIB 89: Proc. 5th Int. Congr. Tribol., Espoo, June 12, 1989, Vol. 1 - Espoo* - 1989.-P.234-239.
20. Trojahn W. Möglichkeiten zum Beschichten von Massivumformwerkzeugen // *Drahtwelt* - 1986 - 72, № 3.-S.76-79.
21. Bemacchi E., Ferrero A., Gariboldi E. et al. PVD coatings in aluminium die casting dies and steel forming tools // *Metal. Sci. and Technol.* - 1996 - 14, № 1.-P.3-11.
22. Салманов Н.С. Упрочнение режущих деталей вырубных штампов методом низкотемпературного карбонитрирования // *Изв. вузов. Черн. металлургия* - 1997 - № 6. -С.39-40.
23. Ляшенко Б.А., Мовшович А.Я., Долматов А.И. Упрочняющие покрытия дискретной структуры // *Технологические системы* - 2001 - № 4 (10) -С. 17-25.
24. Михайленко Ф.П. Стойкость разделительных штампов - М.: Машиностроение, 1976. - 207 с.
25. Конечно-элементный комплекс MSC VisualNastran for Windows 2003 S№ 141087607592353bb492cfce94a.
26. Rich T.P., Orbison Y.G. Analysis of two metal-forming die failures // "Case Hist. Invol. Fatigue and Fract. Mech. Symp., Charleston, 21-22 March, 1985". Philadelphia, 1986 -P.311-335.
27. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирующие и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. - Киев: Наукова думка, 1976 -/515 а
28. Антонок В.С., Сорока О.Б., Ляшенко Б.А., Рутабский А.В. Дискретш покриття на р1зальному шструмент1 // *Пробл. прочности.* - 2007. - №1. - С. 138-143

УДК 621.762

Вплив мікроструктури на граничну пластичність композиційних та поруватих матеріалів

М.Б. Штерн^{1,2}, А.В. Кузьмов^{1,2}, П. Є. Коробко²

1-КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна; 2- Інститут проблем матеріалознавства НАНУ

Анотація: Базуючись на енергетичній концепції граничного напруженого стану була сформульована трипараметрична модель пластичності типу Cam-Clay. Методом мікрOMEХАНІЧНОГО осереднення на представницькому осередку шляхом моделювання методом скінчених елементів для пористого пошкодженого матеріалу порошкового походження були знайдені залежності визначальних параметрів моделі від пористості та пошкоженості.

Ключові слова: теорія пластичності, порошкові матеріали, мікрOMEХАНІКА, напружено-деформований стан.

Для практики обробки тиском порошкових і композиційних матеріалів важливо оцінити зміну структури матеріалу з метою прогнозування руйнування або погіршення властивостей в ході технологічного процесу. Складність цієї задачі полягає, зокрема, в необхідності враховувати фізико-механічні процеси, що відбуваються на різних масштабних рівнях. Як неоднорідність напружено-деформованого стану в різних точках заготовки що деформується, так і процеси на рівні структури гетерогенного матеріалу. В своїх попередніх роботах автори торкалися цієї проблеми на мезоструктурному рівні шляхом моделювання на представницькому осередку виникнення локалізації пластичної деформації внаслідок початково неоднорідного розподілу поля густини [1]. Але з іншого боку для знаходження напружено-деформованого стану в оброблюємії тиском заготовці необхідно знати, хоча б на якісному рівні, залежність механічних властивостей (тобто закону пластичної течії) від структури матеріалу, або, в спрощеній постановці хоча б від деяких найважливіших параметрів, що описують цю структуру. **Метою** даної роботи і є одна з задач такого типу. В ній для представницького осередку, що зображений на рис.1. і відображає пошкоджений матеріал порошкового походження, знаходиться залежність границі текучості не тільки від густини, але і від ступеня пошкоженості матеріалу k . Параметр $0 < k < 1$ являє собою (рис.1.) відношення довжини відшарованої частини контакту до повної довжини міжчастинного контакту $k = \frac{L}{2l}$.

Досить простий і в той же час фізично обґрунтований шлях отримання виразу, що описує границю текучості, заснований на енергетичній концепції граничного стану. У випадку пружного тіла, описуваного в рамках узагальненого закону Гука, зазначений шлях приводить до границі текучості Мізеса для пластично нестисливих матеріалів. У тому випадку якщо матеріал допускає пластичну стисливість, подібний шлях приводить до граничного умови, якій в просторі головних напружень відповідає еліпсоїд обертання щодо гідростатичної осі, симетричний щодо початку координат [2]. В даній роботі була використана модель пружності різноопірного матеріалу раніше розвинена одним з авторів [3], яка описується питомою пружною енергією як функцією інваріантів (ε, γ) - об'ємного розширення та інтенсивності зсувних деформацій відповідно

$$W = \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{K\varepsilon^2 + 2G\gamma^2} - \sqrt{Km\varepsilon}}{1+m} \right)^2, \quad (1)$$

Параметр $0 < m < 1$ є мірою різноспірності матеріалу. При $m=0$ різноспірність відсутня і матеріал стає звичайним пружним матеріалом з об'ємним та зсувними модулями K і G відповідно, а при $m=1$ матеріал перестає опиратись всебічному розтягу. На основі визначальних співвідношень було знайдено додаткову роботу пружного деформування U що відповідає (1) як функцію інваріантів (p, τ) - тиску та октаедричних напружень відповідно.

$$U = \frac{1}{2(1-m)^2} \left(\sqrt{\frac{p^2}{K} + (1-m^2) \frac{\tau^2}{2G}} + \frac{mp}{\sqrt{K}} \right)^2, \quad (2)$$

Енергетична концепція граничного стану для пористого тіла за умови що пластична течія матеріалу каркасу описується умовою текучості Мізеса (з границею текучості τ_0^2) полягає в тому, що прирівнюється додаткова енергія пружного деформування U до величини $\frac{\tau_0^2}{4G_0} \rho$. де ρ – відносна густина, G_0 модуль зсуву матеріалу каркасу. Отримане рівняння і буде шуканою умовою пластичності для пористого матеріалу. В нашому випадку отримаємо умову пластичності в просторі головних напружень у вигляді еліпсоїда обертання щодо гідростатичної осі, зміщеного відносно початку координат на величину, пропорційну параметру m .

$$\frac{(p - m\sigma\sqrt{\psi})^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\phi} = \sigma^2; \quad \psi = \frac{K}{2G_0}; \quad \phi = \frac{G}{G_0}; \quad \sigma = \frac{\tau_0\sqrt{\rho}}{1+m}, \quad (3)$$

У літературі рівняння (3) відомо як модифікована умова досягнення граничного стану Cam-Clay. Вона широко використовується в теорії пластичності незворотно стисливих матеріалів, зокрема, пористих тіл. Слід поверхонь, описуваних умовою (3) в (p, τ) площині при різних m наведено на рис. 2.. Поряд з геомеханікою, механікою ґрунтів і гірських порід умова (3) активно застосовується при моделюванні процесів компактування порошків і обробки тиском пористих матеріалів. Дана умова досить добре узгоджується з експериментальними даними [2, 4-8] по визначенню поверхні навантаження в теоріях пластичності стисливих матеріалів та інших численних дослідженнях. Поряд з цим умова (3) може розглядатися як граничне і по відношенню до крихкого руйнування. Зокрема, на основі експериментів по руйнуванню графіту в ході одновісного навантаження, поєднаного з крученням і зсувом, в роботі [7] встановлено, що контур руйнування має вигляд, представлений на рис. 3

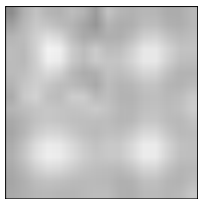


Рис. 1. Представницький осередок



Рис. 2. Криві граничного стану для різних m



Рис. 3. Контур руйнування графіту при одновісному навантаженні, поєднаному з крученням і зсувом

Як зазначалось вище енергетична концепція напруженого стану для ізотропного матеріалу приводить до трипараметричної поверхні текучості типу Cam-Clay. Для знаходження цих параметрів було проведено мікромеханічне усереднення методом скінчених елементів для низки представницьких осередків рис. 1. , що відповідають різним значенням пористості та пошкодженості, так, щоб охопити з певним невеликим кроком всі їх допустимі значення. Нижче на наведені графіки залежностей границі текучості при одновісному розтягу та стиску від пошкодженості k для різних значень пористості рис.4.а). та рис.5.а)., а також залежності від пористості при різних k рис.4.б) рис.5.б).

а)

б)

Рис. 4. Залежності границі текучості на одновісний розтяг від пошкодженості а) та пористості б)

а)

б)

Рис. 5. Залежності границі текучості на одновісний стиск від пошкодженості а) та пористості б)

З них видно що границі текучості на розтяг та стиск відрізняються тим більше чим більш пошкодженим є матеріал, тобти чим більше відшарованими є міжчастинні контакти. Також видно, що якщо залежність границь текучості від пористості близька до лінійної, то від дефектності k вони залежать нелінійно та більш суттєво спадають при великих k .

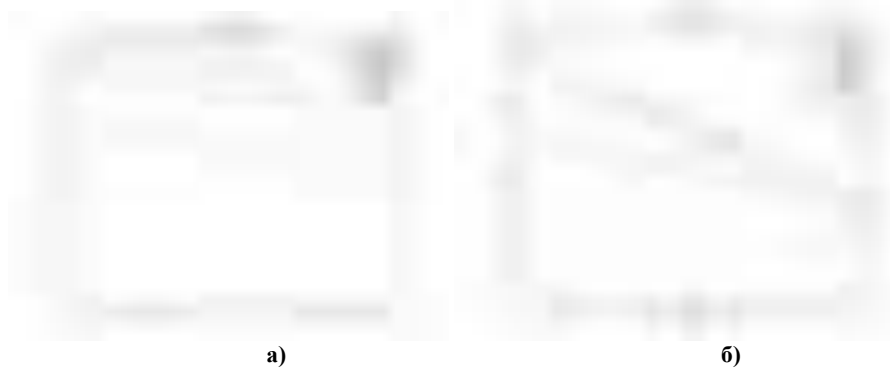


Рис. 6. Залежності границі текучості на зсув від пошкодженості а) та пористості б)

На наступному рис.6 наведені графіки залежностей границі текучості при чистому зсуві від пошкодженості k та пористості. Також зауважимо, що при всебічному стиску відшаровані контакти перестають знімцнювати матеріал і відповідно границя текучості в цьому випадку не залежить від k , а тільки від пористості.

Висновки

На базі запропонованої раніше авторами моделі пружності різноопірних матеріалів була побудована феноменологічна модель пластичності стисливих матеріалів з розподіленими мікрodefekтами. Також на базі обчислювального моделювання на представницькому осередку, що відображає структуру пошкодженого матеріалу порошкового походження були знайдені залежності модулів феноменологічної моделі пластичності від ступеня відшарованості міжчастинних контактів та пористості. Зокрема виявилось, що границя текучості на зсув суттєво (на 30 %) менш чутлива до пошкодженості ніж границя текучості на одновісний розтяг.

Influence of microstructure on plasticity of composite and porous materials

M. Shtern, A. Kuzmov, P. Korobko

Abstract: Based on the energy concept of the critic stress state, a three-parameter model of plasticity of the Cam-Clay type was formulated. The dependences of the determining parameters of the model on porosity and damage were found by the method of micromechanical averaging on a unit cell by modeling by the finite element method for porous damaged material of powder origin.

Keywords: theory of plasticity, powder materials, micromechanics, stress-strain state.

Влияние микроструктуры на предельную пластичность композиционных и пористых материалов

М.Б. Штерн, А.В. Кузьмов, П. Е. Коробко

Аннотация: В работе рассмотрена задача по определению прогиба и напряжений трехслойной панели с сотовым наполнителем и углепластиковой обшивкой, состоящий из монослоев со схемой армирования $[0^\circ / 90^\circ / 45^\circ / -45^\circ]$. Было выполнено переход от многослойной конструкции к трехслойной благодаря определению эффективных упругих характеристик обшивки и с использованием таблиц Гладкова получили напряжение и максимальный прогиб свободно опертой панели под действием собственного веса.

Ключевые слова: теория пластичности, порошковые материалы, микромеханика, напряженно-деформированное состояние

Список літератури

1. Штерн М.Б., Кузьмов А.В. Прогнозирование эволюции дефектов и вязкого разрушения в деформационных технологиях современного материаловедения // В сборнике «Физико-технические проблемы современного материаловедения» в 2-х т. / Ред. кол.: И.К. Походня и др.; НАН Украины – К.: Академперіодика, 2013. Том 2, с. 545-566
2. Скороход В. В., Тучинский Л. И. Условие пластичности пористых тел // Порошковая металлургия. – 1978. – № 11. – С. 83–88.
3. М.Б. Штерн, Модель упругого деформирования изотропных порошковых материалов, характеризующихся различными свойствами при растяжении и сжатии // Порошковая металлургия. – 2009. – № 5–6. С. 14–29 .
4. Мидуков В. З., Рудь В. Д. Экспериментальная проверка основных гипотез теории пластичности пористых тел // Порошковая металлургия. – 1982. – № 1. – С. 6–17
5. Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Эфрос Б. М. Физическая механика гидростатической обработки материалов. – Донецк: Изд-во Донецк. физ.-техн. ин-та НАН Украины, 2000. – 192 с.
6. Pavier E., Doremus P. Mechanical behaviour of a lubricated iron powder // PM'96. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials. – 1996. – Vol. 2, part 6. – P. 27–40.
7. Ивашков И. А. Деформирование и разрушение графита при циклическом кручении // Прочность машин и аппаратов при переменном нагружении. – Челябин. гос.техн. ун-т, 1995. – С. 15–23
8. Dick D. S. Critical state powder flow // Powder Metal. – 2005. – 48, No. 1. – P. 209–211.

Численное исследование течения потока в межлопаточном канале соплового аппарата с поворотной диафрагмой

А. Г. Жирков¹, А. П. Усатый², Е.П. Авдеева², Ю. И. Торба¹

¹ ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

² Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

Введение

В процессе разработки метода численного исследования плоского обтекания сопловой решетки с поворотной диафрагмой были выполнены расчеты при различных степенях открытия поворотной диафрагмы δ и перепадах давлений π на решетке. В результате расчетов, для малых степеней открытия поворотной диафрагмы, были получены сложные картины течения, в межлопаточном канале соплового аппарата, с делением ядра потока на сверхзвуковые области, представленные на рис. 1. Для более детального исследования этих явлений проведено дополнительное численное исследование. В работе приведены некоторые результаты численного исследования сверхзвукового течения в канале соплового аппарата при степени открытия поворотной диафрагмы $\delta = (0,15 \div 0,3)$.

Численные исследования проводились с использованием программного комплекса Fluent.



Рис. 1. – Течение в расчетной области. Изолинии чисел Маха при $\pi = 0,3$ $\delta = 0,3$

Рис. 1. – Течение в расчетной области. Изолинии чисел Маха при $\pi = 0,3$ $\delta = 0,3$

1. Численное исследование

После получения расчетом картины течения, представленной на рис. 1, были выполнены проверки результатов расчета:

Проведено численное исследование течения в межлопаточном канале решетки профилей С-9013Р при $\pi = 0,3$ $\delta = 0,3$ с использованием модели турбулентности Reynolds Stress. Модель применяется для моделирования турбулентности и позволяет получать хорошее совпадение результатов расчета сверхзвуковых струйных течений с результатами эксперимента. Так как в модели используются пристеночные функции, для разрешения явлений в пограничном слое, была построена отдельная расчетная область с сеткой удовлетворяющей условию $y^+ \leq 30$ с количеством элементов ≈ 63000 шт. Характер течения, в межлопаточном канале, полученный расчетом с использованием модели турбулентности Reynolds Stress схож с ранее полученной картиной течения, рассчитанной с использованием модели турбулентности $k-\omega$ SST.

Произведено численное исследование пространственного течения в межлопаточном канале. Для чего выполнено моделирование межлопаточного канала соплового аппарата со степенью открытия диафрагмы $\delta = 0,3$ для расчета пространственного течения. Высота канала составила 80 мм. В расчетной области построена сетка из Poly-Hexcore элементов (технология Mosaic™, которая позволяет строить сетку, состоящую из гексагональных призм в пристеночной области и осуществлять прямой переход от полиэдрической сетки к гексаэдрической минуя тетра-ячейки).

Во всех случаях проверочного расчета была получена картина течения в межлопаточном канале с делением ядра потока на сверхзвуковые области. На основе этого был сделан вывод о возможном присутствии подобных явлений в реальном сопловом аппарате и принято решение о проведении дополнительного исследования течения в межлопаточном канале соплового аппарата с поворотной диафрагмой при малых степенях открытия.

Для численного исследования плоского течения использовалась модель двумерного течения вязкого газа CFD-решателя Fluent с использованием разностного метода второго порядка.

Рабочее тело – вязкий сжимаемый газ – воздух. Для расчета явлений турбулентности использовалась модель турбулентности $k-\omega$ SST (модель Ментера) [1]. В качестве граничных условий на входе в расчетную область использовались:

- давление и температура воздуха, для некоторой части расчетов расход и температура воздуха;
- направление потока воздуха;
- интенсивность турбулентности;
- гидравлический диаметр.

Граничным условием на выходе из расчетной области задавалось давление воздуха.

2. Результаты расчетов

Для применения одной из теорий, описывающих явления при сверхзвуковом течении, необходимо решить вопрос о типе течения в межлопаточном канале. С одной стороны, несомненно, это сверхзвуковое течение в поворачивающем канале, с другой, из-за внезапного расширения после поворотной диафрагмы, часть течения можно рассматривать как истечение сверхзвуковой струи в полость с давлением практически равным давлению в струе.

Так как должно соблюдаться условие равенства расходов на входе и выходе из решетки, то при диффузорном течении, в канале происходит местное увеличение скорости в ядре потока для компенсации уменьшения площади проходного сечения из-за перекрытия поворотной диафрагмы. Статическое давление на выходе из канала имеет большую величину, чем на входе в канал.

То есть движение потока происходит против положительного градиента давления. При этом межлопаточный канал разделен на две области: у корытца лопатки область сверхзвукового течения, у спинки область вихревого, дозвукового течения.

После прохождения потоком поворотной диафрагмы течение происходит подобно течению в косом срезе соплового аппарата. Так как давление перед поворотной диафрагмой больше, чем за ней, то расширение газа происходит в косом срезе, который играет, таким образом, роль расширяющейся части сопла.

Далее, так как движение потока происходит против положительного градиента давлений, то есть величина давления в потоке должна постепенно стать равной величине давления за сопловым аппаратом, возникает ударный фронт, представляющий собой волну сжатия, давление и плотность газа в ней увеличиваются. Ударный фронт начинается на стенке, наклонно к ней, и сопровождается отрывом струи от корытца лопатки. Дойдя до границы струи ударный фронт отражается от неё и возникает отраженный фронт. При этом отраженный ударный фронт является волной разряжения, и граница струи снова расходится. Затем весь процесс повторяется. Действием вязкости на границе струи эта периодическая картина, в конце концов, стирается [2].

Заключение

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- дросселирование потока, проходящего через поворотную диафрагму соплового аппарата, начинается происходить при значениях отношений ширины канала на входе к горлу решетки больше единицы;
- структура потока в межлопаточном канале, соплового аппарата при малых степенях открытия, разделена на две части: сверхзвуковое ядро у корытца лопатки и дозвуковую, вихревую зону у спинки лопатки;
- сверхзвуковое ядро потока при определенных значениях относительного перепада давлений на решетке (или величины расхода воздуха через решетку) разделяется ударными фронтами на несколько областей;
- коэффициенты потерь энергии, для малых степеней открытия, уменьшаются при уменьшении относительных перепадов давления (при увеличении скорости истечения потока из сопловой решетки);
- наибольший вклад в величину потерь кинетической энергии вносит вихревая зона в межлопаточном канале, а не волновые явления в ядре потока.
- оптимизацию проточной части соплового аппарата необходимо проводить с целью уменьшения областей с вихревым течением.

Результаты, полученные в данной работе, будут использованы для разработки метода многопараметрической оптимизации теплофикационных паровых турбин с регулируемым отбором пара.

Список литературы

1. F.R. Menter. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. AIAA. – 1993. -93-2906. – P. 1-21.
2. Р. Курант, К. Фридрихс. Сверхзвуковое течение и ударные волны. М.: Издательство иностранной литературы, 1950. – 427 с.